

PACS numbers: 62.20.Qp, 68.35.Ct, 68.35.Gy, 68.55.J-, 68.55.Ln, 81.15.Rs, 81.40.Pq

Поверхневі властивості високоміцних чавунних деталей зі зносостійкими композитними покриттями, синтезованими методом електроіскрового легування. Ч. 2. Дослідження структури та мікротвердості оброблених поверхонь чавунів

В. Б. Тарельник*, О. П. Гапонова**,***, Н. В. Тарельник*,
М. Ю. Думанчук*, М. М. Майфат*, М. О. Мікуліна*, В. М. Козін*

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

**Сумський державний університет,
вул. Харківська, 116,
40007 Суми, Україна

***Інститут фундаментальних технологічних досліджень
Польської академії наук,
5B Pawińskiego,
02-016 Варшава, Польща

В статті описано методику та представлено результати металографічних досліджень і визначення розподілу елементів покриття по глибині шару

Corresponding author: Viacheslav Borysovykh Tarelnyk
E-mail: tarelnik@i.ua

*Sumy National Agrarian University,
160 Herasyma Kondratieva Str., UA-40021 Sumy, Ukraine

**Sumy State University,
116 Kharkivska Str., UA-40007 Sumy, Ukraine

***Institute of Fundamental Technological Research, Polish Academy of Sciences,
5B Pawińskiego, 02-016 Warsaw, Poland

Citation: V. B. Tarelnyk, O. P. Haponova, N. V. Tarelnyk, M. Yu. Dumanchuk, M. M. Maifat, M. A. Mikulina, and V. M. Kozin, Surface Properties of High-Strength Cast Iron Parts with Wear-Resistant Composite Coatings Synthesized by Electrospark Alloying Method. Pt. 2. Investigation of the Structure and Microhardness of the Treated Cast-Iron Surfaces, *Metallofiz. Novitni Tekhnol.*, **47**, No. 7: 717–736 (2025). DOI: [10.15407/mfint.47.07.0717](https://doi.org/10.15407/mfint.47.07.0717)

© Publisher PH “Akademperiodyka” of the NAS of Ukraine, 2025. This is an open access article under the CC BY-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0>)

зразків з високоміцного чавуну марки ВЧ50, на які методом електроіскрового легування (ЕІЛ) наносили покриття компактними електродами-інструментами (ЕІ) складів (90%ВК6+10%1М) і 1М, виготовленими шляхом спікання методом порошкової металургії (ПМ), а також з використанням спеціальних технологічних насичуючих середовищ (СТНС). В результаті металографічних досліджень встановлено, що структура поверхневого шару складається з трьох ділянок: «білого» та перехідного шарів товщиною у 15–75 і 10–20 мкм відповідно й основного металу. ДюрOMETричними дослідженнями встановлено, що мікротвердість «білого» шару і перехідної зони знаходяться в межах 6200–13360 і 4290–4900 МПа відповідно. Мікротвердість від максимальної на поверхні покриття поступово зменшується у міру поглиблення. Найбільшу мікротвердість, відповідно, 13260 і 12800 МПа, одержано з використанням компактних електрод-інструментів з твердого стопу ВК6 і ніхромового дроту Х20Н80 та з використанням СТНС 0,5% Si+0,5% B+2% Cr+7% Ni+90% вазелін і 5% Si+5% B+90% вазелін відповідно. Водночас товщина їхнього шару підвищеної твердості сягає 50 і 90 мкм відповідно. Дослідження топографії поверхні показали, що поверхневий шар всіх зразків складається з трьох характерних ділянок: гладкої поверхні, шерсткої поверхні, пори. На зразку після ЕІЛ електродами, виготовленими методом ПМ з матеріалу 90%ВК6+10%1М, іноді проглядаються мікротріщини та пори розмірами до 1 мкм і 1–3 мкм відповідно. Спектральна аналіза показала, що поверхневий шар усіх зразків у всіх характерних точках складається з елементів основи та легувального матеріалу.

Ключові слова: електроіскрове легування, електрода-інструмент, металографічна аналіза, рентгеноспектральна аналіза, поверхневий шар, покриття, структура, мікротвердість, тріщини, пори, суцільність.

The article discloses the method and the results of the metallographic studies and investigation of distribution of the coating elements along the depth of the layers of the high-strength ВЧ50 (VCh50) cast-iron samples, which have been coated by the electrospark alloying (ESA) method with the use of the compact electrode-tools (ETs) having a composition of (90% ВК6 (VK6)+10% 1М) and 1М, while the ETs having been manufactured by powder metallurgy (PM) sintering method, as well as applying special technological saturating media (STSM). The metallographic studies have established that the structure of the surface layer consists of three areas, namely, the 'white' and transition layers having the thicknesses of 15–75 and 10–20 microns, respectively, and the base metal. The durometric studies have established that the microhardnesses of the 'white' layer and the transition zone are within the ranges 6200–13360 and 4290–4900 MPa, respectively. While deepening, the microhardness value is gradually decreasing from the maximum one on the surface of the coating. The highest microhardness values of 13260 and 12800 MPa were obtained, when using the compact electrode-tools made of hard alloy ВК6 (VK6) and the nichrome wire of Х20Н80 (Kh20N80), respectively, and applying the STNS of 0.5% Si+0.5% B+2% Cr+7% Ni+90% petroleum jelly and 5% Si+5% B+90% petroleum jelly, respectively. At the same time, the thickness values of their layers of increased hardness achieve 50 and 90 microns, respectively. The studies of the surface topography have

shown that the surface layers of all the samples consist of three characteristic areas, namely, a smooth surface, a rough surface, and a pore. The micro-cracks and pores having sizes up to $1\text{ }\mu\text{m}$ and $1\text{--}3\text{ }\mu\text{m}$, respectively, may sometimes be seen on the sample after the ESA process with the use of the electrodes made of the material of 90%BK6 (VK6)+10%1M by the PM method. The x-ray spectral analysis has shown that the surface layers of all the samples consist of the base elements and alloying material at all the characteristic points.

Key words: electrospark alloying, electrode-tool, metallographic analysis, x-ray spectral analysis, surface layer, coating, structure, microhardness, cracks, pores, continuity.

(Отримано 25 січня 2024 р.; остаточн. варіант — 27 червня 2024 р.)

1. ВСТУП

В статті [1] було описано результати досліджень особливостей масоперенесення за електроіскрового легування (ЕІЛ) зразків з високоміцного чавуну марки ВЧ50. ЕІЛ здійснювалося компактними електродами-інструментами (ЕІ), виготовленими методом порошкової металургії, складу (90%BK6 + 10%1M) і 1M, де 1M — 70%Ni, 20%Cr, 5%Si, 5%B, а також ЕІ з твердого стопу BK6 і ніхромового дроту марки Х20Н80, за використання яких на зразки попередньо наносили спеціальні технологічні насичуючі середовища (СТНС) складів 0,5%Si+0,5%B+2%Cr+7%Ni+90% вазелін і 5%Si+5%B+90% вазелін відповідно. ЕІЛ зразків проводили циклічним легуванням (1 цикл = 0,5 хв.) на установці мод. «Елітрон-52А» впродовж до 2,5 хв. Зразки і ЕІ зважували до ЕІЛ і потім через кожні 0,5 хв. на аналітичних вагах марки «ВЛА-200» з точністю до 10^{-4} знаку. ЕІЛ проводили за енергій розряду у 0,55, 1,3, 2,6 і 3,4 Дж.

В результаті дослідження масоперенесення зі збільшенням часу ЕІЛ збільшується кількість перенесеного матеріалу з аноди (Δm_a) на катоду (Δm_k), а шерсткість і суцільність покриття практично не змінюється. Найбільша кількість матеріалу переноситься з початку процесу ЕІЛ; потім процес масоперенесення поступово гальмується, зовсім припиняється та може змінитися руйнуванням нанесеного шару, тобто Δm_k стає від'ємним. Зі збільшенням енергії розряду W_p процес масоперенесення збільшується, але процес руйнування нанесеного шару покриття розпочинається раніше; водночас збільшується шерсткість покриття та зменшується його суцільність.

