

ВПЛИВ НАНОСТРУКТУРОВАННИХ ЕЛЕКТРОІСКРОВИХ ПОКРИТТІВ НА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ ДЕТАЛЕЙ ВИСОКОВІДПОВІДАЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ

М. Л. Шуляк, Н. В. Тарельник*

Сумський національний аграрний університет; 40000, м. Суми, вул. Герасима Кондратьєва, 160;
e-mail: adm@snau.edu.ua

В представленій статті проведено аналіз сучасних технологій підвищення якості поверхневого шару деталей високовідповідального обладнання. Підкреслено, що на сьогоднішній день одним з найбільш затребуваних методів зміцнення поверхонь деталей є електроіскрове легування (ЕІЛ). Він є більш ефективним під час застосування спеціальних технологічних насичуючих середовищ (СТНС). Завдяки СТНС розроблено технологію наноструктурування методом електроіскрового легування поверхневих шарів деталей. Метою роботи є удосконалення технології підвищення параметрів якості поверхонь деталей шляхом поєднання наноструктурування методом ЕІЛ та обробки поверхневим пластичним деформуванням (ППД) поверхневих шарів на параметри міцності та пластичності сталевих і чавунних деталей високовідповідального обладнання. У результаті проведених експериментальних досліджень встановлено, що наноструктурування методом електроіскрового легування підвищує межу міцності та межу плинності порівняно з традиційним ЕІЛ. Серед спеціальних технологічних насичуючих середовищ кращі результати щодо підвищення межі міцності та межі плинності були отримані під час застосування одностінних вуглецевих нанотрубок T?ball Ocsial (0.01 % за масою) в епоксидній смолі Ероху 510 без затверджувача. В результаті ЕІЛ з використанням спеціальних технологічних середовищ і без них знижується межа міцності і межа плинності, а відносно подовження та відносно звуження збільшуються. Під час використання після наноструктурування методом електроіскрового легування подальшої безабразивної ультразвукової фінішної обробки, в порівнянні з зразками без обробки, межа міцності і межа плинності збільшуються, а відносно подовження і звуження зменшуються. Збільшення енергії розряду призводить до зростання шорсткості поверхневого шару та зменшення суцільності покриття. Під час використання безабразивної ультразвукової фінішної обробки шорсткість поверхневого шару зменшується, а суцільність покриття збільшується.

Ключові слова: електроіскрове легування, абразивний знос, шорсткість, поверхнєве пластичне деформування.

This paper analyzes modern technologies for improving the surface layer parameters of critical equipment parts. It is emphasized that today one of the most popular methods for improving the quality of part surfaces is electric spark alloying (ESA). It is especially effective when using special technological saturating media (STSM). Owing to the availability of the STSMs, there has been developed a technology for nanostructuring the surface layers of the parts by the ESA method. The aim of the work was to improve the technology of increasing the of parts surfaces quality parameters by analyzing the effect of nanostructuring by the ESA method and SPD treatment of surface layers on the strength and plasticity parameters of steel and cast iron parts of high-responsibility equipment. Thus, based on the results of the experimental studies, it has been found that nanostructuring by the ESA method increases the tensile strength and yield strength as compared to the conventional ESA methods. Among the STSMs, the best results in terms of increasing the tensile strength and yield strength have been obtained with the use of single-walled carbon nanotubes Tuball Ocsial (0.01 % by weight) in epoxy resin Epoxy 510 without a hardener. Because of the ESA process with and without the STSMs, the tensile strength and yield strength decrease, and the relative elongation and contraction increase. When using subsequent non-abrasive ultrasonic finishing after nanostructuring by the ESA method, as compared to the samples without such a treatment, the tensile strength and yield strength increase, and the relative elongation and contraction decrease. With an increase in the discharge energy, the roughness of the surface layer increases, and the continuity decreases. If using non-abrasive ultrasonic finishing, the roughness of the surface layer decreases, and the continuity increases.

Keywords: electro-spark alloying, abrasive wear, roughness, surface plastic deformation.

Вступ

У сучасній промисловості раціональний вибір матеріалів і покриттів є важливим для забезпечення якості машинобудівної продукції. Найбільше розповсюдження для виготовлення

деталей машин знайшли конструкційні матеріали у вигляді зносостійких металевих сплавів. Найпоширенішими серед них є конструкційна сталь, нержавіюча сталь і чавун. Такі матеріали знайшли досить широке застосування у нафто-

газовій, енергетичній, автомобільній, авіаційній, космічній та інших галузях, де виготовлені з них деталі повинні витримувати великі навантаження по відношенню до ваги матеріалу, швидкості переміщень, тиску, температури, радіаційного опромінювання тощо.

Єдиний спосіб забезпечити хорошу робоздатність і довговічність деталям машин для кожного промислового застосування є правильний вибір матеріалу для їх виготовлення, тому що кожна з них має свої особливості, які безпосередньо впливають на здатність витримувати різні навантаження, протистояти корозії, переносити екстремальні температури тощо. Розширити діапазони застосування традиційних матеріалів можна шляхом використання зміцнюючих технологій.

Таким чином, роботи, спрямовані на визначення впливу різних методів поверхневої обробки відповідальних деталей машин, які лімітують безаварійну роботу обладнання, на їх механічні властивості, є актуальними.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій

Деталі машини та обладнання виходять з ладу з різних причин. Цю втрату робоздатності розбивають на три основні категорії: старіння, погіршення якості поверхні та виникнення аварії. В переважній більшості випадків (до 80 %) до втрати експлуатаційних властивостей машини призводить деградація поверхні деталей [1], що відбувається переважно за рахунок корозії та механічного зношування.

