Metallophysics and Advanced Technologies
Металофіз. новітні технол.
Metallofiz. Noveishie Tekhnol.
2023, vol. 45, No. 5, pp. 663–686
https://doi.org/10.15407/mfint.45.05.0663
Reprints available directly from the publisher

© 2023 G. V. Kurdyumov Institute for Metal Physics,
National Academy of Sciences of Ukraine
Published by license under
the G. V. Kurdyumov Institute for Metal Physics–
N.A.S. of Ukraine Publishers imprint.
Printed in Ukraine.

PACS numbers: 61.72.Ff, 62.20.Qp, 68.35.Ct, 68.35.Gy, 68.55.J-, 81.15.Rs, 81.40.Pq

Властивості поверхонь деталів із криці зі зносостійкими покриттями складу 1М і 90% ВК6 + 10% 1М, нанесеними методом електроіскрового леґування з використанням спеціяльних технологічних середовищ. Ч. 1. Особливості структурного стану зміцнених поверхонь

В. Б. Тарельник, О. П. Гапонова[*], В. І. Мельник[**], Н. В. Тарельник, В. М. Зубко, В. М., Власовець[***], Є. В. Коноплянченко, С. Г. Бондарев, О. В. Радіонов, М. М. Майфат, В. О. Охріменко[*], А. В. Ткаченко

Сумський національний аграрний університет,
вул. Герасима Кондратьєва, 160,
40021 Суми, Україна
[*] *Сумський державний університет,*
вул. Римського-Корсакова, 2,
40007 Суми, Україна
[**] *Державний біотехнологічний університет,*
вул. Алчевських, 44,
61002 Харків, Україна

Corresponding author: Oksana Petrivna Gaponova
E-mail: gaponova@pmtkm.sumdu.edu.ua

Sumy National Agrarian University,
160 Herasim Kondratiev Str., UA-40021 Sumy, Ukraine
[*] *Sumy State University,*
2, Rymsky-Korsakov Str., UA-40007 Sumy, Ukraine
[**] *State Biotechnological University,*
44 Alchevskikh Str., UA-61002 Kharkiv, Ukraine
[***] *Lviv National University of Nature Management,*
1, Volodymyr Velykyi Str., UA-30831 Dublyany, Lviv Region, Ukraine

Citation: 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, Properties of Surfaces of Steel Parts with Wear-Resistant Coatings of the 1M and 90% ВК6 + 10% 1M Composition Applied by the Method of Electrospark Alloying Using Special Technological Media. Pt. 1. Features of the Structural State of Strengthened Surfaces, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **45**, No. 5: 663–686 (2023) (in Ukrainian). DOI:10.15407/mfint.45.05.0663

*** *Львівський національний університет природокористування,*
вул. Володимира Великого, 1,
30831 Дубляни, Львівська область, Україна

В статті описано новий спосіб формування захисних покриттів деталів із криці, що працюють в умовах абразивного зношування як в загальному машинобудуванні складу 90% ВК6 + 10% 1М, так і на виробництвах, де може бути радіяційне опромінення — 1М (70% Ni, 20% Cr, 5% Si, 5% B), шляхом нанесення їх методом електроіскрового леґування (ЕІЛ) компактними електродами-інструментами з ніхромового дроту Х20Н80 і твердого стопу ВК6 та використання спеціяльних технологічних середовищ (СТС), в склад яких входять необхідні леґувальні елементи. В результаті проведених досліджень встановлено, що поверхневі шари із криць 45 і Р6М5 після нанесення зносостійких покриттів мають структуру, яка складається з трьох ділянок: «білий шар», перехідна зона нижче й основний метал. Із збільшенням енергії розряду (Wp) від 0,52 до 2,6 Дж зростають товщини «білого шару» та перехідної зони, їхні мікротвердість і шерсткість поверхні, але суцільність нанесеного покриття зменшується. Найвища мікротвердість у 9750–12800 і 14250–14600 МПа відповідає покриттям, сформованим на крицях 45 і Р6М5 відповідно за ЕІЛ компактними електродами-інструментами з твердого стопу ВК6 і СТС складу 0,5% Si + 0,5% B + 2% Cr + 7% Ni + 90% вазелін.

Ключові слова: електроіскрове леґування, електрод-інструмент, покриття, «білий шар», мікротвердість, шерсткість, суцільність.

The article describes a new method of forming the protective coatings of steel parts operating under conditions of abrasive wear both in general mechanical engineering, the composition of which is of 90% ВК6 + 10% 1М, and in industries, where there may be radiation exposure and the composition of 1М (70% Ni, 20% Cr, 5% Si, 5% B), by applying them by the method of electrospark alloying (ESA) with compact electrodes-tools made of nichrome wire Х20Н80 and ВК6 hard alloy and using special technological media (STM), which include the necessary alloying elements. As a result of these research, it is established that the surface layers of the 45 and Р6М5 steels after applying wear-resistant coatings have a structure that consists of three areas: the ‘white layer’, the transition zone below, and the base metal. When the discharge energy (Wp) increases from 0.52 to 2.6 J, the thicknesses of the ‘white layer’ and the transition zone, their microhardness and surface roughness increase, but the integrity of the applied coating decreases. The highest microhardness of 9750–12800 and 14250–14600 MPa corresponds to the coating formed on steel 45 and Р6М5, respectively, during ESA by means of both the compact electrodes-tools made of hard alloy ВК6 and the STM with the composition of 0.5% Si + 0.5% B + 2% Cr + 7% Ni + 90% Vaseline.

Key words: electrospark alloying, electrode tool, coating, ‘white layer’, microhardness, roughness, continuity.

(Отримано 7 квітня 2023 р.; остаточн. варіянт — 13 квітня 2023 р.)

1. ВСТУП

Безперервний процес науково-технічного проґресу супроводжується появою нових більш досконалих машин і механізмів, експлуатація яких відбувається за більш жорстких режимних параметрів (температур, тисків, швидкостей), а також у аґресивніших навколишніх середовищах.

Зміна умов експлуатації обладнання тягне за собою підвищення вимог до якости деталів, що його складають. Враховуючи те, що під впливом різних неґативних чинників руйнування деталів починається з поверхні, зростають вимоги до якости її поверхневого шару: шерсткости, хвилястости, мікротвердости, залишкових напружень, утомної міцности та ін.

Отже, розв'язання завдань, пов'язаних з підвищенням якости поверхонь деталів, розробка методів управління окремими її параметрами є актуальними та своєчасними.

2. АНАЛІЗА ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Висока продуктивність праці має поєднуватися з високою якістю та відсутністю браку продукції [1]. Особлива увага приділяється якості поверхонь та механічним властивостям деталів обладнання, надійна робота якого пов'язана з безпекою та здоров'ям людей, наприклад деталів машин і механізмів, що працюють в умовах радіяційного опромінювання [2, 3]. Ще на стадії технологічної підготовки виробництва, під час механічного обробляння технологи приділяють велику увагу точності позиціонування заготовки на верстатах [4], вивченню вільних і вимушених коливань складної механічної системи «пристосування–заготовка» [5–7]. Питання підвищення якости робочих поверхонь деталів машин і механізмів, конструювання їхніх поверхневих шарів може бути вирішено геометричними методами. Так, у [8] складено диференційні рівняння руху гнучкої стрічки, що не стискується з прямокутнім перерізом вздовж внутрішньої шерсткої поверхні горизонтального циліндру. Стрічка рухається із заданою постійною швидкістю вгору перпендикулярно твірним циліндра, тобто траєкторією її руху є переріз циліндра.

Є роботи, присвячені руху частинки під дією сили власної ваги по шерсткій ґвинтовій поверхні, утвореній ґвинтовим рухом синусоїди, що розташована у вертикальній площині і є осьовим перерізом ґвинтової поверхні [9], по сферичному сеґменту, який обертається навколо вертикальної осі [10], по хвилястій поверхні з перерізом у вигляді синусоїди [11], по внутрішній поверхні горизонтального сферичного диска [12].

З метою підвищення якости поверхневих шарів виробів, крім по-

ліпшення геометричних параметрів, велику увагу приділяють нанесенню захисних покриттів, широкий набір яких визиває між ними конкуренцію й ускладнення вибору ліпшого матеріялу та більш раціональної технології нанесення їх.

Найбільш затребуваними технологіями для нанесення захисних покриттів вважаються: напорошення твердими зносостійкими матеріялами [13–15], лазерне оброблення [16–19], нанесення нанокомпозитів [20]. Для захисту деталів від абразивного зносу використовують шлікерні покриття зносостійкими матеріялами [21]. Відомо про зносостійке спечене покриття, в якому наповнювачем служить твердостопна суміш ВК-6, а легкотопким зв'язувальним — твердий розчин системи Ni–Cr–Si–B. Покриття наносять на поверхні деталів шлікерним методом з наступним відпалом у вакуумі. Серед шляхів поліпшення якости поверхневого шару деталів за рахунок зміцнення їхніх поверхневих шарів особливе місце займає хеміко-термічне оброблення (ХТО) [22–25] та ін.

Серед розглянутих методів відновлення деталів великої уваги заслуговує електроіскрове леґування (ЕІЛ), яке є екологічно безпечним, а останнім часом все частіше використовується в ремонтному виробництві [26–30]. Метод має ряд специфічних особливостей: матеріял аноди (матеріял, яким леґують) може утворювати на поверхні катоди (поверхня, яку леґують) шар покриття, надзвичайно міцно зчеплений з поверхнею. У цьому випадку не тільки відсутня межа поділу між нанесеним матеріялом і металом основи, але й відбувається дифузія елементів аноди в катоду [31]; леґування можна здійснювати у зазначених місцях (радіюсом від часток міліметра та більше), не захищаючи решту поверхні деталю; технологія електроіскрового леґування металевих поверхонь дуже проста, а необхідна апаратура є компактною і транспортабельною.

