

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

Властивості поверхонь деталей із криці зі зносостійкими покриттями складу 1М і 90% ВК6 + 10% 1М, нанесеними методом електроіскрового легування з використанням спеціальних технологічних середовищ. Ч. 2. Зносостійкість, топографічні і механічні властивості

В. Б. Тарельник, О. П. Гапонова*, Н. В. Тарельник,
Є. В. Коноплянченко, С. Г. Бондарев, О. В. Радіонов, М. М. Майфат,
А. В. Охріменко*, М. Ю. Думанчук, К. Г. Сировацький

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

**Сумський державний університет,
вул. Римського-Корсакова, 2,
40007 Суми, Україна*

В статті в результаті порівняльних випробувань встановлено, що ліпшу стійкість проти гідроабразивного зносу мають зразки криці 45 з покриттям, нанесеним методом електроіскрового легування (ЕІЛ) електродою з твердого ступу ВК6 з використанням спеціального технологічного середовища (СТС) складу 0,5%Si + 0,5%B + 2%Cr + 7%Ni + 90% вазелін, знос яких після 24 годин випробування складає 221 мг, що на 122% менше, ніж у зразків без покриття, на 15% і 31% — ніж у зразків з покриттями, нанесене-

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

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

**Sumy State University,
2 Rymskogo-Korsakova Str., UA-40007 Sumy, Ukraine*

Citation: V. B. Tarelnyk, O. P. Gaponova, N. V. Tarelnyk, Ie. V. Konoplianchenko, S. G. Bondarev, O. V. Radionov, M. M. Mayfat, A. V. Okhrimenko, M. Yu. Dumanchuk, K. G. Sirovitskiy, The Surfaces Properties of Steel Parts with Wear-Resistant Coatings of the 1M and 90%BK6 + 10% 1M Composition, Applied by the Method of Electrospark Alloying with the Use of Special Technological Environments. Pt. 2. Wear Resistance, Topographic and Mechanical Properties, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 45, No. 6: 773–794 (2023) (in Ukrainian). DOI:[10.15407/mfint.45.06.0773](https://doi.org/10.15407/mfint.45.06.0773)

ними електродами з ніхромового дроту Х20Н80 з використанням СТС складу 0,5%Si + 0,5%B + 59%BK6 + 40% вазелін і СТС складу 5%Si + 5%B + 90% вазелін відповідно, та на 22% і 47% менше, ніж з покриттями, нанесеними електродами, виготовленими методом порошкової металургії (ПМ) складу 90%BK6 + 10%1M і 1M відповідно. Для криці Р6М5 ліпшу стійкість проти гідроабразивного зносу мають зразки з покриттям, нанесеним методом ЕІЛ електродою з твердого стопу BK6 з використанням СТС складу 0,5%Si + 0,5%B + 2%Cr + 7%Ni + 90% вазелін, знос яких після 24 годин випробування складає 188 мг, що на 43% менше, ніж у зразків без покриття, на 6% і 15% — ніж у зразків з покриттям, нанесеним методом ЕІЛ електродою з ніхромового дроту складу Х20Н80 з використанням СТС складу 0,5%Si + 0,5%B + 59%BK6 + 40% вазелін і СТС складу 5%Si + 5%B + 90% вазелін відповідно, та на 24 і 27% менше, ніж з покриттями, нанесеними електродами, виготовленими методом ПМ, складу 90%BK6 + 10%1M і 1M відповідно. За ЕІЛ електродами-інструментами, виготовленими як методом ПМ, так і за новою технологією з дроту Х20Н80 і твердого стопу BK6 і СТС, деталей із криці 45 і криці Р6М5 відбувається пониження межі міцності та межі плинності відповідно, а відносно подовження та відносне звуження зростають. За подальшого проведення БУФО межа міцності та межа плинності збільшуються, а відносне подовження та відносне звуження зменшуються. До практичної реалізації пропонуються зносостійкі покриття, сформовані за новою технологією, з використанням електрод-інструментів з дроту Х20Н80 і твердого стопу BK6 та СТС у два етапи з наступним БУФО, зростання межі міцності та межі плинності яких збільшуються для криці 45 і криці Р6М5, відповідно, на 4,9% і 4,6% та 3,5% і 2,7%, а відносне подовження та відносне звуження зменшуються, відповідно, на 1,7% і 1,3% та 2,0% і 1,7%; в той же час шерсткість поверхні складає $Ra = 1,1$ мкм, а суцільність — 100%.

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

In the article, as a result of comparative tests, it is established that steel samples with a coating applying the electrospark alloying method (ESA) with a BK6 hard-alloy electrode with the use of a special technological environment (STE) with a composition of 0.5%Si + 0.5%B + 2%Cr + 7%Ni + 90% vaseline, the wear of which after 24 hours of testing is of 221 mg that is 122% less than that for samples without coating and 15% and 31% for samples with coatings applying the nichrome-electrodes' wire X20H80 using STE composition of 0.5%Si + 0.5%B + 59%BK6 + 40% vaseline and STE composition of 5%Si + 5%B + 90% vaseline, respectively, and by 22% and 47% less than with coatings applying the electrodes made by the method of powder metallurgy (PM), the composition of which is of 90%BK6 + 10%1M and 1M, respectively. For P6M5 steel, better resistance against hydroabrasive wear is possessed by samples with a coating applying the ESA method with an electrode made of hard alloy BK6 using STE composition of 0.5%Si + 0.5%B + 2%Cr + 7%Ni + 90% vaseline, the wear of which after 24 hours of testing is of 188 mg that is 43% less than in samples without coating and by 6% and 15% in samples with a coating applying the ESA method with an electrode made of nichrome wire of the composition X20H80 using STE composition of 0.5%Si + 0.5%B +

+ 59%ВК6 + 40% vaseline and STE composition of 5%Si + 5%B + 90% vaseline, and by 24% and 27% less than with coatings applying the electrodes produced by the PM method with a composition of 90%ВК6 + 10%1М and 1М, respectively. In ESA with electrodes-tools made both by the PM method and by the new technology of wire X20H80 and hard alloy ВК6 and STE, parts made of steel 45 and steel P6M5 have a decrease in the strength limit and yield limit, respectively, and both the relative elongation and the relative narrowing increase. With further abrasive-free ultrasonic finishing (AFUF), both the strength limit and the yield strength increase, and both the relative elongation and the relative narrowing decrease. For practical implementation, wear-resistant coatings formed according to the new technology, using tool electrodes made of X20H80 wire and hard alloy ВК6 and STE in two stages with the following AFUF are proposed, the growth of the strength limit and the yield limit of which increase for steel 45 and steel P6M5 by 4.9% and 4.6% and 3.5% and 2.7%, respectively, and relative elongation and relative contraction decrease by 1.7% and 1.3% and 2.0% and 1.7%, respectively. At the same time, the surface roughness is $Ra = 1.1 \mu\text{m}$, and the integrity is of 100%.

Key words: electrospark alloying, electrode tool, coating, 'white layer', microhardness, roughness, integrity.

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

1. ВСТУП

В першій частині [1] циклу статей описано новий спосіб формування захисних покриттів деталей із криці, що працюють в умовах абразивного зношування, як в загальному машинобудуванні, складу 90%ВК6 + 10%1М, так і на виробництвах, де може бути радіаційне опромінювання — 1М (70%Ni, 20%Cr, 5%Si, 5%B), шляхом нанесення їх методом електроіскрового легування (ЕІЛ) компактними електродами-інструментами з ніхромового дроту X20H80 і твердого стопу ВК6 та використання спеціальних технологічних середовищ (СТС), в склад яких входять відсутні легувальні елементи.

