

## Закономірності формування зносостійких покриттів сталевих зразків за допомогою їх електроерозійної обробки

Д. Д. Марченко, В. М. Курепін

*Розглянуто технологію електроерозійної обробки сталевих пар тертя та представлено результати експериментальних досліджень. Аналіз експериментальних досліджень показав, що збільшення напруги «анод-катод» призводить до різкого зниження мікротвердості поверхневого шару. Дослідження також дозволило визначити характерні розміри елементів конструкції, параметри висоти шорсткості поверхні. Елементний склад вихідної поверхні зразка зі сталі 15ХГН2ТА відрізняється від складу покриттів та поверхневих шарів зразків, модифікованих електроерозійною обробкою різними електродами. У режимі роботи системи «анод-катод» на поверхні катода внаслідок дисипативних процесів утворюється тонкий шар покриття стійкої модифікованої структури. Показано, що висота поверхневих нерівностей на ділянках після тертя вища, ніж на ділянках поверхні поза течією тертя, що пов'язано з утворенням на поверхні зразків плівки перенесення тертя. Встановлено, що взаємодія тертя зразків сталі, оброблених електроерозійним методом, утворює тонку плівку на поверхні тертя зразків сталі, що призводить до зміни рельєфу поверхонь із збільшенням висоти мікрорівнень та структурування переносної плівки в напрямку ковзання. Встановлено вплив електроерозійної обробки сталевих поверхонь на зносостійкість металополімерної трибосистеми. Впровадження розробленої технології забезпечить істотне підвищення зносостійкості металополімерних трибоспрямижень.*

*Ключові слова: легуючий електрод, зносостійкість металополімерів, трибоспрямиження, електроерозійна обробка, модифікування сталі.*

### 1. Вступ

Надійність і ефективність машин і технологічного устаткування визначаються в основному зносостійкістю і довговічністю деталей трибосистем. У промисловості залежно від умов експлуатації виробів застосовуються різні методи поверхневого зміцнення сталей і сплавів. Найбільш енергоефективні з них такі як поверхнева пластична деформація, хіміко-термічна обробка, формування зміцнюючих зносостійких покриттів (мікродугове оксидування, напилення та ін.), високоенергетичні методи (лазерна, іонно-променева обробка та ін.) і різні їх комбінації. Усі відомі методи поверхневого зміцнення мають свої переваги і сферу застосування, але повною мірою не задовольняють сучасним вимогам до ефективності, універсальності і економічності технологічних процесів. Найбільш перспективними є методи поверхневого модифікування деталей трибосистем із застосуванням висококонцентрованих потоків енергії, до яких відноситься електроерозійна обробка (ЕЕО), що дозволяє отримувати покриття з високими фізико-механічними і триботехнічними властивостями.

Тому розробка ефективного, досить простого для освоєння в промислово-му виробництві і економічного, методу підвищення зносостійкості залишається актуальним науковим і практичним завданням, вирішенню якого і присвячено дане дослідження.

## 2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Комбіновані методи поверхневого зміцнення дозволяють створювати покриття з високими заздалегідь заданими експлуатаційними властивостями [1]. Так поверхневе легування з подальшим азотуванням низьколегованих сталей дозволяє підвищити характеристики механічної міцності вище рівня властивостей високолегованих сталей. В роботі [2] розглянуті проблеми підвищення зносостійкості протяжного інструменту методом комбінованого зміцнення, що включає азотування та нанесення покриття (Ti, Nb, Al, N). Виробничі випробування показали, що комбіноване зміцнення протяжок по запропонованим режимам дозволяє в 2–4 рази підвищити їх стійкість в порівнянні з незміцненими.

Комбінація методів фізичного катодно-дугового і хімічного осадження з газової фази при обробці плунжерних пар паливних насосів високого тиску, виготовлених зі сталі 25X5MA, дозволяє отримати покриття з високою твердістю, зносостійкістю і корозійною стійкістю [3]. Суть методу полягає в деструкції молекул вуглецевмісного газу в результаті їх зіткнень з високоенергетичними іонами, що генеруються потужнострумівим імпульсним катодно-дуговим розрядом на поверхні мішені з графіту. Продукти такої взаємодії, осідають на підкладці і формують зносостійке покриття. Встановлено, що коефіцієнт тертя поверхонь з таким покриттям в умовах граничного мащення становить 0,10–0,12 і практично не змінюється при наявності в ній домішок води і дрібнодисперсних абразивних частинок. Для поверхонь без покриттів коефіцієнт тертя зростає в 1,4 рази в присутності домішок.