Корозія деталей машин більш поширена, особливо для тих виробів, які контактують із забрудненою водою. Вода не тільки викликає ржавіння залізних поверхонь, але також може збільшити швидкість окислення мастила, що призводить до зниження показника кислотності середовища та інтенсифікації протікання корозійних процесів. Кислоти також можуть утворюватися як побічні продукти реакції між певними присадками в мастилi та воді. Забруднення продукту через ущільнення може створити їдке середовище та підвищити корозійний знос [2, 3].

Механічне зношування виникає, коли матеріал втрачається з поверхонь деталей машини в результаті відносного руху та фрикційного контакту між ними. Абразивне зношування відбувається, коли забруднення частками викликає більшу частину зношування. Частинки, такі як бруд (кремнезем) або залишки продуктів зносу, можуть призвести до стирання робочих поверхонь деталей або втомного руйнування поверх-

ні, що призводить до появи на них ямок і подрипин [4].

Адгезивне зношування відбувається, коли дві поверхні безпосередньо контактують одна з одною і матеріал переноситься з однієї поверхні на іншу. Цей вид зношування з'являється в місцях, де мастильний матеріал більше не витримує навантаження, або в областях, де мастильного матеріалу не вистачає [5].

Здебільшого зниження експлуатаційних показників багатьох деталей машин, поверхневі шари яких знаходяться в контакті під час функціонування машин, є результатом дії різних чинників: механічного зносу, корозії, ерозії, кавітації, втомного руйнування, повзучості матеріалів, деградації поверхневих шарів матеріалу та ін. Для підвищення надійності та довговічності існує дуже багато методів покращення якості поверхневих шарів виробів. Серед них характерними є: напилення металокерамічних покриттів [6–8], наплавлення покриттів з композиційних матеріалів [9, 10], хіміко-термічна обробка (ХТО) [11–13], яка поєднує в собі цементацію, азотування, нітроцементацію та ряд інших методів.

Особливе місце займають технології, що використовують концентровані потоки енергії (КПЕ), які забезпечують формування сприятливої структури поверхневих шарів деталей. Це плазмові технології напилення [14] та плазмова обробка [15]), лазерна обробка [16]. Як правило, кожен з цих методів займає свою «технологічну нішу», що пов'язано з його перевагами, недоліками і оптимальними областями застосування.

Для цілеспрямованого керування параметрами якості поверхневих шарів виробів під час зміцнення та формування композиційних покриттів досить перспективним є метод, який також використовує КПЕ – електроіскрове легування (ЕІЛ). До його важливих особливостей, які вигідно виділяють його серед інших методів зміцнення робочих поверхонь деталей необхідно віднести:

- можливість обробки в локальних місцях робочої поверхні;
- висока міцність зчеплення нанесеного шару покриття з металевою основою;
- відсутність деформування в результаті нагрівання деталі під час обробки;
- можливість використання для легування композиційних електродів із будь-яких електропровідних матеріалів;
- дифузійне насичення поверхні катода (деталі) складовими елементами анода (електрода) без істотної зміни геометричних розмірів деталі;

- немає необхідності в особливій підготовці поверхні.

Незважаючи на низку позитивних властивостей ЕІЛ має і деякі недоліки, які пов'язані зі зміною шорсткості поверхні, а в окремих випадках порушенням нанесеного шару покриття і зміцнення поверхневого шару, зниженням втомної міцності та іншими, які нерідко обмежують застосування ЕІЛ для широкої номенклатури деталей [17].

Слід відзначити, що одним із шляхів усунення перелічених вище недоліків є проведення після ЕІЛ поверхневого пластичного деформування (ППД) [18]. ППД не тільки усуває ряд недоліків ЕІЛ, а й надає переваги. Поверхневе пластичне деформування широко використовується в машинобудуванні для покращення параметрів якості поверхонь деталей машин: збільшення глибини зміцнення; зниження шорсткості; підвищення твердості та зносостійкості; збільшення опору схоплювання та підвищення втомної міцності. Очевидно, застосування ППД у поєднанні з попереднім ЕІЛ поверхневого шару викликає особливий інтерес, оскільки дані технології доповнюють одна іншу за рахунок синергетичного ефекту [19].

Резервом підвищення ресурсу роботи деталей машин є розроблення технологій формування покриттів із унікальними фізико-механічними властивостями: підвищеною зносостійкістю та корозійною тривкістю, високою втомною міцністю тощо, а також забезпечення наноструктурування робочих поверхонь різними методами. Наноструктуровані поверхневі шари матеріалу забезпечують поліпшенням як фізичних, механічних, так і електрохімічних властивостей деталей, що є дуже важливим для різних галузей науки і техніки. Розробка екологічно чистих та енергоефективних методів поверхневого зміцнення деталей машин, які базуються на використанні ЕІЛ і забезпечують наноструктурування поверхні, дозволяє суттєво підвищити техніко-економічні показники роботи машин та механізмів.

Раніше нами були проведені дослідження зразків із АРМКО-заліза, легованої сталі 40Х, нержавіючої сталі 12Х18Н10Т та чавуну СЧ60 на які методом ЕІЛ наносили покриття електродами-інструментами (ЕІ) з молібдену [20].