Поряд з низкою переваг, основними з яких є міцне зчеплення перенесеного матеріялу з основою, підвищення твердости, корозійної стійкости, зносо- та жаростійкости поверхонь, метод електроіскрового леґування має і низку недоліків (збільшення шерсткости поверхні, виникнення в поверхневому шарі розтягувальних напружень, зменшення утомної міцности та ін.), які істотно ускладнюють його використання.

Усунути недоліки електроіскрового леґування можна шляхом чергування твердих зносостійких і м'яких антифрикційних матеріялів [32, 33] і виготовленням нових електродних матеріялів (а. с. 806338, МКИ 23 Р 1/12; а.с. 833418, МКИ 23 Р 1/18; а. с. 1106623, МКИ 23 Р 1/12; а. с. 1488142, МКИ В 23 Н 1/06; а. с. 1488338, МКИ В 23 Н 1/06; а. с. 1098740, МКИ 23 Р 1/18; а. с. 412274, МКИ С; а. с. 377387, МКИ С 22с 27/00).

З метою застосування електродами для електроіскрового леґування нових композиційних зносостійких матеріялів, одержаних

за допомогою порошкової металургії, досліджувалися матеріяли, що складаються з тонкодисперсної суміші 1М (70% Ni, 20% Cr, 5% Si, 5% B) і ВК6. Найперспективнішим є леґування електродою з матеріялу складу 90% ВК6 + 10% 1М, що уможливлює формувати поверхневий шар з мікротвердістю до 14200 МПа. Із застосуванням електрод з тонкодисперсної суміші 1М мікротвердість сягає 11500 МПа. Підшар з індію, понижуючи шерсткість покриття (з $Ra = 3{,}5$–$4{,}2$ мкм до $Ra = 0{,}6$–$0{,}9$ мкм), незначно понижує його мікротвердість, але ж вона залишається на достатньо високому рівні — відповідно, 13250 і 12250 МПа [34].

В останні декілька років стали з'являтися статті, в яких з метою удосконалення методу електроіскрового леґування додаткове леґування поверхневого шару корисними елементами відбувається за рахунок спеціяльних технологічних середовищ (СТС), які попередньо наносяться на поверхню, що леґується, у вигляді паст чи суспензій [35–37].

Аналіза літературних і патентних джерел показала, що для підвищення якости поверхонь деталів є багато технологічних методів, пов'язаних зі зміцненням поверхневого шару, нанесенням захисних покриттів, механічним обробленням, дослідженням геометрії руху контактувальних поверхонь та ін. Показано, що одним з перспективних методів нанесення покриттів є електроіскрове леґування. Удосконалення технології ЕІЛ за рахунок виготовлення електродів-інструментів методом порошкової металургії дало змогу наносити на поверхні деталів, що в процесі роботи підлягають абразивному зносу, зносостійкі покриття складу 1М і 90% ВК6 + 10% 1М, які раніше наносили шлікерним методом, що має багато значних недоліків. Вироби, оброблені шлікерним методом, мають недостатню надійність і довговічність внаслідок того, що через руйнування сформованого шлікерного покриття відбувається відмова їхньої працездатности. Всі методи контролю формування шлікерних покриттів не можуть дати повної гарантії якости зчеплення нанесеного матеріялу з підкладинкою. Як правило, перед нанесенням шлікерного покриття проводиться очищення поверхні. На ділянках фактичного контакту поверхонь діють сили молекулярного притягання.

Перехідний шар, який зумовлює міцний механічний зв'язок, відсутній, що неґативно впливає на якість адгезії в цілому. Крім того, вказаний спосіб є достатньо дорогим і трудомістким через процеси виготовлення, нанесення та відпалу покриттів. Незважаючи на це, слід відмітити, що технологія електроіскрового леґування з використанням електрод-інструментів з матеріялів складу 1М і 90% ВК6 + 10% 1М є значно ліпшою від нанесення їх шлікерним методом, але процедура виготовлення електроди методом порошкової металургії також є дуже складною, енергоємною, довготривалою та достатньо вартісною.

Суміш 1М готується з тонкодисперсних порошків Ni, Cr, Si, B із розмірами частинок трохи більше 40 мкм. Порошки просушуються в сушильних шафах за 150–200°С, просіюються через сито 0075, завантажується необхідна кількість їх згідно з рецептурою в спеціяльний змішувач і проводиться механічне змішування упродовж 24 год. Для приготування суміші ВК6 використовується готова твердостопна суміш типу ВК6; вона просушується у вакуумі з розрідженням не менше $1 \cdot 10^{-1}$ мм рт. ст. за 150°С, потім просіюється через сито 0075. Після того, як твердостопна та самофлюсувальна суміші готові, їх завантажують у змішувач і піддають спільному сухому механічному змішуванню упродовж 24 год. у співвідношенні 90% ВК6 + 10% 1М. Потім суміші замішуються з пластифікатором (5%-розчин синтетичного каучуку в бензині). Заготовки необхідних розмірів пресуються у формах (тиск пресування — 0,7–1,0 т/см^2), які потім спікаються за 1400–1500°С у захисній атмосфері (водень) печі будь-якої системи, що уможливлює забезпечити задану температуру.

Крім цього, з літературних джерел відомо, що на підприємствах, обладнання яких працює в умовах радіяційного опромінювання, під час виготовлення та відновлення деталів виробів не допускається використання Кобальту [38–40]. Так, у [41] відзначається, що задля вибору конструкційних матеріялів для ядерних енергетичних установок різних типів з метою пониження впливу перенесених активних продуктів корозії на умови ремонту устаткування першого контуру в ряді випадків додатково реґламентується вміст елементів у криці, які під час опромінювання стають джерелом небезпечних довгоіснуючих ізотопів. Насамперед, це стосується Кобальту. Також відомо, що Кобальт, який має великий період напіврозпаду, неприпустимо використовувати в ущільненнях насосів атомних електростанцій.

Якщо замість кобальтової зв'язки використано нікель, то подібні явища не відбуваються [42]. Згідно з [43], хемічний склад матеріялів деталів, що стикаються з теплоносієм, не містить спеціяльних добавок Кобальту й інших елементів, що утворюють довгоіснуючі ізотопи в активному робочому середовищі. В ядерній енергетиці для створення циркуляції теплоносія використовують головні циркуляційні насоси з допоміжними насосами до них. Усі деталі та вузли, які стикаються з теплоносієм, виготовлено із криць, стійких проти корозії й ерозії.

У [44] описано композитний матеріял для радіяційного захисту, в якому як наповнювач полістирольної матриці використано порошки вольфраму й алюмінію. В [45–48] описано результати досліджень впливу високоточного електронного пучка під час опромінювання поверхневих шарів металів і стопів з метою поліпшення їхньої якости.

Таким чином, представляє як науковий, так і практичний інте-

рес дослідити параметри якости та властивості поверхневих шарів складу 90% ВК6 + 10% 1М, в який входить Кобальт і 1М (70% Ni, 20% Cr, 5% Si, 5% B), сформованих на крицевих підкладинках, які можуть бути корисними для захисту поверхневих шарів, як в загальному машинобудуванні, так і на виробництвах, де може бути радіяційне опромінювання.

На наш погляд, технологію нанесення зносостійких покриттів методою ЕІЛ з використанням електрод-інструментів складу 1М і 90% ВК6 + 10% 1М, які виготовляють шляхом порошкової металургії, можна удосконалити за рахунок використання спеціяльних технологічних середовищ, що попередньо наносяться на поверхню, яка леґується.

Таким чином, метою роботи є удосконалення технології нанесення методом ЕІЛ на поверхні деталів із криці, що працюють в умовах абразивного зношування, зносостійких покриттів складу 1М (70% Ni, 20% Cr, 5% Si, 5% B) і 90% ВК6 + 10% 1М електродами-інструментами, виготовленими технологіями порошкової металургії, шляхом розробки нового способу нанесення їх методом електроіскрового леґування компактними електродами-інструментами з ніхромового дроту Х20Н80 і з твердого стопу ВК6 за рахунок використання спеціяльних технологічних середовищ, в склад яких входять необхідні леґувальні елементи.

3. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Для дослідження структури та вимірювання мікротвердости поверхневого шару використовували шліфи зразків криць 45 і Р6М5 розміром 10×10×8 мм.

Середньовуглецева нелеґована криця 45 застосовувалася для досліджень у поліпшеному стані з твердістю основи 280 *HB* та сорбітною структурою.

Швидкорізальна криця Р6М5 — це високо- та складнолеґована криця, де сума леґувальних елементів сягає 16–18%. Вона містить у собі такі леґувальні елементи, як W, Mo, Cr, V. Твердість цих зразків після остаточного термооброблення становила до 64 *HRC*.

Електроіскрове леґування зразків відбувалося з енергією розряду та з продуктивністю згідно з табл. 1 на установці з ручним вібра-

ТАБЛИЦЯ 1. Залежність продуктивности ЕІЛ від енергії розряду.

TABLE 1. Dependence of ESA performance on discharge energy.

Енергія розряду (Wp), Дж	0,52	1,3	2,6
Продуктивність, см^2/хв	1,0	1,5	2,0

тором «Елітрон-52А».