В результаті проведених досліджень встановлено, що поверхневі шари криці 45 і P6M5 після нанесення зносостійких покриттів мають структуру, яка складається з трьох ділянок: зверху «білий шар», нижче перехідна зона й основний метал. Із збільшенням енергії розряду (W_p) з 0,52 до 2,6 Дж зростають товщини «білого шару» та перехідної зони, їхня мікротвердість і шерсткість поверхні, але суцільність нанесеного покриття зменшується. Найвища мікротвердість 9750–12800 і 14250–14600 МПа належить покриттям, сформованим, відповідно, на криці 45 і P6M5 за ЕІЛ компактними електродами-інструментами з твердого стопу ВК6 і спеціального технологічного середовища (СТС) складу 0,5%Si + 0,5%B + 2%Cr + 7%Ni + 90% вазелін.

Актуальними задачами, які також потрібно вирішити, залиша-

ються: оцінка зносостійкості покриттів складу 90%ВК6 + 10%1М і 1М (70%Ni, 20%Cr, 5%Si, 5%B), розроблених новим способом, а також їхній вплив на механічні властивості деталей.

2. АНАЛІЗА ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

В результаті аналізу патентних і літературних джерел, проведених в частині 1 [1] даного циклу статей, необхідно відмітити, що велика увага на машинобудівних підприємствах приділяється високій якості продукції, що випускається як на виробництвах загального призначення, так і тих, робота яких пов'язана з радіаційним опромінюванням [2–4]. Враховуючи те, що зношування та руйнування деталей виробів починається переважно з поверхневих шарів, першорядне значення має надання їм захисних властивостей, що досягається різними технологіями, які використовують як на стадії виготовлення, так і під час їх реновації. Для захисту поверхонь деталей переважно використовують покриття, які наносять як окремими технологіями, наприклад, напорошенням твердими зносостійкими матеріалами [5–7], лазерним обробленням [8–11], нанесенням нанокompatитів [12], так і в комбінації з іншими, поєднання яких є ефективніше окремо взятих [13–15].

Серед розглянутих методів відновлення деталей великої уваги заслуговує електроіскрове легування (ЕІЛ), яке є екологічно безпечним й останнім часом все частіше застосовується в ремонтному виробництві [16–18]. Метод ЕІЛ має ряд специфічних особливостей: матеріал аноди (матеріал яким легують) може утворювати на поверхні катоди (поверхня яку легують) шар покриття, надзвичайно міцно зчеплений з поверхнею. У цьому випадку не тільки відсутня межа поділу між нанесеним матеріалом і металом основи, але й відбувається навіть дифузія елементів аноди в катоду [19–21]; легування можна здійснювати у зазначених місцях (радіусом від часток міліметра та більше), не захищаючи решту поверхні деталі; технологія ЕІЛ металевих поверхонь дуже проста, а необхідна апаратура не займає багато місця та достатньо легко транспортується.

Поряд з низкою переваг, основними з яких є міцне зчеплення перенесеного матеріалу з основою, підвищення твердості, корозійної стійкості, зносо- та жаростійкості поверхонь, що труться, метод ЕІЛ має і низку недоліків (збільшення шерсткості поверхні, виникнення в поверхневому шарі розтягувальних напружень, зменшення утомної міцності та ін.), які істотно понижують його використання [22, 23].

Попередніми дослідженнями нами встановлено, що величину шерсткості поверхневого шару після оброблення методом ЕІЛ можна понизити подальшим легуванням електродою-інструментом з такого ж матеріалу, але використовуючи меншої енергії розряд

[10], а змінити розтягувальні напруження на стискальні та збільшити утомну міцність можна шляхом використання після ЕІЛ технології поверхневої пластичної деформації (ППД) [22, 23].

Слід відмітити, що криці 45 і Р6М5 достатньо широко використовують у машинобудуванні для виготовлення, відповідно, деталей машин і металорізальних інструментів. Так, згідно з [24], найбільш поширеними матеріялами валів для насосів загального призначення, що перекачують холодну воду, є криці марок 40, 45, 40Х. Також, у [25] описано результати експериментальних досліджень процесу свердління зразків із криці 40Х, загартованої до твердості *HRC* 38–40 свердлами марки HSS (аналог швидкорізальної легваної криці Р6М5) швейцарської фірми IRWIN. Свердління здійснювалося незміцненими свердлами та зміцненими методом ЕІЛ твердими стопами ТК і ВК, порошковим дротом ПД 80Х20Р3Т, а також порошковим дротом ПД 80Х20Р3Т з додаванням до них компоненту «К». Встановлено, що стійкість свердел, зміцнених порошковим дротом ПД80Х20Р3Т+«К», порівняно із серійним незміцненим збільшилася майже у 7 разів. Металорізальні інструменти в процесі роботи підлягають охолодженню мастильно-охолодною рідиною [26].

Враховуючи те, що деталі із криці 45 і металорізальні інструменти із криці Р6М5 в процесі роботи піддаються абразивному зношуванню в рідинному середовищі, представляє науковий і практичний інтерес дослідити їхню стійкість без покриттів і з покриттями складу 1М і 90%ВК6 + 10%1М, нанесеними методом ЕІЛ на поверхні деталей із криці в умовах гідроабразивного зношування.

Отже, метою цієї частини циклу статей є визначення впливу захисних покриттів складу 1М (70%Ni, 20%Cr, 5%Si, 5%B) і 90%ВК6 + 10%1М, нанесених методом ЕІЛ на поверхні деталей із криці компактними електродами-інструментами з ніхромового дроту Х20Н80 і з твердого стопу ВК6 з використанням СТС, на їхню стійкість за гідроабразивного зношування та механічні властивості.

3. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

З метою оцінки зносостійкості проти дії на поверхню, що зношується, абразиву виготовляли зразки із криць 45 і Р6М5 розміром 15×15×10 мм без покриттів і з покриттями, нанесеними згідно з табл. 1.

Нами в попередніх дослідженнях для проведення випробувань зразків на гідроабразивну зносостійкість було розроблено конструкцію і виготовлено дослідну установку (рис. 1, а) [27]. Як абразивний матеріал використовували водну суміш піску з розміром частинок у 0,1–0,5 мм (рис. 1, б) і концентрацією у 100 г/л.

Зразки для визначення інтегрального зносу всієї поверхні перед випробуванням зважували на аналітичних вагах ВЛА-200 з точністю до 0,0001 г. Інтегральний (ваговий) знос визначали як різницю ваги

ТАБЛИЦЯ 1. Серії зразків для випробувань на стійкість проти гідроабразивного зношування.**TABLE 1.** Series of test specimens for resistance to water-abrasive wear.

Матеріал зразка	Електрода-інструмент	Матеріал електроди-інструменту	Склад спеціального технологічного середовища
Криця 45	–	–	–
Криця Р6М5	–	–	–
Криця 45		90%ВК6 + 10%1М	–
	Виготовлений методом ПМ	1М	–
Криця Р6М5		90%ВК6 + 10%1М	–
		1М	–
	Ніхромовий дріт Ø 3 мм	X20H80	5%Si + 5%B + 90% вазелін 0,5%Si + 0,5%B + 59%ВК6 + 40% вазелін
Криця 45	Стандартні пластини розміром 2×3×30 мм	твердий стоп ВК6	0,5%Si + 0,5%B + 2%Cr + 7%Ni + 90% вазелін
	Ніхромовий дріт Ø 3 мм	X20H80	5%Si + 5%B + 90% вазелін 0,5%Si + 0,5%B + 59%ВК6 + 40% вазелін
Криця Р6М5	Стандартні пластини розміром 2×3×30 мм	твердий стоп ВК6	0,5%Si + 0,5%B + 2%Cr + 7%Ni + 90% вазелін

зразка до і після проведення випробувань. Показники контролювали через кожні 6 годин. Дослідження проводили протягом 24 годин.