ЕІЛ ЕІ, виготовленими методом ПМ складів (90%BK6+10%1M) і 1M (з 70%Ni, 20%Cr, 5%Si, 5%B, та ЕІ з твердого стопу BK6 і ніхромового дроту марки Х20Н80 з використанням СТНС складів 0,5%Si+0,5%B+2%Cr+7%Ni+90% вазелін і 5%Si+5%B+90% вазелін

відповідно зразків з ВЧ50 із $W_p = 0,55$ Дж і продуктивністю $Q = 0,67$ см²/хв. супроводжується пониженням межі плинності (σ_t) і межі міцності (σ_b), а відносне подовження (δ) зростає. Шерсткість поверхневого шару збільшується, а суцільність покриття (S) зменшується. Після безабразивного ультразвукового оброблення (БУФО) σ_t і σ_b збільшуються, а δ зменшується. Шерсткість поверхні зменшується, а S збільшується.

По мірі зростання W_p від 0,55 до 1,3 і 3,4 Дж та Q від 0,67 до 1,0 і 2,0 см²/хв. із використанням тих самих ЕІ σ_t і σ_b зменшуються, а δ збільшується, шерсткість покриття збільшується, а суцільність зменшується. Після наступного БУФО σ_t і σ_b збільшуються, а δ зменшується. Шерсткість поверхні зменшується, а суцільність збільшується.

2. АНАЛІЗА ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

В статті [1] було проведено аналізу літературних джерел, що стосуються зміцнення матеріалів висококонцентрованими джерелами нагріву (ВКДН), які використовуються щодо деталей з високоміцного чавуну під час плазмового модифікування без отоплення поверхні [2], модифікування шлікерним способом, шляхом нанесення суміші у вигляді стружки білого чавуну [3], фрикційним обробленням [4], введенням у структуру домішок-модифікаторів [5, 6], шляхом регулювання умов кристалізації виробів [7–9], попереднім підігріванням форми у газовій печі [10] до необхідних температур. Також досліджували літературні та патентні джерела, в яких представлено прогресивні технології зміцнення поверхневих шарів металевих поверхонь за рахунок нанесення міцних і зносостійких покриттів [11–13], натоплення [14, 15], армування карбідом Вольфраму [16], нанесення покриттів з оксиду Алюмінію [17–19], хромування [20] електролітичним методом [21, 22] тощо. Запропоновано й методи дослідження [23].

Багато уваги було приділено технологіям, яких сформовано на основі методу електроіскрового легування (ЕІЛ), застосування яких уможлиблює в широких межах управляти параметрами якості поверхонь деталей на нанорівні [24, 25].

Слід відмітити, що технологіями ЕІЛ можливо формувати покриття на любых струмопровідних металах, використовуючи в якості електроди-інструменту чисті метали [26–28], криці різного ступеня легування [29, 30], стопи [31], графіт [32] тощо. Також було відмічено, що потенційно можуть бути корисними багат шарові покриття [33, 34] або ті, які складаються з твердих зносостійких і м'яких антифрикційних металів [35–37], а також покриття, сформовані комбінацією декількох технологій: ЕІЛ + поверхнева пластична деформація (ППД) [38], ЕІЛ + лазерне оброблення (ЛО) + на-

несення металополімерних матеріалів (МПМ) [39], ЕІЛ + конденса- ване йонне бомбардування (метод КІБ) [40], ЕІЛ + йонне азотування (ІА) [41], ЕІЛ+МПМ+ППД (обкаткою кулькою) [42]. Деякі техноло- гії ЕІЛ є альтернативними щодо технологій ХТО: цементації [43], нітроцементації [44, 45], азотування [46] тощо.

З метою вибору кращих технологій для ремонту чавунних дета- лів сільськогосподарської техніки автори [47] аналізували методи газотермічного напорошення [48,49], ЛО [50–53] й ЕІЛ. Перевагу було віддано методу ЕІЛ, який переважає більшість традиційних методів, а серед матеріалів електрод-інструментів було запропоно- вано прутки з ніхрому Х20Н80 [47].

В попередніх дослідженнях для оброблення деталей із криці нами використовувалися компактні ЕІ, виготовлені методом порошкової металургії, які складаються з тонкодисперсної суміші 1М і твердос- топної суміші ВК6. Серед цих досліджених матеріалів у різних співвідношеннях найбільшого використання отримали матеріали: 90%ВК6+10%1М, де 1М має в своєму складі 70%Ni, 20%Cr, 5%Si, 5%B. Вони дають змогу формувати поверхневі шари на крицевих поверхнях з мікротвердістю до 14200 МПа, а складу 1М — 11500 МПа [54]. В роботах [55, 56] покриття вищезначеного складу (90%ВК6+10%1М) наносили компактними електродами з ніхромов- ого дроту Х20Н80 і твердого стопу ВК6 з використанням спеціаль- них технологічних насичуючих середовищ (СТНС), у склад яких входять відсутні легувальні елементи.

Метою даної роботи є удосконалення технології захисту деталей з високоміцного чавуну від зношування шляхом дослідження масо- перенесення, топографії, структури, елементного складу та механі- чних властивостей комбінованих покриттів (90%ВК6+10%1М) та 1М, сформованих на їхніх поверхнях методом ЕІЛ як компактними ЕІ, виготовленими методом порошкової металургії (ПМ), так і з ви- користанням СТНС.

3. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

В роботі для проведення досліджень виготовляли зразки з високо- міцного чавуну марки ВЧ50 (ГОСТ 7293-85) розміром 10×10×8 мм, на які методом ЕІЛ наносили покриття компактними ЕІ складу (90%ВК6+10%1М) та 1М, сформовані на їхніх поверхнях як компа- ктними ЕІ, виготовленими спіканням методом ПМ, так і з викорис- танням СТНС.

Після оброблення вимірювалася шерсткість поверхні на приладі профілограф-профілометр мод. 201 заводу «Калібр». Результати фіксували за допомогою спеціальної приставки. Топографію повер- хні після оброблення вивчали за допомогою растрового електронно- го мікроскопа РЕМ-106 І.

Металографічну аналізу зразків проводили за стандартною методикою на оптичному мікроскопі «Неофот-2» та растровому електронному мікроскопі «РЕММА-102» виробництва ВАТ «SELMІ», за допомогою якого проводилася оцінка якості шару, його суцільності, товщини та будови зон підшару — дифузійної зони. Також за допомогою електронного мікроскопа проводилася якісна та кількісна спектральна аналіза щодо визначення хемічного складу покриттів. Мікрофотографії ділянок поверхні зразків одержано в режимі формування зображення струмом вторинних електронів за пришвидшувальної напруги на електронній гарматі мікроскопа у 20 кВ і струму зонду (пучка) у 200 пА. Водночас на поверхні покриття вибирали 3 зони (гладку поверхню, шерстку поверхню й пору) та в кожній точці з них визначався елементний склад нанесеного покриття.

Також проводилася дюрOMETрична аналіза на розподіл мікротвердості у поверхневому шарі й по глибині шліфа від поверхні. Мірювання мікротвердості проводили на мікротвердомірі ПМТ-3 вдавлюванням діамантової піраміди під навантаженням у 0,05 Н, згідно з ГОСТ 9450-76.

4. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

На рисунках 1–4 показано структуру (а) та розподіл мікротвердості по глибині шару (б) за ЕІЛ чавуну марки ВЧ50 компактними ЕІ складів (90%ВК6+10%1М) й 1М, виготовленими методом ПМ, (рис.