В роботі [4] представлено технологію іонно-променевого азотування газотермічних покриттів, отриманих методом гіперзвукового розпилення дротових сталей феритного (Св-08Г2С), мартенситного (40X13) і аустенітного (06X19Н9Т) класів. Показано, що застосування даної технології забезпечує підвищення зносостійкості покриттів з феритної сталі від 2 до 80 разів; з мартенситної сталі від 2 до 13 разів; з аустенітної сталі від 10 до 35 разів.

В роботі [5] наведені результати попереднього нанесення на поверхню деталі легуючого підшару з концентратом методом електроіскрового легування з подальшим його переплавом електричною дугою в середовищі вуглекислого газу. Саме такий підхід використаний в роботі [5] дозволяє значно змінювати експлуатаційні характеристики сталі Ст3 в потрібному напрямку.

Електроіскрова обробка сталі 45 твердим сплавом ВК6М, хромом і молібденем з подальшим лазерним зміцненням наведена в роботі [6]. Це дозволяє знизити інтенсивність зношування покриттів, сформованих твердим сплавом на 70 %, а покриттів, сформованих Cr і Мо – відповідно в 3,5 і 3 рази, в порівнянні з необробленою сталлю.

В роботі [7] проведено експериментальне дослідження процесу мікродугової цементації сталевих виробів в порошкових середовищах. Застосування по-

рошку кам'яного вугілля інтенсифікує процес дифузійного насичення вуглецем і формування дифузійного шару глибиною до 0,3 мм відбувається в перебігу 2–3 хвилин, що в сотні разів скорочує процес цементації.

Проведенні дослідження цементації в плазмі електроліту зворотної полярності, які представлено в роботі [8]. Показано, що електролітно-плазмова обробка – при температурі 850 °С тривалістю 3–6 хвилин призводить до утворення в сталі 30ХГСА модифікованого шару глибиною 30–40 мкм, що складається з зерен фериту (-Fe), на кордонах яких розташовані карбіди заліза (Fe<sub>3</sub>C). Значення мікротвердості поверхневих шарів сталі, модифікованої електролітно-плазмової цементації, становить 7500 МПа.

В сучасному ремонтному виробництві перспективним напрямом є поєднання електричного впливу на поверхню з механічною обробкою або зміцнення методом електродеформуючої обробки [9]. В роботі [10] проведено аналіз експериментальних даних з дослідження мікротвердості поверхневих шарів вуглецевих сталей, підданих електромеханічному зміцненню з ударом. Автором роботи [11] розглянуто також деякі відмінні риси тонкої структури зміцненого поверхневого шару («білого шару») матеріалу, отриманого в області імпульсного температурно-силового впливу.

Ефективним способом зміцнення вуглецевих сталей також є обробка, що поєднує вплив на зміцнюючу поверхню іскрового розряду і подальшу пластичну деформацію з одночасним легуванням [12]. Обробка поверхонь можлива як ексцентрично встановленим електродом, так і обертовим диском-електродом з роликками, які виконують функції розриву і замикання ланцюга анод-катод при поверхневій деформації. При замиканні ланцюга забезпечується перенесення легуючого матеріалу на оброблювану поверхню і його розрівнювання електродом. При цьому легуючий матеріал заповнює вм'ятини і подряпини на поверхні оброблюваної деталі, змінюючи її топографію, сформовану після проходження електрода і підвищуючи мікротвердість.

Авторами [13] досліджено один з перспективних методів підвищення зносостійкості - комбінована фрикційно-електрична обробка з високоенергетичним впливом через проміжну середу – модифікатор, що містить поверхнево-активну речовину (ПАР). Вивчено [1, 14] вплив поверхневого модифікування сталевих зразків дисперсними модифікаторами в суміші з ПАР (гліцерин) і режимів комбінованої обробки на мікротвердість поверхневого шару і зносостійкість пари тертя «сталь-бронза». В якості модифікаторів застосовувалися: дисульфід молібдену, мідь, бронза.

