

PACS numbers: 62.20.Qp, 68.35.Ct, 68.35.Gy, 68.55.J-, 68.55.Ln, 81.15.Pq, 81.65.Lp

Поверхневі властивості високоміцних чавунних деталей зі зносостійкими композитними покриттями, синтезованими методом електроіскрового легування. Ч. 1. Специфічні аспекти масообміну; геометричні, топографічні та механічні характерні особливості зміцнених поверхонь

В. Б. Тарельник*, О. П. Гапонова**,***, Н. В. Тарельник*,
М. Ю. Думанчук*, М. М. Майфат*, В. О. Герасименко*,
М. О. Мікуліна*, А. Д. Поливаний*, В. О. Охріменко**,
О. В. Семерня*, М. Ю. Василенко*, В. М. Козін*

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

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

***Інститут фундаментальних технологічних досліджень
Польської академії наук,
5Б Адольфа Павінського,

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

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

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

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

Citation: V.B. Tarelnyk, O.P. Haponova, N.V. Tarelnyk, M.Yu. Dumanchuk, M.M. Maifat, V.O. Gerasimenko, M.O. Mikulina, A.D. Polyvanyi, V.O. Ohrimenko, O.V. Semernya, M.Yu. Vasilenko, and V.M. Kozin, Surface Properties of High-Strength Cast Iron Parts with Wear-Resistant Composite Coatings Synthesized by Electrospray Alloying Method. Pt. 1. Specific Aspects of Mass Transfer; Geometric, Topographic, and Mechanical Characteristic Features of Strengthened Surfaces, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 47, No. 4: 427–451 (2025). DOI: [10.15407/mfint.47.04.0427](https://doi.org/10.15407/mfint.47.04.0427)

© 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>)

02-016 Варшава, Польща

В статті описано результати досліджень особливостей масоперенесення під час електроіскрового легування (ЕІЛ) зразків з високоміцного чавуну марки ВЧ50. ЕІЛ проводилося компактними електродами-інструментами (ЕІ), виготовленими методом порошкової металургії (ПМ) складу: 90% ВК6 + 10% 1М і 1М, де 1М — 70% Ni, 20% Cr, 5% Si, 5% B, а також ЕІ з твердого стопу ВК6 і ніхромового дроту марки Х20Н80, за використання яких на зразки попередньо наносили спеціальні технологічні насичувальні середовища (СТНС) складу 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.). За результатом 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 змінюються. Найбільша кількість матеріалу переноситься спочатку процесу ЕІЛ, потім процес масоперенесення поступово зменшується, зовсім припиняється та може змінитися руйнуванням нанесеного шару, тобто Δm_k стає негативною. Зі збільшенням енергії розряду, масоперенесення також збільшується, але процес руйнування нанесеного шару покриття розпочинається раніше, водночас збільшується шерсткість покриття та зменшується його суцільність. ЕІЛ з використанням ЕІ, виготовленими методом ПМ, з використанням СТНС супроводжується зниженням межі плинності (σ_T) і межі міцності (σ_B), а відносно подовження (δ) зростає. Шерсткість поверхневого шару збільшується, а суцільність покриття (S) зменшується. Показники якості покриття поліпшуються із застосуванням після ЕІЛ безабразивного ультразвукового оброблення (БУФО).

Ключові слова: електроіскрове легування, електрода-інструмент, анода, катода, масоперенесення, поверхневий шар, покриття, структура, мікротвердість, шерсткість, суцільність.

This paper describes the results of mass-transfer specific-aspect studies during electrospark alloying (ESA) process for the samples made of the high-strength ВЧ50 (VCh50) cast iron. The ESA was carried out by the compact electrode-tools (ETs) made with the use of the powder metallurgy (PM) method and having the composition of 90% ВК6 (VK6) + 10% 1М and 1М, where 1М is of 70% Ni, 20% Cr, 5% Si, 5% B, as well as by the ETs made of ВК6 (VK6) hard alloy and Х20Н80 (Kh20N80) nichrome wire. When using those, the samples had been pre-coated with the special technological saturating media СТНС (STSM) of the compositions 0.5% Si+0.5% B+2% Cr+7% Ni+90 petroleum jelly and 5% Si + 5% B+ 90% petroleum jelly, respectively. The ESA of the samples has carried out by cyclic alloying (1 cycle = 0.5 min). The mass-transfer study has shown that the amount of the material, which is transferred from the anode (Δm_a) to the cathode (Δm_k), increases with an increase in the ESA time, while both the roughness and the continuity of the coating do not change practically. The largest amount of the material is transferred at the beginning of the ESA process; then, the mass-transfer process is gradually decreasing, stops completely, and eventually, it may be

changed by destruction of the applied layer, *i.e.*, Δm_k may become negative. With an increase in the discharge energy (W_p), the mass-transfer process increases, but the process of the applied coating layer destruction begins earlier, while the roughness of the coating increases and its continuity decreases. At $W_p = 0.55$ J, the ESA process, which is carried out by the ETs made by the PM method and having the composition of 90% BK6 (VK6) + 10% 1M and with 1M of 70% Ni, 20% Cr, 5% Si, 5% B, as well as by the ETs made of BK6 (VK6) hard alloy and X20H80 (Kh20N80) nichrome wire, with the special technological saturating media CTHC (STSM) of the compositions of 0.5% Si + 0.5% B + 2% Cr + 7% Ni + 90 petroleum jelly and 5% Si + 5% B + 90% petroleum jelly, respectively, for the samples made of the BЧ50 (VCh50), and the above ESA process are accompanied by decreasing yield strength and strength limit and increasing the relative elongation (δ). The roughness of the surface layer increases, and the continuity (S) of the coating decreases. After non-abrasive ultrasonic finishing, the yield strength and strength limit increase, and δ decreases. Surface roughness decreases and S increases. As W_p increases from 0.55 to 1.3 and 3.4 J and, at using the same ETs, yield strength and strength limit decrease, and δ increases, the roughness of the coating increases, and S decreases. After the next non-abrasive ultrasonic finishing, the yield strength and strength limit increase, and δ decreases, surface roughness decreases and S increases.

Key words: electrospark alloying, electrode tool, anode, cathode, mass transfer, surface layer, coating, structure, microhardness, roughness, continuity.

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

1. ВСТУП

На сьогодні в різних галузях господарства України, — від сільсько-господарського та комунального хазяйства до атомно-енергетичної й аерокосмічної промисловости, — виготовляється, відновлюється та зміцнюється дуже велика кількість деталей з чавунів. Порівняно із крицями, у чавунів нижчі механічні властивості, але істотно ліпші технологічні: зносостійкість, антифрикційність, оброблюваність різанням тощо. Серед чавунів особливе місце займають високоміцні чавуни з кулястим графітом, які завдяки оптимальному поєднанню ливарних, фізико-механічних й експлуатаційних властивостей та економічності виробництва їх широко застосовуються в сучасному машинобудуванні [1]. Завдяки їхнім механічним характеристикам ($\sigma_{0.2} = 370 \dots 700$ МПа, $\sigma = 2 \dots 7\%$, твердість за Бринеллевою шкалою — $153 \dots 360$ НВ) високоміцні чавуни використовують замість криці, сірого та ковкого чавунів і деяких кольорових стопів [2]. З високоміцних чавунів на перлітній основі, марок ВЧ 50, ВЧ 60, ВЧ 70, ВЧ 80, ВЧ 100 виготовляють поршневі кільця, гільзи, шестерні, деталі двигунів, компресорів, виливниці, прокатні валки тощо [3].

Багато чавунних деталей працює у важких умовах абразивного,

гідроабразивного, корозійного й інших видів зносу, а методи виготовлення їх і ремонту дуже часто є екологічно небезпечними: нагрівання, термічне напорошення, ряд дифузійних методів оброблення тощо.

Для усунення дефектів під час ремонту чавунних деталей широко застосовують зварювальні процеси та методи нагрівання. У різних галузях промисловості використовують одні й ті ж методи зварювання, які дещо відрізняються за технологічними прийомами та застосовуваними зварювальними матеріалами [4, 5]. Згідно з [6], відновлення зруйнованих ділянок діяфрагми (рис. 1) компресора «PCL» проводили шляхом електродугового нагрівання на апараті ТДМ-305 шару нікелю спеціальними електродами УТР 86 FN Ш 4 мм.

Технології підвищення зносостійкості, втомної міцності, корозійної стійкості тощо чавунних деталей, а також виправлення дефектів на їхніх поверхнях різного експлуатаційного призначення повинні бути екологічно безпечними. Роботи направлені на удосконалення наявних технологій і розроблення нових методів відновлення та зміцнення поверхонь чавунних деталей, які працюють у важких умовах і підлягають впливу негативних середовищ, екологічно безпечними методами є актуальними та своєчасними.

2. АНАЛІЗА ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Велика кількість зміцнювальних і ремонтних (відновлювальних) технологій, направлених на підвищення параметрів якості поверхневих шарів деталей, а також безліч матеріалів для їхнього здійснення роблять дуже складним вибір більш доцільної.



а



б

Рис. 1. Місце руйнування діяфрагми компресора «PCL» (а), кольорова дефектоскопія зруйнованої ділянки (б).

Fig. 1. The location of the 'PCL'-compressor diaphragm failure (a); dye-penetrant inspection of the failure area (b).