Зразки фіксували на диску за допомогою тримачів (рис. 1, а, з). Кріплення тримача до диска уможливило змінювати кут контакту зразка з абразивом. В процесі випробувань зразки, закріплені під кутом у 45°, оберталися зі швидкістю у 120 об/хв.

Зразки без покриттів і з покриттями, згідно з табл. 1, випробували двома партіями: окремо із криці 45 і криці Р6М5, по 6 зразків у кожній партії:

1-й зразок — без покриття;

2-й зразок — покриття 90%ВК6 + 10%1М (електроду виготовлено методом ПМ);

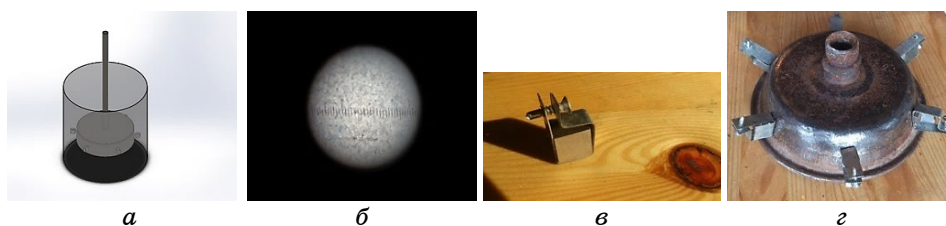


Рис. 1. Дослідна установка для визначення гідроабразивної зносостійкості: схема (а), розмір частинок піску (б), фіксація зразків на диску (в), розміщення тримачів на диску (г) [27].

Fig. 1. Experimental setup for determining hydroabrasive wear resistance: scheme (a), size of sand particles (b), fixation of samples on the disc (v), placement of holders on the disk (z) [27].

- 3-й зразок — покриття 1М (електроду виготовлено методом ПМ);
 4-й зразок — покриття електродою-інструментом з ніхромового дроту складу Х20Н80 з використанням СТС складу 5%Si + 5%B + 90% вазелін;
 5-й зразок — покриття електродою-інструментом з ніхромового дроту складу Х20Н80 з використанням СТС складу 0,5%Si + 0,5%B + 59%BK6 + 40% вазелін;
 6-й зразок — покриття електродою-інструментом з твердого стопу BK6 з використанням СТС складу 0,5%Si + 0,5%B + 2%Cr + 7%Ni + 90% вазелін.

Згідно з ДСТУ 7809, для дослідження впливу різних технологій зміцнення на фізико-механічні властивості деталю було виготовлено зразки із криці 45 і криці Р6М5 (рис. 2).

Зміцнення виконувалося на установці ЕІЛ «Елітрон-52А» в два



Рис. 2. Зразки для випробування на розрив.

Fig. 2. Tensile test specimen.

ТАБЛИЦЯ 2. Застосовані методи оброблення зразків для випробування на розрив.**TABLE 2.** Applied methods of sample processing during tensile testing.

		Матеріал	
зразка		покриття	
	Електрода-інструмент	СТС	
		без покриття	
криця 45	виготовлений методом ПМ	90%ВК6 + 10%1М	
		1М	
	X20H80	5%Si + 5%B + 90% вазелін	
	твердий стоп ВК6	0,5%Si + 0,5%B + 59%ВК6 + 40% вазелін	
		без покриття	
криця Р6М5	виготовлений методом ПМ	90%ВК6 + 10%1М	
		1М	
	X20H80	5%Si + 5%B + 90% вазелін	
	твердий стоп ВК6	0,5%Si + 0,5%B + 59%ВК6 + 40% вазелін	
		0,5%Si + 0,5%B + 2%Cr + 7%Ni + 90% вазелін	

етапи:

1-й етап із $Wp = 2,6$ Дж і продуктивністю, відповідно, $T = 2,0$ см²/хв;
2-й етап із $Wp = 0,13$ Дж і продуктивністю, відповідно $T = 0,5$ см²/хв.

Режими оброблення методом ЕІЛ і матеріал покриття зазначено в табл. 2.

Після оброблення методом ЕІЛ деякі зразки із криці 45 зміцнювали методом безабразивного ультразвукового фінішного оброблення (БУФО).

Шерсткість вимірювали на приладі профілограф-профілометр мод. 201 заводу «Калібр» шляхом зняття й оброблення профілограм.


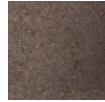







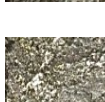


4. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

4.1. Оцінка гідроабразивної зносостійкості

З метою оцінки гідроабразивної зносостійкості покриттів, сформованих за різною технологією, проводилися випробування на знос.

ТАБЛИЦЯ 3. Результати інтенсивності зношення зразків криці 45.

TABLE 3. Results of wear intensity of steel 45 samples.

№	Покриття	Час зношування, год.				Зразок до зносу	Зразок після зносу
		6	12	18	24		
		Втрата ваги, Δm , мг					
1.	без покриття	103	215	344	491		
2.	електродою 100% 1М, виготовленою методом ПМ	71	146	230	325		
3.	електродою 90%ВК6 + 10%1М, виготовленою методом ПМ	61	124	193	270		
4.	електродою з ніхромового дроту складу Х20Н80 з використанням СТС складу 5%Si + 5%B + 90% вазелін	65	133	207	289		
5.	електродою з ніхромового дроту складу Х20Н80 з використанням СТС складу 0,5%Si + 0,5%B + 59%ВК6 + 40% вазелін	58	118	183	254		
6.	електродою з твердого ступу ВК6 з використанням СТС складу 0,5%Si + 0,5%B + 2%Cr + 7%Ni + 90% вазелін	51	104	160	221		

В таблиці 3 представлено результати дослідження зразків криці 45 без покриття і з покриттями, нанесеними методом ЕІЛ: електродами, виготовленими методом ПМ, відповідно, 1М і 90%ВК6 + 10%, та за новою технологією, відповідно, компактною електродою-інструментом з ніхромового дроту складу Х20Н80 з використанням СТС складу 5%Si + 5%B + 90% вазелін і складу 0,5%Si + 0,5%B + 59%ВК6 + 40% вазелін, а також компактною електродою-інструментом з твердого ступу ВК6 і з використанням СТС складу 0,5%Si + 0,5%B + 2%Cr + 7%Ni + 90% вазелін.