Тому важливим є дослідження впливу ЕЕО конструкційної сталі на структуру, елементний і фазовий склад, механічні і триботехнічні властивості модифікованого поверхневого шару. Проведенні дослідження і практичне впровадження результатів забезпечать підвищену зносостійкість оброблюваних деталей.

### **3. Ціль та задачі дослідження**

Мета роботи полягає в встановленні закономірностей формування зносостійких покриттів на сталевій підкладці методом електроерозійної обробки, що забезпечують підвищення зносостійкості сталевих деталей вузлів тертя машин.

Це дасть можливість забезпечити істотне підвищення зносостійкості металополімерних трибоспряжень.

Для досягнення поставленої мети були поставлені такі завдання:

- провести експериментальне дослідження впливу хімічного складу матеріалу електроду (анода) на структуру і фазовий склад покриттів, що формуються на сталевих зразках;

- методом контактної атомно-силової мікроскопії дослідити вплив складу матеріалу ЛЕ і режимів ЕЕО на розміри структурних елементів покриттів, що формуються, і параметри шорсткості оброблюваної поверхні;

- дослідити залежності мікротвердості і триботехнічних властивостей покриттів від складу матеріалу ЛЕ і енергетичних режимів ЕЕО.

#### 4. Матеріали та методи досліджень

В якості об'єкту експериментальних досліджень використали конструкційну леговану сталь 15ХГН2ТА, яка широко застосовується для виготовлення шестерень, осей, втулок, валів коробок передач автомобілів, багатоцільових гусеничних і колісних машин і інших видів техніки [1, 15]. Для підвищення механічних властивостей сталі 15ХГН2ТА використовують хімікотермічну обробку з подальшою термічною обробкою, що значно ускладнює і збільшує тривалість технологічного процесу виготовлення деталей.

Обробка зразків здійснювалася на установках для ЕЕО моделей ИМЭИ-02-2-IMES і ИМЭИ-1001-IMES, що забезпечують технологічні режими: анодно-катодна напруга  $U=40-160$  В; розрядна ємність конденсаторів  $C=34-240$  мкФ.

Поверхні сталевих зразків обробляли з різними ЛЕ. Використовувалися стандартні електроди марки Т15К6 (TiC – 15 %, Со – 6 %, WC – 79 %); електроди ИМХ21 (WC-Со – 50 %, Ni-Cr-B-Si – 50 %); електроди Ш21 з мінеральною сировиною на основі шеелітового концентрату (TiC – 60%, Ni-Cr-Al – 30 %, ШЛК (шеелітовий концентрат  $CaWO_4$ ) – 10 %). Вибір легуючих електродів робився на основі раніше проведених досліджень.

Методика дослідження включала вивчення впливу матеріалу легуючого електроду і технологічних режимів обробки на мікротвердість і товщину покриттів, що формуються при ЕЕО. Мікротвердість формованих поверхневих шарів визначалася за допомогою мікротвердоміру ПМТ – 3М при навантаженні на індентор 0,49 Н.

Дослідження структури і фазового складу модифікованого поверхневого шару сталі 15ХГН2ТА після ЕЕО проводилося методом рентгенофазового аналізу початкових і модифікованих зразків на дифрактометрі D8 ADVANCE (Bruker) в монохроматизованому  $Cu-K_{\alpha}$  випромінюванні в області кутів  $5^{\circ} \dots 120^{\circ}$  з кроком 0,050 і часом накопичення 10 сек/точці.

За допомогою скануючого зондового мікроскопа NTEGRA Prima (НТ-МДТ, Росія) в режимі контактної атомно-силової мікроскопії (к-АСМ) досліджувався мікрорельєф і визначалися характерні розміри структурних елементів поверхонь початкових зразків і зразків, модифікованих ЕЕО різними електродами. Також досліджувалися модифіковані покриття, сформовані електродом ИМХ2 на різних режимах після випробувань на тертя і знос [1, 16]. Математична постобробка

отриманих результатів здійснювалася за допомогою модульної програми Gwyddion (Чехія, Czech Metrology Institute).