Одним з найперспективніших напрямів розвитку сучасного виробництва є впровадження інтенсивних технологій зміцнення матеріалів висококонцентрованими джерелами нагріву (ВКДН) — лазерним і електронним променями, плазмовим струменем тощо. В [7] досліджено вплив технології плазмового поверхневого модифікування (без отоплення або з мікроотопленням) на механізми фазових перетворень, твердість і зносостійкість чавунів (СЧ18, СЧ40, ВЧ80, 300Х25Н3С3). Для сірих і високоміцних чавунів структура модифікованої зони та рівень експлуатаційних властивостей залежать від типу й фазового складу матриці та не залежать від форми графітових включень. Для високоміцного чавуну найвища зносостійкість досягається під час плазмового модифікування без отоплення поверхні, а для сірих чавунів — з мікроотопленням поверхні.

В [8] проводилися дослідження, направлені на створення дешевих сумішей, здатних зміцнювати робочі органи ґрунтообробної техніки. Для визначення складу сумішей проведено розрахунки й одержано результати стосовно термохімічних параметрів для двох типів феростопів із різними масовими вмістами Карбону у чавуні — від 2,2 до 6,2%. Суміш із порошку низьковуглецевого ферохрому та меленої стружки білого чавуну наносили на деталі у вигляді шлікера. Шар, що утворився, висушували, а потім нагрівали плазмотроном аж до ініціювання екзотермічної реакції та надання йому рідко-твердого стану. Аналіза мікроструктури нагрітого шару показала, що він має дрібнозернисту будову, відповідає принципу Шарпі: суміш твердих карбідів і м'якої залізної матриці зі структурою перліту, сорбіту чи то троститу, залежно від швидкості охолодження, має високу твердість у межах від *HRC* 52 до *HRC* 63. Ці суміші можуть бути використані в разі газотермічного зміцнення поверхонь деталей.

До зміцнення матеріалів висококонцентрованими джерелами нагріву відносять також і фрикційне оброблення. У зоні контакту під час фрикційного оброблення проходить інтенсивне зсувне деформування металу поверхневого шару оброблюваної поверхні. Під час високошвидкісного нагрівання металу та наступного високошвидкісного охолодження у поверхневих шарах деталей формується зміцнений білий шар з нанокристалічною структурою [9].

Дослідженнями, представленими в [10], показано, що якість втулок з високоміцного чавуну істотно залежить від структури, яка формується у виливках. Інноваційними технологіями для машинобудування можуть бути ефективні способи введення та типи домішок-модифікаторів, які докладно аналізуються в роботах і використовуються за рекомендаціями на промислових підприємствах [11].

Для регулювання умов кристалізації виробів, як правило, перед заливанням підігрівають форму, у яку їх відливають. Цей метод використовують для виробництва як масивних виливків, напри-

клад прокатних валків, так і тонкостінних — втулок гільз циліндрів, корпусних деталей, гальмівних дисків тощо [12–14]. Як правило, металеву форму перед заливанням чавуну, незалежно від способу виробництва виробу (стаціонарне або відцентрове лиття), її попередньо підігрівають у газовій печі [15] до необхідних температур (що визначається масою вилівка та вимогами за рівнем властивостей і структури).

Аналіза літературних і патентних джерел показує, що в останні роки з'являється дуже багато джерел, присвячених підвищенню якості металевих поверхонь деталей різними технологіями: нанесенням твердих і зносостійких металокерамічних покриттів [16–18], нанесенням композиційних матеріалів шляхом натоплення [19, 20], шляхом відцентрового армування карбідом Вольфраму [21], нанесенням шарів оксиду Алюмінію [22–24], хромуванням у проточному електроліті [25] електролітичним методом [26–28] тощо.

Перспективним шляхом підвищення зносостійкості поверхонь пар тертя можуть бути багатошарові покриття, що поєднують у собі змащувальні й антизношувальні властивості [29].

До зміцнювальних технологій, що використовують ВКДН, слід віднести одну з найбільш перспективних сучасних технологій — електроіскрове легування (ЕІЛ), застосування якої дає змогу в широких межах управляти параметрами якості поверхонь деталей. За використання технології ЕІЛ поверхні деталей поєднують низку особливих фізико-механічних і трибологічних властивостей на нанорівні [30].

Методом ЕІЛ можливо наносити покриття з чистих металів [31, 32], легованих криць [33–35], ніклевих і мідних стопів [36–38], графіту [39] тощо.

Резервом підвищення якості металевих поверхонь можуть бути багатошарові [40–42] та комбіновані електроіскрові покриття (КЕП) [44–46], а також покриття, сформовані комбінацією з декількох технологій ЕІЛ і ППД [47–50], ЕІЛ, лазерного оброблення та нанесення металополімерних матеріалів (МПМ) [51], ЕІЛ і конденсованого йонного бомбардування [52], ЕІЛ і йонного азотування [53], КЕП, МПМ, ППД (обкаткою кулькою) [54], направлені на підвищення якості поверхонь деталей як під час виготовлення, так і під час відновлення. Крім того, методи ЕІЛ можуть бути альтернативними технології хеміко-термічного оброблення (ХТО): цементації [55], нітроцементації [56, 57], азотуванню [58], сульфоцементації [59] тощо.

В [60] для розробки раціональних технологій відновлення зношених крицевих і чавунних деталей сільськогосподарської техніки проведено аналізу літературних джерел, а також подано пропозиції щодо відновлення зношених деталей машин. Авторами розглядався електролітичний метод [27, 28], методи газотермічного напорошення [61, 62], лазерного оброблення [63–66] та ЕІЛ. Під час узагаль-

нення проведених досліджень перевагу було віддано методу ЕІЛ, який може бути альтернативним до традиційних технологій відновлення деталей з поверхневим зміцненням. Завдяки низькій енергоємності, малогабаритному та мобільному технологічному обладнанню, екологічній чистоті процесу тощо метод ЕІЛ переважає більшість традиційних методів [67]. Завдяки проведеним дослідженням розроблено та використовують технологію відновлення методом ЕІЛ плунжерних пар, поновлюються деталі з чавуну, зокрема вилки перемикачів передач коробки зміни швидкостей (коробка ZF). Успішно реалізуються технології відновлення блоку та головки циліндрів дизельного двигуна Dxi 11 вантажних автомобілів «Вольво». Слід відмітити, що під час відновлення в якості електроди-інструменту (ЕІ) застосовували прутки з ніхрому Х20Н80 діаметром у 2 мм [60].

Крім позитивних властивостей, ЕІЛ метод має й недоліки. До характерних негативних особливостей, які понижують його розповсюдження, слід віднести обмеження товщини нанесеного шару, нерівномірність поверхневого зміцнення, пониження втомної міцності виробів [54].

Для усунення означених недоліків, як уже відмічалось вище, використовують комбіновані технології (КТ), які складаються з декількох, що доповнюють одна іншу. Так, у попередніх роботах нами було запропоновано КТ відновлення зношених поверхонь деталей центрифуг для очищення стічних вод, які підлягають гідроабразивному зношенню. Ця КТ включає підготовку поверхні деталю, нанесення на неї КЕП, наступну ППД одержаного покриття та нанесення на нього МПМ. Перед нанесенням КЕП поверхню деталю шліфують до $R_a = 0,5$ мкм. Під час формування КЕП спочатку проводять цементацію шліфованої поверхні деталю методом ЕІЛ, тобто ЦЕІЛ. Після цього виконують алітування цементованого шару алюмінійовою електродою з подальшим нанесенням на неї електроіскрового покриття електродою з твердого стопу Т15К6. Далі поверхню сформованого КЕП піддають ППД методом обкатки кулькою (ОК). Після полімеризації МПМ армованим порошком твердостійкої суміші ВК6 частину шару видаляють до виступів шерсткості покриття з твердого стопу Т15К6 [51, 68].

З метою застосування як електрод у ЕІЛ нових композиційних зносостійких матеріалів, одержаних за допомогою порошкової металургії, нами досліджувалися матеріали, що складаються з тонкодисперсної суміші 1М (70% Ni, 20% Cr, 5% Si, 5% В) та ВК6. Найбільш перспективним є леґування електродою з матеріалу складу 90% ВК6 + 10% 1М, що дає змогу формувати поверхневий шар на крицевих поверхнях з мікротвердістю до 14200 МПа. Під час застосування електрод з тонкодисперсної суміші 1М мікротвердість досягає 11500 МПа. Підшар з індію, понижуючи шерсткість покриття

(з $R_a = 3,5 \dots 4,2$ мкм до $R_a = 0,6 \dots 0,9$ мкм), незначно понижує його мікротвердість, але водночас вона залишається на достатньо високому рівні (відповідно 13250 і 12250 МПа [69]). В [70] покриття вищезначеного складу (90% ВК6 + 10% 1М) наклали компактними електродами з ніхромового дроту Х20Н80 і твердого стопу ВК6 з використанням спеціальних технологічних насичувальних середовищ (СТНС), в склад яких входять необхідні леґувальні елементи.

Таким чином, виникає як науковий, так і практичний інтерес дослідити механічні, фізичні, трибологічні й інші властивості функціональних покриттів складу (90% ВК6 + 10% 1М) та 1М, синтезованих на поверхнях з високоміцного чавуну способом, який би підвищив здатність поверхневого шару чавунних деталей чинити опір зношуванню, ґарантував би надійність і довговічність їхньої роботи в агресивних середовищах, був би екологічно безпечним і скоротив витрати на їх виготовлення.