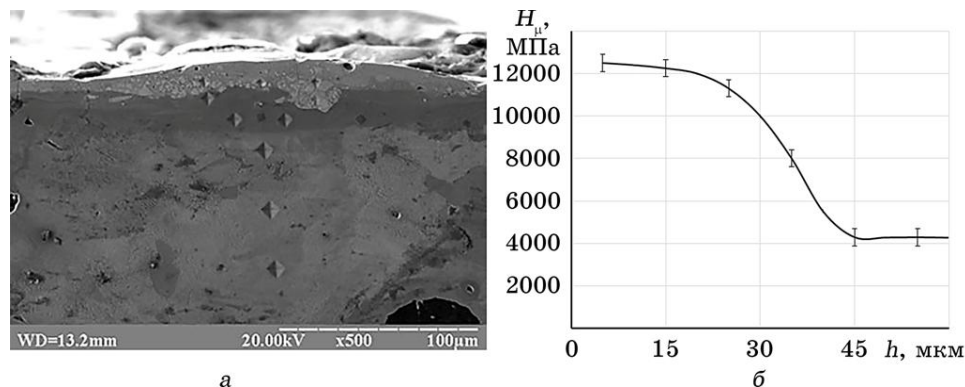


Рис. 1. Мікроструктура (а) та розподіл мікротвердості по глибині шару (б) за ЕІЛ ВЧ50 компактною електродою-інструментом 90%ВК6+10%1М.

Fig. 1. Microstructure (а) and microhardness distribution along the depth of the layer (b) in the course of ESA processing high-strength ВЧ50 (VCh50) cast iron by the compact electrode-tool of 90%ВК6 (VK6)+10%1M composition.

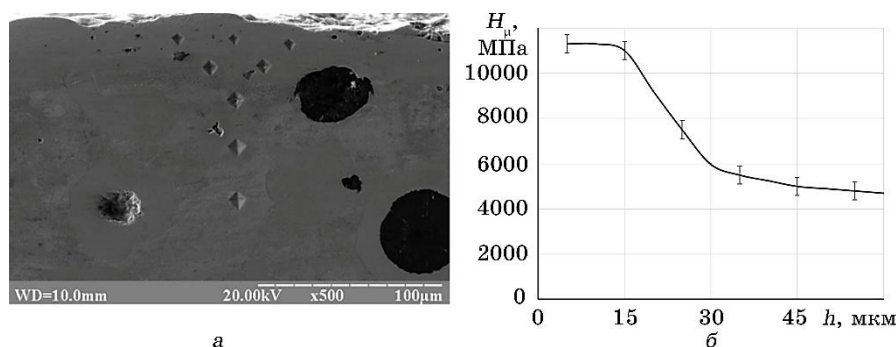


Рис. 2. Мікроструктура (а) та розподіл мікротвердості по глибині шару (б) за ЕІЛ ВЧ50 компактною електродою-інструментом 1М.

Fig. 2. Microstructure (a) and microhardness distribution along the depth of the layer (b) in the course of ESA processing high-strength BCh50 (VCh50) cast iron by the compact electrode-tool of 1M composition.

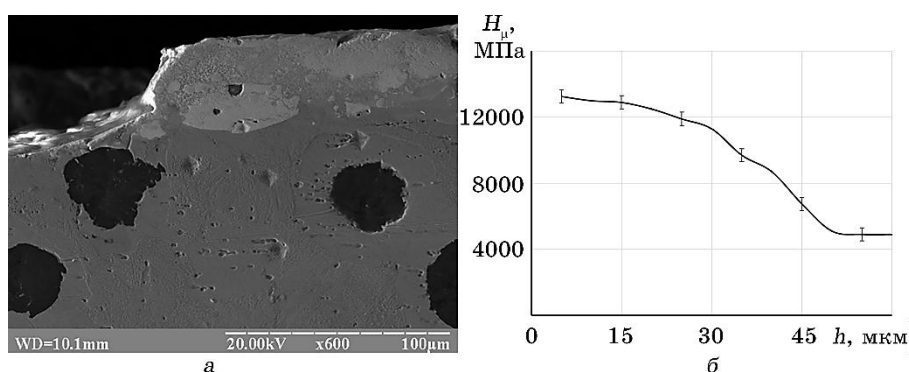


Рис. 3. Мікроструктура (а) та розподіл мікротвердості по глибині шару (б) за ЕІЛ ВЧ50 електродою-інструментом з твердого стопу ВК6 з використанням СТНС складу 0,5%Si+0,5%B+2%Cr+7%Ni+90% вазелін.

Fig. 3. Microstructure (a) and microhardness distribution along the depth of the layer (b) in the course of ESA processing high-strength BCh50 (VCh50) cast iron by the compact electrode-tool made of BK6 (VK6) hard alloy with the use of the STSM having the composition of 0.5%Si+0.5%B+2%Cr+7%Ni+90% petroleum jelly.

1 і 2 відповідно) та компактними ЕІ з твердого стопу ВК6 (рис. 3) і ніхромового дроту марки Х20Н80 (рис. 4) з використанням СТНС складів 0,5%Si+0,5%B+2%Cr+7%Ni+90 вазелін і 5%Si+5%B+90% вазелін відповідно.

Параметри якості поверхневих шарів покриттів, сформованих на зразках з високоміцного чавуну ВЧ50, наведено в табл. 1.

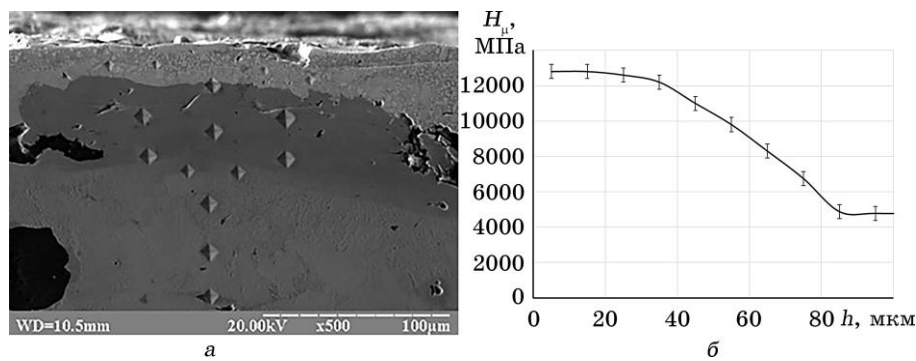


Рис. 4. Мікроструктура (а) та розподіл мікротвердості по глибині шару (б) за ЕІЛ ВЧ50 ЕІ з ніхромового дроту Х20Н80 та використання СТНС складу 5%Si+5%B+90% вазелін.

Fig. 4. Microstructure (a) and microhardness distribution along the depth of the layer (b) in the course of ESA processing high-strength ВЧ50 (VCh50) cast iron by the compact electrode-tool made of nichrome wire of Х20Н80 (Kh20N80) grade with the use of the STSM having the composition of 5%Si+5%B+90% petroleum jelly.

ТАБЛИЦЯ 1. Результати металографічних досліджень зразків ВЧ50 після ЕІЛ компактними ЕІ складу (90%ВК6+10%1М) й 1М та ЕІ з твердого стопу ВК6 і ніхромового дроту марки Х20Н80 за використання СТНС.

TABLE 1. The results of metallographic studies of the high-strength ВЧ50 (VCh50) cast iron samples after ESA processing by the compact electrode-tools of the compositions of 90%ВК6 (VK6)+10%1M and of 1M, and by the electrode-tools made of ВК6 (VK6) hard alloy and of nichrome wire of Х20Н80 (Kh20N80) grade with the use of the STSM.

Матеріал електроди	Склад СТНС, %	Товщина, мкм		Мікротвердість, МПа	
		Білого шару	Перехідної зони	Білого шару	Перехідної зони
90%ВК6+10%1М	—	25–30	15	6200–12500	4290
1М	—	25–30	15	5970–11300	4800
ВК6	0,5Si+0,5B+2Cr+7Ni+90 вазелін	15–40	10	9540–13260	4900
Ніхром Х20Н80	5%Si+5%B+90% вазелін	45–75	20	8200–12800	4780

В результаті аналізу рис. 1–4 та табл. 1 встановлено, що за нане-

сення методом ЕІЛ покриттів на чавун марки ВЧ50 структура поверхневого шару складається з трьох ділянок: «білого» та перехідного шарів товщиною у 15–75 і 10–20 мкм відповідно й основного металу.