Для дослідження елементного складу початкової поверхні сталі 15ХГН2ТА і поверхневих шарів, модифікованих ЕЕО різними електродами використали растровий електронний мікроскоп Jeol JCM – 5700 з детектором Shimadzu EDX – 720HS (Японія). Для покриттів, сформованих електродом ИМХ2 на різних режимах після триботехнічних випробувань використали рентгенівський енергодисперсійний спектрометр. Додатково був використаний мікрохіманалізатор JEOL JСХА – 733 «Superprobe» (Японія).

Дослідження характеристик триботехнічних властивостей робили на спеціальній установці, створеній на базі настільного свердлувального верстата за схемою тертя «палець-диск» при контактному тиску  $P=2,66$  МПа і швидкості ковзання  $V=1,20$  м/с. В якості контрзразків були використані циліндричні пальці з композиційного матеріалу на основі ПТФЭ.

## **5. Результати експериментальних досліджень модифікації сталевих зразків за допомогою технології їх електроерозійної обробки**

### **5.1. Результати досліджень сталевих зразків на структуру і фазовий склад покриттів**

З рентгенограм початкових поверхонь зразків (рис. 1, а) видно, що сталь 15ХГН2ТА містить чотири інтенсивні піки, які відносяться до твердого розчину типу CrFe.

На рис. 1, б–г приведені рентгенограми поверхонь зразків, модифікованих ЕЮ різними електродами. Розшифровка рентгенограм покриттів показала, що електроіскрова обробка стандартним електродом Т15К6 приводить до утворення в поверхневому шарі карбиду титану (TiC), а також фаз:  $(CrTi)_2O_3$  і FeO в незначній кількості (рис. 1, б). При цьому піків від початкового матеріалу практично не спостерігається, що говорить про відсутність перемішування матеріалу легуючого електроду і основи. Поверхневий шар, сформований при ЕЮ електродом Ш2, містить фази: CrFe, FeC, CrTiC і  $Cr_2O_3$  (рис. 1, г).

Обробка рентгенограм показала також, що в поверхневому шарі, модифікованому електродом ИМХ2 спостерігаються інтенсивні піки що відповідають складним інтерметаллідам: FeNi<sub>3</sub>, CrNiW (рис. 2, в), а також списи від підкладки (CrFe). В результаті ЕЕО легуючим електродом ИМХ2 на поверхні зразків утворюється шар, що є сумішшю інтерметаллідів. Утворення інтерметаллідів за участю заліза, хрому і нікелю є наслідком мікрометалургійних процесів, що протікають на катоді в результаті перемішування і хімічної взаємодії компонентів електроду з матеріалом основи. При ЕЕО сталі 15ХГН2ТА за допомогою електроду ИМХ2 мікролегуючі елементи забезпечують утворення захисного середовища, яке перешкоджає формуванню оксидів в поверхневому шарі.

З діаграм (рис. 2) видно, що з підвищенням енергетичних режимів ЕЕО: напруга від 80 В до 160 В і місткості від 34 мкФ до 240 мкФ товщина покриттів збільшується при будь-якому матеріалі ЛЕ. При цьому, при обробці електродом Т15К6 товщина покриття збільшується на 48,6 %, при обробці електродом ИМХ2 – на 75 %, при обробці електродом Ш2 – на 83,3 %.