Метою роботи є удосконалення технології захисту деталей з високоміцного чавуну від зношування шляхом дослідження масоперенесення, топографії, структури, елементного складу та механічних властивостей комбінованих покриттів, одержаних методом ЕІЛ, як компактними ЕІ, виготовленими методом ПМ, так і з використанням СТНС.

3. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Для дослідження закономірностей під час формування електроіскрових покриттів першорядне значення має вивчення характерних особливостей масоперенесення, тобто кількості перенесеної речовини з аноди (леґувальної електроди-інструменту) на катоду (зразок або деталь).

В якості катоди під час дослідження масоперенесення використовували зразки з високоміцного чавуну ВЧ 50 розміром $10 \times 10 \times 8$ мм, шліфовані до $R_a = 0,5$ мкм. Анодою були компактні ЕІ, виготовлені спіканням методом порошкової металургії, складу (90% ВК6 + 10% 1М) і 1М (70% Ni, 20% Cr, 5% Si, 5% В). Також використовували компактні ЕІ з твердого стопу ВК6 і ніхромового дроту марки Х20Н80; для використання їх на зразки попередньо наносили спеціальні технологічні насичувальні середовища (СТНС) складу, відповідно, 0,5% Si + 0,5% В + 2% Cr + 7% Ni + 90 вазелін і 5% Si + 5% В + 90% вазелін. ЕІЛ зразків проводили циклічним леґуванням на установці моделю «Елітрон-52А» з ручним вібратором упродовж до 2,5 хв. (1 цикл = 0,5 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 0,55, 1,3, 2,6, 3,4 Дж.

На всіх етапах оброблення вимірювалася шерсткість поверхні на приладі профілограф-профілометр мод. 201 заводу «Калібр». Ре-

зультати фіксували за допомогою спеціальної приставки.

Для проведення металографічних досліджень виготовляли шліфи, які досліджували на оптичному мікроскопі «Неофот-2» та растровому електронному мікроскопі-аналізаторі «РЕМ-106 І» ВАТ SELMI, де проводилася оцінка якості шару, його суцільності, товщини та будови зон підшару — дифузійної зони.

Також за допомогою «РЕМ-106 І» виконувалася локальна мікрорентгеноспектральна аналіза одержаних покриттів, проводилася дюрOMETрична аналіза на розподіл мікротвердості у поверхневому шарі та по глибині шліфу від поверхні. Мірювання мікротвердості проводили на мікротвердомірі ПМТ-3 вдавленням алмазної піраміди під навантаженням у 0,05 Н, згідно з ГОСТ 9450-76.

Після ЕІЛ для підвищення параметрів якості поверхневих шарів (пониження шерсткості покриттів, підвищення суцільності та втомної міцності, зміни характеру залишкових напружень з розтягувальних на стискальні) використовували безабразивне ультразвукове фінішне оброблення (БУФО).

Для дослідження впливу методу ЕІЛ на механічні властивості деталі (межу міцності, межу плинності, відносне подовження та відносне звуження) були виготовлені зразки із високоміцного чавуну ВЧ 50, відповідно до ГОСТ 7855-84. Для кожного матеріалу електроди-інструменту та режиму ЕІЛ виготовляли по 3 зразки.

4. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Дослідження масоперенесення

В таблиці 1 і на рисунках 2 і 3 представлено результати досліджень динаміки масоперенесення матеріалу аноди складу (90% ВК6 + 10% 1М) і 1М на поверхневі шари зразків з чавуну ВЧ 50 без попереднього нанесення покриттів з СТНС (рис. 2) і з СТНС (рис. 3), а також шерсткості та суцільності сформованих покриттів.

В результаті аналізу табл. 1 і рис. 2 і 3 встановлено:

- зі збільшенням часу ЕІЛ збільшується кількість перенесеного матеріалу з аноди (Δm_a) на катоду (Δm_k), а шерсткість і суцільність практично не змінюються;
- найбільша кількість матеріалу, що визначається коефіцієнтом масоперенесення (k_m), переноситься з початку процесу ЕІЛ і далі зі зростанням часу легування, процес масоперенесення поступово гальмується, потім зовсім припиняється і, більш того, може змінитися на руйнування нанесеного шару, тобто Δm_k змінюється за знаком;
- зі збільшенням енергії розряду W_p масоперенесення збільшується, але процес руйнування нанесеного шару покриття розпочинається раніше, наприклад за $W_p = 1,3, 2,6$ і $3,4$ Дж після $2,0, 1,5$ і $1,0$ хв. випробувань відповідно;

- зі збільшенням енергії розряду зростає шерсткість поверхневого

ТАБЛИЦЯ 1. Результати дослідження масоперенесення матеріалу ЕІ складу (90% ВК6 + 10% 1М) і 1М на зразки з чавуну ВЧ 50 з використанням СТНС і без них, а також шерсткість і суцільність покриттів.

TABLE 1. The results of the study of mass transferring the ET (electrode-tool) material, which has a composition of (90% ВК6 (VK6) + 10% 1М) and of 1М, onto the high-strength ВЧ 50 (VCh-50) cast iron samples with and without the use of the СТНС (STSM), as well as the coating roughness and continuity.

Матеріал електроди- інструменту	Склад СТНС, %	Час легування, хв.					Шерст- кість R_a , мкм	Суціль- ність S , %
		0,5	1,0	1,5	2,0	2,5		
		Збільшення ваги катоди, Δm_k , г·10 ⁴ /коефіцієнт масоперенесення, k_m					До/після БУФО	До/після БУФО
Енергія розряду $W_p = 0,55$ Дж								
90%BK6+10%1M	—	80/0,77	90	95	98	99	3,2/0,7	60/70
1M	—	90/0,76	110	115	118	119	3,3/0,8	80/90
BK6	0,5Si+0,5B+2Cr+7Ni+90 вазелін	70/0,79	80	85	89	90	3,3/0,8	95/100
ніхром Х20Н80	5% Si + 5% В + 90% ва- зелін	850,78	95	100	103	103	3,5/0,7	90/95
Енергія розряду $W_p = 1,3$ Дж								
90%BK6+10%1M	—	105/0,76	110	115	118	114	3,7/0,8	55/65
1M	—	120/0,72	125	128	130	126	3,9/08	70/80
BK6	0,5Si+0,5B+2Cr+7Ni+90 вазелін	90/0,75	95	98	99	97	4,2/0,9	85/95
ніхром Х20Н80	5% Si + 5% В + 90% ва- зелін	110/0,74	115	119	121	118	4,3/0,9	80/90
Енергія розряду $W_p = 2,6$ Дж								
90%BK6+10%1M	—	115/0,68	121	123	115		5,4/1,1	50/60
1M	—	140/0,68	150	156	142		5,71,1	60/70
BK6	0,5Si+0,5B+2Cr+7Ni+90 вазелін	95/0,67	110	114	105		5,9/1,1	75/85
ніхром Х20Н80	5% Si + 5% В + 90% ва- зелін	120/0,67	130	137	123		6,1/1,2	70/80
Енергія розряду $W_p = 3,4$ Дж								
90%BK6+10%1M	—	120/0,65	127	118	104		6,0/1.2	45/55
1M	—	150/0,66	155	141	135		6,3/1,3	55/65
BK6	0,5Si+0,5B+2Cr+7Ni+90 вазелін	105/0,64	109	98	91		6,7/1,4	70/80
ніхром Х20Н80	5% Si + 5% В + 90% ва- зелін	130/0,66	133	125	117		7,5/1,5	65/75

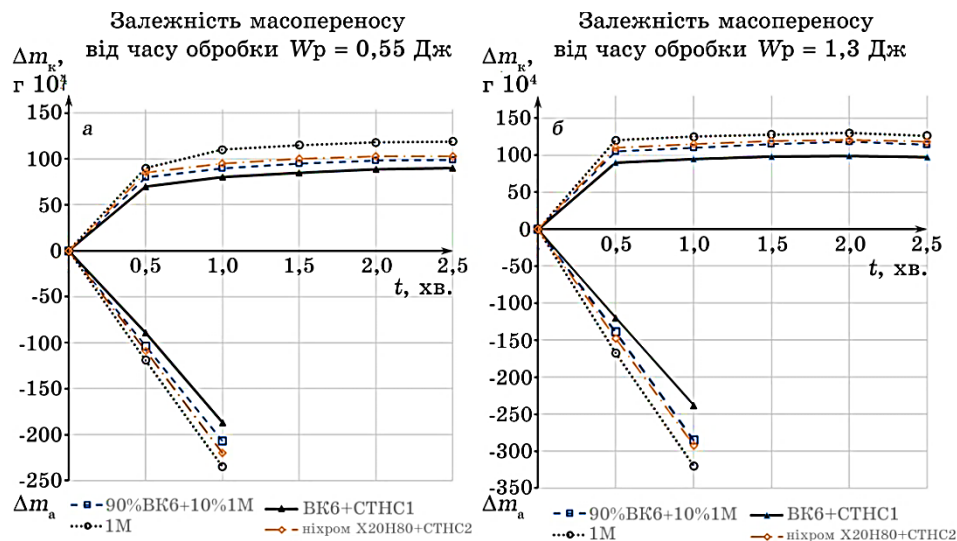


Рис. 2. Приріст ваги катода й ерозія анода під час ЕІЛ високоміцного чавуну марки ВЧ 50 компактними ЕІ, виготовленими методом порошкової металургії, складу (а) (90% ВК6 + 10% 1М) та (б) 1М.