Як спеціальні технологічні насичуючі середовища (СТНС) використовували багатостінні вуглецеві нанотрубки ARKEMA (0,2 %) в епоксидній смолі Ероху 510 без затверджувача та одностінні вуглецеві нанотрубки Tuball Ocsial (0,01 % за масою) в епоксидній смолі Ероху 510 без затверджувача.

Під час дослідження зміцнення АРМКО-заліза встановлено, що його мікроструктури після ЕІЛ складаються з трьох характерних зон: верхнього «білого» шару, що не травиться у хімічному реактиві, дифузійної зони й основи з феритною структурою, що відповідає АРМКО-залізу. Встановлено, що з підвищенням енергії електричного розряду збільшується товщина і суцільність шару нанесеного покриття та його твердість – з 608 до 1300 HV. Необхідно відзначити вплив нанотрубок ARKEMA на твердість покриття. Під час ЕІЛ за енергії $W_p = 0,13$ Дж покриття без СТНС мають твердість 446 HV, а з нанотрубками ARKEMA (0,2 %) – 608 HV. Спостерігається також незначне підвищення товщини «білого» шару та суцільності композиційного покриття за рахунок використання СТНС (табл. 1). Вочевидь, позитивний вплив нанотрубок на параметри якості та властивості покриттів пов'язаний з формуванням наноструктури (рис. 1 і 2). Встановлено, що у мікроструктурах виявляються фази нанорівневого розміру від 40 до 60 нм, причому вони рівномірно розподілені у складі покриттів.

Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми

Механічні властивості металевих матеріалів є основою під час проектування та вибору складів композиційних матеріалів для зміцнення деталей машин. Відомо, що основними механічними характеристиками є границя міцності, пластичність, твердість, ударна в'язкість, стійкість до багаторазового удару, втомна міцність тощо. Механічні властивості металевих матеріалів змінюватимуться залежно від характеру та знаку прикладеного навантаження: розтягування, стискання, кручення, удару, циклічного навантаження тощо.

На сьогодні недостатня кількість даних щодо впливу наноструктурованих електроіскрових покриттів та поверхневого пластичного деформування на механічні властивості поверхневих шарів (межу міцності, (σ_B), межу пластичності, (σ_T) відносне подовження, (δ) та відносне звуження (ψ) деталей високовідповідального обладнання, що стримує розвиток і практичне застосування аналізованого комплексу зміцнювальних технологій.

Формулювання цілей

Таким чином, **ціллю роботи** є удосконалення технології підвищення якості поверхонь деталей шляхом поєднання впливу наноструктурування методом ЕІЛ та обробки ППД поверхневих шарів на параметри міцності та пласти-

Таблиця 1 – Зведені дані параметрів отриманих покриттів [20]

Електродні матеріали, технологія ЕЛ	Склад СТНС	Енергія розряду W_p , Дж	Товщина «білого» шару, мкм	Мікротвердість «білого» шару, HV	Шорсткість поверхні, Ra, мкм
Катод – АРМКО-залізо, анод – Мо	Без СТНС	0,13	20–30	446	0,98
Катод – АРМКО-залізо, анод – Мо	Багатостінні вуглецеві нанотрубки ARKEMA (0,2 %) в епоксидній смолі Ероху 510 без затверджувача	0,13	30–40	608	1,26
		0,52	30–40	1300	2,67
	Одностінні вуглецеві нанотрубки Tuball Ocsial (0.01 % за масою) в епоксидній смолі Ероху 510 без затверджувача	0,13	30–40	1438	1,72
Катод – сталь 40X, анод – Мо	Без СТНС	0,13	20–30	663	0,90
Катод – сталь 12X18Н10Т, анод – Мо	Без СТНС	0,13	20–30	715	1,10
Катод – чавун ВЧ60, анод – Мо	Без СТНС	0,13	20–30	691	1,10
Катод – сталь 40X, анод – Мо	Одностінні вуглецеві нанотрубки Tuball Ocsial (0.01 % за масою) в епоксидній смолі Ероху 510 без затверджувача	0,13	30–40	1525	1,72
Катод – сталь 12X18Н10Т, анод – Мо			25–40	1632	1,6
Катод – чавун ВЧ60, анод – Мо			35–45	1575	1,8

чності сталевих і чавунних деталей високовідповідального обладнання.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- дослідити вплив спеціальних технологічних насичуючих середовищ із вмістом вуглецевих нанотрубок на властивості покриттів;

- встановити вплив безабразивної ультразвукової фінішної обробки на властивості цих покриттів.

Висвітлення основного матеріалу дослідження

Для дослідження впливу різних методів зміцнення на механічні властивості (межу міцності та межу плинності, відносне подовження та відносне звуження) виготовляли металеві зразки (рис. 3) відповідно до ГОСТ 7855-84, які вставляли у затискачі універсальної розривної машини моделі ИМ-4Р і розтягували під впливом поступово зростаючого навантаження до розривання.

Як матеріал для зразків використовували АРМКО-залізо, сталь 40X, сталь 12X18Н10Т та високоміцний чавун ВЧ60. АРМКО-залізо було вибрано як еталон, виходячи із таких міркувань, щоб під час дослідження процесу формування композиційних покриттів ЕЛ на технічно чистому залізі виключити чинники впливу легуючих елементів на наноструктурування. Режим зміцнення та результати випробовування на розрив серії зразків наведені в табл. 2.