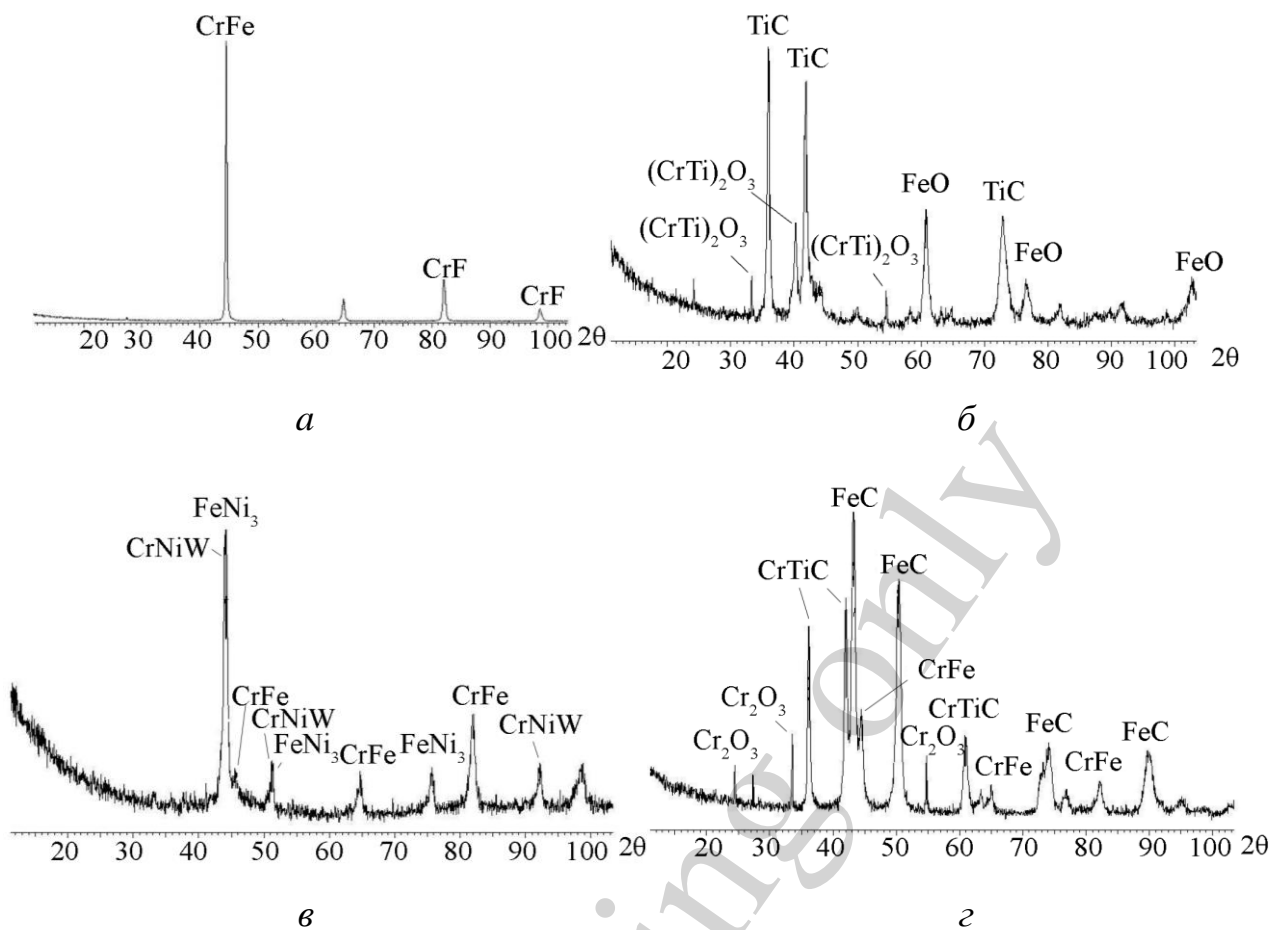


Рис. 1. Рентгенограми поверхні початкового зразка (а) і поверхневих шарів зразків із сталі 15ХГН2ТА, легованою електродами на режимах:  $U=80-120$  В,  $C=34-120$  мкФ,  $t=3-4$  хв; б – Т15К6; в – ИМХ2; г – Ш2

Проведений аналіз [1, 17] експериментальних залежностей мікротвердості покриттів на зразках із сталі 15ХГН2ТА, від анодно-катодної напруги і розрядної місткості конденсаторів. Встановлено, що підвищення енергетичних режимів обробки по-різному впливає на характер зміни мікротвердості покриттів при зміні матеріалу легуючого електроду (рис. 3, 4).

Найбільш високі значення мікротвердості покриттів (HV 900...1080) отримані при використанні електродів ИМХ2 і Т15К6. Найбільший ефект підвищення мікротвердості забезпечується при ЕЕО електродом ИМХ2 з напругою  $U=140$  В і ємністю  $C=120$  мкФ. При обробці електродом Т15К6 максимальна мікротвердість отримана при напрузі  $U=120$  В і ємності  $C=150$  мкФ. Подальше збільшення анодно-катодної напруги призводить до різкого зниження мікротвердості поверхневого шару [1, 17].