В якості електрод-інструментів використовували ніхромовий дріт Х20Н80 ∅3 мм і пластини розміром 2×3×30 мм з твердого стопу ВК6.

За електроіскрового леґування електродами з ніхромового дроту Х20Н80 на зразки попередньо наносили СТС згідно з 2 варіянтами:
1-й складу 5% Si + 5% B + 90% вазелін;
2-й складу 0,5% Si + 0,5% B + 59% ВК6 + 40% вазелін.

За ЕІЛ електродами з твердого стопу ВК6 на зразки попередньо наносили СТС складу 0,5% Si + 0,5% B + 2% Cr + 7% Ni + 90% вазелін.

Порошки для СТС в необхідній кількості ретельно перемішували з вазеліном і наносили на поверхню зразків. Після цього, не чекаючи висихання, проводили електроіскрового леґування.

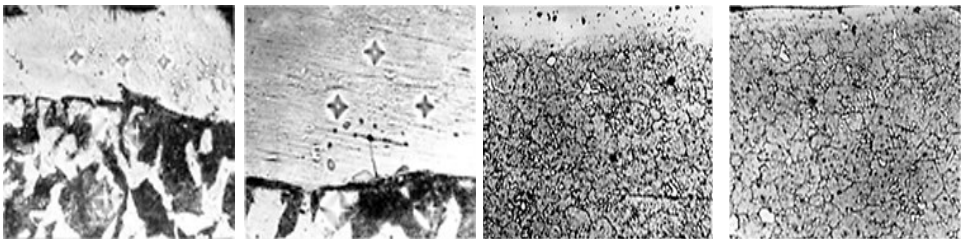
У металографічних дослідженнях поверхню шліфу орієнтують перпендикулярно поверхні леґування. Перед виготовленням шліфу для виключення крайового ефекту під час леґування торець зразка фрезерували на глибину не менше 2 мм. Для попередження зминання шару, завалів краю зразок кріпили з контртілом у струбцині.

Для виявлення структури шліф зазнавав хемічного щавлення у реактиві.

Після виготовлення шліфи досліджували на оптичному мікроскопі «Неофот-2», де проводилася оцінка якости шару, його суцільности, товщини та будови зон підшару — дифузійної зони та зони термічного впливу.

Також проводили дюрометричну аналізу розподілу мікротвердости у поверхневому шарі та по глибині шліфу від поверхні. Вимірювання мікротвердости проводили на мікротвердомірі ПМТ-3 шляхом вдавлювання алмазної піраміди під навантаженням у 0,05 Н.

Шерсткість вимірювали на приладі профілограф-профілометр



а *б* *в* *г*

Рис. 1. Мікроструктури поверхневого шару зразків криць 45 (*а* і *б*) і Р6М5 (*в* і *г*) після ЕІЛ електродою-інструментом, виготовленим шляхом порошкової металурґії з матеріялу 90% ВК6 + 10% 1М (*а* і *в*) і 1М (*б* і *г*); ×400.

Fig. 1. Microstructures of the surface layer of samples of steels 45 (*а* and *б*) and Р6М5 (*в* and *г*) after ESA with a tool electrode made of the material 90% ВК6 + 10% 1М (*а* and *в*) and 1М (*б* and *г*) by powder metallurgy; ×400.

мод. 201 заводу «Калібр» шляхом зняття й обробки профілограм.

4. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

На рисунку 1 зображено ділянки структури поверхневого шару зразків криці 45 (*а* і *б*) і криці Р6М5 (*в* і *г*) після електроіскрового леґування електродою-інструментом, виготовленим шляхом порошкової металурґії з матеріялу 90% ВК6 + 10% 1М (*а*, *б*) і 1М (*в*, *г*) з енергією розряду $Wp = 0{,}42$ Дж і продуктивністю у 1,0 см^2/хв.

Аналіза структур показує, що поверхневі шари криці 45 і швидкорізальної криці Р6М5 з покриттями, нанесеними методом ЕІЛ, традиційно, у міру поглиблення, складаються з трьох ділянок: «білий шар», перехідна зона й основний метал.

На рисунку 2, *а*, *б*, *в* показано мікроструктури поверхневого ша-

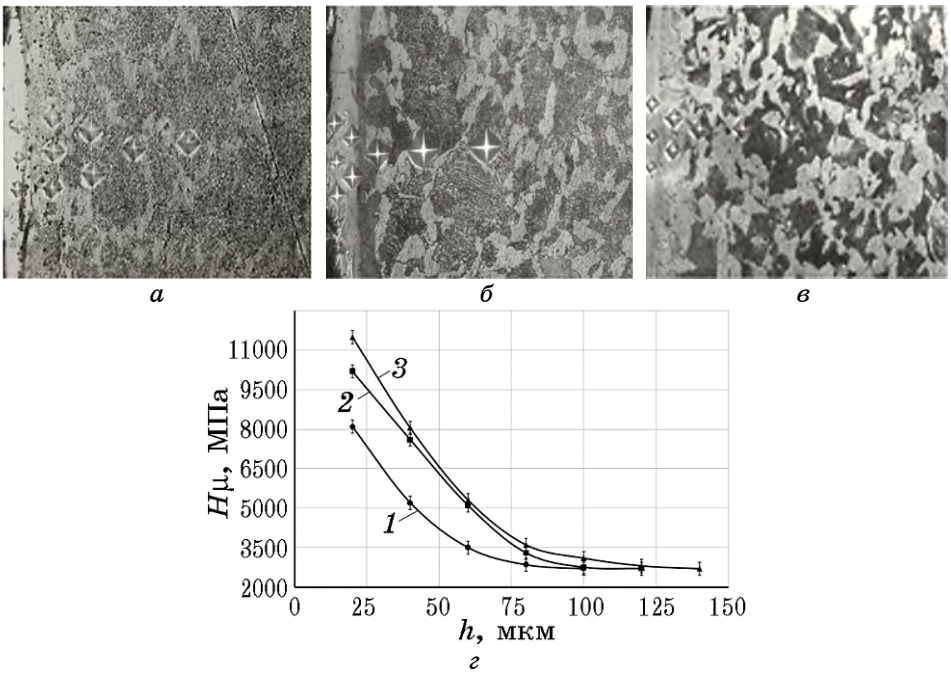


Рис. 2. Мікроструктури (*а*, *б*, *в*) та розподіл мікротвердости (*г*) по глибині поверхневого шару криці 45 після ЕІЛ електродою-інструментом з ніхрому (Х20Н80) з використанням СТС складу 5% Si + 5% B + 90% вазелін із $Wp = 0{,}52$, 1,30 і 2,60 Дж (графіки *1*, *2* і *3* відповідно).

Fig. 2. Microstructures (*а*, *б*, *в*) and distribution of microhardness (*г*) along the depth of the surface layer of steel 45 after ESA with a nichrome (X20H80) tool electrode using STE composition 5% Si + 5% B + 90% Vaseline at $Wp = 0.52$, 1.30 and 2.60 J (graphs *1*, *2* and *3*, respectively).

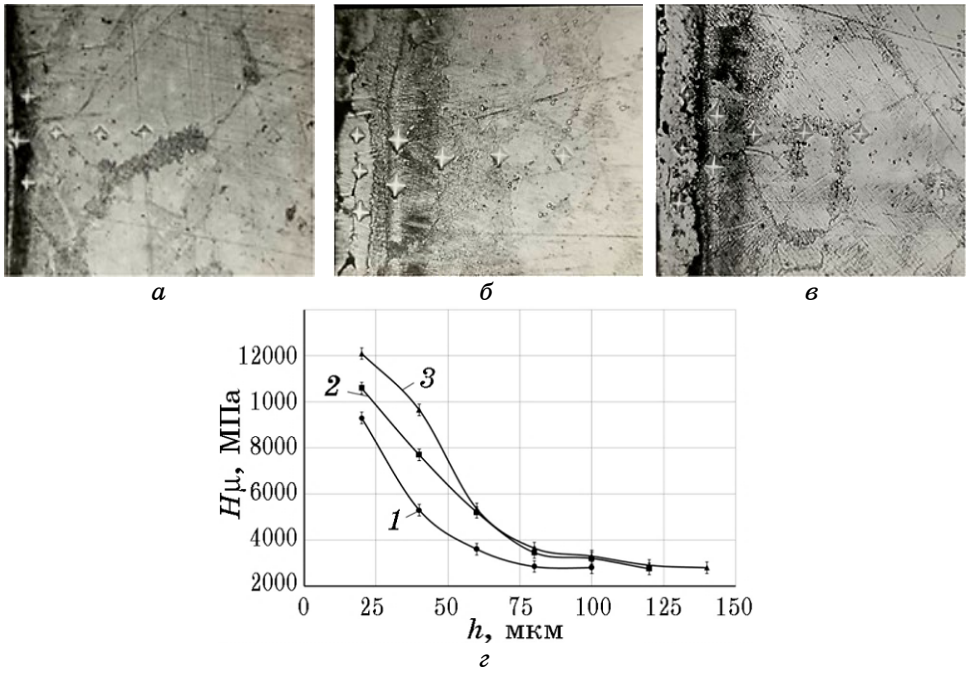


Рис. 3. Мікроструктури (*а*, *б*, *в*) і розподіл мікротвердости (*г*) по глибині поверхневого шару криці 45 після електроіскрового леґування електродою-інструментом з ніхрому (Х20Н80) з використанням СТС складу 0,5% Si + 0,5% B + 59% ВК6 + 40% вазелін із $Wp = 0{,}52$, 1,30 і 2,60 Дж (графіки *1*, *2* і *3* відповідно); ×400.