Експериментальні зразки із АРМКО-заліза, сталі 40X, 12X18Н10Т і високоміцного чавуну ВЧ60 піддавали комбінованій обробці в три етапи. На першому етапі проводили легування поверхні зразків, використовуючи молібденовий електрод за енергії електричного розряду 0,13 або 0,52 Дж відповідно. На другому етапі на поверхню легованих зразків наносили СТНС у вигляді «пасти», яка містила наночастинки, і, не чекаючи її повного висихання, повторно проводили обробку методом ЕЛ молібденовим

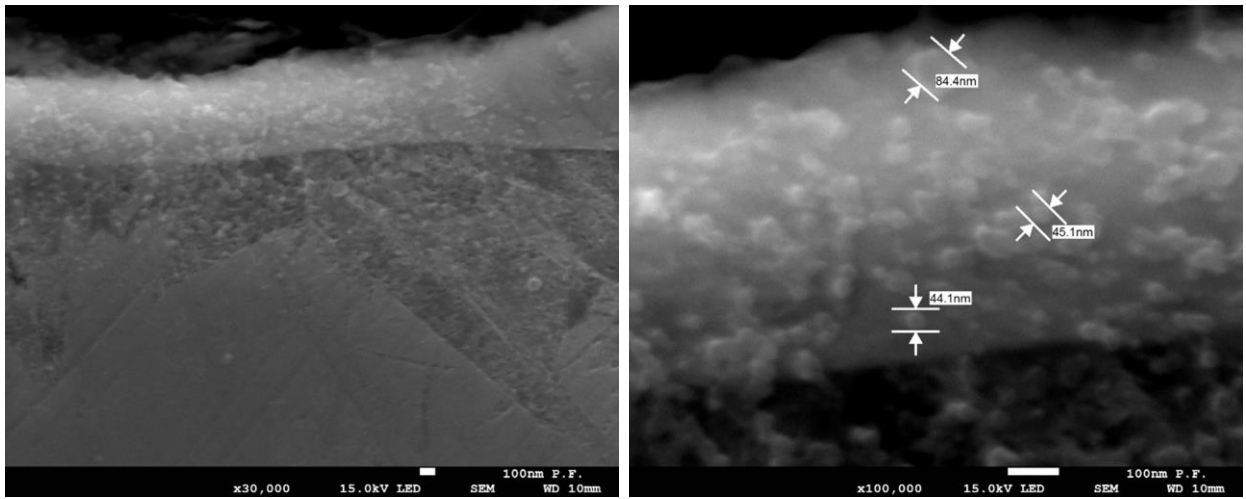


Рисунок 1 – Мікроструктури покриттів, сформованих на зразках із АРМКО-заліза після ЕІЛ, покриття Мо–СТС–Мо, отримане за $W_p = 0,13$ Дж, СТС – багатостінні вуглецеві нанотрубки ARKEMA (0,2 %) в епоксидній смолі Ероху 510 без затверджувача збільшення: а – $\times 30\,000$, б – $\times 100\,000$ [20]

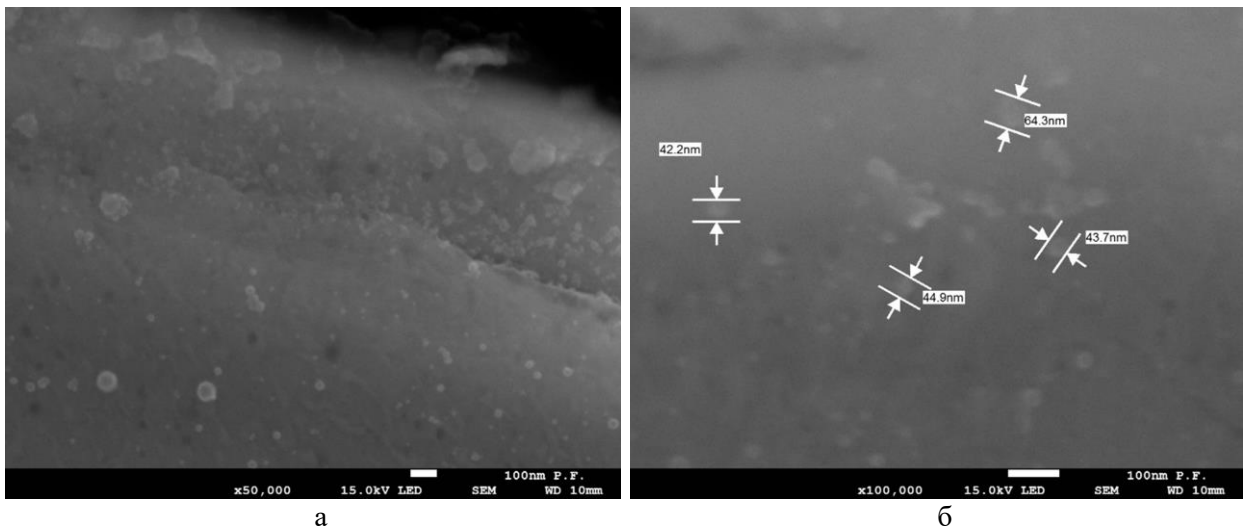


Рисунок 2 – Мікроструктури покриттів на зразках із АРМКО -заліза після ЕІЛ, покриття Мо–СТС–Мо, отримане за $W_p = 0,52$ Дж, СТС – багатостінні вуглецеві нанотрубки ARKEMA (0,2 %) в епоксидній смолі Ероху 510 без затверджувача збільшення: а – $\times 50\,000$, б – $\times 100\,000$ [20]



Рисунок 3 – Зразок зі сталі 40Х до (а) і після (б) випробування на розрив

електродом за такої ж енергії електричного розряду, що й на першому етапі.