Мікротвердості «білого» шару й перехідної зони знаходяться в межах 6200–13260 і 4290–4900 МПа відповідно. Вони від максимальних значень на поверхні поступово зменшуються вглиб підкладинки.

Найбільші мікротвердості у 13260 і 12800 МПа відповідно одержано з використанням компактних ЕІ з твердого стопу ВК6 і ніхромового дроту Х20Н80 та СТНС 0,5%Si+0,5%B+2%Cr+7%Ni+90% вазелін і 5%Si+5%B+90% вазелін відповідно. Водночас товщини їхніх шарів підвищеної твердості сягають 50 і 90 мкм (рис. 3 й 4) відповідно.

4.1. Дослідження на растровому електронному мікроскопі «РЕМ-106 І»

На рисунку 5, *а* і *б* представлено топографію поверхні зразків за ЕІЛ чавуну марки ВЧ50 компактними ЕІ 90%ВК6+10%1М і 1М відповідно.

Для одержання результатів щодо наявності та кількості хемічних елементів на поверхні покриття обирали три характерні зони: 1 — шерстку поверхню, 2 — пору, 3 — гладку поверхню. З кожної ділянки в точці фіксували спектер, що характеризує наявність хемічних елементів, а також знімали загальний спектер з усієї ділянки поверхні (Σ).

Кількісний склад хемічних елементів, як в характерних точках покриттів, нанесених методом ЕІЛ компактними ЕІ складів 90%ВК6+10%1М і 1М на чавуні марки ВЧ50, так і з усієї досліджуваної поверхні, представлено в табл. 2.

Аналіза рис. 5 і табл. 2 показала, що на поверхні сформованих покриттів, коли в якості ЕІ використовували компактні електроди 90%ВК6+10%1М і 1М, присутні хемічні елементи, що входять до їхнього складу, і незначна кількість Феруму, що входить до складу основи зразків. Водночас найбільша кількість Феруму знаходиться в порах — 8,09 і 3,98% та покриттях складів 90%ВК6+10%1М і 1М відповідно.

На рисунку 6 представлено результати електронно-мікроскопічних досліджень топографії поверхні зразків після ЕІЛ чавуну марки ВЧ50 компактними ЕІ з твердого стопу ВК6 (рис. 6, *а*) і ніхромового дроту марки Х20Н80 (рис. 6, *б*) за використанням СТНС складів 0,5%Si+0,5%B+2%Cr+7%Ni+90% вазелін і 5%Si+5%B+90% вазелін відповідно.

Кількісний склад хемічних елементів, як у характерних точках покриттів, нанесених методом ЕІЛ компактними ЕІ з твердого стопу ВК6 (*а*) і ніхромового дроту марки Х20Н80 (*б*) з використанням СТНС 0,5%Si+0,5%B+2%Cr+7%Ni+90% вазелін і 5%Si+5%B+90% вазелін відповідно на чавуні марки ВЧ50, так і з усієї досліджуваної поверхні, представлено в табл. 3.

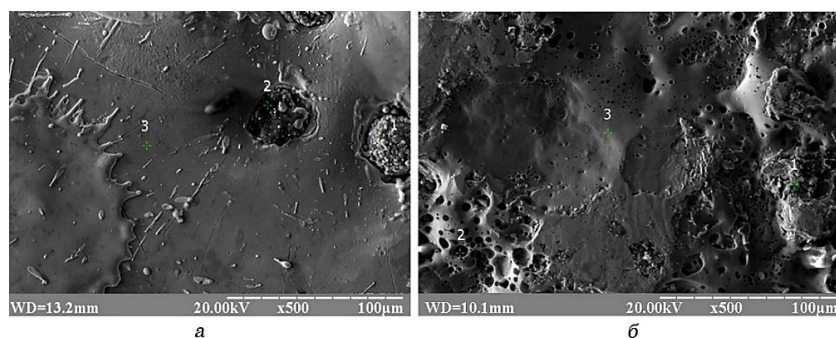


Рис. 5. Топографія ділянки поверхні зразків за ЕІЛ чавуну марки ВЧ50 компактними ЕІ (а) 90%ВК6+10%1М і (б) 1М (1 — шерстка поверхня, 2 — пора, 3 — гладка поверхня).

Fig. 5. Topography of the surface area of the high-strength BCh50 (VCh50) cast iron samples in the course of ESA processing by the compact electrode-tools of the compositions (a) 90%VK6 (VK6)+10%1M and (b) 1M (1—rough surface, 2—pore, 3—smooth surface).

ТАБЛИЦЯ 2. Елементний склад покриттів у характерних точках і зі всієї досліджуваної поверхні*.

TABLE 2. The elemental compositions of the coatings at the characteristic points and over the entire surface* being investigated.

Досліджувана точка й ділянка (Σ) поверхні	Елементи, %							
	C	W	Co	B	Si	Cr	Ni	Fe
90%ВК6+10%1М								
1	2,48	87,15	3,81	—	1,50	0,20	0,70	4,16
2	2,97	83,12	3,14	—	1,70	0,17	0,81	8,09
3	2,54	86,42	3,57	—	1,10	0,19	0,69	5,49
Σ	2,61	85,91	3,12	—	0,89	0,19	0,68	6,60
1М: 70%Ni, 20%Cr, 5%Si, 5%B								
1	3,16	—	—	4,17	4,71	17,41	69,23	1,32
2	3,27	—	—	4,01	4,53	16,29	67,92	3,98
3	3,41	—	—	4,20	4,71	16,97	68,20	2,51
Σ	3,31	—	—	4,28	4,32	17,07	69,05	1,97

*1 — шерстка поверхня, 2 — пора, 3 — гладка поверхня.

Аналіза рисунку 6 і табл. 3 показала, що на поверхні сформованих покриттів, коли використовували компактні ЕІ з твердого ступу ВК6 і ніхромового дроту марки Х20Н80 з використанням СТНС 0,5%Si+0,5%B+2%Cr+7%Ni+90% вазелін і 5%Si+5%B+90% вазелін відповідно присутні хемічні елементи, що входять до їхнього скла-

ду, і незначна кількість Феруму, що входить до складу зразків.

Водночас найбільша кількість Феруму знаходиться у порах —

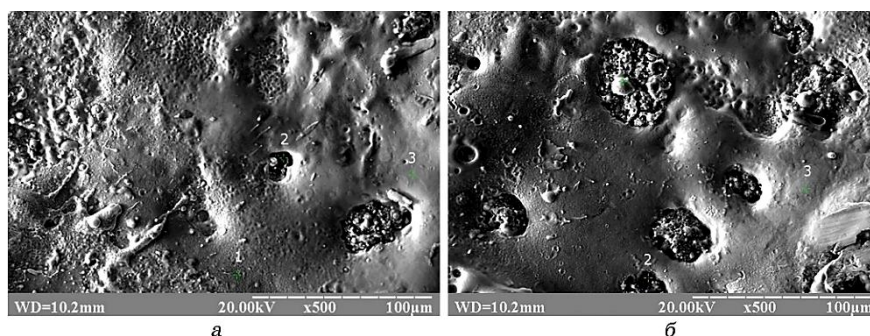


Рис. 6. Топографія ділянки поверхні зразків за ЕІЛ чавуну марки ВЧ50 ЕІ з твердого стопу ВК6 (а) і ніхромового дроту марки Х20Н80 (б) з використанням СТНС 0,5%Si+0,5%B+2%Cr+7%Ni+90 вазелін і 5%Si+5%B+90% вазелін відповідно (1 — шерстка поверхня, 2 — пора, 3 — гладка поверхня).