Fig. 3. Microstructures (*а*, *б*, *в*) and distribution of microhardness (*г*) along the depth of the surface layer of steel 45 after ESA with a nichrome (X20H80) tool electrode using STE composition 0.5% Si + 0.5% B + 59% ВК6 + 40% Vaseline) at $Wp = 0.52$, 1.30 and 2.60 J (graphs *1*, *2* and *3*, respectively); ×400.

ру криці 45 після ЕІЛ електродою-інструментом з ніхрому марки Х20Н80 з використанням СТС складу 5% Si + 5% B + 90% вазелін, а також розподіл мікротвердости (рис. 2, *г*) по глибині поверхневого шару із $Wp = 0{,}52$, 1,30 і 2,60 Дж.

На рисунках 3, *а*, *б*, *в* показано мікроструктури поверхневого шару криці 45 після електроіскрового леґування електродою-інструментом з ніхрому марки Х20Н80 з використанням СТС складу 0,5% Si + 0,5% B + 59% ВК6 + 40% вазелін, а розподіл мікротвердости по глибині поверхневого шару із $Wp = 0{,}52$, 1,30 і 2,60 Дж на рис. 3, *г* (графіки *1*, *2* і *3* відповідно).

На рисунку 4, *а*, *б*, *в* показано мікроструктури поверхневого шару криці 45 після електроіскрового леґування електродою-інструментом з твердого стопу ВК6 з використанням СТС

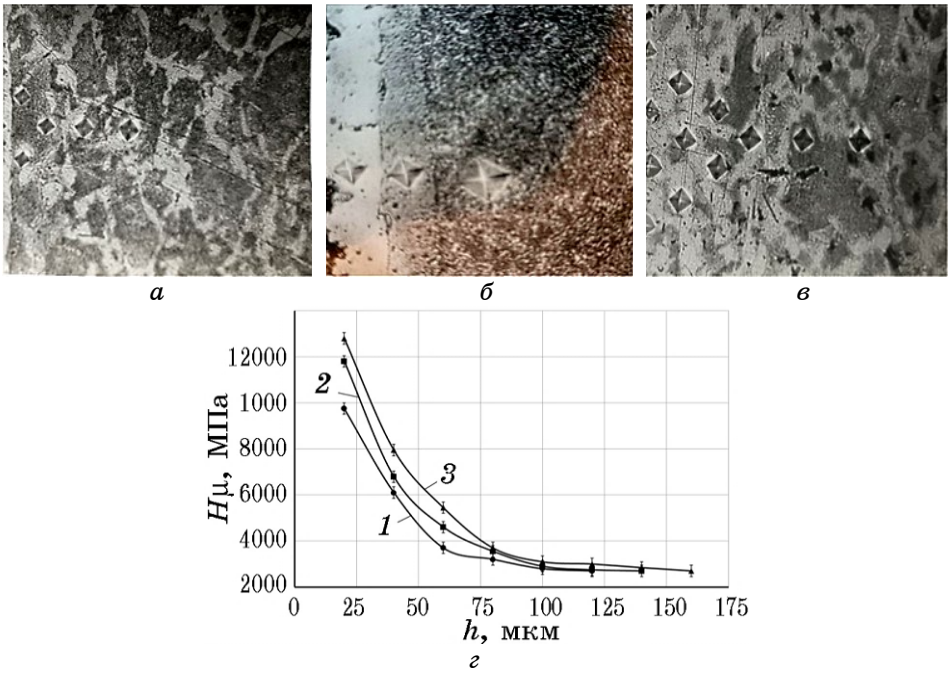


Рис. 4. Мікроструктури (*а*, *б*, *в*) та розподіл мікротвердости (*г*) по глибині поверхневого шару криці 45 після електроіскрового леґування електродою-інструментом з твердого стопу ВК6 з використанням СТС складу 0,5% Si + 0,5% B + 2% Cr + 7% Ni + 90% вазелін із $Wp = 0{,}52$, 1,30 і 2,60 Дж (графіки *1*, *2* і *3* відповідно); ×400.

Fig. 4. Microstructures (*а*, *б*, *в*) and distribution of microhardness (*г*) along the depth of the surface layer of steel 45 after ESA with a hard ВК6 alloy tool electrode using STE composition 0.5% Si + 0.5% B + 2% Cr + 7% Ni +90% Vaseline at $Wp = 0.52$, 1.30 and 2.60 J (graphs *1*, *2* and *3*, respectively); ×400.

0,5% Si + 0,5% B + 2% Cr + 7% Ni +90% вазелін, а на рис. 4, *г* — розподіл мікротвердости по глибині поверхневого шару із $Wp = 0{,}52$, 1,30 і 2,60 Дж (графіки *1*, *2* і *3* відповідно).

В таблицях 2 і 3 представлено результати розподілу мікротвердости в поверхневому шарі криці 45 за даними мірянь із кроком ≅ 20 мкм у міру поглиблення з поверхні та параметри якости: товщина та найбільша мікротвердість «білого шару» і перехідної (дифузійної) зони, шерсткість поверхні та суцільність нанесеного покриття.

Було проведено аналізу мікроструктур (рис. 2–4), розподілу мікротвердости (табл. 2) і параметрів якости поверхневого шару зразків криці 45 (табл. 3) після ЕІЛ за енергій розряду та продуктивности згідно з табл. 1 електродами-інструментами, виготовленими з ніхрому Х20Н80 і твердого стопу ВК6 з використанням СТС.

ТАБЛИЦЯ 2. Результати дюрометричної аналізи поверхневих шарів криці 45.

TABLE 2. Results of durometry analysis of steel 45 surface layers.

Енергія розряду, Дж	Продуктивність, см²/хв	Розподіл мікротвердости ($H\mu$) у поверхневому шарі із кроком вимірювання ≅ 20 мкм							
		20	40	60	80	100	120	140	160
ЕІЛ ніхром Х20Н80									
0,52	1,0	8100±20	5200±20	3500±20	2850±20				
1,30	1,5	10200±20	7600±50	5100±50	3300±50	2750±50			
2,60	2,0	11500±50	8050±50	5300±50	3600±50	3100±50	2800±50		
ЕІЛ ніхром Х20Н80									
0,52	1,0	9300±20	5300±50	3600±50	2850±50	2800±50			
1,30	1,5	10600±20	7700±50	5200±50	3450±50	3200±50	2750±50		
2,60	2,0	12100±20	9650±50	5350±50	3650±50	3300±50	2900±50	2800±50	
ЕІЛ ВК6									
0,52	1,0	9750±20	6100±50	3700±50	3200±50	2800±50			
1,30	1,5	11800±20	6700±50	5300±50	3550±50	2900±50	2750±50		
2,60	2,0	12800±20	6800±50	5450±50	3700±50	3100±50	3000±50	2850±50	

ТАБЛИЦЯ 3. Параметри якости поверхневих шарів криці 45 після ЕІЛ електродами-інструментами 1М та 90% ВК6 + 10% 1М, виготовленими методом порошкової металургії, а також з ніхрому Х20Н80 і твердого стопу ВК6 з використанням СТС.

TABLE 3. Quality parameters of the steel 45 surface layers after ESA with electrodes using tools of 1M and 90% ВК6 + 10% 1M made by the method of powder metallurgy, as well as made of nichrome Х20Н80 and hard ВК6 alloy using STE.

Енергія розряду, Дж	Продуктивність, см²/хв	Склад спеціяльного технологічного середовища	Товщина, мкм		Максимальна мікротвердість, МПа		Шерсткість *Ra*, мкм	Суцільність покриття, %
			«білого» шару	перехідної зони	«білого» шару	перехідної зони		
ЕІЛ1М*								
0,42	1,0	–	До 55	20-30	8350	5500	3,1	60
0,42	1,0	–	До 30	20-30	14200	7500	3,2	80
ЕІЛ ніхром Х20Н80								
0,52	1,0	5% Si + 5% B + 90% вазелін	20	30	8100	5200	3,5	90
1,30	1,5	5% Si + 5% B + 90% вазелін	35	40	10200	6300	4,3	80

Продовження ТАБЛИЦІ 3.

Continuation of TABLE 3.

2,60	2,0	5% Si + 5% B + 90% вазелін	50	50	11500	6800	6,1	70
		ЕІЛ ніхром Х20Н80						
0,52	1,0	0,5% Si + 0,5% B + 59% ВК6 + 40% вазелін	20	35	9300	5600	3,5	90
1,30	1,5	0,5% Si + 0,5% B + 59% ВК6 + 40 вазелін	40	45	10600	6400	4,7	80
2,60	2,0	0,5% Si + 0,5% B + 59% ВК6 + 40 вазелін	60	55	12100	6800	6,5	70
		ЕІЛ ВК6						
0,52	1,0	0,5% Si + 0,5% B + 2% Cr + 7% N і + 90% вазелін	35	45	9750	6100	3,3	95
1,30	1,5	0,5% Si + 0,5% B + 2% Cr + 7% N і + 90% вазелін	50	55	11800	6700	4,2	85
2,60	2,0	0,5% Si + 0,5% B + 2% Cr + 7% N і + 90% вазелін	65	70	12800	6800	5,9	70

* — електроди-інструменти, виготовлені методом порошкової металургії.

Покриття у міру поглиблення складаються з трьох ділянок: «білий шар», перехідна зона й основний метал.