Fig. 2. The cathode-weight increase and the anode erosion in the course of ESA processing high-strength ВЧ 50 (VCh-50) cast iron by the compact powder-metallurgy manufactured ET of the composition of: (a) (90% ВК6 (VK6) + 10% 1М), (b) 1М.

шару покриття та зменшується його суцільність;
- за незмінної енергії розряду за рівні проміжки часу кількість втраченої ваги (ерозії) анода Δm_a майже не змінюється.

Дослідження топографії і механічних властивостей

До топографічних параметрів покриттів, сформованих методом ЕІЛ, слід віднести шерсткість і суцільність, а до механічних властивостей — межу міцності, межу плинності, відносне подовження та відносне звуження деталю.

В таблиці 2 представлено зведені дані результатів дослідження впливу різних технологій нанесення покриттів методом ЕІЛ і ЕІЛ+БУФО на топографію та механічні властивості деталей з високоміцного чавуну ВЧ 50. Під час аналізу табл. 2 було визначено, що ЕІЛ ЕІ складу 90% ВК6 + 10% 1М і 1М, виготовленими методом ПМ, зразків з високоміцного чавуну за енергії розряду $W_p = 0,55$ Дж і продуктивності $Q = 0,67$ см²/хв. супроводжується пониженням межі плинності (σ_T) та межі міцності (σ_B) на 32,0% і 32,78% та 34,0% і 28,7% відповідно, а відносне подовження (δ) водночас зростає на 5,71% і 5,43%. Слід відмітити, що за ЕІЛ, коли підвищується

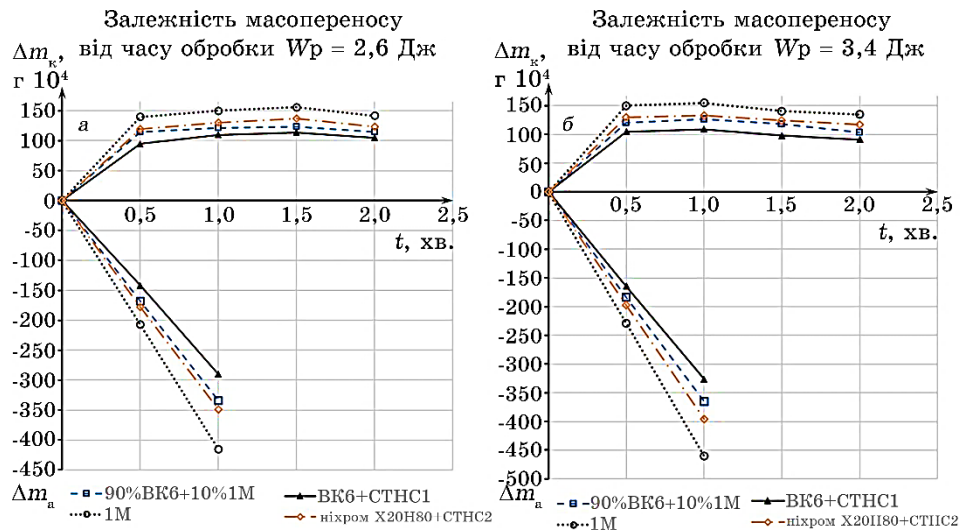


Рис. 3. Приріст ваги катоди та ерозія аноди під час ЕІЛ високоміцного чавуну марки ВЧ 50 компактними ЕІ з твердого стопу ВК6 (а) і ніхромового дроту марки Х20Н80 (б) з використанням СТНС складу 0,5% Si + 0,5% В + 2% Cr + 7% Ni + 90% вазелін і 5% Si + 5% В + 90% вазелін відповідно.

Fig. 3. The cathode-weight increase and the anode erosion in the course of ESA processing high-strength ВЧ 50 (VCh-50) cast iron by the compact ET made of ВК6 (VK6) hard alloy (а) and nichrome wire of Х20Н80 (Kh20N80) grade (б) with the use of the СТНС (STSM) having a composition of 0.5% Si + 0.5% В + 2% Cr + 7% Ni + 90% petroleum jelly, and 5% Si + 5% В + 90% petroleum jelly, respectively.

параметер (δ), нерідко погіршуються значення σ_b і σ_T . Це пояснюється наступним чином. Нанесення методом ЕІЛ покриттів супроводжується збільшенням шерсткості поверхневого шару (з $R_a = 0,5$ мкм до $R_a = 3,2$ і $3,3$ мкм) і виникненням значних концентраторів напружень, а суцільність покриття складає 60% і 80% відповідно (табл. 1).

Також у поверхневому шарі виникають залишкові розтягувальні напруження.

Після проведення ЕІЛ і оброблення БУФО ЕІ складу 90% ВК6 + 10% 1М і 1М шерсткість покриття зменшується до $R_a = 0,7$ мкм і $0,8$ мкм відповідно, а суцільність збільшується до 70% і 90% відповідно.

В результаті межа плинності та межа міцності збільшуються до 325 МПа і 324,1 МПа та 512 МПа і 526 МПа відповідно, а відносне подовження зменшується до 1,16% і 2,14% відповідно. Шерсткість поверхні зменшується до $R_a = 0,8$ мкм і $0,7$ мкм, а суцільність збільшується і складає 70% і 90% (табл. 1).

ТАБЛИЦЯ 2. Результати дослідження впливу різних технологій нанесення покриттів на топографію та механічні властивості деталей з високоміцного чавуну ВЧ 50.

TABLE 2. The results of the study of the various coating technologies impacts on the topography and mechanical characteristics of parts made of high-strength ВЧ 50 (VCh-50) cast iron.

Метод нанесення покриття	Енергія розряду, Дж	Продуктивність, см ² /хв	Межа плинності, МПа	Межа міцності, МПа	Відносне подовження, %
1	2	3	4	5	6
Без покриття	–	–	320	500	7
Електродою, виготовленою методом ПМ, складу 90% ВК6 + 10% 1М	0,55	0,67	217,6	330	7,40
			–32,0	–34,0	+5,71
Електродою, виготовленою методом ПМ, складу (90% ВК6 + 10% 1М) + БУФО	0,55	0,67	325	512	6,92
			+1,56	+2,40	–1,16
Електродою, виготовленою методом ПМ, складу 1М	0,55	0,67	241	356,5	7,38
			–32,78	–40,25	+5,43
Електродою, виготовленою методом ПМ, складу 1М + БУФО	0,55	0,67	324,1	526,5	6,85
			+1,28	+5,30	–2,14
Електродою, виготовленою з дроту Х20Н80 з СТНС, складу 5% Si + 5% В + 90% вазелін	0,55	0,67	253,3	375,5	7,20
			–26,3	–33,16	+2,86
Електродою, виготовленою з дроту Х20Н80 з СТНС, складу 5% Si + 5% В + 90% вазелін + БУФО	0,55	0,67	341,1	538,2	6,72
			+6,59	+7,64	–4,0
Електродою, виготовленою з твердого стопу ВК6 з СТНС складу 0,5% Si + 0,5% В + 2% Cr + 7% Ni + 90% вазелін	0,55	0,67	250,1	374,3	7,25
			–21,87	–33,58	+3,57
Електродою, виготовленою з твердого стопу ВК6 з СТНС складу 0,5% Si + 0,5% В + 2% Cr + 7% Ni + 90% вазелін + БУФО	0,55	0,67	335,4	532,1	6,79
			+4,81	+6,62	–3,0

(продовження) **ТАБЛИЦЯ 2.** Результати дослідження впливу різних технологій нанесення покриттів на топографію та механічні властивості деталей з високоміцного чавуну ВЧ 50.

(Continuation) **TABLE 2.** The results of the study of the various coating technologies impacts on the topography and mechanical characteristics of parts made of high-strength ВЧ 50 (VCh-50) cast iron.

1	2	3	4	5	6
Електродою, виготовленою методом ПМ, складу 90% ВК6 + 10% 1М	1,3	1,0	211,3	375,3	7,15
			-51,44	53,70	+2,14
Електродою, виготовленою методом ПМ, складу (90% ВК6 + 10% 1М) + БУФО	1,3	1,0	321	506	6,89
			+0,31	+1,20	-1,6
Електродою, виготовленою методом ПМ, складу 1М	1,3	1,0	225,7	349,2	7,17
			-41,78	-43,18	+2,42
Електродою, виготовленою методом ПМ, складу 1М + БУФО	1,3	1,0	321,5	507,1	6,81
			+0,47	+1,42	-2,79
Електродою, виготовленою з дроту Х20Н80 з СТС складу 5% Si + 5% В + 90% вазелін	1,3	1,0	243,3	363,9	7,20
			-31,52	-37,4	+2,86
Електродою, виготовленою з дроту Х20Н80 з СТС складу 5% Si + 5% В + 90% вазелін + БУФО	1,3	1,0	325,1	509,8	6,75
			+1,59	+1,96	-3,70
Електродою, виготовленою з твердого ступу ВК6 з СТС складу 0,5% Si + 0,5% В + 2% Cr + 7% Ni + 90% вазелін	1,3	1,0	245,3	354,2	7,18
			-30,45	-1,16	+2,57

Характер зміни механічних властивостей не змінюється під час нанесення методом ЕІЛ зносостійких покриттів на зразки з високоміцного чавуну ВЧ 50 з використанням ЕІ з дроту Х20Н80 і твердого ступу ВК6 і спеціальних технологічних середовищ складу 5% Si + 5% В + 90% вазелін та твердого ступу ВК6 з СТС складу 0,5% Si + 0,5% В + 2% Cr + 7% Ni + 90% вазелін відповідно.