На рисунку 3 представлено графіки зміни втрати маси за гідроабразивного зношування зразків криці 45 без покриття (1) і з покриттями, нанесеними методом ЕІЛ електродами, виготовленими мето-

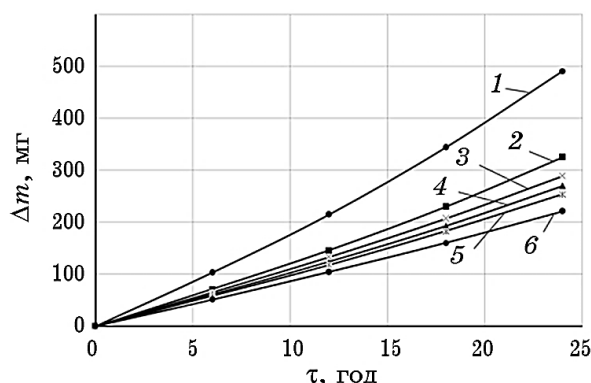


Рис. 3. Залежність гідроабразивного зносу (по втраті маси) від часу випробування зразків криці 45: без покриття (1), ЕІЛ електродою 1М, виготовленою методом ПМ (2), ЕІЛ електродою з ніхромового дроту складу Х20Н80 з використанням СТС складу 5%Si + 5%B + 90% вазелін (3), ЕІЛ електродою 90%BK6 + 10%1М, виготовленою методом ПМ (4), ЕІЛ електродою з ніхромового дроту складу Х20Н80 з використанням СТС складу 0,5%Si + 0,5%B + 59%BK6 + 40% вазелін (5), ЕІЛ електродою з твердого стопу ВК6 з використанням СТС складу 0,5%Si + 0,5%B + 2%Cr + 7%Ni + 90% вазелін (6).

Fig. 3. Dependence of hydroabrasive wear (by mass loss) on the test time of steel 45 samples: without coating (1), ESA with a 1M electrode made by the PM method (2), ESA with an electrode made of nichrome wire of the composition X20H80 using STE of the composition of 5%Si + 5%B + 90% vaseline (3), ESA electrode 90%BK6 + 10%1M manufactured by the PM method (4), ESA electrode made of nichrome wire of composition X20H80 using STE composition of 0.5%Si + 0.5%B + 59%BK6 + 40% vaseline (5), ESA electrode made of BK6 hard alloy using STE composition of 0.5%Si + 0.5%B + 2%Cr + 7%Ni + 90% vaseline (6).

дом ПМ, відповідно, 1М (2) і 90%BK6 + 10%1М (4), і за новою технологією, відповідно, компактною електродою-інструментом з ніхромового дроту складу Х20Н80 з використанням СТС складу 5%Si + 5%B + 90% вазелін (3) і складу 0,5%Si + 0,5%B + 59%BK6 + 40% вазелін (5), а також компактною електродою-інструментом з твердого стопу ВК6 і з використанням СТС складу 0,5%Si + 0,5%B + 2%Cr + 7%Ni + 90% вазелін (6).

В результаті аналізу табл. 3 і рис. 3 з'ясовано, що ліпшу стійкість проти гідроабразивного зносу мають зразки криці 45 з покриттям, нанесеним методом ЕІЛ електродою з твердого стопу ВК6 з використанням СТС складу 0,5%Si + 0,5%B + 2%Cr + 7%Ni + 90% вазелін.

Після 24 годин випробувань знос цих зразків складає 221 мг. Знос зразків з покриттям, нанесеним методом ЕІЛ електродою з ніхромового дроту складу Х20Н80 з використанням СТС складу 0,5%Si + 0,5%B + 59%BK6 + 40% вазелін і СТС складу 5%Si + 5%B +

+ 90% вазелін, складає, відповідно, на $\cong 15\%$ і 31% більше, тобто 254 мг і 289 мг, а з покриттями, нанесеними електродами, виготовленими методом ПМ, складу $90\%VK6 + 10\%1M$ і $1M$ більше, відповідно, на $\cong 22\%$ і 47% , тобто 270 мг і 325 мг.

Найбільший знос — у зразків без покриття, який складає 491 мг, що на 122% більше, ніж у зразка з покриттям, нанесеним методом ЕІЛ за новою технологією електродою з твердого стопу $VK6$ з використанням СТС складу $0,5\%Si + 0,5\%V + 2\%Cr + 7\%Ni + 90\%$ вазелін.

Аналіза ефективності процесу зношування показала, що зі збільшенням часу зношування за рівні проміжки часу поступово збільшується. Так, для зразків без покриття та зразків з найменшим зносом з покриттям, нанесеним методом ЕІЛ за новою технологією електродою з твердого стопу $VK6$ з використанням СТС складу $0,5\%Si + 0,5\%V + 2\%Cr + 7\%Ni + 90\%$ вазелін, знос у міру збільшення часу за кожні 6 годин постійно збільшується та складає, відповідно, 103, 112, 129, 147 мг і 51, 53, 56, 61 мг.

Візуальна аналіза зразків показала, що після 24 годин випробувань під дією абразивних частинок зовнішній вигляд поверхонь зразків змінився. Поверхні всіх зразків з покриттями, нанесеними методом ЕІЛ, стали більш блискучими, а профіль шерсткості став меншим за розміром і більш покатим («розмитим»). Колір зразка без покриття навпаки потемнів, що відбулось, очевидно, через появу слідів абразивного зносу та забруднення западин і інших недосконаlostей, які виникли в результаті зношування (див. табл. 3).

В таблиці 4 представлено результати дослідження зразків криці Р6М5 без покриття і з покриттями, нанесеними методом ЕІЛ: електродами, виготовленими методом ПМ, відповідно, $1M$ і $90\%VK6 + 10\%$, і за новою технологією, відповідно, компактною електродою-інструментом з ніхромового дроту складу Х20Н80 з використанням СТС складу $5\%Si + 5\%V + 90\%$ вазелін і складу $0,5\%Si + 0,5\%V + 59\%VK6 + 40\%$ вазелін, а також компактною електродою-інструментом з твердого стопу $VK6$ і з використанням СТС складу $0,5\%Si + 0,5\%V + 2\%Cr + 7\%Ni + 90\%$ вазелін.

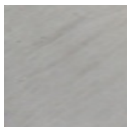


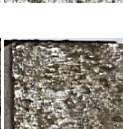
На рисунку 4 представлено графіки гідроабразивного зношування зразків криці Р6М5 без покриття (1) і з покриттями, нанесеними методом ЕІЛ.

В результаті аналізу табл. 4 і рис. 4 встановлено, що ліпшу стійкість проти гідроабразивного зносу мають зразки криці Р6М5 з покриттям, нанесеним методом ЕІЛ електродою з твердого стопу $VK6$ з використанням СТС складу $0,5\%Si + 0,5\%V + 2\%Cr + 7\%Ni + 90\%$ вазелін.

Після 24 годин випробувань знос цих зразків складає 188 мг. Знос зразків з покриттям, нанесеним методом ЕІЛ електродою з ніхромового дроту складу Х20Н80 з використанням СТС складу $0,5\%Si + 0,5\%V + 59\%VK6 + 40\%$ вазелін і СТС складу $5\%Si + 5\%V +$

ТАБЛИЦЯ 4. Результати інтенсивності зношення зразків криці Р6М5.

TABLE 4. Results of wear intensity of P6M5 steel samples.

№	Покриття	Час зношування, год.				Зразок до зносу	Зразок після зносу
		6	12	18	24		
		Втрата ваги, мг					
1.	без покриття	61	124	192	268		
2.	електродою 1М, виготовленою методом ПМ	57	115	175	238		
3.	електродою 90%ВК6+10%1М, виготовленою методом ПМ	53	108	167	234		
4.	електродою з ніхромового дроту складу Х20Н80 з використанням СТС складу 5%Si+5%B+90% вазелін	49	100	155	216		
5.	електродою з ніхромового дроту складу Х20Н80 з використанням СТС складу 0,5%Si+0,5%B+59%ВК6+40% вазелін	45	92	143	200		
6.	електродою з твердого стопу ВК6 з використанням СТС складу 0,5%Si+0,5%B+2%Cr+7%Ni +90% вазелін	41	84	132	188		

+ 90% вазелін, складає, відповідно, на $\cong 6\%$ і 15% більше, тобто 200 мг і 216 мг, а з покриттями, нанесеними електродами, виготовленими методом ПМ, складу 90%ВК6 + 10%1М і 1М більше, відповідно, на $\cong 24\%$ і 27% , тобто 234 мг і 238 мг.