Fig. 6. Topography of the surface areas of the high-strength ВЧ50 (VCh50) cast iron samples in the course of ESA processing by the electrode-tools made of ВК6 (VK6) hard alloy (a) and of nichrome wire of Х20Н80 (Kh20N80) grade (b) with the use of the STSM 0.5%Si+0.5%B+2%Cr+7%Ni+90 petroleum jelly and 5%Si+5%B+90% petroleum jelly, respectively (1—rough surface, 2—pore, 3—smooth surface).

ТАБЛИЦЯ 3. Елементний склад покриттів у характерних точках і зі всієї досліджуваної поверхні*.

TABLE 3. The elemental compositions of the coatings at the characteristic points and over the entire surface* being investigated.

Досліджувана точка й ділянка (Σ) поверхні	Елементи, %							
	C	W	Co	B	Si	Cr	Ni	Fe
Компактний ЕІ ВК6								
і СТНС складу 0,5%Si+0,5%B+2%Cr+7%Ni+90% вазелін								
1	2,51	84,16	3,91	0,39	0,41	1,59	6,27	0,76
2	2,85	82,23	3,74	0,27	1,20	1,61	5,93	2,17
3	2,59	83,91	3,63	0,28	0,41	1,84	6,42	0,92
Σ	2,71	83,71	3,71	0,49	0,49	1,86	6,79	0,73
Компактний ЕІ марки Х20Н80 і СТНС складу 5%Si+5%B+90% вазелін								
1	3,24	—	—	4,17	4,71	17,13	68,31	2,44
2	3,85	—	—	4,01	4,53	16,21	63,79	7,61
3	3,43	—	—	4,20	4,71	17,82	66,41	3,43
Σ	3,37	—	—	4,28	4,32	17,98	66,89	3,16

*1 — шерстка поверхня, 2 — пора, 3 — гладка поверхня.

7,61 і 2,17% та покриттях, сформованих компактними ЕІ з ніхромового дроту марки Х20Н80 і твердого стопу ВК6 відповідно.

Найбільша кількість хемічних елементів у покриттях відповідає хемічним елементам, що входять до складу компактних електрод. Це — Вольфрам і Кобальт, що входять до складу твердого стопу ВК6, та Нікель і Хром, з яких складаються ЕІ з ніхромового дроту

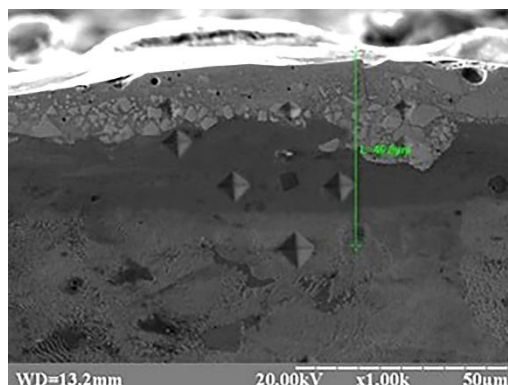


Рис. 7. Лінія сканування та розподіл мікротвердості по глибині шару за ЕІЛ ВЧ50 компактним ЕІ складу 90%ВК6+10%1М.

Fig. 7. The scanning line and the microhardness distribution along the depth of the layer in the course of ESA processing the high-strength ВЧ50 (VCh50) cast iron samples by the compact electrode-tool of the composition of 90%ВК6 (VK6)+10%1М.

ТАБЛИЦЯ 4. Результати локальної енергодисперсійної аналізи покриття, сформованого на зразку з чавуну марки ВЧ50 після ЕІЛ компактним ЕІ складу 90%ВК6+10%1М.

TABLE 4. The results of local energy dispersive analysis of the coating formed on the high-strength ВЧ50 (VCh50) cast iron sample due to ESA processing by the compact electrode-tool of the composition of 90%ВК6 (VK6)+10%1М.

Покриття: 90%ВК6+10%1М; крок сканування — 10 мкм									
С	W	Co	B	Si	Cr	Ni	Mn	Fe	Σ, %
2,37	85,23	3,76	—	1,48	0,21	0,67	—	6,28	100
2,57	84,16	3,72	—	1,32	0,18	0,61	—	7,44	100
2,62	76,17	3,12	—	1,38	0,14	0,43	0,11	16,03	100
2,91	41,14	1,91	—	1,46	0,16	0,21	0,24	51,97	100
3,51	17,21	0,73	—	1,39	0,13	0,08	0,41	76,54	100
3,63	0,78	0,13	—	1,58	0,12	0,02	0,49	93,25	100
3,58	—	—	—	1,92	0,15	—	0,53	93,82	100
3,43	—	—	—	1,32	0,14	—	0,46	94,65	100

марки Х20Н80.

На рисунку 7 показано лінію сканування хемічних елементів по глибині поверхневого шару зразка з чавуну марки ВЧ50 після легування компактным ЕІ 90%ВК6+10%1М, а в табл. 4 наведено результати локальної енергодисперсійної аналізи сформованого покриття.

Аналіза табл. 4 показує, що Вольфрам і Кобальт, максимальна кількість яких на поверхні складає 85,23 і 3,76% відповідно, а також Нікель (0,67%) у міру віддалення від поверхні поступово зникають і на віддалі у ≈ 50 мкм не виявляються. Кількість Феруму, що є основним елементом чавуну, від мінімальної кількості на поверхні у 6,28%, навпаки, поступово збільшується і на віддалі у ≈ 50 мкм від поверхні відповідає кількості, що знаходиться у чавуні марки ВЧ50. На глибині у ≈ 20 мкм з'являється Манган (0,11%), який у міру віддалення від поверхні поступово збільшується до кількості, що є у чавуні марки ВЧ50, — $\approx 0,3-0,7\%$. Силіцій і Хром входять до складу чавуну ВЧ50 і тому також виявляються аналізою у кількості, що відповідає марочному складу основи.

Аналіза таблиці 5 показує, що Нікель і Хром, максимальна кількість яких на поверхні складає 68,03 і 17,67% відповідно, а також Силіцій (4,55%) і Бор (4,11%) у міру віддалення від обробленої поверхні вглиб підкладинки поступово зникають і на глибині у ≈ 60 мкм зовсім зникають, крім Силіцію, який входить до складу ВЧ50. Ферум, що є основним елементом чавуну, від мінімальної кількості на поверхні у 2,28%, навпаки, поступово збільшується і на глибині у ≈ 60 мкм відповідає марочному вмісту ВЧ50. На глибині у ≈ 20 мкм з'являється Манган (0,17%), який у міру заглиблення пос-

ТАБЛИЦЯ 5. Результати локальної енергодисперсійної аналізи покриття, сформованого на зразку з чавуну марки ВЧ50 після ЕІЛІ компактным ЕІ складу 1М: 70%Ni, 20%Cr, 5%Si, 5%B.

TABLE 5. The results of local energy dispersive analysis of the coating formed on the high-strength ВЧ50 (VCh50) cast iron sample due to ESA processing by the compact electrode-tool of the composition of 1M: 70%Ni, 20%Cr, 5%Si, 5%B.

Покриття 1М: 70% Ni, 20% Cr, 5% Si, 5% B; крок сканування — 10 мкм							
С	В	Si	Cr	Ni	Mn	Fe	$\Sigma, \%$
3,36	4,11	4,55	17,67	68,03	—	2,28	100
3,21	4,01	4,07	14,31	61,15	—	13,25	100
3,51	3,34	3,58	10,28	43,14	0,17	35,98	100
3,64	2,23	2,14	4,72	23,54	0,23	63,50	100
3,52	0,72	1,89	1,12	8,95	0,31	83,49	100
3,67	0,01	1,61	0,43	0,73	0,38	93,17	100
3,70	—	1,91	0,13	—	0,52	93,73	100
2,93	—	1,33	0,12	—	0,47	95,14	100

тупово збільшується до марочного вмісту чавуну $\cong 0,3-0,7\%$.