В даному випадку пониження межі плинності та межі міцності менше і складає 26,3% і 21,87% та 33,16% і 33,58% відповідно, а відносне подовження зростає також менше і складає 2,86% і 3,57%. За подальшого БУФО зростання межі плинності та межі міцності також збільшується, відповідно до 341,1 МПа і 335,4 МПа та 538,2 МПа і 532,1 МПа, а відносне подовження зменшується на 4,0% і 3,0% відповідно. Шерсткість поверхні зменшується до $R_a = 0,8$ мкм і

(продовження) **ТАБЛИЦЯ 2.** Результати дослідження впливу різних технологій нанесення покриттів на топографію та механічні властивості деталей з високоміцного чавуну ВЧ 50.

(Continuation) **TABLE 2.** The results of the study of the various coating technologies impacts on the topography and mechanical characteristics of parts made of high-strength ВЧ 50 (VCh-50) cast iron.

1	2	3	4	5	6
Електродою, виготовленою методом ПМ складу (90% ВК6 + 10% 1М) + БУФО	3,4	2,0	320,5	502,1	6,92
			+0,16	+0,42	-1,16
Електродою, виготовленою методом ПМ складу 1М	3,4	2,0	211,4	325,2	7,18
			-51,37	-5,04	+2,57
Електродою, виготовленою методом ПМ складу 1М + БУФО	3,4	2,0	320,9	503,6	6,83
			+0,28	+0,72	-1,01
Електродою, виготовленою з дроту Х20Н80 з СТНС складу 5% Si + 5% В + 90% вазелін	3,4	2,0	223,3	331,4	7,19
			-43,30	-0,86	+2,86
Електродою, виготовленою з дроту Х20Н80 з СТНС складу 5% Si + 5% В + 90% вазелін + БУФО	3,4	2,0	323,1	505,8	6,89
			+0,97	+1,16	-1,60
Електродою, виготовленою з твердого стопу ВК6 з СТНС складу 0,5% Si + 0,5% В + 2% Cr + 7% Ni + 90% вазелін	3,4	2,0	221,7	330,3	7,19
			-44,34	-1,38	+2,71

0,7 мкм, а суцільність складає 100% і 95% відповідно (табл. 1).

Зі збільшенням енергії розряду до $W_p = 1,3$ Дж і 3,4 Дж і продуктивності ЕІЛ до $Q = 1,0$ см²/хв. і 2,0 см²/хв. відповідно характеристики зміни межі плинності (σ_T), межі міцності (σ_B) і відносного подовження (δ) не змінюються. Межа плинності та межа міцності зменшуються по мірі зростання W_p і Q .

За використання компактних ЕІ 90% ВК6 + 10% 1М і 1М, виготовлених методом ПМ та ЕІ з твердого стопу ВК6 і ніхромового дроту Х20Н80 з використанням СТНС, межа плинності зменшується за $W_p = 1,3$ Дж до 211,3 МПа, 225,7 МПа, а за $W_p = 3,4$ Дж — до 205,3 МПа і 211,4 МПа, межа міцності зменшується за $W_p = 1,3$ Дж до 375,3 МПа і 349,2 МПа, а за $W_p = 3,4$ Дж до 321,2 МПа і 325,2 МПа; відносне подовження водночас збільшується до 7,15% і 7,17% та 7,20% і 7,18% відповідно. Шерсткість поверхневого шару покриття збільшується за $W_p = 1,3$ Дж і продуктивності ЕІЛ у 1,0 см²/хв. до $R_a = 3,7, 3,9, 4,2$ і 4,3 мкм відповідно, а за $W_p = 3,4$ Дж і продуктивності ЕІЛ у 2,0 см²/хв. — до $R_a = 6,0, 6,3, 6,7$ і 7,5 мкм; суцільність

(S) зменшується та складає за $W_p = 1,3$ Дж і продуктивності ЕІЛ $Q = 1,0$ см²/хв. $S = 55, 70, 85$ і 80% , а за $W_p = 3,4$ Дж і продуктивності ЕІЛ $Q = 2,0$ см²/хв. — $S = 45, 50, 70$ і 65% (табл. 1).

Після наступного БУФО межа плинності збільшується за $W_p = 1,3$ Дж до 321 МПа, 321,5 МПа, а за $W_p = 3,4$ Дж — до 325,1 МПа і 324,4 МПа; межа міцності водночас збільшується за $W_p = 1,3$ Дж до 506 МПа, 507,1 МПа, а за $W_p = 3,4$ Дж — до 509,8 МПа і 508,5 МПа; відносне подовження водночас зменшується до 6,89% і 6,81% та 6,75% і 6,59% відповідно. Шерсткість покриття зменшується за $W_p = 1,3$ Дж до 0,8 мкм, 0,8 мкм, 0,9 мкм і 0,9 мкм, а за $W_p = 3,4$ Дж — до $R_a = 1,2$ мкм, 1,3 мкм, 1,4 мкм і 1,5 мкм; водночас суцільність збільшується до 60%, 75%, 85% і 80% та 55%, 65%, 80% і 75% відповідно.

5. ВИСНОВКИ

1. 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 змінюються.
2. Найбільша кількість матеріалу переноситься з початку процесу ЕІЛ, потім процес масоперенесення поступово зменшується, зовсім припиняється та може змінитися руйнуванням нанесеного шару, тобто Δm_k стає від'ємним.
3. Зі збільшенням енергії розряду масоперенесення зростає, але процес руйнування нанесеного шару покриття розпочинається раніше; водночас збільшується шерсткість покриття та зменшується його суцільність.
4. За незмінної енергії розряду за рівні проміжки часу кількість втраченої ваги (ерозії) аноди Δm_a майже не змінюється.
5. Електроіскрове легування ЕІ складу (90% ВК6 + 10% 1М) і 1М, виготовленими методом ПМ, зразків з високоміцного чавуну за $W_p = 0,55$ Дж і $Q = 0,67$ см²/хв. супроводжується пониженням межі плинності (σ_T) і межі міцності (σ_B) на 32,0 і 32,78% і 34,0 і 28,7% відповідно, а відносне подовження (δ) водночас зростає на 5,71 і 5,43%. Шерсткість поверхневого шару збільшується з $R_a = 0,5$ до 3,2 і 3,3 мкм, а суцільність покриття (S) складає 60 і 80% відповідно. Після оброблення БУФО межа плинності та межа міцності збільшуються до 325 і 324,1 МПа та 512 і 526 МПа відповідно, а відносне подовження зменшується до 1,16 і 2,14% відповідно. Шерсткість поверхні зменшується до $R_a = 0,8$ і 0,7 мкм, а суцільність збільшується і складає 70 і 90%.
6. За ЕІЛ зразків з високоміцного чавуну ВЧ 50 ЕІ з дроту Х20Н80 і твердого стопу ВК6 та з використанням СТНС пониження межі плинності та межі міцності менше й складає 26,3 і 21,87% та 33,16

і 33,58% відповідно, а відносне подовження також зменшується та складає 2,86 і 3,57% відповідно. За подальшого БУФО зростання межі плинності та межі міцності збільшуються до 341,1 і 335,4 МПа та 538,2 і 532,1 МПа відповідно, а відносне подовження зменшується на 4,0 і 3,0% відповідно. Шерсткість покриття зменшується до $R_a = 0,8$ і $0,7$ мкм, а суцільність складає 100 і 95% відповідно.

7. Зі збільшенням W_p до 1,3 і 3,4 Дж і використанням компактних ЕІ складу (90% ВК6 + 10% 1М) і 1М, виготовлених методом ПМ, та ЕІ з твердого стопу ВК6 і ніхромового дроту Х20Н80 з використанням СТНС межа плинності зменшується за $W_p = 1,3$ Дж до 211,3 МПа, 225,7 МПа, а за $W_p = 3,4$ Дж — до 205,3 МПа і 211,4 МПа; межа міцності зменшується за $W_p = 1,3$ Дж до 375,3 МПа і 349,2 МПа, а за $W_p = 3,4$ Дж — до 321,2 МПа і 325,2 МПа; відносне подовження водночас збільшується до 7,15 і 7,17% та 7,20 і 7,18% відповідно. Шерсткість поверхневого шару покриття збільшується за $W_p = 1,3$ Дж до $R_a = 3,7, 3,9, 4,2$ і $4,3$ мкм, а за $W_p = 3,4$ Дж — до $R_a = 6,0, 6,3, 6,7$ і $7,5$ мкм. Суцільність (S) зменшується та складає за $W_p = 1,3$ Дж $S = 55, 70, 85$ і 80%, а за $W_p = 3,4$ Дж — $S = 45, 50, 70$ і 65%.