Для проведення ЕІЛ використовували установку ЕІЛ моделі "Елітрон-22А". Під час досліджень застосовували енергію електричного розряду $W_p = 0,13$ та $0,52$ Дж відповідно. Для

порівняння також досліджували покриття з усіх вище вказаних матеріалів без ЕІЛ та без СТС після легування молібденовим електродом за енергії електричного розряду $0,13$ або $0,52$ Дж відповідно.

Таблиця 2 – Режими формування та властивості отриманих покриттів

Електродні матеріали, технологія ЕЛЛ	Склад СТНС	Енергія розряду, Дж	Межа плинності, МПа	Межа міцності, МПа	Відносне подовження, %	Відносне звуження, %	Шореткість, Ra, мкм	Суцільність, %	
			± %*						
АРМКО-залізо	Без покриття	–	120	260	30	60	0,5	–	
Катод – АРМКО-залізо, анод – Мо	Без СТНС	0,13	107	238	33,6	61,4	1,1	80	
			–12,1	–9,2	+12,0	+2,3			
	Багатостінні вуглецеві нанотрубки ARKEMA (0,2 %) в епоксидній смолі Ероху 510 без затверджувача СТНС+БУФО	0,52	112	241	32,3	58,7	1,3	87	
			–7,1	–7,9	+7,7	+2,2	–		
			96	217	35,3	63,5	2,9	81	
			–25,0	–19,8	+17,7	+5,8	–		
			130	275	29	58	0,6	95	
			+8,3	+5,8	–3,4	–3,4	–		
		Одностінні вуглецеві нанотрубки Tuball Ocsial (0.01 % за масою) в епоксидній смолі Ероху 510 без затверджувача		117	253	31,3	59,2	0,9	85
				–2,6	–2,8	+4,3	+1,4	1,3	
	СТНС+БУФО		135	280	28	57	0,6	95	
			+12,5	+7,7	–7,1	+5,3	–		
Сталь 40X	Без покриття	0,13	315	570	17,0	38,0	0,5	–	
Сталь 12X18Н10Т	Без покриття		196	510	40,0	55,0	0,5	–	
Високоміцний чавун ВЧ60	Без покриття		320	500	7			–	
Катод – сталь 40X, анод – Мо БУФО	Одностінні вуглецеві нанотрубки Tuball Ocsial (0.01 % за масою) в епоксидній смолі Ероху 510 без затверджувача		291	523	18	40	1,2	85	
			–8,2	–9,0	+5,9	+5,3			
Катод – сталь 12X18Н10Т, анод – Мо БУФО			335	591	18	39,5	0,6	95	
			+3,9	+3,7	–5,9	–3,9			
Катод – високоміцний чавун ВЧ60, анод – Мо БУФО			185	471	43	58	1,4	85	
			–5,9	–8,3	+7,5	+5,5			
			210	531	38,5	53	0,6	95	
		+7,1	+4,1	–3,9	–3,8				
		293	447	7,7	–	1,5	–		
		–9,2	–11,9	+1,1	–				
	325	515	6,6	–	0,7	92			
	+1,6	+3,0	–6	–	–				

* Показано, на скільки відсотків збільшились або зменшились: межа міцності (σ_B), межа плинності (σ_r), відносне подовження (δ) та відносне звуження (ψ) зразків після різних видів обробки порівняно з необробленим матеріалом.

Безабразивну ультразвукову фінішну обробку (БУФО) зразків після ЕЛЛ проводили в наступній послідовності:

- зразки встановлювали на верстат (биття поверхні, що зміцнюється, повинно бути від 0,01 до 0,03 мм);

- закріплювали акустичну головку в різцетри-мачі токарного верстата;

- із поверхонь, що піддаються зміцненню, серветками (ГОСТ 21220–75), змоченими зневодненим гасом (ГОСТ 4753–68), видаляли мастило та бруд;

- здійснювали вибір параметрів обробки (швидкість обкочування – 50 м/хв, подача – не більше 0,2 мм/об, число проходів – 1);

- подавали охолоджувальну рідину в акустичну головку;

- включали генератор, налаштувавши на робочу частоту від 18 до 22 кГц; встановлювали вибрані робочі числа обертів деталі; підводили індентор до деталі, використавши індикатор годинникового типу (0,2–0,4 мм); вмикали автоматичну подачу;

- після виконання операції БУФО вимикали пристрій у зворотній послідовності.

Шорсткість поверхні оброблених зразків вимірювали за допомогою приладу профілограф-профілометр мод. 201 заводу «Калібр».

У табл. 2 представлено зведені данні результатів проведених досліджень.

Аналіз результатів (табл. 2) дає підставу рекомендувати запропоновану комбіновану технологію наноструктурування поверхонь методом електроіскрового легування для широкої номенклатури деталей машин, які через недостатньо хороші механічні властивості не могли раніше претендувати на таке використання, наприклад, для машин та обладнання нафтогазової галузі.

Механічні властивості характеризують поведінку матеріалів під час прикладання зовнішніх сил або навантажень. Реакція матеріалу на прикладену силу залежить від типу зв'язків, структурного розташування атомів або молекул, а також типу та кількості дефектів, які присутні в твердих тілах. Завдяки цьому на механічні властивості впливають методи обробки та перетворення, які можуть впливати на ці характеристики матеріалів, що мають однаковий хімічний склад.