На рисунках 8 і 9 показано лінії сканування хемічних елементів по глибині поверхневого шару зразка з чавуну ВЧ50 за легування компактим ЕІ ВК6 і СТНС складу $0,5\%\text{Si}+0,5\%\text{B}+2\%\text{Cr}+7\%\text{Ni}+90\%$ вазелін, а в табл. 6 наведено результати локальної енергодисперсійної аналізи сформованого покриття.

Аналіза таблиці 6 показує, що Вольфрам і Кобальт, максимальна

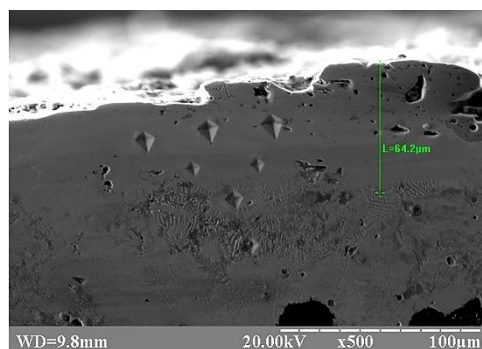


Рис. 8. Лінія сканування та розподіл мікротвердості по глибині шару за ЕІЛ ВЧ50 компактим ЕІ складу 1М.

Fig. 8. The scanning line and the microhardness distribution along the depth of the layer in the course of ESA processing the high-strength ВЧ50 (VCh50) cast iron samples by the compact electrode-tool of the composition of 1М.

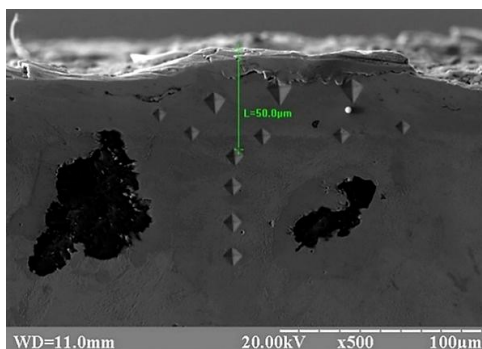


Рис. 9. Лінія сканування та розподіл мікротвердості по глибині шару за ЕІЛ зразків з чавуну марки ВЧ50 ЕІ з твердого стопу ВК6 з використанням СТНС.

Fig. 9. The scanning line and the microhardness distribution along the depth of the layer in the course of ESA processing the high-strength ВЧ50 (VCh50) cast iron samples by the electrode-tool of the ВК6 (VK6) hard alloy and with the use of the STSM.

ТАБЛИЦЯ 6. Дані локальної енергодисперсійної аналізи покриття, сформованого на зразку з чавуну марки ВЧ50 після ЕІІ компактним ЕІ з твердого стопу ВК6 з використанням СТНС 0,5%Si+0,5%B+2%Cr+7%Ni+90% вазелін.

TABLE 6. The results of local energy dispersive analysis of the coating formed on the high-strength ВЧ50 (VCh50) cast iron sample due to ESA processing by the compact electrode-tool of the ВК6 (VK6) hard alloy with the use of the STSM of the composition of 0.5%Si+0.5%B+2%Cr+7%Ni+90% petroleum jelly.

Покриття з твердого стопу ВК6 з СТНС 0,5%Si+0,5%B+2%Cr+7%Ni+90% вазелін; крок сканування — 10 мкм									
C	W	Co	B	Si	Cr	Ni	Mn	Fe	Σ, %
2,61	84,17	3,91	0,39	1,22	1,51	2,53	—	3,66	100
2,79	79,14	2,76	0,37	1,25	1,32	2,14	—	10,23	100
2,91	51,67	1,15	0,32	1,38	1,14	1,37	—	40,06	100
2,73	11,17	0,73	0,27	1,42	0,23	0,75	0,12	82,58	100
3,10	0,95	0,07	0,08	1,72	0,15	0,33	0,32	93,28	100
3,43	0,06	0,01	—	1,63	0,14	0,02	0,44	94,27	100
3,58	—	—	—	1,81	0,15	—	0,53	93,93	100
3,39	—	—	—	1,34	0,13	—	0,45	94,69	100

кількість яких на поверхні складає 84,17 і 3,91% відповідно, а також Нікель (2,53%), Хром (1,51%) і Бор (0,39%) у міру заглиблення поступово понижуються і на глибині у $\cong 50$ мкм, окрім Хрому, який входить до складу чавуну, не виявляються. Ферум, що є основним елементом чавуну, від мінімальної кількості на поверхні у 3,66%, навпаки, поступово збільшується і на глибині у $\cong 50$ мкм відповідає марочному складу ВЧ50. На глибині у $\cong 30$ мкм з'являється Манган (0,12%), який з віддаленням від поверхні поступово збільшується до кількості, що міститься в чавуні марки ВЧ50, — $\cong 0,3-0,7\%$. Силіцій і Хром входять до складу чавуну ВЧ50 і тому також виявляються аналізом у кількості, що відповідає марочному складу основи.

На рисунку 10 показано лінію сканування хемічних елементів по глибині поверхневого шару зразка з чавуну марки ВЧ50 після легування компактним ЕІ марки Х20Н80 і СТНС складу 5%Si+5%B+90% вазелін, а в табл. 7 наведено результати локальної енергодисперсійної аналізи сформованого покриття.

Аналіза табл. 7 показує, що кількість Нікелю та Хрому, максимальний вміст яких на поверхні складає 68,81 і 17,11% відповідно, а також Силіцій (4,56%) і Бор (4,27%) у міру віддалення від обробленої поверхні поступово зникають і на глибині у $\cong 70$ мкм не виявляються, крім Силіцію та Хрому, які входять до марочного складу ВЧ50.

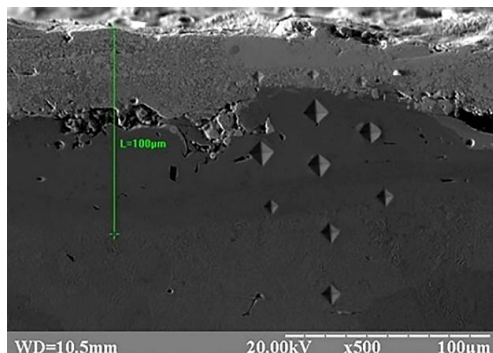


Рис. 10. Лінія сканування та розподіл мікротвердості по глибині шару за ЕІЛ зразків з чавуну марки ВЧ50 ЕІ марки Х20Н80 і СТНС складу 5%Si+5%B+90% вазелін.

Fig. 10. The scanning line and the microhardness distribution along the depth of the layer in the course of ESA processing the high-strength ВЧ50 (VCh50) cast iron samples by the electrode-tool of the Х20Н80 (Kh20N80) grade and with the use of the STSM of the composition of 5%Si+5%B+90% petroleum jelly.

ТАБЛИЦЯ 7. Результати локальної енергодисперсійної аналізи покриття, сформованого на зразку з чавуну марки ВЧ50 після ЕІЛ компактим ЕІ марки Х20Н80 із СТНС складу 5%Si+5%B+90% вазелін.

TABLE 7. The results of local energy dispersive analysis of the coating formed on the high-strength ВЧ50 (VCh50) cast iron sample due to ESA processing by the compact electrode-tool of the Х20Н80 (Kh20N80) grade and with the use of the STSM of the composition of 5%Si+5%B+90% petroleum jelly.