8. Після наступного БУФО межа плинності збільшується за $W_p = 1,3$ Дж до: 321, 321,5, 325,1 і 324,4 МПа, а за $W_p = 3,4$ Дж — до 320,5, 320,9, 323,1 і 322,8; межа міцності збільшується за $W_p = 1,3$ Дж до 506 і 507 МПа, а за $W_p = 3,4$ Дж — до 502,1, 503,6, 505,8 і 504,9 МПа; відносне подовження водночас зменшується до 6,89 і 6,81% та 6,75 і 6,59% відповідно. Шерсткість покриття зменшується за $W_p = 1,3$ Дж до 0,8, 0,8, 0,9 і 0,9 мкм, а за $W_p = 3,4$ Дж — до $R_a = 1,2, 1,3, 1,4$ і $1,5$ мкм, але суцільність 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, виконавець — Сумський державний університет), що фінансується МОН України.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. ДСТУ 3925-99 Чавун з кулястим графітом для виливків. Марки. З поправками (ІПС № 9-2002, ІПС № 8-2006).
2. В. П. Мовчан, М. М. Бережний, *Основи металургії* (Дніпропетровськ: Пороги: 2001).
3. О. К. Антонов, *Українська радянська енциклопедія* (Київ: Головна редакція УРЕ: 1985).

4. Н. А. Калинин, *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, **2**: 19 (2008).
5. М. А. Калін, *Нові матеріали і технології для зварювання чавуну* (Харків: НТМТ: 2009).
6. V. B. Tarelnik, *Materialy VI Konferencji Naukowo-Technicznej TEROTECHNOLOGIA-2009 (Targi-Kielce, 29-30 września 2009)* (Targi-Kielce: 2009), p. 406.
7. Yu. S. Samotugina, B. A. Lyashenko, and O. O. Bezumova, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **43**, No. 8: 1105 (2021).
8. О. П. Шиліна, *Вісник машинобудування та транспорту*, **2**: 115 (2017).
9. Т. А. Гурей, *Вестник ХНАДУ*, **74**: 48 (2016).
10. Т. С. Скобло, О. І. Сідашенко, О. В. Сайчук, *Корпусні деталі з чавунів та їх якісні показники* (Харків: Діса плюс: 2019).
11. A. Sidashenko, O. Tikhonov, S. Luzan, T. Skoblo, N. Pilgui, V. Avetisyan, O. Saychuk, and V. Manilo, *Repair Technology of Machinery and Equipment* (Kharkiv: Co Ltd «PromArt»: 2017).
12. T. Skoblo, S. Romanyuk, and T. Maltsev, *Системи розроблення та постановлення продукції на виробництво. Індустрія 4.0. Сучасний напрямок автоматизації та обміну даними у виробничих технологіях: матеріали II Міжнар. наук.-практ. конф.* (Суми: 2017), p. 62.
13. T. Skoblo, O. Klochko, E. Belkin, and A. Sidashenko, *Int. J. Min. Proc. and Extract. Met.*, **2**, Iss. 3: 34 (2017).
14. Т. С. Скобло, А. К. Автухов, О. І. Сідашенко, О. Ю. Клочко, Ю. Л. Белкін, Р. Г. Соколов, *Спосіб виробництва прокатних валків*, Патент України № 105761UA (Опубліковано 2016).
15. О. І. Сідашенко, О. В. Тіхонов, Т. С. Скобло, О. Д. Мартиненко, О. О. Гончаренко, О. В. Сайчук, В. К. Аветісян, А. К. Автухов, І. М. Рибалко, П. С. Сиромятніков, В. А. Бантковський, В. Л. Маніло, *Практикум з ремонту машин* (Ред. О. І. Сідашенко, О. В. Тіхонов). *Т. 1: Загальний технологічний процес ремонту та технології відновлення і зміцнення деталей машин* (Харків: ТОВ «ПромАрт»: 2018).
16. I. P. Shatskyi, V. V. Perepichka, and L. Ya. Ropyak, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **42**, No. 1: 69 (2020).
17. M. S. Storozhenko, A. P. Umanskii, A. E. Terentiev, and I. M. Zakiev, *Powder Metal. and Metal Ceram.*, **56**, Nos. 1-2: 60 (2017).
18. O. Umanskyi, M. Storozhenko, G. Baglyuk, O. Melnyk, V. Brazhevsky, O. Chernyshov, O. Terentiev, Yu. Gubin, O. Kostenko, and I. Martsenyuk, *Powder Metal. and Metal Ceram.*, **59**, Nos. 7-8: 434 (2020).
19. M. Bembenek, P. Prysyazhnyuk, T. Shihab, R. Machnik, O. Ivanov, and L. Ropyak, *Materials*, **15**, No. 14: 5074 (2022).
20. 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).
21. L. Ropyak, I. Schuliar, and O. Bohachenko, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, **1**, No. 5: 53 (2016).
22. I. Ivasenko, V. Posuvailo, H. Veselivska, and V. Vynar, *International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies*, **2**: 9321900 (2020).
23. M. Bembenek, M. Makoviichuk, I. Shatskyi, L. Ropyak, I. Pritula, L. Gryn, and

- V. Belyakovskiy, *Sensors*, **22**, No. 21: 8105 (2022).
24. M. M. Student, V. M. Dovhunyk, V. M. Posuvailo, I. V. Koval'chuk, and V. M. Hvozdet's'kyi, *Mater. Sci.*, **53**, No. 3: 359 (2017).
25. O. Bazaluk, O. Dubei, L. Ropyak, M. Shovkoplias, T. Pryhorovska, and V. Lozynskiy, *Energies*, **15**, No. 1: 83 (2022).
26. Т. С. Скобло, А. А. Гончаренко, Н. В. Фирсова, А. Н. Легкобыт, *Материалы научно-практической конференции студентов и магистрантов БГАТУ* (2019).
27. A. V. Karakurkchi, *Functional Materials*, **22**, No. 2: 181 (2015).
28. G. S. Yar-Mukhamedova, N. D. Sakhnenko, M. V. Ved', I. Y. Yermolenko, and S. I. Zyubanova, *Mater. Sci. Eng.*, **213**: 012019 (2017).
29. 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).
30. B. Tarelnyk, O. P. Gaponova, Ye. V. Konoplyanchenko, N. S. Yevtushenko, and V. O. Herasymenko, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **40**, No. 6: 795 (2018).
31. V. Tarelnyk, I. Konoplianchenko, O. Gaponova, B. Antoszewski, C. Kundera, V. Martsynkovskyy, M. Dovzhyk, M. Dumanchuk, and O. Vasilenko, *NAP 2019. Springer Proceedings in Physics. Vol. 240* (2019), p. 195.
32. O. Gaponova, Cz. Kundera, G. Kirik, V. Tarelnyk, V. Martsynkovskyy, Ie. Konoplianchenko, M. Dovzhyk, A. Belous, and O. Vasilenko, *Advances in Thin Films, Nanostructured Materials, and Coatings. Lecture Notes in Mechanical Engineering* (Singapore: Springer: 2019).
33. V. Martsynkovskyy, V. Tarelnyk, I. Konoplianchenko, O. Gaponova, and M. Dumanchuk, *Advances in Design, Simulation and Manufacturing II. DSMIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering* (Singapore: Springer: 2020).
34. O. M. Myslyvchenko, O. P. Gaponova, V. B. Tarelnyk, and M. O. Krapivka, *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, **59**, Nos. 3–4: 201 (2020).
35. O. P. Umanskyi, M. S. Storozhenko, V. B. Tarelnyk, O. Y. Koval, Y. V. Gubin, N. V. Tarelnyk, and T. V. Kurinna, *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, **59**, No. 1–2: 57 (2020).
36. N. V. Tarelnyk, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **44**, No. 8: 1037 (2022).
37. В. Б. Тарельник, О. П. Гапонова, Є. В. Коноплянченко, Н. В. Тарельник, М. Ю. Думанчук, В. О. Пирогов, Т. П. Волошко, Д. Б. Глушкова, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **44**, No. 12: 1643 (2022).
38. В. Б. Тарельник, О. П. Гапонова, Є. В. Коноплянченко, Н. В. Тарельник, М. Ю. Думанчук, М. О. Мікуліна, В. О. Пирогов, С. О. Горовий, Н. К. Медведчук, *Металофіз. новітні технол.*, **44**, № 11: 1475 (2022).
39. О. П. Гапонова, Н. В. Тарельник, *Металофіз. новітні технол.*, **44**, № 9: 1103 (2022).
40. В. Б. Тарельник, О. П. Гапонова, Є. В. Коноплянченко, Н. С. Евтушенко, В. О. Герасименко, *Металофіз. новітні технол.*, **40**, № 6: 795 (2018).
41. В. Б. Тарельник, О. П. Гапонова, Г. В. Кирик, Є. В. Коноплянченко, Н. В. Тарельник, М. О. Мікуліна, *Металофіз. новітні технол.*, **42**, № 5: 655 (2020).
42. О. П. Гапонова, В. Б. Тарельник, В. С. Марцинковський, Є. В. Коноплянченко, В. І. Мельник, В. М. Власовець, О. А. Саржанов, Н. В. Тарельник, М. О. Мікуліна, А. Д. Поливаний, Г. В. Кирик,