Завдяки своєму об'єму, поверхні та квантовому впливу наноматеріали мають особливі механічні властивості, що перевищують властивості їхніх макроскопічних аналогів. Коли наноматеріали вводяться в склад матеріалу, вони певною мірою покращують зернистість, створюючи особливу структуру сплаву, яка вдосконалює межі зерен і покращує механічні характеристики матеріалу. Унікальні механічні властивості наноструктурованих поверхневих шарів можуть бути застосовані у різноманітних сферах, включаючи трибологію, інженерію поверхні тощо.

Слід зазначити, що у праці [21] встановлено позитивний вплив поверхневого пластичного деформування під час алмазного вигладжування на напружений стан хромових покриттів.

Тому у подальших дослідженнях планується вивчити вплив режимів алмазного вигладжування на фізико-механічні властивості ЕІЛ покриттів.

Висновки

1. Експериментальними дослідженнями встановлено, що наноструктурування методом електроіскрового легування підвищує межу міцності та межу плинності в порівнянні з традиційним ЕІЛ, але знижує відносне подовження та відносне звуження зразків під час випробування на розтягування.

2. Серед спеціальних технологічних насичуючих середовищ кращі результати, щодо підвищення межі міцності та межі плинності, отримано у випадку застосування одностінних вуглецевих нанотрубок Tuball Ocsial (0,01 % за масою) в епоксидній смолі Ероху 510 без затверджувача.

3. У результаті ЕІЛ з використанням спеціальних технологічних середовищ і без них знижується межа міцності та межа плинності, а відносне подовження та звуження зростає.

4. Під час використання після наноструктурування методом електроіскрового легування подальшої безабразивної ультразвукової фінішної обробки, в порівнянні зі зразками без обробки, межа міцності та межа плинності збільшуються, а відносне подовження та звуження зменшуються.

5. Зі збільшенням енергії електричного розряду шорсткість поверхневого шару збільшується, а суцільність покриття – зменшується.

6. Під час використання безабразивної ультразвукової фінішної обробки шорсткість поверхневого шару зменшується, а суцільність покриття – збільшується.

Література

1. Тарельник В.Б. Триботехнічне матеріалознавство та триботехнологія в задачах: навч. посіб. Суми: Університетська книга, 2014. 192 с.
2. Полутренко М.С. Мікробіологічна корозія підземних металокопункцій та способи їх захисту. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2012. Вип. 4, №. 45. С. 184-188.
3. Андреюк К.І., Козлова І.П., Коптєва Ж.П. та ін. Мікробна корозія підземних споруд. К.: Наукова думка, 2005. 258 с.
4. Тарельник В.Б., Коноплянченко Є.В., Марцинковський В.С. та ін. Триботехнологія деталей машин: навч. посіб. Суми: МакДен, 2010. 260 с.
5. Дейнега Р.О., Чумаченко Я.В., Фафлей О.Я., Мельник В.О., Михайлюк В.В., Яценко Д.О. Особливості дослідження зношування елементів фонтанних арматур методом імітаційного моделювання. *Розвідка та розробка*