Мікротвердість на ділянках, які максимально близькі до поверхні, у міру поглиблення повільно зменшується та переходить у мікротвердість основного металу (див. табл. 2). Зі збільшенням енергії розряду зростають товщини «білого шару» та перехідної зоні, а також мікротвердість і шерсткість поверхні, але суцільність зменшується (див. табл. 3).

На рисунку 5, *а*, *б*, *в* показано мікроструктури поверхневого шару криці Р6М5 після ЕІЛ електродою-інструментом з ніхрому марки Х20Н80 з використанням СТС складу 5% Si + 5% B + 90% вазелін. Розподіл мікротвердости по глибині поверхневого шару із $Wp = 0{,}52$, 1,30 і 2,60 Дж представлено на рис. 5, *г*.

На рисунку 6, *а*, *б*, *в* показано мікроструктури поверхневого шару Р6М5 після електроіскрового леґування електродою-інструментом з ніхрому марки Х20Н80 з використанням СТС складу 0,5% Si + 0,5% B + 59% ВК6 + 40% вазелін.

Розподіл мікротвердости по глибині поверхневого шару із $Wp = 0{,}52$, 1,30 і 2,60 Дж (графіки *1*, *2* і *3* відповідно) див. на рис. 6, *г*.

Мікроструктури поверхневого шару Р6М5 після ЕІЛ електродою-інструментом з твердого стопу ВК6 з використанням СТС складу 0,5% Si + 0,5% B + 2% Cr + 7% Ni + 90% вазелін див. на рис. 7, *а*, *б*, *в*.

Розподіл мікротвердости по глибині поверхневого шару із $Wp = 0{,}52$, 1,30 і 2,60 Дж (графіки *1*, *2* і *3* відповідно) див. на рис. 7, *г*.

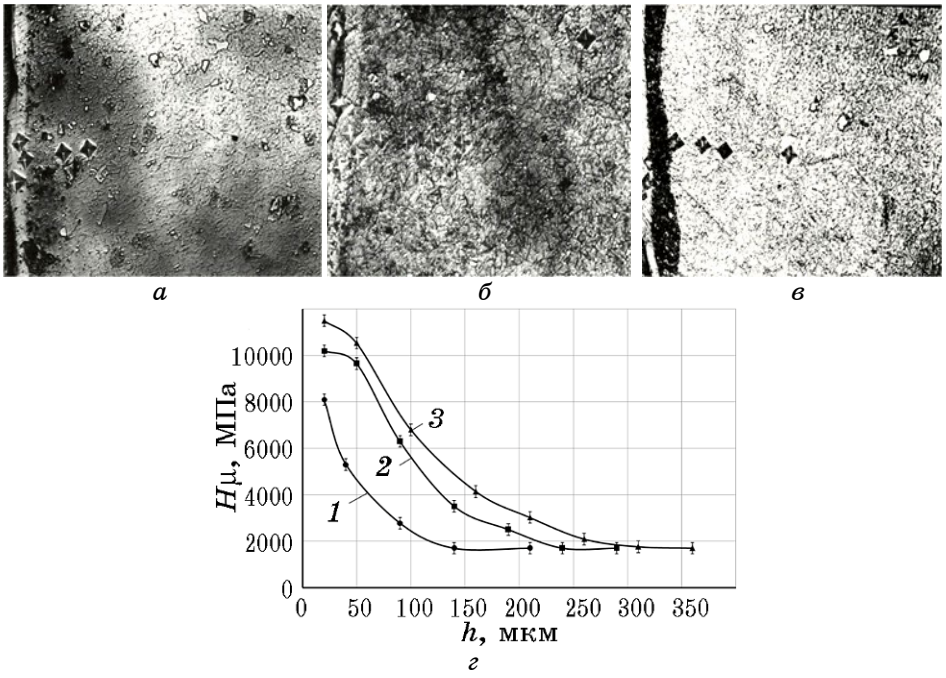


Рис. 5. Мікроструктури (*а*, *б*, *в*) і розподіл мікротвердости (*г*) по глибині поверхневого шару криці Р6М5 після електроіскрового леґування електродою-інструментом з ніхрому (Х20Н80) з використанням СТС складу 5% Si + 5% B + 90% вазелін із $Wp = 0{,}52$, 1,30 і 2,60 Дж (графіки *1*, *2* і *3* відповідно); ×400.

Fig. 5. Microstructures (*а*, *б*, *в*) and distribution of microhardness (*г*) along the depth of the surface layer of steel P6M5 after ESA with a nichrome (X20H80) electrode-tool using STE composition 5% Si + 5% B + 90% Vaseline at $Wp = 0.52$, 1.30 and 2.60 J (graphs *1*, *2* and *3*, respectively); ×400.

Було проаналізовано мікроструктури, зображені на рис. 5–7, а також розподіл мікротвердости (див. табл. 4) і параметрів якости поверхневого шару зразків криці Р6М5 (див. табл. 5) після електроіскрового леґування за енергій розряду та продуктивности згідно з даними табл. 1 та електродами-інструментами, виготовленими з ніхрому Х20Н80 і твердого стопу ВК6 з використанням СТС.

Показано, що покриття у міру поглиблення складаються з трьох ділянок: «білий шар», перехідна зона й основний метал.

Мікротвердість, яка є максимальною ближче до поверхні, у міру поглиблення повільно зменшується та переходить у мікротвердість основного металу (див. табл. 4).

Зі збільшенням енергії розряду зростають товщина «білого шару» та перехідної зони, а також мікротвердість і шерсткість повер-

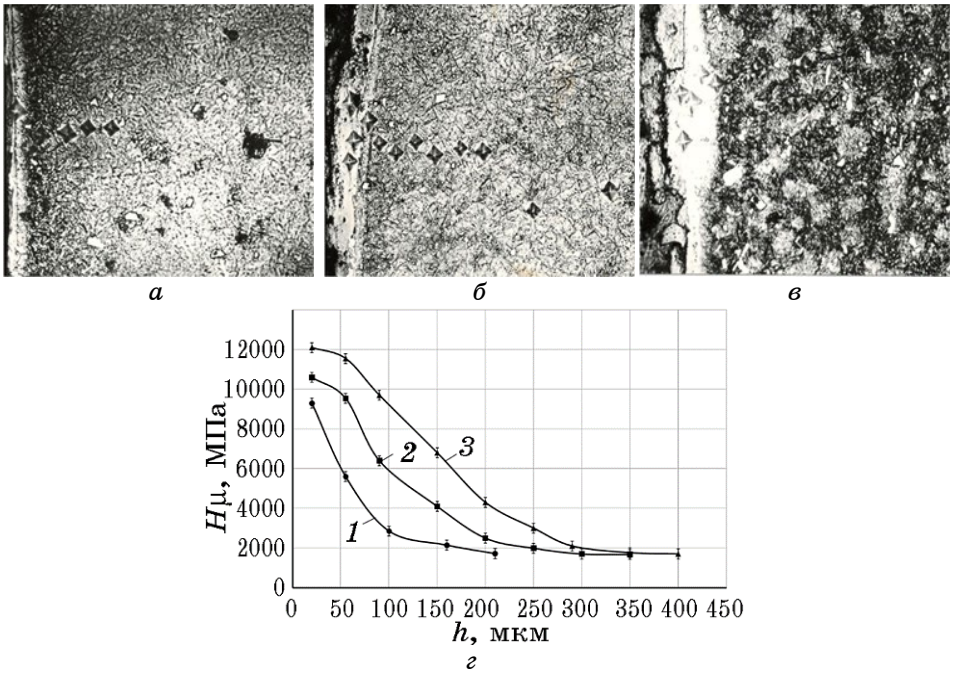


Рис. 6. Мікроструктури (*а*, *б*, *в*) та розподіл мікротвердости (*г*) по глибині поверхневого шару криці Р6М5 після електроіскрового леґування електродою-інструментом з ніхрому (Х20Н80) з використанням СТС складу 0,5% Si + 0,5% B + 2% Cr+7% Ni + 90% вазелін із $Wp = 0{,}52$, 1,30 і 2,60 Дж (графіки *1*, *2* і *3* відповідно); ×400.

Fig. 6. Microstructures (*а*, *б*, *в*) and distribution of microhardness (*г*) along the depth of the surface layer of steel P6M5 after ESA with a nichrome (X20H80) tool electrode with using STE composition 0.5% Si + 0.5% B + 2% Cr+ 7% Ni + 90% Vaseline at $Wp = 0.52$, 1.30 and 2.60 J (graphs *1*, *2* and *3*, respectively); ×400.

хні, але суцільність зменшується (див. табл. 5).