- A. Б. Баталова, *Металофіз. новітні технол.*, **43**, № 8: 1121 (2021).
43. О. П. Гапонова, В. Б. Тарельник, В. С. Марцинковський, С. В. Коноплянченко, В. І. Мельник, В. М. Власовець, Н. В. Тарельник, В. О. Герасименко, С. Г. Бондарев, А. Б. Баталова, Г. В. Кирик, А. Д. Поливаній, Ю. І. Семирненко, О. В. Рясна, *Металофіз. новітні технол.*, **43**, № 9: 1155 (2021).
44. 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).
45. V. Martsinkovsky, V. Yurko, V. Tarelnik, and Yu. Filonenko, *Procedia Engineering*, **39**: 148 (2012).
46. V. Martsinkovsky, V. Yurko, V. Tarelnik, and Yu. Filonenko, *Procedia Engineering*, **39**: 157 (2012).
47. В. Б. Тарельник, О. П. Гапонова, Е. В. Коноплянченко, В. С. Марцинковский, Н. В. Тарельник, О. А. Василенко, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **41**, No. 2: 173 (2019).
48. В. Б. Тарельник, О. П. Гапонова, Е. В. Коноплянченко, В. С. Марцинковский, Н. В. Тарельник, О. А. Василенко, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **41**, No. 3: 313 (2019).
49. В. Б. Тарельник, О. П. Гапонова, С. В. Коноплянченко, Н. В. Тарельник, М. Ю. Думанчук, М. О. Мікуліна, В. О. Пирогов, С. О. Горовий, Н. К. Медведчук, *Металофіз. новітні технол.*, **44**, № 11: 1475 (2022).
50. B. Antoszewski, O. P. Gaponova, V. B. Tarelnyk, O. M. Myslyvchenko, P. Kurp, T. I. Zhylenko, and I. Konoplianchenko, *Materials*, **14**: 739 (2021).
51. 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).
52. V. Martsynkovskyy, V. Tarelnyk, V. Martsynkovskyy, P. Furmańczyk, and N. Tarelnyk, *AIP Conference Proc.*, **2017**, No. 1: 020017 (2018).
53. 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 (2018).
54. 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).
55. V. Tarelnyk, I. Konoplianchenko, O. Gaponova, B. Sarzhanov, and A. Polyvanyi, *Proc. of the 2022 IEEE 12th International Conference «Nanomaterials: Applications and Properties»—NAP 2022* (2022).
56. V. Tarelnyk, O. Gaponova, V. Martsynkovskyy, T. Voloshko, and O. Semernya, *Proc. of the 2020 IEEE 10th International Conference on «Nanomaterials: Applications and Properties»—NAP 2020*, p. 9309618 (2020).
57. V. Tarelnyk, O. Gaponova, V. Martsynkovskyy, N. Tarelnyk, and A. Polyvanyi, *Proc. of the 2021 IEEE 11th International Conference «Nanomaterials: Applications and Properties»—NAP 2021* (2021).
58. O. P. Gaponova, V. B. Tarelnyk, B. Antoszewski, O. M. Myslyvchenko, and J. Hoffman, *Materials*, **15**, No. 17: 6085 (2022).
59. V. Tarelnyk, I. Konoplianchenko, V. Martsynkovskyy, M. Dovzhyk, M. Dumanchuk, M. Goncharenko, B. Antoszewski, and O. Gaponova, *8th IEEE International Conference on Nanomaterials: Applications and Properties—NAP*

- 2018, p. 03TFNMC26 (2018).
60. О. В. Іванкова, О. В. Гаращук, В. І. Куценко, В. В. Щербина, Д. В. Чижевський, Я. В. Бабич, М. О. Тіхонов, *Вісник ПДАА*, **4**: 283 (2020).
61. M. M. Student, V. M. Hvozdetzkyi, T. R. Stupnytskyi, and Y. V. Dzioba, *Science and Innovation*, **13**, No. 6: 34 (2017).
62. В. М. Гвоздецький, *Вісник Національної академії наук України*, **3**: 79 (2018).
63. Б. А. Ляшенко, Е. К. Соловых, В. И. Мирненко, *Оптимизация технологии нанесения покрытий по критериям прочности и износостойкости* (Киев: ИПП НАНУ: 2010).
64. Т. С. Скобло, Н. Н. Рибалко, А. В. Тихонов, А. Д. Мартиненко, *Технічний сервіс автопромислового, лісового та транспортного комплексів*, **15**: 60 (2019).
65. B. Carcel, J. Sampedro, A. Ruescas, and X. Toneu, *Physics Procedia*, **12**: 353 (2011).
66. A. Guzanova, M. Džupon, D. Draganovská, J. Brezinová, J. Viňal, D. Smorej, E. Janoško, and P. Maruschak, *Acta Metallurgica Slovaca*, **26**, No. 2: 37 (2020).
67. Ф. Х. Бурумкулов, П. П. Лезин, П. В. Сенин, В. И. Иванов, С. А. Величко, П. А. Ионов, *Электроискровые технологии восстановления и упрочнения деталей машин и инструментов (теория и практика)* (Саранск: Красный Октябрь: 2003).
68. V. Tarel'nyk, I. Konoplianchenko, O. Gaponova, and B. Sarzhanov, *Key Engineering Materials*, **864**: 265 (2020).
69. 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).
70. В. Б. Тарельник, О. П. Гапонова, В. І. Мельник, Н. В. Тарельник, В. М. Зубко, В. М. Власовець, Є. В. Конопляченко, С. Г. Бондарев, О. В. Радіонов, М. М. Майфат, В. О. Охріменко, А. В. Ткаченко, *Металофіз. новітні технол.*, **45**, № 5: 663 (2023).

REFERENCES

1. DSTU 3925-99 *Chavun z Kulyastym Grafitom dlya Vylyvkiv. Marky. Z Popravkamy* [Ductile Iron for Castings. Grades. With Amendments] (IPS № 9-2002, IPS № 8-2006) (in Ukrainian).
2. V. P. Movchan and M. M. Berezhnyi, *Osnovy Metalurgii* [Fundamentals of Metallurgy] (Dnipropetrovsk: Porohy: 2001) (in Russian).
3. О. К. Antonov, *Ukrainska Radyanska Ehntsyklopediya* [Ukrainian Soviet Encyclopedia] (Kyiv: Holovna Redaktsiia URE: 1985) (in Ukrainian).
4. N. A. Kalin, *Vostochno-Yevropeiskiy Zhurnal Peredovykh Tekhnologiy*, **2**:19 (2008) (in Russian).
5. M. A. Kalin, *Novi Materialy i Tekhnologii Dlya Zvaryuvannya Chavunu* [New Materials and Technologies for Welding Cast Iron] (Kharkiv: NTMT: 2009) (in Ukrainian).
6. V. B. Tarel'nik, *Materialy VI Konferencji Naukowo-Technicznej TEROTECHNOLOGIA-2009 (Targi-Kielce, 29-30 września 2009)* (Targi-

- Kielce: 2009).
7. Yu. S. Samotugina, B. A. Lyashenko, and O. O. Bezumova, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **43**, No. 8: 1105 (2021) (in Ukrainian).
8. O. P. Shylina, *Visnyk Mashynobuduvannya ta Transportu*, **2**: 115 (2017).
9. T.A. Hurei, *Visnyk KhNADU*, **74**: 48 (2016).
10. T. S. Skoblo, O. I. Sidashenko, and O. V. Saichuk, *Korpusni Detali z Chavuniv ta Yikh Yakisni Pokaznyky* [Useful Cast Iron Parts and Their Quality Indicators] (Kharkiv: Disa plus: 2019) (in Ukrainian).
11. A. Sidashenko, O. Tikhonov, S. Luzan, T. Skoblo, N. Pilgui, V. Avetisyan, O. Saychuk, and V. Manilo, *Repair Technology of Machinery and Equipment*, (Kharkiv: Co Ltd «PromArt»: 2017).
12. T. Skoblo, S. Romanyuk, and T. Maltsev, *Systemy Rozroblennya ta Postanovlennya Produktii na Vyrobnystvo. Industriia 4.0. Suchasnyi Napryamok Avtomatyzatsii ta Obminu Danymy u Vyrobnychykh Tekhnologiyakh: Materialy II Mizhnar. Nauk.-Prakt. Konf.* (Sumy: 2017).
13. T. Skoblo, O. Klochko, E. Belkin, and A. Sidashenko, *International Journal of Mineral Processing and Extractive Metallurgy*, **2**, No. 3: 34 (2017).
14. 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).
15. O. I. Sidashenko, O. V. Tikhonov, T. S. Skoblo, O. D. Martynenko, O. O. Honcharenko, O. V. Saichuk, V. K. Avetisian, A. K. Avtukhov, I. M. Rybalko, P. S. Syromiatnikov, V. A. Bantkovskiy, and V. L. Manilo, *Praktykum z Remontu Mashyn. T. 1: Zagalnyi Tekhnologichnyi Protses Remontu ta Tekhnologii Vidnovlennya i Zmitsnennya Detalei Mashyn* [Workshop on Machine Repair. Vol. 1: General Technological Process of Repair and Technology of Restoration and Strengthening of Machine Parts] (Kharkiv: TOV «PromArt»: 2018) (in Ukrainian).
16. I. P. Shatskyi, V. V. Perepichka, and L. Ya. Ropyak, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **42**, No. 1: 69 (2020) (in Ukrainian).
17. M. S. Storozhenko, A. P. Umanskii, A. E. Terentiev, and I. M. Zakiev, *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, **56**, Nos. 1–2: 60 (2017).
18. 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).
19. M. Bembenek, P. Prysyazhnyuk, T. Shihab, R. Machnik, O. Ivanov, and L. Ropyak, *Materials*, **15**, No. 14: 5074 (2022).
20. 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).
21. L. Ropyak, I. Schuliar, and O. Bohachenko, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, **1**, No. 5: 53 (2016) (in Ukrainian).
22. I. Ivasenko, V. Posuvailo, H. Veselivska, and V. Vynar, *International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies*, **2**: 9321900 (2020).
23. M. Bembenek, M. Makoviichuk, I. Shatskyi, L. Ropyak, I. Pritula, L. Gryn, and V. Belyakovskiy, *Sensors*, **22**, No. 21: 8105 (2022).
24. M. M. Student, V. M. Dovhunyk, V. M. Posuvailo, I. V. Koval'chuk, and