- нафтових і газових родовищ, 2020. Вип. 1, No. 74. С. 45–52.
6. Storozhenko M.S., Umanskii A.P., Terentiev A.E., Zakiev I.M. Effect of the Structure of TiB₂–(Fe–Mo) Plasma Coatings on Mechanical and Tribotechnical Properties. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 2017. Vol. 56, No.1-2. P. 60-69. <https://doi.org/10.1007/s11106-017-9872-x>
7. Umanskyi O., Storozhenko M., Baglyuk G., Melnyk O., Brazhevsky V., Chernyshov O., Terentiev O., Gubin Yu., Kostenko O., Martsenyuk I. Structure and wear resistance of plasma-sprayed NiCrBSiC–TiCrC composite powder coatings. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 2020. Vol. 59, No. 7-8. P. 434–444. <https://doi.org/10.1007/s11106-020-00177-y>
8. Umanskyi O.P., Storozhenko M.S., Tarelnyk V.B., Koval O.Y., Gubin Y.V., Tarelnyk N.V., Kurinna T.V. Electrospark Deposition of Fenicrbsic-Meb₂ Coatings on Steel. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2020. Vol. 59, No. 1-2. P. 57-67. <https://doi.org/10.1007/s11106-020-00138-5>
9. Bembenek M., Prysyazhnyuk P., Shihab T., Machnik R., Ivanov O., Ropyak L. Microstructure and Wear Characterization of the Fe–Mo–B–C—Based Hardfacing Alloys Deposited by Flux-Cored Arc Welding. *Materials*, 2022. Vol. 15, No. 14. P. 5074. <https://doi.org/10.3390/ma15145074>
10. Trembach B.O., Sukov M.G., Vynar V.A., Trembach I.O., Subbotina V.V., Rebrov O.Yu., Rebrova O.M., Zakiev V.I. Effect of Incomplete Replacement of Cr for Cu in the Deposited Alloy of Fe–C–Cr–B–Ti Alloying System with a Medium Boron Content (0.5% wt.) on its Corrosion Resistance. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*, 2022. Vol. 44, No. 4. P. 493. <https://doi.org/10.15407/mfint.44.04.0493>
11. Fernandes F.A. P., Heck S.C., Pereira R.G., Lombardi-Neto A., Totten G.E., Casteletti L.C. Wear of plasma nitrided and nitrocarburized AISI 316L austenitic stainless steel. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 2010. Vol. 40, No. 2. P.175.
12. Shu-Hung Yeh, Liu-Ho Chiu, Heng Chang, Effects of Gas Nitriding on the Mechanical and Corrosion Properties of SACM 645 Steel. Engineering, *Scientific Research Publishing*, 2011. Vol. 3, No. 9. P. 942. <https://doi.org/10.4236/eng.2011.39116>
13. Ben Slima S., Ion and Gas Nitriding Applied to Steel Tool for Hot Work X38CrMoV5 Nitriding Type: Impact on the Wear Resistance. Materials Sciences and Applications, *Scientific Research Publishing*, 2012. Vol. 9, No.3. P. 640.
14. Kuzmin V.I., Mikhal'chenko A.A., Kovalev O.B. et al. The technique of formation of the axisymmetric heterogeneous flow for thermal spraying of powder materials. *J. of Thermal Spray Technology*, 2012. Vol. 21, No. 1. P. 159–168.
15. Morand G., Chevallier P., Bonilla-Gameros L., Turgeon S., Cloutier M., Da Silva Pires M., Sarkissian A., Tatoulian M., Houssiau L., Mantovani, D. On the adhesion of diamond-like carbon coatings deposited by low-pressure plasma on 316L stainless steel. *Surface and Interface Analysis*, 2021. Vol. 53, No. 7. P. 658-671. <https://doi.org/10.1002/sia.6953>
16. Antoszewski B., Tofil S., Scendo M. and Tarelnik W. Utilization of the UV laser with picosecond pulses for the formation of surface microstructures on elastomeric plastics. *2017 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, Vol. 233. P. 012036. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/233/1/012036>
17. Tarelnyk V.B., Gaponova O.P., Loboda V.B., Konoplyanchenko E.V., V Martsinkovskii.S., Semirnenko Yu.I., Tarelnyk N.V., Mikulina M.A., Sarzhanov B.A. Improving Ecological Safety when Forming Wear-Resistant Coatings on the Surfaces of Rotation Body Parts of 12Kh18N10T Steel Using a Combined Technology Based on Electrospark Alloying. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2021. Vol. 2. P. 173-184. <https://doi.org/10.3103/s1068375521020113>
18. Tarelnyk V., Konoplianchenko Ie., Tarelnyk N., Kozachenko A. Modeling technological parameters for producing combined electrospark deposition coatings. *Materials Science Forum. Materials Science Forum*, 2019. Vol. 968 MSF, P. 131–142. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.968.131>
19. Tarelnyk V.B., Gaponova O.P., Konoplianchenko Ye.V., Martsynkovskyy V.S., Tarelnyk N.V. and Vasylenko O.O. Improvement of Quality of the Surface Electroerosive Alloyed Layers by the Combined Coatings and the Surface Plastic Deformation. II. The Analysis of a Stressedly-Deformed State of Surface Layer after a Surface Plastic Deformation of Electroerosive Coatings. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 2019. Vol. 41, No. 2. P. 173–192. <https://doi.org/10.15407/mfint.41.02.0173>
20. Gaponova O.P., Tarelnyk V.B., Tarelnyk N.V., Myslyvchenko O.M.. Nanostructuring of Metallic Surfaces by Electrospark Alloying Method. *JOM*, 2023. Vol. 75, No. 9. P. 3400–3412. <https://doi.org/10.1007/s11837-023-05940-1>
21. Bembenek M., Kopei V., Ropyak L.Y., Levchuk K. Stressed State of Chrome Parts During Diamond Burnishing. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*, 2023. Vol. 45, No. 2. P. 239–250. <https://doi.org/10.15407/mfint.45.02.0239>