Найбільший знос — у зразків без покриття, який складає 268 мг, що на 43% більше, ніж у зразка з покриттям, нанесеним методом ЕІЛ за новою технологією електродами з твердого стопу ВК6 з використанням СТС складу 0,5%Si + 0,5%B + 2%Cr + 7%Ni + 90% вазелін.

Аналіза ефективності процесу зношування показала, що зі збі-

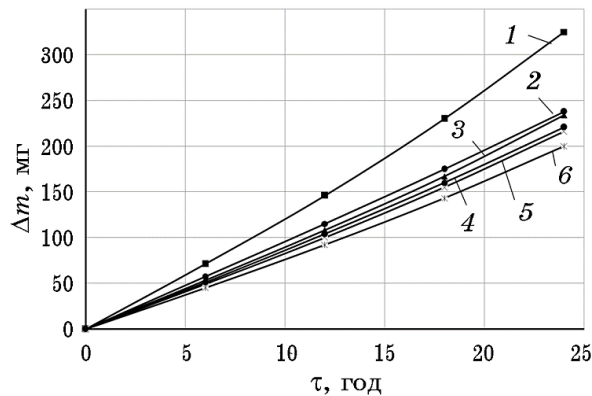


Рис. 4. Залежність гідроабразивного зносу (по втраті ваги) від часу випробування зразків криці Р6М5: без покриття (1), електродою 1М, виготовленою методом ПМ (2), електродою 90%ВК6 + 10%1М, виготовленою методом ПМ (3), електродою з ніхромового дроту складу Х20Н80 з використанням СТС складу 5%Si + 5%B + 90% вазелін (4), електродою з ніхромового дроту складу Х20Н80 з використанням СТС складу 0,5%Si + 0,5%B + 59%ВК6 + 40% вазелін (5), електродою з твердого стопу ВК6 з використанням СТС складу 0,5%Si + 0,5%B + 2%Cr + 7%Ni + 90% вазелін (6).

Fig. 4. Dependence of hydroabrasive wear (by weight loss) on the test time of P6M5 steel samples: without coating (1), with a 1M electrode made by the PM method (2), with a 90%VK6 + 10%1M electrode made by the PM method (3), with an electrode of nichrome wire of the composition X20H80 using STE composition of 5%Si + 5%B + 90% vaseline (4), electrode of nichrome wire composition X20H80 using STE composition of 0.5%Si + 0.5%B + 59%VK6 + 40% vaseline (5), electrode made of hard alloy VK6 using STE composition of 0.5%Si + 0.5%B + 2%Cr + 7%Ni + 90% vaseline (6).

льшенням часу знос за рівні проміжки часу поступово збільшується. Так, для зразків без покриття та зразків з найменшим зносом із покриттям, нанесеним методом ЕІЛ за новою технологією електродою з твердого стопу ВК6 з використанням СТС складу 0,5%Si + 0,5%B + 2%Cr + 7%Ni + 90% вазелін, знос у міру збільшення часу за кожні 6 годин постійно збільшується і складає, відповідно, 61, 63, 68, 76 мг і 41, 43, 48, 56 мг.

Візуальна аналіза зразків показала, що після 24 годин випробувань під дією абразивних частинок зовнішній вигляд поверхонь зразків змінився. Поверхні всіх зразків з покриттями, нанесеними методом ЕІЛ, стали більш світлішими, а профіль шерсткості став меншим за розміром і більш покатим («розмитим»). Колір зразка без покриття, навпаки, потемнів, що відбулось, очевидно, через появу слідів абразивного зносу і забруднення западин і інших недосконалоостей, які виникли в результаті зношування (див. табл. 4).

4.2. Результати дослідження впливу способів нанесення зносостійких покриттів на топографічні та механічні властивості деталей із криці

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

В таблиці 5 представлено зведені дані результатів дослідження впливу різних технологій нанесення покриттів методом ЕІЛ і ЕІЛ + БУФО на топографію та механічні властивості деталей із криць 45 і Р6М5.

ТАБЛИЦЯ 5. Результати дослідження впливу різних технологій, що зміцнюють, на топографію та механічні властивості деталей із криці.

TABLE 5. Results of the study of the impact of various strengthening technologies on the topography and mechanical properties of steel parts.

Метод нанесення покриття	Енергія розряду, Дж	Продуктивність, см ² /хв	Межа плинності, МПа	Межа міцності, МПа	Відносне подовження, %	Відносне звуження, %	Шерсткість, Ra	Суцільність, %
±								
Криця 45								
без покриття в нормалізованому стані	–	–	355	600	16	40	0,5	–
електродою, виготовленою методом ПМ, складу 90%ВК6+10%1М	2,6	2,0	315	552	18,0	41,0	6,5	70
			–12,7	–8,7	+12,5	+2,5		
	2,6+0,13	2,0+0,5	343	575	17,5	40,5	1,9	80
			–3,5	–4,9	+9,4	+1,3		
електродою, виготовленою методом ПМ, складу 90%ВК6+10%1М+БУФО	2,6+0,13	2,0+0,5	362	615	15,9	39,7	1,3	90
			+1,97	+2,5	–0,6	–0,8		
	2,6	2,0	320	563	18,0	41,0	6,3	60
електродою, виготовленою методом ПМ, складу 1М			–10,9	–6,6	+12,5	+2,5		
	2,6+0,13	2,0+0,5	333	582	17,5	40,5	1,9	70
			–6,6	–3,1	+9,4	+1,3		
електродою, виготовленою методом ПМ, складу 1М+БУФО	2,6+0,13	2,0+0,5	368	622	15,7	39,6	1,2	80
			+3,7	+3,7	–1,9	–1,0		

Продовження ТАБЛИЦІ 5.

Continuation of TABLE 5.

електродою, виготовленою з дроту Х20Н80	2,6	2,0	325	569	18,0	41,0	6,1	70
з СТС складу			-9,2	-5,4	+12,5	+2,5		
5%Si+5%B+90% вазелін	2,6+0,13	2,0+0,5	343	584	17,5	40,4	1,6	90
			-3,5	-2,7	+9,4	+1,0		
електродою, виготовленою з дроту Х20Н80	2,6+0,13	2,0+0,5	371	625	15,8	39,3	1,1	100
з СТС складу			+4,5	+4,2	-1,3	-1,8		
5%Si+5%B+90% вазелін+БУФО								
електродом, виготовленою з дроту Х20Н80	2,6	2,0	327	571	17,9	40,9	6,5	70
з СТС складу			-8,6	-5,0	+11,9	+2,3		
0,5%Si+0,5%B+59%BK6+	2,6+0,13	2,0+0,5	345	585	17,5	40,4	1,8	2,6+0,13
+40% вазелін			-2,9	-2,6	+9,4	+1,0		
електродою, виготовленою з дроту Х20Н80	2,6+0,13	2,0+0,5	371	627	15,7	39,6	1,2	100
з СТС складу			+4,5	+4,5	-1,9	-1,0		
0,5%Si+0,5%B+59%BK6+								
+40% вазелін+БУФО								
електродою, виготовленою з твердого стопу BK6 з СТС складу	2,6	2,0	332	575	17,8	40,8	5,9	70
0,5%Si+0,5%B+2%Cr+7%Ni+	2,6+0,13	2,0+0,5	349	588	17,5	40,4	1,5	95
+90% вазелін			-1,7	-2,0	+9,4	+1,0		
електродою, виготовленою з твердого стопу BK6 з СТС складу	2,6+0,13	2,0+0,5	375	630	15,7	39,6	1,0	100
0,5%Si+0,5%B+2%Cr+7%Ni+			+5,6	+5,0	-1,9	-1,0		
+90% вазелін+БУФО								
Криця Р6М5								
без покриття в нормалізованому стані	-	-	510	850	12,0	14,0	0,5	-
	2,6	2,0	460	790	13,0	15,0	5,3	80
електродою, виготовленою методом ПМ, складу 90%BK6+10%1M	2,6+0,13	2,0+0,5	480	819	12,7	14,7	2,0	90
			-10,9	-7,6	+8,3	+7,1		
			-6,3	-3,8	+5,8	+5		
електродою, виготовленою методом ПМ, складу	2,6+0,13	2,0+0,5	520	865	11,9	13,9	1,3	95
90%BK6+10%1M+БУФО			+2,0	+1,8	-0,8	-0,7		