- V. M. Hvozdet's'kyi, *Mater. Sci.*, **53**, No. 3: 359 (2017).
25. O. Bazaluk, O. Dubei, L. Ropyak, M. Shovkoplias, T. Pryhorovska, and V. Lozynskyi, *Energies*, **15**, No. 1: 83 (2022).
26. T. S. Skoblo, A. A. Goncharenko, N. V. Firsova, and A. N. Legkobyt, *Materialy Nauchno-Prakticheskoy Konferentsii Studentov i Magistrantov BGATU* [Materials of the Scientific and Practical Conference of Students and Graduate Students BGATU] (2019) (in Russian).
27. A. V. Karakurkchi, *Functional Materials*, **22**, No. 2: 181 (2015).
28. G. S. Yar-Mukhamedova, N. D. Sakhnenko, M. V. Ved', I. Y. Yermolenko, and S. I. Zyubanova, *Mater. Sci. Eng.*, **213**: 012019 (2017).
29. 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).
30. B. Tarelnyk, O. P. Gaponova, Ye. V. Konoplyanchenko, N. S. Yevtushenko, and V. O. Herasymenko, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **40**, No. 6: 795 (2018).
31. V. Tarelnyk, I. Konoplianchenko, O. Gaponova, B. Antoszewski, C. Kundera, V. Martsynkovskyy, M. Dovzhyk, M. Dumanchuk, and O. Vasilenko, *NAP 2019. Springer Proceedings in Physics. Vol. 240* (2019), p. 195.
32. O. Gaponova, Cz. Kundera, G. Kirik, V. Tarelnyk, V. Martsynkovskyy, Ie. Konoplianchenko, M. Dovzhyk, A. Belous, and O. Vasilenko, *Advances in Thin Films, Nanostructured Materials, and Coatings. Lecture Notes in Mechanical Engineering* (Singapore: Springer: 2019).
33. V. Martsynkovskyy, V. Tarelnyk, I. Konoplianchenko, O. Gaponova, and M. Dumanchuk, *Advances in Design, Simulation and Manufacturing II. DSMIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering* (Singapore: Springer: 2020).
34. O. M. Myslyvchenko, O. P. Gaponova, V. B. Tarelnyk, and M. O. Krapivka, *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, **59**, Nos. 3–4: 201 (2020).
35. O. P. Umanskyi, M. S. Storozhenko, V. B. Tarelnyk, O. Y. Koval, Y. V. Gubin, N. V. Tarelnyk, and T. V. Kurinna, *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, **59**, Nos. 1–2: 57 (2020).
36. N. V. Tarelnyk, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **44**, No. 8: 1037 (2022).
37. V. B. Tarelnyk, O. P. Gaponova, Ie. V. Konoplianchenko, N. V. Tarelnyk, M. Yu. Dumanchuk, V. O. Pirogov, T. P. Voloshko, and D. B. Hlushkova, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **44**, No. 12: 1643 (2022) (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. O. P. Gaponova and N. V. Tarelnyk, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **44**, No. 9: 1103 (2022) (in Ukrainian).
40. 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).
41. V. B. Tarelnyk, O. P. Gaponova, G. V. Kirik, Ye. V. Konoplyanchenko, N. V. Tarelnyk, M. O. Mikulina, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **42**, No. 5: 655 (2020) (in Ukrainian).
42. 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 Uk-

- rainian).
43. O. P. Gaponova, V. B. Tarelnyk, V. S. Martsynkovskyy, Y. I. Semirnenko, and O. V. Ryasnaya, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **43**, No. 9: 1155 (2021) (in Ukrainian).
44. 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).
45. V. Martsinkovsky, V. Yurko, V. Tarelnik, and Yu. Filonenko, *Procedia Engineering*, **39**: 148 (2012).
46. V. Martsinkovsky, V. Yurko, V. Tarelnik, and Yu. Filonenko, *Procedia Engineering*, **39**: 157 (2012).
47. 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).
48. 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).
49. V. B. Tarelnyk, O. P. Gaponova, Ie. V. Konoplianchenko, S. O. Gorovoy, and N. K. Medvedchuk, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **44**, No. 11: 1475 (2022) (in Ukrainian).
50. B. Antoszewski, O. P. Gaponova, V. B. Tarelnyk, O. M. Myslyvchenko, P. Kurp, T. I. Zhylenko, and I. Konoplianchenko, *Materials*, **14**: 739 (2021).
51. 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).
52. V. Martsynkovskyy, V. Tarelnyk, V. Martsynkovskyy, P. Furmańczyk, and N. Tarelnyk, *AIP Conference Proc.*, **2017**, No. 1: 020017 (2018).
53. 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 (2018).
54. 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).
55. V. Tarelnyk, I. Konoplianchenko, O. Gaponova, B. Sarzhanov, and A. Polyvanyi, *Proc. of the 2022 IEEE 12th International Conference «Nanomaterials: Applications and Properties»—NAP 2022* (2022).
56. V. Tarelnyk, O. Gaponova, V. Martsynkovskyy, T. Voloshko, and O. Semernya, *Proc. of the 2020 IEEE 10th International Conference on «Nanomaterials: Applications and Properties»—NAP 2020*, p. 9309618 (2020).
57. V. Tarelnyk, O. Gaponova, V. Martsynkovskyy, N. Tarelnyk, and A. Polyvanyi, *Proc. of the 2021 IEEE 11th International Conference «Nanomaterials: Applications and Properties»—NAP 2021* (2021).
58. O. P. Gaponova, V. B. Tarelnyk, B. Antoszewski, O. M. Myslyvchenko, and J. Hoffman, *Materials*, **15**, No. 17: 6085 (2022).
59. V. Tarelnyk, I. Konoplianchenko, V. Martsynkovskyy, M. Dovzhyk, M. Dumanchuk, M. Goncharenko, B. Antoszewski, and O. Gaponova, *8th IEEE International Conference on Nanomaterials: Applications and Properties—NAP 2018*, p. 03TFNMC26 (2018).
60. O. V. Ivankova, O. V. Harashchuk, V. I. Kutsenko, V. V. Shcherbyna,

- D. V. Chyzhevs'kyi, Ya. V. Babych, and M. O. Tikhonov, *Visnyk PDAA*, **4**: 283 (2020).
61. M. M. Student, V. M. Hvozdet'skyi, T. R. Stupnytskyi, and Y. V. Dzioba, *Science and Innovation*, **13**, No. 6: 34 (2017).
62. V. M. Gvozdecki, *Visnik Nacional'noi Akademii Nauk Ukrainy*, **3**: 79 (2018) (in Ukrainian).
63. B. A. Lyashenko, Ye. K. Solovykh, and V. I. Mirnenko, *Optimizatsiya Tekhnologii Naneseniya Pokrytiy po Kriteriyam Prochnosti i Iznosostoykosti* [Optimization of Coating Application Technology According to Durability and Wear Resistance Criteria] (Kyiv: IPP NANU: 2010) (in Russian).
64. T. S. Skoblo, N. N. Rybalko, A. V. Tykhonov, and A. D. Martynenko, *Tekhnichnyy Servis Agropromyslovoho, Lisovoho ta Transportnoho Kompleksiv*, **15**: 60 (2019) (in Ukrainian).
65. B. Carcel, J. Sampedro, A. Ruescas, and X. Toneu, *Physics Procedia*, **12**: 353 (2011).
66. A. Guzanova, M. Džupon, D. Draganovská, J. Brezinová, J. Viňáš, D. Cmorej, E. Janoško, and P. Maruschak, *Acta Metallurgica Slovaca*, **26**, No. 2: 37 (2020).
67. F. Kh. Burumkulov, P. P. Lezin, P. V. Senin, V. I. Ivanov, S. A. Velichko, and P. A. Ionov, *Ehlektriskrovyie Tekhnologii Vosstanovleniya i Uprochneniya Detaley Mashin i Instrumentov (Teoriya i Praktika)* [Electrospark Technologies for Restoration and Hardening of Parts of Machines and Tools (Theory and Practice)] (Saransk: Krasnyy Oktyabr': 2003) (in Russian).
68. V. Tarelnyk, I. Konoplianchenko, O. Gaponova, and B. Sarzhanov, *Key Engineering Materials*, **864**: 265 (2020).
69. 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).
70. 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).