Кількісний хімічний склад початкового (немодифікованого) зразка і покриттів на сталевих зразках, оброблених електродами Т15К6, Ш2 і ИМХ2, приведені табл. 1.

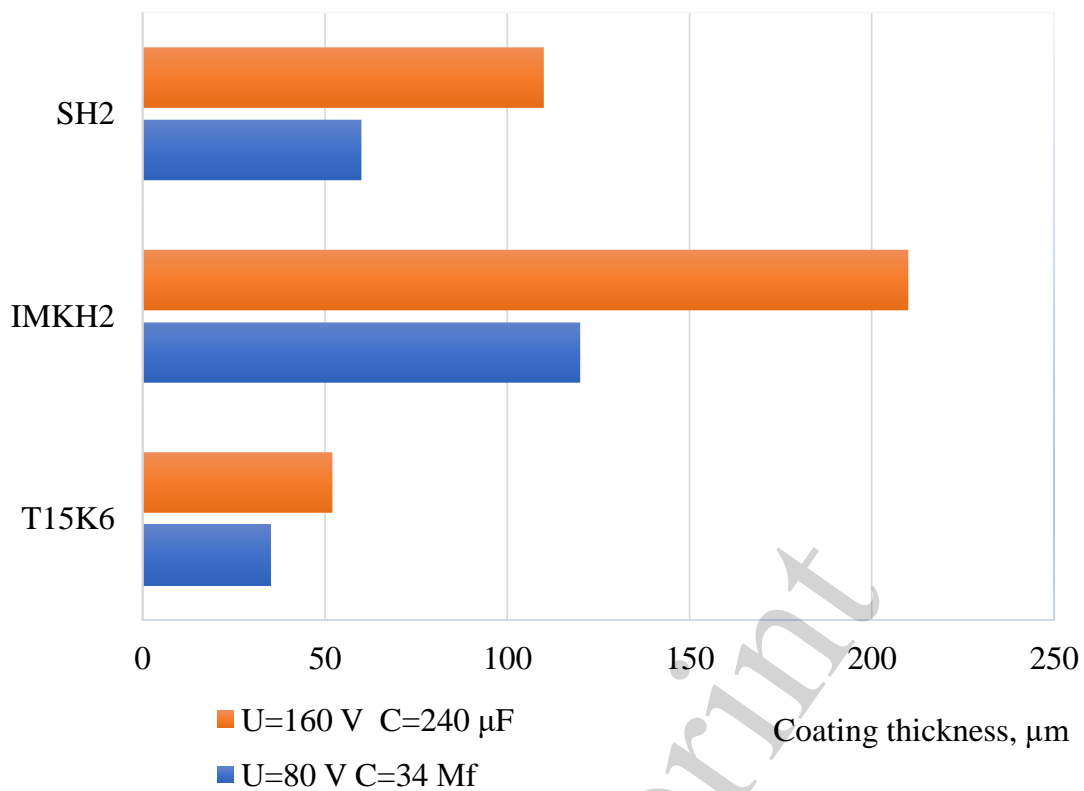


Рис. 2. Товщина покриттів зразків із сталі 15ХГН2ГА при різних матеріалах електродів