Покриття з твердого стопу ВК6							
з СТНС: 0,5%Si+0,5%B+2%Cr+7%Ni+90% вазелін; крок сканування — 10 мкм							
С	В	Si	Cr	Ni	Mn	Fe	Σ, %
3,15	4,27	4,56	17,11	68,81	—	2,10	100
2,91	4,15	4,34	17,43	67,14	—	4,03	100
2,95	4,04	4,13	16,38	65,63	—	6,87	100
2,79	3,41	3,45	16,89	59,12	0,21	14,13	100
2,76	2,77	2,43	14,21	55,18	0,17	22,48	100
3,41	0,17	1,98	6,32	21,23	0,14	66,75	100
3,52	0,11	1,64	0,72	0,93	0,31	92,77	100
3,43	—	1,90	0,27	0,04	0,27	94,09	100
3,29	—	1,45	0,19	—	0,43	94,64	100
3,62	—	1,63	0,14	—	0,47	94,14	100
3,58	—	1,41	0,15	—	0,51	94,35	100
2,95	—	1,38	0,13	—	0,32	95,22	100

Ферум, що є основним елементом чавуну, від мінімальної кількості на поверхні у 2,10%, навпаки, поступово збільшується і на глибині у $\cong 70$ мкм відповідає кількості, що знаходиться в чавуні марки ВЧ50. На глибині у $\cong 30$ мкм виявляється Манган (0,21%), який у міру віддалення від поверхні в основу поступово збільшується до $\cong 0,3-0,7\%$, що відповідає марці ВЧ50.

5. ВИСНОВКИ

1. З нанесенням методом ЕІЛ на чавун марки ВЧ50 покриттів як компактними ЕІ складу 90%ВК6+10%1М і 1М, так і ЕІ з твердого стопу ВК6 і ніхромового дроту Х20Н80 з використанням СТНС складу 0,5%Si+0,5%B+2%Cr+7%Ni+90% вазелін і 5%Si+5%B+90% вазелін відповідно структура поверхневого шару складається з трьох ділянок: «білого» та перехідного шарів товщиною у 15–75 і 10–20 мкм відповідно та основного металу.
2. Найбільшу мікротвердість зразків у 13260 і 12800 МПа одержано з використанням компактних ЕІ з твердого стопу ВК6 і ніхромового дроту Х20Н80 відповідно із використанням СТНС, а товщина їхнього шару підвищеної твердості сягає 50 і 90 мкм відповідно.
3. Поверхня покриттів, одержаних компактними ЕІ із використанням СТНС, складається з їхніх хемічних елементів і незначної кількості Феруму, що входить до складу матеріялу основи — чавуну. Водночас найбільша кількість Феруму виявляється у порах.
4. Легувальні елементи покриття у міру віддалення від обробленої поверхні в основу поступово зникають і на віддалі у $\cong 50$ мкм для покриттів складу 90%ВК6+10%1М і твердого стопу ВК6 з СТНС та на віддаль у 60 і 70 мкм для покриттів складу 1М і ніхромового дроту Х20Н80 відповідно з СТНС не виявляються, а кількість Феруму збільшується.

ПОДЯКИ

Частину наукових результатів одержано в рамках науково-дослідного проєкту «Розробка екологічно безпечних технологій модифікації поверхні деталей обладнання електростанцій комбінованими методами, заснованими на електроіскровому легуванні» (державний реєстраційний № 0124U000539) за виконання Сумським державним університетом, що фінансується МОН України.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА—REFERENCES

1. V. B. Tarelnyk, O. P. Gaponova, N. V. Tarelnyk, M. Y. Dumanchuk, M. M. Maifat, and V. A. Gerasimenko, *Metallfiz. Noveishie Tekhnol.*, **47**,

- No. 4: 427 (2025) (in Ukrainian).
2. Yu. S. Samotugina, B. A. Lyashenko, and O. O. Bezumova, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **43**, No. 8: 1105 (2021) (in Ukrainian).
3. O. P. Shylina, *Visnyk Mashynobuduvannia ta Transportu*, **2**:115 (2017) (in Ukrainian).
4. T. A. Hurei, *Vestnyk KhNADU*, **74**: 48 (2016) (in Russian).
5. T. S. Skoblo, O. I. Sidashenko, and O. V. Saichuk, *Korpusni Detali z Chavuniv ta Yikh Yakisni Pokaznyky: Monohrafiya* [Cast Iron Body Parts and Their Quality Indicators: Monograph] (Kharkiv: Disa Plus: 2019).
6. T. S. Skoblo, O. Yu. Marchenko, and I. M. Rybalko, *Metodyka Otsinky Stupenyu Degradatsiyi Metaliv Vyrobyv u Protsesi Ekspluatatsiyi* [Method for Assessing the Degree of Metal Degradation of Products During Operation], Patent 95287 UA (publ. 25.06.15., Bull. No. 12) (in Ukrainian).
7. T. S. Skoblo, S. H. Kartashov, and N. S. Hrankina, *Visnyk Kharkivs'kogo Nacional'nogo Tekhnichnogo Universytetu Sils'kogo Hospodarstva im. P. Vasylenka*, **122**: 143 (2012) (in Ukrainian).
8. O. I. Sidashenko, T. S. Skoblo, O. V. Tikhonov, A. K. Avtukhov, O. V. Saychuk, V. A. Bantkovsky, O. D. Martynenko, I. G. Sherzhukov, and O. O. Goncharenko, *Tekhnologichni Systemy Remontnoho Vyrobnystva. Ch. 3. Proektuvannya Resursozberihayuchykh Tekhnologichnykh Protsesiv Remontu Mashyn* [Technological Systems of Repair Production. Pt. 3. Design of Resource-Saving Technological Processes for Machine Repair] (Kharkiv: KhNTUSG: 2012).
9. T. S. Skoblo, A. K. Avtukhov, O. I. Sidashenko, O. Iu. Klochko, Yu. L. Belkin, and R. H. Sokolov, *Sposib Vyrobnystva Prokatnykh Valkiv* [Method of Manufacturing Rolling Rolls], Patent 105761UA (opubl. 11.04.2016) (in Ukrainian).
10. T. S. Skoblo and V. M. Vlasovets, *Materials Science*, **47**, No. 5:644 (2012).
11. I. P. Shatskyi, V. V. Perepichka, and L. Ya. Ropyak, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **42**, No. 1: 69 (2020) (in Ukrainian).
12. M. S. Storozhenko, A. P. Umanskii, A. E. Terentiev, and I. M. Zakiev, *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, **56**, Nos. 1–2: 60 (2017).
13. O. Umanskyi, M. Storozhenko, G. Baglyuk, O. Melnyk, V. Brazhevsky, O. Chernyshov, O. Terentiev, Yu. Gubin, O. Kostenko, and I. Martsenyuk, *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, **59**, Nos. 7–8: 434 (2020).
14. M. Bembenek, P. Prysyazhnyuk, T. Shihab, R. Machnik, O. Ivanov, and L. Ropyak, *Materials*, **15**, No. 14: 5074 (2022).
15. B. O. Trembach, M. G. Sukov, V. A. Vynar, I. O. Trembach, V. V. Subbotina, O. Yu. Rebrov, O. M. Rebrova, and V. I. Zakiev, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **44**, No. 4: 493 (2022).
16. L. Ropyak, I. Schuliar, and O. Bohachenko, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, **1**, Iss. 5: 53 (2016) (in Ukrainian).
17. I. Ivashenko, V. Posuvailo, H. Veselivska, and V. Vynar, *International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies (2020)*, vol. 2, p. 9321900.
18. M. Bembenek, M. Makoviichuk, I. Shatskyi, L. Ropyak, I. Pritula, L. Gryn, and V. Belyakovskiy, *Sensors*, **22**, Iss. 21: 8105 (2022).
19. M. M. Student, V. M. Dovhunyk, V. M. Posuvailo, I. V. Koval'chuk, and V. M. Hvozdet's'kyi, *Materials Science*, **53**, Iss. 3: 359 (2017).
20. O. Bazaluk, O. Dubei, L. Ropyak, M. Shovkoplias, T. Pryhorovska, and V. Lozynskiy, *Energies*, **15**, Iss. 1: 83 (2022).