Продовження ТАБЛИЦІ 5.

Continuation of TABLE 5.

	2,6	2,0	455	797	13,0	15,0	5,3	80
електродою, виготовленою методом ПМ, складу 1М			-12,1	-6,6	+8,3	+7,1		
	2,6+0,13	2,0+0,5	476	815	12,7	14,7	1,9	90
			-7,1	-4,3	+5,8	+5,0		
електродою, виготовленою методом ПМ, складу 1М+БУФО	2,6+0,13	2,0+0,5	520	865	11,9	13,9	1,2	95
			+2,0	+1,8	-0,8	-0,7		
електродою, виготовленою з дроту Х20Н80 з СТС складу 5%Si+5%B+90% вазелін	2,6	2,0	465	810	13,0	15,0	5,3	80
			-9,7	-4,9	+8,3	+7,1		
	2,6+0,13	2,0+0,5	480	830	12,6	14,6	1,9	90
			-6,3	-2,4	+5,0	+4,3		
електродою, виготовленою з дроту Х20Н80 з СТС складу 5%Si+5%B+90% вазелін+БУФО	2,6+0,13	2,0+0,5	525	870	11,8	13,8	1,1	100
			+3,3	+2,4	-1,7	-1,4		
електродою, виготовленою з дроту Х20Н80 з СТС складу 0,5%Si+0,5%B+59%BK6+ +40% вазелін	2,6	2,0	470	815	13,0	15,0	5,7	80
			-8,5	-4,3	+8,3	+7,1		
	2,6+0,13	2,0+0,5	490	835	12,6	14,6	1,9	90
			-4,1	-1,8	+5,0	+4,3		
електродою, виготовленою з дроту Х20Н80 з СТС складу 0,5%Si+0,5%B+59%BK6+ +40% вазелін+БУФО	2,6+0,13	2,0+0,5	527	873	11,8	13,8	1,1	100
			+3,3	+2,7	-1,7	-1,4		
електродою, виготовленою з твердого сто- пу BK6 з СТС складу 0,5%Si+0,5%B+2%Cr+7%Ni+ +90% вазелін	2,6	2,0	472	817	12,9	14,9	5,9	80
			-8,1	-4,0	+7,5	+6,4		
	2,6+0,13	2,0+0,5	495	840	12,8	14,8	1,9	90
			-3,0	-1,2	+6,7	+5,7		
електродою, виготовленою з твердого сто- пу BK6 з СТС складу 0,5%Si+0,5%B+2%Cr+7%Ni+ +90% вазелін+БУФО	2,6+0,13	2,0+0,5	530	875	11,7	13,7	1,1	100
			+3,9	+2,9	-2,6	-2,2		

В результаті аналізу таблиці встановлено, що за ЕІЛ електродами-інструментами, виготовленими методом ПМ, зразків із криць 45 і Р6М5 відбувається пониження межі міцности та межі плинности,

відповідно, на 11,8% і 7,7% та 11,5% і 7,1%, а відносно подовження і відносно звуження зростають, відповідно, \cong на 12,5% і 2,5% та 8,0% і 6,9%.

Слід відмітити, що електроіскрові покриття, підвищуючи одні експлуатаційні характеристики (ψ , δ), нерідко погіршують інші (σ_B , σ_T). Це можна пояснити наступним чином. Нанесення методом ЕІЛ покриттів супроводжується збільшенням шерсткості поверхневого шару (з $Ra = 0,5$ мкм до $Ra = 5,3$ – $6,5$ мкм) і появою значної кількості концентраторів напружень; суцільність покриття складає 70–80%. Також у поверхневому шарі виникають залишкові розтягувальні напруження. За нанесення зносостійких ЕП, сформованих у два етапи, вплив негативних процесів значно менший. Так, шерсткість зменшується до $Ra = 1,9$ – $2,0$ мкм, а суцільність покриття збільшується до 90% і, як результат, межа міцності та межа плинності зменшуються для криці 45 і криці Р6М5, відповідно, \cong на 5,1% і 4,0% та 2,7% і 2,4%, а відносно подовження і відносно звуження зростають, відповідно, \cong на 9,4% і 1,3% та 5,8% і 5,0%.

За подальшого БУФО шерсткість поверхні становиться ще меншою ($Ra = 1,9$ – $2,0$ мкм), суцільність покриття збільшується до 95%, а залишкові напруження стають стискальними. В результаті межа міцності та межа плинності збільшуються для криці 45 і криці Р6М5, відповідно, \cong на 2,8% і 3,1% та 2,0% і 1,8%, а відносно подовження та відносно звуження зменшуються, відповідно, \cong на 1,3% і 0,9% та 0,8% і 0,7%.

Характер зміни механічних властивостей не змінюється за нанесення зносостійких покриттів на крицю 45 і крицю Р6М5 за новою технологією з використанням електрод-інструментів з дроту Х20Н80 і твердого стопу ВК6 та спеціальних технологічних середовищ.

Але слід відмітити, що за нанесення зносостійких ЕП, сформованих за новою технологією, як за один етап, так і в два етапи, пониження межі міцності та межі плинності значно менші та складають, відповідно, 8,2% і 4,9% та 2,7% і 2,4% і 8,8% і 4,4% та 4,5% і 1,8%, а відносно подовження та відносно звуження зростають також менше, відповідно, на 11,9% і 1,7% та 9,4% і 1,0% та 8,0% і 6,9% та 5,6% і 4,8%. За подальшого БУФО зростання межі міцності та межі плинності також збільшуються для криці 45 і криці Р6М5, відповідно, на 4,9% і 4,6% та 3,5% і 2,7%, а відносно подовження та відносно звуження зменшуються, відповідно, на 1,7% і 1,3% та 2,0% і 1,7%. Шерсткість зменшується до $Ra = 1,1$ мкм, а суцільність складає 100%.