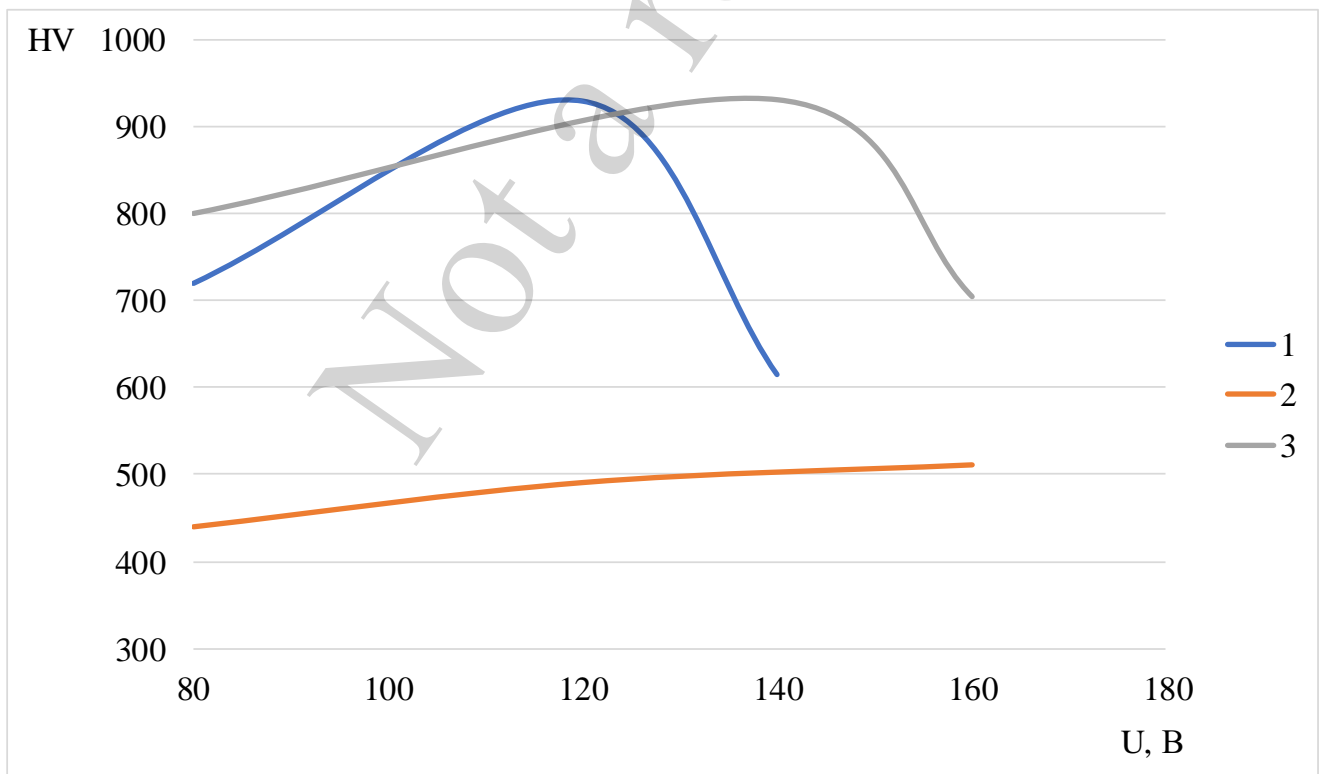


Рис. 3. Залежність мікротвердості поверхневих шарів зразків, модифікованих електроерозійною обробкою різними електродами, від анодно-катодної напруги при  $C=34$  мкФ: 1 – Т15К6; 2 – Ш2; 3 – ИМХ2