21. T. S. Skoblo, A. A. Goncharenko, N. V. Firsova, and A. N. Legkobyat, *Materialy Nauchno-Prakticheskoy Konferentsii Studentov i Magistrantov BGATU* [Proc. of the Scientific and Practical Conference of Students and Masters of BGATU] (2019) [in Russian].
22. A. V. Karakurkchi, *Functional Materials*, **22**, Iss. 2: 181 (2015).
23. V. A. Tatarenko and T. M. Radchenko, *Uspehi Fiziki Metallov*, **3**, Iss. 2: 111 (2002) (in Ukrainian).
24. A. D. Pogrebnjak, A. A. Bagdasaryan, P. Horodek, V. Tarelnyk, V. V. Buranich, H. Amekura, N. Okubo, N. Ishikawa, and V. M. Beresnev, *Materials Letters*, **303**: 130548 (2021).
25. V. B. Tarelnyk, O. P. Gaponova, Ye. V. Konoplyanchenko, N. S. Yevtushenko, and V. O. Herasymenko, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **40**, No. 6: 795 (2018) (in Russian).
26. O. Gaponova, Cz. Kundera, G. Kirik, V. Tarelnyk, V. Martsynkovskyy, Ie. Konoplianchenko, M. Dovzhyk, A. Belous, and O. Vasilenko, *Estimating Qualitative Parameters of Aluminized Coating Obtained by Electric Spark Alloying Method* (Eds. A. D. Pogrebnjak and V. Novosad). *Advances in Thin Films, Nanostructured Materials, and Coatings. Lecture Notes in Mechanical Engineering* (Singapore: Springer: 2019).
27. O. P. Gaponova, B. Antoszewski, V. B. Tarelnyk, P. Kurp, O. M. Myslyvchenko, and N. V. Tarelnyk, *Materials*, **14**: 6332 (2021).
28. N. V. Tarelnyk, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **44**, No. 8: 1037 (2022) (in Ukrainian).
29. V. B. Tarelnyk, O. P. Gaponova, Ye. V. Konoplyanchenko, N. S. Yevtushenko, and V. O. Herasymenko, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **40**, No. 6: 795 (2018) (in Ukrainian).
30. V. B. Tarelnyk, O. P. Gaponova, G. V. Kirik, N. V. Tarelnyk, and M. O. Mikulina, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **42**, No. 5: 655 (2020) (in Ukrainian).
31. O. P. Gaponova, V. B. Tarelnyk, V. S. Martsynkovskyy, G. V. Kirik, and A. B. Batalova, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **43**, No. 8: 1121 (2021) (in Ukrainian).
32. O. P. Gaponova, V. B. Tarelnyk, V. S. Martsynkovskyy, Y. I. Semirnenko, and O. V. Rysnaya, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **43**, No. 9: 1155 (2021) (in Ukrainian).
33. V. B. Tarelnyk, I. V. Konoplianchenko, O. P. Gaponova, O. A. Sarzhanov, and B. Antoszewski, *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, **58**, Nos. 11–12: 703 (2020).
34. V. Martsinkovsky, V. Yurko, V. Tarelnik, and Yu. Filonenko, *Procedia Engineering*, **39**: 148 (2012).
35. V. Martsinkovsky, V. Yurko, V. Tarelnik, and Yu. Filonenko, *Procedia Engineering*, **39**: 157 (2012).
36. V. B. Tarelnyk, O. P. Gaponova, Ye. V. Konoplianchenko, N. V. Tarelnyk, and O. O. Vasylenko, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **41**, No. 2: 173 (2019) (in Ukrainian).
37. V. B. Tarelnyk, O. P. Gaponova, Ye. V. Konoplianchenko, V. S. Martsynkovskyy, N. V. Tarelnyk, and O. O. Vasylenko, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **41**, No. 3: 313 (2019) (in Ukrainian).
38. V. B. Tarelnyk, O. P. Gaponova, Ie. V. Konoplianchenko, N. V. Tarelnyk, M. Y. Dumanchuk, M. O. Mikulina, V. O. Pirogov, S. O. Gorovoy, and

- N. K. Medvedchuk, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **44**, No. 11: 1475 (2022) (in Ukrainian).
39. V. Tarelnyk, I. Konoplianchenko, N. Tarelnyk, and A. Kozachenko, *Materials Science Forum*, **968**: 131 (2019).
40. B. Antoszewski, O. P. Gaponova, V. B. Tarelnyk, O. M. Myslyvchenko, P. Kurp, T. I. Zhylenko, and I. Konoplianchenko, *Materials*, **14**: 739 (2021).
41. V. Martsynkovskyy, V. Tarelnyk, V. Martsynkovskyy, P. Furmańczyk, and N. Tarelnyk, *AIP Conference Proceedings*, **2017**, No. 1: 020017 (2018).
42. V. Tarelnyk, A. Kozachenko, V. Martsynkovskyy, C. Kundera, and O. Gaponova, *Proc. of the 2018 IEEE 8th International Conference on Nanomaterials: Applications and Properties–NAP 2018*, p. 8915077.
43. V. B. Tarelnyk, O. P. Gaponova, V. B. Loboda, M. A. Mikulina, and B. A. Sarzhanov, *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, **57**, No. 2: 173 (2021).
44. V. Tarelnyk, I. Konoplianchenko, O. Gaponova, B. Sarzhanov, and A. Polyvani, *Proc. of the 2022 IEEE 12th International Conference “Nanomaterials: Applications and Properties”–NAP 2022*.
45. V. Tarelnyk, O. Gaponova, V. Martsynkovskyy, T. Voloshko, and O. Semernya, *Proc. of the 2020 IEEE 10th International Conference “Nanomaterials: Applications and Properties”–NAP 2020*, p. 9309618.
46. O. M. Myslyvchenko, O. P. Gaponova, V. B. Tarelnyk, and M. O. Krapivka, *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, **59**, Nos. 3–4: 201 (2020).
47. O. P. Gaponova, V. B. Tarelnyk, B. Antoszewski, O. M. Myslyvchenko, and J. Hoffman, *Materials*, **15**, No. 17: 6085 (2022).
48. O. V. Ivankova, O. V. Garashchuk, V. I. Kutsenko, V. V. Shcherbyna, D. V. Chizhevsky, Ya. V. Babych, and M. O. Tikhonov, *Visnyk PDAA*, **4**: 283 (2020) (in Ukrainian).
49. M. M. Student, V. M. Hvozdetzkyi, T. R. Stupnytskyi, and Y. V. Dzioba, *Science and Innovation*, **13**, No. 6: 34 (2017).
50. V. M. Gvozdecki, *Visnyk Natsional'noi Akademii Nauk Ukrainy*, **3**: 79 (2018) (in Ukrainian).
51. B. A. Lyashenko, Ye. K. Solovykh, and V. I. Mirnenko, *Optimizatsiya Tekhnologii Nanoseniya Pokrytiy po Kriteriyam Prochnosti i Iznosostoykosti* [Optimization of Coating Application Technology According to Durability and Wear Resistance Criteria] (Kyiv: IPP NAN: 2010) (in Russian).
52. T. S. Skoblo, N. N. Rybalko, A. V. Tykhonov, and A. D. Martynenko, *Tekhnichnyy Servis Ahropromyslovoho, Lisovoho ta Transportnoho Kompleksiv*, **15**: 60 (2019) (in Ukrainian).
53. B. Carcel, J. Sampedro, A. Ruescas, and X. Toneu, *Physics Procedia*, **12**: 353 (2011).
54. A. Guzanova, M. Džupon, D. Draganovská, J. Brezinová, J. Viňáš, D. Čmurej, E. Janoško, and P. Maruschak, *Acta Metallurgica Slovaca*, **26**, No. 2: 37 (2020).
55. V. B. Tarel'nik, A. V. Paustovskii, Y. G. Tkachenko, V. S. Martsinkovskii, E. V. Konoplyanchenko, and K. Antoshevskii, *Surf. Engin. Appl. Electrochem.*, **53**: 285 (2017).
56. V. B. Tarelnyk, O. P. Gaponova, V. I. Melnyk, N. V. Tarelnyk, V. M. Zubko, V. M. Vlasovets, Ie. V. Konoplianchenko, S. G. Bondarev, O. V. Radionov, M. M. Mayfat, V. O. Okhrimenko, and A. V. Tkachenko, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **45**: 683 (2023) (in Ukrainian).