ВИСНОВКИ

1. В результаті порівняльних випробувань встановлено, що ліпшу

стійкість проти гідроабразивного зносу мають зразки криці 45 з покриттям, нанесеним методом ЕІЛ електродою з твердого стопу ВК6 з використанням СТС складу $0,5\%Si + 0,5\%V + 2\%Cr + 7\%Ni + 90\%$ вазелін, знос яких після 24 годин випробування складає 221 мг, що на 122% менше, ніж у зразків без покриття і на 15% і 31% ніж у зразків з покриттями, нанесеними електродами з ніхромового дроту Х20Н80 з використанням СТС складу $0,5\%Si + 0,5\%V + 59\%VK6 + 40\%$ вазелін і СТС складу $5\%Si + 5\%V + 90\%$ вазелін та на 22% і 47% менше, чим з покриттями, нанесеними електродами, виготовленими методом ПМ, складу $90\%VK6 + 10\%1M + 1M$.

2. Ліпшу стійкість проти гідроабразивного зносу мають зразки із криці Р6М5 з покриттям, нанесеним методом ЕІЛ електродою з твердого стопу ВК6 з використанням СТС складу $0,5\%Si + 0,5\%V + 2\%Cr + 7\%Ni + 90\%$ вазелін, знос яких після 24 годин випробувань складає 188 мг, що на 43% менше, ніж у зразків без покриття та на 6% і 15% ніж у зразків з покриттям, нанесеним методом ЕІЛ електродою з ніхромового дроту складу Х20Н80 з використанням СТС складу $0,5\%Si + 0,5\%V + 59\%VK6 + 40\%$ вазелін і СТС складу $5\%Si + 5\%V + 90\%$ вазелін, та на 24% і 27% менше, ніж з покриттями, нанесеними електродами, виготовленими методом ПМ, складу $90\%VK6 + 10\%1M + 1M$.

3. Аналіза ефективності процесу зношування показала, що зі збільшенням часу знос за рівні проміжки часу поступово збільшується. Так, для зразків з і без покриття та зразків з найменшим зносом з покриттям, нанесеним методом ЕІЛ за новою технологією електродою з твердого стопу ВК6 з використанням СТС складу $0,5\%Si + 0,5\%V + 2\%Cr + 7\%Ni + 90\%$ вазелін, знос по мірі збільшення часу за кожні 6 годин постійно збільшується і складає для криці 45, відповідно, 103, 112, 129, 147 мг і 51, 53, 56, 61 мг, а для криці Р6М5, відповідно, 61, 63, 68, 76 мг і 41, 43, 48, 56 мг.

4. За ЕІЛ електродами-інструментами, виготовленими методом ПМ, деталей із криці 45 і криці Р6М5 стається пониження межі міцності та межі плинності, відповідно, на 11,8% і 7,7% та 11,5% і 7,1%, а відносне подовження та відносне звуження зростають, відповідно, на 12,5% і 2,5% та 8,0% і 6,9%. Шерсткість поверхневого шару зростає з $Ra = 0,5$ мкм до $Ra = 5,3-6,5$ мкм, а суцільність покриття складає 70–80%.

5. З нанесенням зносостійких ЕП, сформованих в два етапи, шерсткість поверхні збільшується з $Ra = 0,5$ мкм до $Ra = 1,9-2,0$ мкм, а суцільність покриття збільшується до 90% і, як результат, межа міцності та межа плинності зменшуються для криці 45 і криці Р6М5, відповідно, на 5,1% і 4,0% та 2,7% і 2,4%, а відносне подовження та відносне звуження зростають, відповідно, \cong на 9,4% і 1,3% та 5,8% і 5,0%.

6. За нанесення зносостійких ЕП, сформованих в два етапи, та про-

ведення БУФО шерсткість поверхні становиться ще меншою — $Ra = 1,9\text{--}2,0$ мкм, суцільність покриття збільшується до 95%. В результаті межа міцності та межа плинності збільшуються для криці 45 і криці Р6М5, відповідно, на 2,8% і 3,1% та 2,0% і 1,8%, а відносне подовження та відносне звуження зменшуються, відповідно, на 1,3% і 0,9% та 0,8% і 0,7%.

7. З нанесенням зносостійких ЕП, сформованих за новою технологією з використанням електрод-інструментів з дроту Х20Н80 і твердого стопу ВК6 та СТС, як за один етап, так і у два етапи, пониження межі міцності та межі плинності значно менше і складає, відповідно, 8,2% і 4,9% та 2,7% і 2,4% і 8,8% і 4,4% та 4,5% і 1,8%, а відносне подовження та відносне звуження зростають також менше, відповідно, на 11,9% і 1,7% та 9,4% і 1,0% й 8,0% і 6,9% та 5,6% і 4,8%. За подальшого БУФО зростання межі міцності та межі плинності збільшуються для криці 45 і криці Р6М5, відповідно, на 4,9% і 4,6% та 3,5% і 2,7%, а відносне подовження та відносне звуження зменшуються, відповідно, на 1,7% і 1,3% та 2,0% і 1,7%. Шерсткість поверхні зменшується до $Ra = 1,1$ мкм, а суцільність складає 100%.

8. До практичної реалізації пропонуються зносостійкі ЕП, сформовані за новою технологією з використанням електрод-інструментів з дроту Х20Н80 і твердого стопу ВК6 та СТС в два етапи з наступним БУФО, зростання межі міцності та межі плинності яких збільшуються для криці 45 і криці Р6М5, відповідно, на 4,9% і 4,6% та 3,5% і 2,7%, а відносне подовження та відносне звуження зменшуються, відповідно, на 1,7% і 1,3% та 2,0% і 1,7%. Шерсткість поверхні при цьому складає $Ra = 1,1$ мкм, а суцільність — 100%.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. 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, *Металофіз. новітні технол.*, **45**, № 5: 663 (2023).
2. I. Kuric, M. Kandra, 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.
3. A. Zahorulko, C. Kundera, and S. Hudkov, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **233**: 012039 (2017).
4. A. Zahorulko, *Sealing Technology*, **2015**, Iss. **8**: 7 (2015).
5. A. A. Parkin, S. S. Zhatkin, and A. B. Semin, *Izvestiya Samarського Nauchnogo Tsentra Rossiyskoy Akademii Nauk*, **18**, No. 4 (2): 362 (2016) (in Russian).
6. A. Panasyuk, O. Umanskyi, M. Storozhenko, and V. Akopyan, *Key Engineering Materials*, **527**: 9 (2013).
7. O. Umanskyi, M. Storozhenko, M. Antonov, O. Terentjev, O. Koval, and D. Goljandin, *Key Engineering Materials*, **604**: 16 (2019).