5. ВИСНОВКИ

1. Розроблено новий спосіб формування захисних покриттів деталів із криць, що працюють в умовах абразивного зношування, як в загальному машинобудуванні складу 90% ВК6 + 10% 1М, так і на виробництвах, де може бути радіяційне опромінювання — 1М (70% Ni, 20% Cr, 5% Si, 5% B).
2. Спосіб полягає у нанесенні їх методом електроіскрового леґування компактними електродами-інструментами з ніхромового дроту Х20Н80 і твердого стопу ВК6 та використання спеціяльних

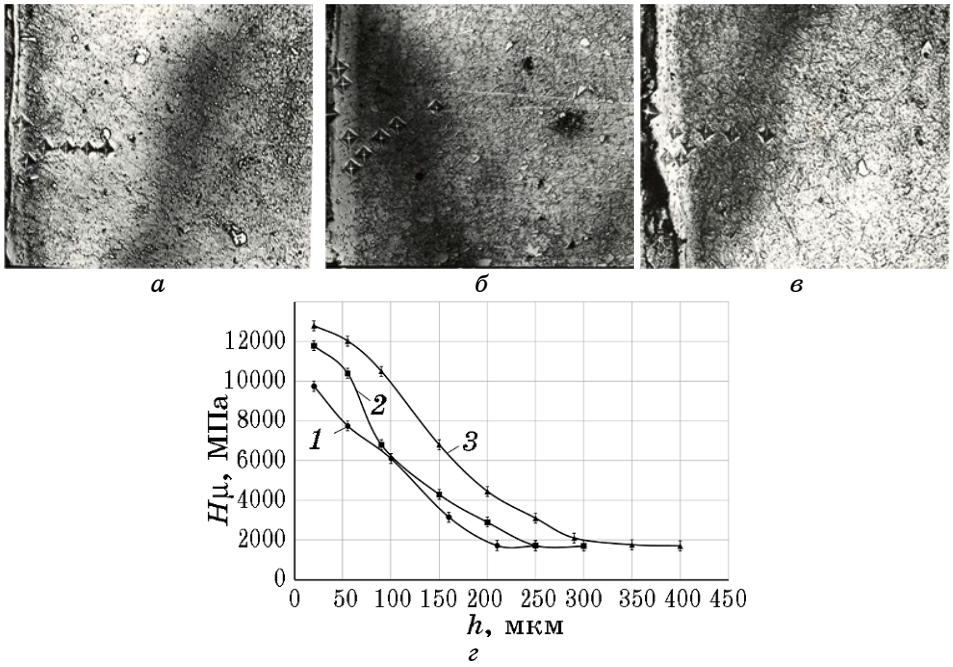


Рис. 7. Мікроструктури (*а*, *б*, *в*) та розподіл мікротвердости (*г*) по глибині поверхневого шару криці Р6М5 після електроіскрового леґування електродою-інструментом з твердого стопу ВК6 з використанням СТС складу 0,5% Si + 0,5% B + 2% Cr+7% Ni + 90% вазелін із $Wp = 0{,}52$, 1,30 і 2,60 Дж (графіки *1*, *2* і *3* відповідно); ×400.

Fig. 7. Microstructures (*а*, *б*, *в*) and distribution of microhardness (*г*) along the depth of the surface layer of P6M5 steel after ESA with a hard ВК6 alloy electrode tool with using STE composition 0.5% Si + 0.5% B + 2% Cr+ 7% Ni +90% Vaseline at $Wp = 0.52$, 1.30 and 2.60 J (graphs *1*, *2* and *3*, respectively); ×400.

технологічних середовищ, в склад яких входять необхідні леґувальні елементи.

2. Поверхневі шари криць 45 і Р6М5 після нанесення зносостійких покриттів мають структуру, що складається з трьох ділянок: зверху — «білий шар», нижче — перехідна зона й основний метал.

3. Якщо збільшують енергію розряду, то зростають товщини «білого шару» та перехідної зоні, а також зростають мікротвердість і шерсткість поверхні, але суцільність зменшується.

4. Найвищу мікротвердість у 9750–12800 МПа і 14250–14600 МПа мають покриття, сформовані на крицях 45 і Р6М5 відповідно за електроіскрового леґування компактними електродами-інструментами з твердого стопу ВК6 і СТС складу 0,5% Si + 0,5% B + 2% Cr + 7% Ni + 90% вазелін.

ТАБЛИЦЯ 4. Результати дюрометричної аналізи поверхневих шарів криці Р6М5.

TABLE 4. Results of durometry analysis of steel P6M5 surface layers.

Енергія розряду, Дж	Продуктивність, см²/хв	Розподіл мікротвердости ($H\mu$) в поверхневому шарі із кроком вимірювання ≅ 20 мкм							
		20	40	60	80	100	120	140	160
ЕІЛ ніхром Х20Н80									
0,52	1,0	12500±20	8200±20	3000±20	2750±20				
1,30	1,5	12800±20	8600±50	6100±50	3300±50	2800±50			
2,60	2,0	13300±50	9050±50	6300±50	3500±50	3000±50	2800±50		
ЕІЛ ніхром Х20Н80									
0,52	1,0	12600±20	8300±50	3500±50	3050±50	2800±50			
1,30	1,5	12900±20	8800±50	6200±50	3400±50	3000±50	2750±50		
2,60	2,0	13500±20	9850±50	6350±50	3650±50	3200±50	2900±50	2800±50	
ЕІЛ ВК6									
0,52	1,0	14250±20	8450±50	3550±50	3200±50	2800±50			
1,30	1,5	14400±20	9700±50	6300±50	3550±50	2900±50	2750±50		
2,60	2,0	14600±20	9950±50	6550±50	3700±50	3200±50	3000±50	2850±50	

ТАБЛИЦЯ 5. Параметри якости поверхневих шарів криці Р6М5 після електроіскрового леґування електродами-інструментами 1М та 90% ВК6 + 10% 1М, виготовленими методом порошкової металурґії, а також з ніхрому Х20Н80 і твердого стопу ВК6 з використанням СТС.

TABLE 5. Parameters of the steel P6M5 surface layers quality after ESA with electrodes using tools of 1M and 90% ВК6 + 10% 1M made by the method of powder metallurgy, as well as made of nichrome Х20Н80 and hard ВК6 alloy using STE.

Енергія розряду, Дж	Продуктивність, см²/хв	Склад спеціяльного технологічного середовища	Товщина, мкм		Максимальна мікротвердість, МПа		Шерсткість *Ra*, мкм	Суцільність покриття, %
			«білого» шару	перехідної зони	«білого» шару	перехідної зони		
ЕІЛ1М*								
0,42	1,0	—	До 40	20-30	11500	7500	3,3	90
ЕІЛ 90% ВК6 + 10% 1М*								
0,42	1,0	—	До 25	20	14200	8500	3,1	85
ЕІЛ ніхром Х20Н80								
0,52	1,0	5% Si + 5% B + 90% вазелін	20	30	12500	8200	2,8	90
1,30	1,5	5% Si + 5% B + 90% вазелін	35	40	12800	8300	3,7	85
2,60	2,0	5% Si + 5% B + 90% вазелін	50	50	13300	8550	5,3	80
ЕІЛ ніхром Х20Н80								
0,52	1,0	0,5%Si + 0,5%B + 59%ВК6 + 40 вазелін	20	35	12600	8300	3,0	90
1,30	1,5	0,5%Si + 0,5%B + 59%ВК6 + 40 вазелін	40	45	12900	8800	4,1	85
2,60	2,0	0,5%Si + 0,5%B + 59%ВК6 + 40 вазелін	60	55	13500	8900	5,7	80
ЕІЛ ВК6								
0,52	1,0	0,5%Si + 0,5%B + 2%Cr + 7%Ni + 90% вазелін	35	45	14250	8450	3,1	95
1,30	1,5	0,5%Si + 0,5%B + 2%Cr + 7%Ni + 90% вазелін	50	55	14400	8900	4,2	85
2,60	2,0	0,5%Si + 0,5%B + 2%Cr + 7%Ni + 90% вазелін	65	70	14600	10150	5,9	80

* — електроди-інструменти, виготовлені методом порошкової металурґії.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. I. Kuric, M. Kandera, J. Klarák, V. Ivanov, and D. Więcek, *Advanced Manufacturing Processes* (Eds. V. Tonkonogyi, V. Ivanov, J. Trojanowska, G. Oborskyi, M. Edl, I. Kuric, I. Pavlenko, and P. Dasic) (Springer: 2020), p. 148.
2. A. Zahorulko, C. Kundera, and S. Hudkov, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **233**: 012039 (2017).
3. A. Zahorulko, *Sealing Technology, 2015*, Iss. **8**: 7 (2015).
4. A. Kotliar, Y. Basova, V. Ivanov, O. Murzabulatova, S. Vasyltsova, M. Litvynenko, and O. Zinchenko, *Management and Production Engineering Review*, **11**, No. 1: 52 (2020).
5. V. Ivanov, I. Dehtiarov, Y. Denysenko, N. Malovana, and N. Martynova, *Diagnostyka*, **19**, No. 3: 3 (2018).
6. V. Ivanov, I. Dehtiarov, I. Pavlenko, M. Kosov, and M. Hatala, *Advances in Design, Simulation and Manufacturing II* (Eds. V. Ivanov, J. Trojanowska, J. Machado, O. Liaposhchenko, J. Zajac, I. Pavlenko, M. Edl, and D. Perakovic) (Springer: 2019), p. 114.
7. V. Ivanov, I. Pavlenko, I. Kuric, and M. Kosov, *Industry 4.0: Trends in Management of Intelligent Manufacturing Systems* (Eds. L. Knapčíková and M. Balog) (Springer: 2019), p. 133.
8. S. Pylypaka, T. Zaharova, O. Zalevska, D. Kozlov, and O. Podliniaieva, *Advanced Manufacturing Processes* (Eds. V. Tonkonogyi, V. Ivanov, J. Trojanowska, G. Oborskyi, M. Edl, I. Kuric, I. Pavlenko, and P. Dasic) (Springer: 2020), p. 582.
9. S. Pylypaka, T. M. Volina, M. Mukvich, G. Efremova, and O. Kozlova, *Advances in Design, Simulation and Manufacturing III* (Eds. V. Ivanov, I. Pavlenko, O. Liaposhchenko, J. Machado, and M. Edl) (Springer: 2020), p. 63.
10. S. Pylypaka, V. Nesvidomin, T. Volina, L. Sirykh, and L. Ivashyna, *Inmateh Agricultural Engineering*, **62**, No. 3: 79 (2020).
11. S. Pylypaka, T. Volina, I. Hryshchenko, I. Rybenko, and N. Sydorenko, *Advanced Manufacturing Processes II* (Eds. V. Tonkonogyi, V. Ivanov, J. Trojanowska, G. Oborskyi, A. Grabchenko, I. Pavlenko, M. Edl, I. Kuric, and P. Dasic) (Springer: 2021), p. 196.
12. T. Volina, S. Pylypaka, A. Rebrii, O. Pavlenko, and Y. Kremets, *Advanced Manufacturing Processes II* (Eds. V. Tonkonogyi, V. Ivanov, J. Trojanowska, G. Oborskyi, A. Grabchenko, I. Pavlenko, M. Edl, I. Kuric, and P. Dasic) (Springer: 2021), p. 237.
13. A. A. Parkin, S. S. Zhatkin, and A. B. Semin, *Izvestiya Samarskogo Nauchnogo Tsentra Rossiyskoy Akademii Nauk*, **18**, No. 4 (2): 362 (2016) (in Russian).
14. A. Panasyuk, O. Umanskyi, M. Storozhenko, and V. Akopyan, *Key Engineering Materials*, **527**: 9 (2013).
15. O. Umanskyi, M. Storozhenko, M. Antonov, O. Terentjev, O. Koval, and D. Goljandin, *Key Engineering Materials*, **604**: 16 (2019).
16. N. Radek and K. Bartkowiak, *Physics Procedia A*, **5**: 417 (2010).
17. V. G. Smelov, A. V. Sotov, and S. A. Kosirev, *ARPN J. Eng. Applied Sci.*, **9**, No. 10: 1854 (2014).
18. O. Gaponova, C. Kundera, G. Kirik, V. Tarelnyk, V. Martsynkovskyy, Ie. Konoplianchenko, M. Dovzhyk, A. Belous, and O. Vasilenko, *Advances in Thin Films, Nanostructured Materials, and Coatings* (Eds. A. D. Pogrebnjak and