References

1. Tarelnyk V.B. Trybotekhnichne materialoznavstvo ta trybotekhnolohiia v zadachakh: navch. posib. Sumy: Universytetska knyha, 2014. 192 p. [in Ukrainian]
2. Polutrenko M.S. Mikrobiolohichna koroziiia pidzemnykh metalokonstruksii ta sposoby yikh zakhystu. *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshch*, 2012. Vol. 4, No. 45. P. 184–188. [in Ukrainian]
3. Andreiuk K.I., Kozlova I.P., Koptieva Zh.P. ta in. Mikrobna koroziiia pidzemnykh sporud. K.: Naukova dumka, 2005. 258 p. [in Ukrainian]
4. Tarelnyk V.B., Konoplianchenko Ye.V., Martsynkovskiy V.S. ta in. Trybotekhnolohiia detalei mashyn: navch. posib. Sumy: MakDen, 2010. 260 p. [in Ukrainian]
5. Deineha R.O., Chumachenko Ya.V., Faflei O.Ia., Melnyk V.O., Mykhailiuk V.V., Yashchenko D.O. Osoblyvosti doslidzhennia znoshuvannia elementiv fontannykh armatur metodom imitatsiinoho modeliuvannia. *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshch*, 2020. Vol. 1, No. 74. P. 45–52. [in Ukrainian]
6. Storozhenko M.S., Umanskii A.P., Terentiev A.E., Zakiev I.M. Effect of the Structure of TiB₂–(Fe–Mo) Plasma Coatings on Mechanical and Tribotechnical Properties. *Powder metallurgy and Metal Ceramics*, 2017. Vol. 56, No.1-2. P. 60–69. <https://doi.org/10.1007/s11106-017-9872-x>
7. Umanskyi O., Storozhenko M., Baglyuk G., Melnyk O., Brazhevsky V., Chernyshov O., Terentiev O., Gubin Yu., Kostenko O., Martsenyuk I. Structure and wear resistance of plasma-sprayed NiCrBSiC–TiCrC composite powder coatings. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 2020. Vol. 59, No. 7-8. P. 434–444. <https://doi.org/10.1007/s11106-020-00177-y>
8. Umanskyi O.P., Storozhenko M.S., Tarelnyk V.B., Koval O.Y., Gubin Y.V., Tarelnyk N.V., Kurinna T.V. Electrospark Deposition of Fenicrbsic-Meb₂ Coatings on Steel. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2020. Vol. 59, No. 1-2. P. 57–67. <https://doi.org/10.1007/s11106-020-00138-5>
9. Bembenek M., Prysyazhnyuk P., Shihab T., Machnik R., Ivanov O., Ropyak L. Microstructure and Wear Characterization of the Fe–Mo–B–C—Based Hardfacing Alloys Deposited by Flux-Cored Arc Welding. *Materials*, 2022. Vol. 15, No. 14. P. 5074. <https://doi.org/10.3390/ma15145074>
10. Trembach B.O., Sukov M.G., Vynar V.A., Trembach I.O., Subbotina V.V., Rebrov O.Yu., Rebrova O.M., Zakiev V.I. Effect of Incomplete Replacement of Cr for Cu in the Deposited Alloy of Fe–Cr–B–Ti Alloying System with a Medium Boron Content (0.5% wt.) on its Corrosion Resistance. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*, 2022. Vol. 44, No. 4. P. 493. <https://doi.org/10.15407/mfint.44.04.0493>
11. Fernandes F.A. P., Heck S.C., Pereira R.G., Lombardi-Neto A., Totten G.E, Casteletti L.C. Wear of plasma nitrided and nitrocarburized AISI 316L austenitic stainless steel. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 2010. Vol. 40, No. 2. P.175.
12. Shu-Hung Yeh, Liu-Ho Chiu, Heng Chang, Effects of Gas Nitriding on the Mechanical and Corrosion Properties of SACM 645 Steel. Engineering, *Scientific Research Publishing*, 2011. Vol. 3, No. 9. P. 942. <https://doi.org/10.4236/eng.2011.39116>
13. Ben Slima S., Ion and Gas Nitriding Applied to Steel Tool for Hot Work X38CrMoV5 Nitriding Type: Impact on the Wear Resistance. Materials Sciences and Applications, *Scientific Research Publishing*, 2012. Vol. 9, No.3. P. 640.
14. Kuzmin V.I., Mikhal'chenko A.A., Kovalev O.B. et al. The technique of formation of the axisymmetric heterogeneous flow for thermal spraying of powder materials. *J. of Thermal Spray Technology*, 2012. Vol. 21, No. 1. P. 159–168.
15. Morand G., Chevallier P., Bonilla-Gameros L., Turgeon S., Cloutier M., Da Silva Pires M., Sarkissian A., Tatoulian M., Houssiau L., Mantovani, D. On the adhesion of diamond-like carbon coatings deposited by low-pressure plasma on 316L stainless steel. *Surface and Interface Analysis*, 2021. Vol. 53, No. 7. P. 658–671. <https://doi.org/10.1002/sia.6953>
16. Antoszewski B., Tofil S., Scendo M. and Tarelnik W. Utilization of the UV laser with picosecond pulses for the formation of surface microstructures on elastomeric plastics. *2017 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, Vol. 233. P. 012036. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/233/1/012036>
17. Tarelnyk V.B., Gaponova O.P., Loboda V.B., Konoplyanchenko E.V., V Martsinkovskii.S., Semirnenko Yu.I., Tarelnyk N.V., Mikulina M.A., Sarzhanov B.A. Improving Ecological Safety when Forming Wear-Resistant Coatings on the Surfaces of Rotation Body Parts of 12Kh18N10T Steel Using a Combined Technology Based on Electrospark Alloying. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2021. Vol. 2. P. 173–184. <https://doi.org/10.3103/s1068375521020113>
18. Tarelnyk V., Konoplianchenko Ie., Tarelnyk N., Kozachenko A. Modeling technological parameters for producing combined electrospark deposition coatings. *Materials Science Forum. Materials Science Forum*, 2019. Vol. 968

MSF, P. 131–142. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.968.131>

19. Tarelnyk V.B., Gaponova O.P., Konoplianchenko Ye.V., Martsynkovskyy V.S., Tarelnyk N.V. and Vasylenko O.O. Improvement of Quality of the Surface Electroerosive Alloyed Layers by the Combined Coatings and the Surface Plastic Deformation. II. The Analysis of a Stressedly-Deformed State of Surface Layer after a Surface Plastic Deformation of Electroerosive Coatings. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 2019. Vol. 41, No. 2. P. 173–192. <https://doi.org/10.15407/mfint.41.02.0173>

20. Gaponova O.P., Tarelnyk V.B., Tarelnyk N.V., Myslyvchenko O.M.. Nanostructuring of Metallic Surfaces by Electrospark Alloying Method. *JOM*, 2023. Vol. 75, No. 9. P. 3400–3412. <https://doi.org/10.1007/s11837-023-05940-1>

21. Bembenek M., Kopei V., Ropyak L.Y., Levchuk K. Stressed State of Chrome Parts During Diamond Burnishing. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*, 2023. Vol. 45, No. 2. P. 239–250. <https://doi.org/10.15407/mfint.45.02.0239>