8. N. Radek and K. Bartkowiak, *Physics Procedia A*, **5**: 417 (2010).
9. V. G. Smelov, A. V. Sotov, and S. A. Kosirev, *ARPN J. Eng. Applied Sci.*, **9**, No. 10: 1854 (2014).
10. 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. Pogrebnyak and V. Novosad) (Springer: 2019), p. 249.
11. V. Tarelnyk, I. Konoplianchenko, O. Gaponova, N. Tarelnyk, V. Martsynkovskyy, B. Sarzhanov, O. Sarzhanov, and B. Antoszewski, *Powder Metall. Met. Ceram.*, **58**: 703 (2020).
12. A. D. Pogrebnyak, A. M. Mahmud, I. T. Karasha, G. V. Kirik, R. Y. Tkachenko, and A. P. Syrylenko, *J. Nano- Electron. Phys.*, **3**, No. 4: 73 (2011).
13. В. Б. Тарельник, О. П. Гапонова, Е. В. Коноплянченко, В. С. Марцинковский, Н. В. Тарельник, О. А. Василенко, *Металлофиз. новейшие технол.*, **41**, № 2: 173 (2019).
14. V. Martsinkovsky, V. Yurko, V. Tarelnik, and Y. Filonenko, *Procedia Engineering*, **39**: 148 (2012).
15. V. Martsinkovsky, V. Yurko, V. Tarelnik, and Y. Filonenko, *Procedia Engineering*, **39**: 157 (2012).
16. B. Antoszewski, O. Gaponova, V. Tarelnyk, O. Myslyvchenko, P. Kurp, T. Zhylenko, and Ie. Konoplianchenko, *Materials*, **14**: 739 (2021).
17. V. B. Tarelnyk, A. V. Paustovskii, Y. G. Tkachenko, E. V. Konoplianchenko, V. S. Martsynkovskiy, and B. Antoszewski, *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, **55**: 585 (2017).
18. V. B. Tarelnyk, A. V. Paustovskii, Y. G. Tkachenko, V. S. Martsinkovskii, E. V. Konoplyanchenko, and K. Antoshevskii, *Surf. Eng. Applied Electrochemistry*, **53**: 285 (2017).
19. V. B. Tarelnyk, V. S. Martsinkovskii, and A. N. Zhukov, *Chem. Petroleum Eng.*, **53**: 266 (2017).
20. V. B. Tarelnyk, V. S. Martsinkovskii, and A. N. Zhukov, *Chem. Petroleum Eng.*, **53**: 385 (2017).
21. 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).
22. В. Б. Тарельник, О. П. Гапонова, Е. В. Коноплянченко, В. С. Марцинковский, Н. В. Тарельник, О. А. Василенко, *Металлофиз. новейшие технол.*, **41**, № 3: 313 (2019).
23. V. B. Tarelnyk, O. P. Gaponova, V. B. Loboda, E. V. Konoplyanchenko, V. S. Martsinkovskii, Y. I. Semirnenko, N. V. Tarelnyk, M. A. Mikulina, and B. A. Sarzhanov, *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, **57**, Iss. 2: 173 (2021).
24. В. О. Пчелінцев, Т. П. Говорун, В. М. Раб, Х. В. Берладір, *Вісник СумДУ*, **4**: 123 (2012).
25. V. M. Golubets, I. M. Honchar, and Y. S. Shpulyar, *Науковий вісник НЛТУ України*, **28** (2): 111 (2018).
26. ДСТУ 2249:2021 *Оброблення різанням. Терміни, визначення понять та позначки*.
27. V. Tarelnyk, I. Konoplianchenko, O. Gaponova, and B. Sarzhanov, *Key Engineering Materials*, **864**: 265 (2020).

REFERENCES

1. V. B. Tarel'nyk, O. P. Gaponova, V. I. Melnyk, N. V. Tarel'nyk, V. M. Zubko, V. M. Vlasovets, Ie. V. Konoplianchenko, S. G. Bondarev, A. Radionov, M. M. Mayfat, V. O. Okhrimenko, and A. V. Tkachenko, *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*, **45**, No. 5: 663 (2023) (in Ukrainian).
2. I. Kuric, M. Kandra, 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.
3. A. Zahorulko, C. Kundera, and S. Hudkov, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **233**: 012039 (2017).
4. A. Zahorulko, *Sealing Technology*, 2015, Iss. 8: 7 (2015).
5. 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).
6. A. Panasyuk, O. Umanskyi, M. Storozhenko, and V. Akopyan, *Key Engineering Materials*, **527**: 9 (2013).
7. O. Umanskyi, M. Storozhenko, M. Antonov, O. Terentjev, O. Koval, and D. Goljandin, *Key Engineering Materials*, **604**: 16 (2019).
8. N. Radek and K. Bartkowiak, *Physics Procedia A*, **5**: 417 (2010).
9. V. G. Smelov, A. V. Sotov, and S. A. Kosirev, *ARPJ. Eng. Applied Sci.*, **9**, No. 10: 1854 (2014).
10. O. Gaponova, C. Kundera, G. Kirik, V. Tarel'nyk, V. Martsynkovskyy, Ie. Konoplianchenko, M. Dovzhyk, A. Belous, and O. Vasilenko, *Advances in Thin Films, Nanostructured Materials, and Coatings* (Eds. A. D. Pogrebnyak and V. Novosad) (Springer: 2019), p. 249.
11. V. Tarel'nyk, I. Konoplianchenko, O. Gaponova, N. Tarel'nyk, V. Martsynkovskyy, B. Sarzhanov, O. Sarzhanov, and B. Antoszewski, *Powder Metall. Met. Ceram.*, **58**: 703 (2020).
12. 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).
13. V. B. Tarel'nyk, O. P. Gaponova, Ye. V. Konoplianchenko, V. S. Martsynkovskyy, N. V. Tarel'nyk, and O. O. Vasylenko, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **41**, No. 2: 173 (2019) (in Russian).
14. V. Martsinkovsky, V. Yurko, V. Tarel'nik, and Y. Filonenko, *Procedia Engineering*, **39**: 148 (2012).
15. V. Martsinkovsky, V. Yurko, V. Tarel'nik, and Y. Filonenko, *Procedia Engineering*, **39**: 157 (2012).
16. B. Antoszewski, O. Gaponova, V. Tarel'nyk, O. Myslyvchenko, P. Kurp, T. Zhylenko, and Ie. Konoplianchenko, *Materials*, **14**: 739 (2021).
17. V. B. Tarel'nyk, A. V. Paustovskii, Y. G. Tkachenko, E. V. Konoplianchenko, V. S. Martsynkovskyy, and B. Antoszewski, *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, **55**: 585 (2017).
18. V. B. Tarel'nik, A. V. Paustovskii, Y. G. Tkachenko, V. S. Martsinkovskii, E. V. Konoplyanchenko, and K. Antoshevskii, *Surf. Eng. Applied Electrochemistry*, **53**: 285 (2017).
19. V. B. Tarel'nik, V. S. Martsinkovskii, and A. N. Zhukov, *Chem. Petroleum Eng.*, **53**: 266 (2017).
20. V. B. Tarel'nik, V. S. Martsinkovskii, and A. N. Zhukov, *Chem. Petroleum Eng.*, **53**: 385 (2017).

21. V. B. Tarelynyk, O. P. Gaponova, Ye. V. Konoplianchenko, V. S. Martsynkovskyy, N. V. Tarelynyk, and O. Vasylenko, *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*, **41**, No. 1: 47 (2019).
22. V. B. Tarelynyk, O. P. Gaponova, Ye. V. Konoplianchenko, V. S. Martsynkovskyy, N. V. Tarelynyk, and O. Vasylenko, *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*, **41**, No. 3: 313 (2019).
23. V. B. Tarelynyk, O. P. Gaponova, V. B. Loboda, E. V. Konoplyanchenko, V. S. Martsinkovskii, Y. I. Semirnenko, N. V. Tarelynyk, M. A. Mikulina, and B. A. Sarzhanov, *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, **57**, Iss. 2: 173 (2021).
24. V. O. Pchelintsev, T. P. Hovorun, V. M. Rab, and Kh. V. Berladir, *Visnyk Sum. DU*, **4**: 123 (2012) (in Ukrainian).
25. V. M. Golubets, I. M. Honchar, and Y. S. Shpulyar, *Scientific Bulletin of UNFU*, **28** (2): 111 (2018).
26. *DSTU 2249:2021 Obroblennya Rizannyam. Terminy, Vyznachennya Ponyat' ta Poznaky* (in Ukrainian).
27. V. Tarelynyk, I. Konoplianchenko, O. Gaponova, and B. Sarzhanov, *Key Engineering Materials*, **864**: 265 (2020).