V. Novosad) (Springer: 2019), p. 249.
19. V. Tarelnyk, I. Konoplianchenko, O. Gaponova, N. V. Tarelnyk, V. S. Martsynkovskyy, B. O. Sarzhanov, O. A. Sarzhanov, and B. Antoszewski, *Powder Metall. Met. Ceram.*, **58**: 703 (2020).
20. A. D. Pogrebnyak, A. M. Mahmud, I. T. Karasha, G. V. Kirik, R. Y. Tkachenko, and A. P. Sypylenko, *J. Nano- Electron. Phys.*, **3**, No. 4: 73 (2011).
21. В. Н. Радзиевский, Ю. Ф. Гарцунов, Г. Г. Ткаченко, *Автоматическая сварка*, № 3: 48 (1997).
22. Shu-Hung Yeh, Liu-Ho Chiu, and Heng Chang, *Engineering*, **3**, No. 9: 942 (2011).
23. S. Ben Slima, *Materials Sciences and Applications*, **3**, Iss. 9: 640 (2012).
24. C. M. Suh, J. K. Hwang, K. S. Son, and H. K. Jang, *Mater. Sci. Eng. A*, **392**, Nos. 1–2: 31 (2005).
25. J. Baranowska and S. E. Franklin, *Wear*, **264**, Nos. 9–10: 899 (2008).
26. V. Martsinkovsky, V. Yurko, V. Tarelnik, and Y. Filonenko, *Procedia Engineering*, **39**: 148 (2012).
27. V. Martsinkovsky, V. Yurko, V. Tarelnik, and Y. Filonenko, *Procedia Engineering*, **39**: 157 (2012).
28. В. Б. Тарельник, О. П. Гапонова, Е. В. Коноплянченко, Н. С. Евтушенко, В. О. Герасименко, *Металлофиз. новейшие технол.*, **40**, № 6: 795 (2018).
29. V. B. Tarelnyk, A. V. Paustovskii, Y. G. Tkachenko, E. V. Konoplianchenko, V. S. Martsynkovskyi, and B. Antoszewski, *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, **55**: 585 (2017).
30. V. B. Tarel'nik, A. V. Paustovskii, Y. G. Tkachenko, V. S. Martsinkovskii, E. V. Konoplyanchenko, and K. Antoshevskii, *Surf. Eng. Applied Electrochemistry*, **53**: 258 (2017).
31. V. B. Tarelnyk, O. P. Gaponova, V. B. Loboda, E. V. Konoplyanchenko, V. S. Martsinkovskii, Yu. I. Semirnenko, N. V. Tarelnyk, M. A. Mikulina, and B. A. Sarzhanov, *Surf. Eng. Applied Electrochemistry*, **57**: 173 (2021).
32. V. B. Tarel'nik, V. S. Martsinkovskii, and A. N. Zhukov, *Chem. Petroleum Eng.*, **53**: 266 (2017).
33. V. B. Tarel'nik, V. S. Martsinkovskii, and A. N. Zhukov, *Chem. Petroleum Eng.*, **53**: 385 (2017).
34. В. Б. Тарельник, О. П. Гапонова, Е. В. Коноплянченко, В. С. Марцинковский, Н. В. Тарельник, О. А. Василенко, *Металлофиз. новейшие технол.*, **41**, № 1: 47 (2019).
35. V. Tarelnyk, V. Martsynkovskyy, O. Gaponova, I. Konoplianchenko, A. Belous, V. Gerasimenko, and M. Zakharov, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **233**: 012048 (2017).
36. V. Tarelnyk, V. Martsynkovskyy, O. Gaponova, I. Konoplianchenko, M. Dovzyk, N. Tarelnyk, and S. Gorovoy, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **233**: 012049 (2017).
37. O. Gaponova, C. Kundera, G. Kirik, V. Tarelnyk, V. Martsynkovskyy, Ie. Konoplianchenko, M. Dovzhyk, A. Belous, and O. Vasilenko, *Advances in Thin Films, Nanostructured Materials, and Coatings* (Eds. A. D. Pogrebnjak and V. Novosad) (Springer: 2019), p. 249.
38. Н. В. Тарельник, *Металофіз. новітні технол.*, **44**, № 8: 1037 (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. В. Тарельник, М. О. Мікуліна, В. О. Герасименко, О. О. Василенко, В. М. Зубко, В. І. Мельник, *Металофіз. новітні технол.*, **44**, № 10: 1323 (2022).
41. Ю. Ф. Баландин, И. Б. Горынин, Ю. И. Звездин, Б. Г. Мирков, *Конструкционные материалы АЭС* (Москва: Энергоатомиздат: 1984).
42. Э. Майер, *Торцовые уплотнения* (Москва: Машиностроение: 1978) (пер. с нем.).
43. А. С. Шелегов, С. Т. Лескин, В. И. Слободчук, *Физические особенности и конструкция реактора ВВЭР-1000* (Москва: НИЯУ «МИФИ»: 2011).
44. E. M. Prokhorenko, V. Klepikov, V. V. Lytvynenko, A. Zakharchenko, and M. Khazhmuradov, *Problems of Atomic Science and Technology*, No. 2:193 (2015).
45. V. V. Bryukhovetsky, V. F. Klepikov, V. V. Lytvynenko, D. E. Myla, V. P. Poyda, A. V. Poyda, V. T. Uvarov, Yu. F. Lonin, and A. G. Ponomarev, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B*, **499**: 25 (2021).
46. S. E. Donets, V. F. Klepikov, V. V. Lytvynenko, Yu. F. Lonin, A. G. Ponomarev, O. A. Startsev, and V. T. Uvarov, *Problems of Atomic Scienceand Technology*, No. 4: 302 (2015).
47. V. F. Klepikov, V. V. Lytvynenko, Yu. F. Lonin, A. G. Ponomarev, O. G. Tolstolutskiy, V. V. Uvarov, and V. T. Uvarov, *Problems of Atomic Science and Technology*, No. 1: 119 (2009).
48. A. G. Kobets, P. R. Horodek, O. A. Startsev, V. V. Lytvynenko, Yu. F. Lonin, A. G. Ponomarev, and V. T. Uvarov, *Surf. Eng. Applied Electrochemistry*, **51**: 478 (2015).

REFERENCES

1. I. Kuric, M. Kandera, J. Klarák, V. Ivanov, and D. Więcek, *Advanced Manufacturing Processes* (Eds. V. Tonkonogyi, V. Ivanov, J. Trojanowska, G. Oborskyi, M. Edl, I. Kuric, I. Pavlenko, and P. Dasic) (Springer: 2020), p. 148.
2. A. Zahorulko, C. Kundera, and S. Hudkov, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **233**: 012039 (2017).
3. A. Zahorulko, *Sealing Technology, 2015*, Iss. **8**: 7 (2015).
4. A. Kotliar, Y. Basova, V. Ivanov, O. Murzabulatova, S. Vasyltsova, M. Litvynenko, and O. Zinchenko, *Management and Production Engineering Review*, **11**, No. 1: 52 (2020).
5. V. Ivanov, I. Dehtiarov, Y. Denysenko, N. Malovana, and N. Martynova, *Diagnostyka*, **19**, No. 3: 3 (2018).
6. V. Ivanov, I. Dehtiarov, I. Pavlenko, M. Kosov, and M. Hatala, *Advances in Design, Simulation and Manufacturing II* (Eds. V. Ivanov, J. Trojanowska, J. Machado, O. Liaposhchenko, J. Zajac, I. Pavlenko, M. Edl, and D. Perakovic) (Springer: 2019), p. 114.
7. V. Ivanov, I. Pavlenko, I. Kuric, and M. Kosov, *Industry 4.0: Trends in Management of Intelligent Manufacturing Systems* (Eds. L. Knapčíková and M. Balog) (Springer: 2019), p. 133.
8. S. Pylypaka, T. Zaharova, O. Zalevska, D. Kozlov, and O. Podliniaieva, *Advanced Manufacturing Processes* (Eds. V. Tonkonogyi, V. Ivanov,

J. Trojanowska, G. Oborskyi, M. Edl, I. Kuric, I. Pavlenko, and P. Dasic) (Springer: 2020), p. 582.
9. S. Pylypaka, T. M. Volina, M. Mukvich, G. Efremova, and O. Kozlova, *Advances in Design, Simulation and Manufacturing III* (Eds. V. Ivanov, I. Pavlenko, O. Liaposhchenko, J. Machado, and M. Edl) (Springer: 2020), p. 63.
10. S. Pylypaka, V. Nesvidomin, T. Volina, L. Sirykh, and L. Ivashyna, *Inmateh Agricultural Engineering*, **62**, No. 3: 79 (2020).
11. S. Pylypaka, T. Volina, I. Hryshchenko, I. Rybenko, and N. Sydorenko, *Advanced Manufacturing Processes II* (Eds. V. Tonkonogyi, V. Ivanov, J. Trojanowska, G. Oborskyi, A. Grabchenko, I. Pavlenko, M. Edl, I. Kuric, and P. Dasic) (Springer: 2021), p. 196.
12. T. Volina, S. Pylypaka, A. Rebrii, O. Pavlenko, and Y. Kremets, *Advanced Manufacturing Processes II* (Eds. V. Tonkonogyi, V. Ivanov, J. Trojanowska, G. Oborskyi, A. Grabchenko, I. Pavlenko, M. Edl, I. Kuric, and P. Dasic) (Springer: 2021), p. 237.
13. A. A. Parkin, S. S. Zhatkin, and A. B. Semin, *Izvestiya Samarskogo Nauchnogo Tsentra Rossiyskoy Akademii Nauk*, **18**, No. 4 (2): 362 (2016) (in Russian).
14. A. Panasyuk, O. Umanskyi, M. Storozhenko, and V. Akopyan, *Key Engineering Materials*, **527**: 9 (2013).
15. O. Umanskyi, M. Storozhenko, M. Antonov, O. Terentjev, O. Koval, and D. Goljandin, *Key Engineering Materials*, **604**: 16 (2019).
16. N. Radek and K. Bartkowiak, *Physics Procedia A*, **5**: 417 (2010).
17. V. G. Smelov, A. V. Sotov, and S. A. Kosirev, *ARPN J. Eng. Applied Sci.*, **9**, No. 10: 1854 (2014).
18. O. Gaponova, C. Kundera, G. Kirik, V. Tarelnyk, V. Martsynkovskyy, Ie. Konoplianchenko, M. Dovzhyk, A. Belous, and O. Vasilenko, *Advances in Thin Films, Nanostructured Materials, and Coatings* (Eds. A. D. Pogrebnjak and V. Novosad) (Springer: 2019), p. 249.
19. V. Tarelnyk, I. Konoplianchenko, O. Gaponova, N. V. Tarelnyk, V. S. Martsynkovskyy, B. O. Sarzhanov, O. A. Sarzhanov, and B. Antoszewski, *Powder Metall. Met. Ceram.*, **58**: 703 (2020).
20. A. D. Pogrebnyak, A. M. Mahmud, I. T. Karasha, G. V. Kirik, R. Y. Tkachenko, and A. P. Sypylenko, *J. Nano- Electron. Phys.*, **3**, No. 4: 73 (2011).
21. V. N. Radzievskiy, Yu. F. Gartsunov, and G. G. Tkachenko, *Avtomaticheskaya svarka*, No. 3: 48 (1997) (in Russian).
22. Shu-Hung Yeh, Liu-Ho Chiu, and Heng Chang, *Engineering*, **3**, No. 9: 942 (2011).
23. S. Ben Slima, *Materials Sciences and Applications*, **3**, Iss. 9: 640 (2012).
24. C. M. Suh, J. K. Hwang, K. S. Son, and H. K. Jang, *Mater. Sci. Eng. A*, **392**, Nos. 1–2: 31 (2005).
25. J. Baranowska and S. E. Franklin, *Wear*, **264**, Nos. 9–10: 899 (2008).
26. V. Martsinkovsky, V. Yurko, V. Tarelnik, and Y. Filonenko, *Procedia Engineering*, **39**: 148 (2012).
27. V. Martsinkovsky, V. Yurko, V. Tarelnik, and Y. Filonenko, *Procedia Engineering*, **39**: 157 (2012).
28. V. B. Tarelnik, O. P. Gaponova, E. V. Konoplyantschenko, N. S. Yevtushenko, and V. A. Gerasimenko, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **40**, No. 6: 795 (2018) (in Russian).
29. V. B. Tarelnyk, A. V. Paustovskii, Y. G. Tkachenko, E. V. Konoplianchenko,

V. S. Martsynkovskyi, and B. Antoszewski, *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, **55**: 585 (2017).
30. V. B. Tarel'nik, A. V. Paustovskii, Y. G. Tkachenko, V. S. Martsinkovskii, E. V. Konoplyanchenko, and K. Antoshevskii, *Surf. Eng. Applied Electrochemistry*, **53**: 258 (2017).
31. V. B. Tarelnyk, O. P. Gaponova, V. B. Loboda, E. V. Konoplyanchenko, V. S. Martsinkovskii, Yu. I. Semirnenko, N. V. Tarelnyk, M. A. Mikulina, and B. A. Sarzhanov, *Surf. Eng. Applied Electrochemistry*, **57**: 173 (2021).
32. V. B. Tarel'nik, V. S. Martsinkovskii, and A. N. Zhukov, *Chem. Petroleum Eng.*, **53**: 266 (2017).
33. V. B. Tarel'nik, V. S. Martsinkovskii, and A. N. Zhukov, *Chem. Petroleum Eng.*, **53**: 385 (2017).
34. V. B. Tarelnyk, O. P. Gaponova, Ye. V. Konoplianchenko, V. S. Martsynkovskyy, N. V. Tarelnyk, and O. O. Vasylenko, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **41**, No. 1: 47 (2019) (in Russian).
35. V. Tarelnyk, V. Martsynkovskyy, O. Gaponova, I. Konoplianchenko, A. Belous, V. Gerasimenko, and M. Zakharov, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **233**: 012048 (2017).
36. V. Tarelnyk, V. Martsynkovskyy, O. Gaponova, I. Konoplianchenko, M. Dovzyk, N. Tarelnyk, and S. Gorovoy, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **233**: 012049 (2017).
37. O. Gaponova, C. Kundera, G. Kirik, V. Tarelnyk, V. Martsynkovskyy, Ie. Konoplianchenko, M. Dovzhyk, A. Belous, and O. Vasilenko, *Advances in Thin Films, Nanostructured Materials, and Coatings* (Eds. A. D. Pogrebnjak and V. Novosad) (Springer: 2019), p. 249.
38. N. V. Tarelnyk, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **44**, No. 8: 1037 (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, Ie. V. Konoplianchenko, N. V. Tarelnyk, M. A. Mikulina, V. A. Gerasimenko, O. O. Vasylenko, V. M. Zubko, and V. I. Melnyk, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **44**, No. 10: 1323 (2022) (in Ukrainian).
41. Yu. F. Balandin, I. B. Gorynin, Yu. I. Zvezdin, and B. G. Mirkov, *Konstruktsionnyye Materialy AES* [Constructional Materials of NPP] (Moskva: Ehnergoatomizdat: 1984) (in Russian).
42. E. Mayer, *Tortsovyye Uplotneniya* [Front Seals] (Moskva: Mashinostroyenie: 1978) (Russian translation).
43. A. S. Shelegov, S. T. Leskin, and V. I. Slobodchuk, *Fizicheskie Osobennosti i Konstruktsiya Reaktora VVER-1000* [Physical Features and Design of VVER1000 Reactor] (Moskva: NIYaU 'MIFI': 2011) (in Russian).
44. E. M. Prokhorenko, V. Klepikov, V. V. Lytvynenko, A. Zakharchenko, and M. Khazhmuradov, *Problems of Atomic Science and Technology*, No. 2:193 (2015).
45. V. V. Bryukhovetsky, V. F. Klepikov, V. V. Lytvynenko, D. E. Myla, V. P. Poyda, A. V. Poyda, V. T. Uvarov, Yu. F. Lonin, and A. G. Ponomarev, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B*, **499**: 25 (2021).
46. S. E. Donets, V. F. Klepikov, V. V. Lytvynenko, Yu. F. Lonin, A. G. Ponomarev, O. A. Startsev, and V. T. Uvarov, *Problems of Atomic Scien-*

ceand Technology, No. 4: 302 (2015).
47. V. F. Klepikov, V. V. Lytvynenko, Yu. F. Lonin, A. G. Ponomarev, O. G. Tolstolutskiy, V. V. Uvarov, and V. T. Uvarov, *Problems of Atomic Science and Technology*, No. 1: 119 (2009).
48. A. G. Kobets, P. R. Horodek, O. A. Startsev, V. V. Lytvynenko, Yu. F. Lonin, A. G. Ponomarev, and V. T. Uvarov, *Surf. Eng. Applied Electrochemistry*, **51**: 478 (2015).