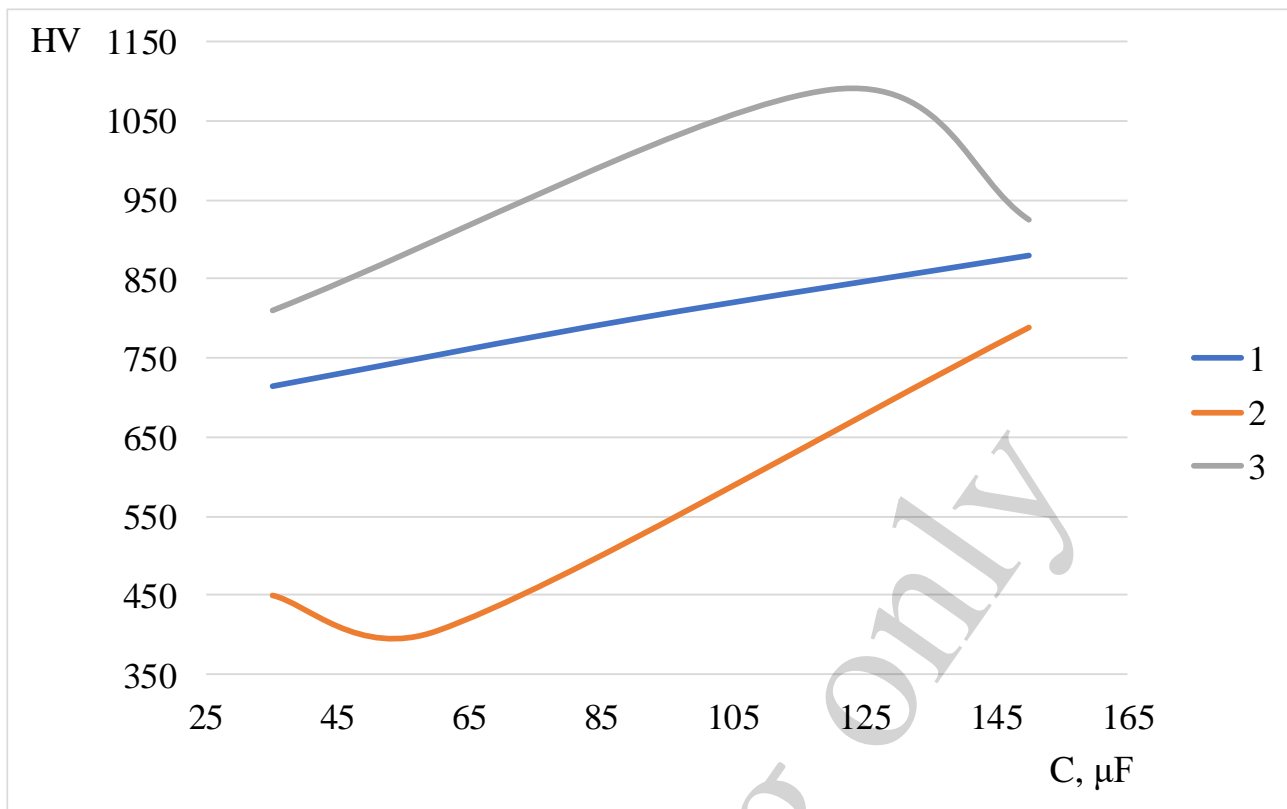


Рис. 4. Залежність мікротвердості поверхневих шарів зразків, модифікованих електроерозійною обробкою різними електродами, від розрядної місткості при  $U=80$  В: 1 – Т15К6; 2 – Ш2; 3 – ИМХ2

Таблиця 1

Елементний склад покриттів на зразках із сталі 15ХГН2ТА

Зразок	Хімічний елемент %							
	Fe	Cr	Mn	Ni	Si	Ti	W	O
Сталь 15ХГН2ТА (початкова)	95,3	1,09	1,95	1,66	–	–	–	–
Покриття ЛЕ Т15К6	54,87	–	–	–	–	12,34	32,8	–
Покриття ЛЕ ИМХ2	23,73	14,39	–	58,02	3,86	–	–	–
Покриття ЛЕ Ш2	47,05	–	–	7,32	–	29,56	–	16,07

## 5. 2. Результати досліджень впливу складу матеріалу легуючих електродів і режимів електроерозійної обробки

Дослідження впливу ЕЕО на топографію покриттів, сформованих методом ЕЕО на режимах:  $U=80-160$  В;  $C=34-240$  мкФ проводилося в режимі к-АСМ (рис. 5–7).

Виконане дослідження дозволило також визначити характерний розмір структурних елементів ( $D$ ), висотні параметри шорсткості поверхні: середнє арифметичне відхилення профілю ( $Ra$ ), глибину найбільшої западини ( $Rv$ ) і висоту найбільшого виступу ( $Rp$ ) профілю поверхонь зразків (табл. 2).

Значення шорсткості досліджуваних поверхонь показують, що параметри:  $Ra$ ,  $Rp$  і  $Rv$  змінюються залежно від матеріалу електроду. Параметри збільшуються в наступному порядку: початковий стан поверхні → обробка електродом Т15К6 → обробка електродом Ш2 → обробка електродом ИМХ2 (табл. 2). При цьо-



му, параметр  $Ra$  збільшується в 1,5–3,9 рази. Найбільше збільшення параметра шорсткості  $Ra$  до 6,3 і параметра  $R_r$  до 538,3 нм спостерігається при обробці електродом ИМХ2. Це може бути пов'язано з більш високим рівнем енергетичної дії при ЕЕО цим електродом.

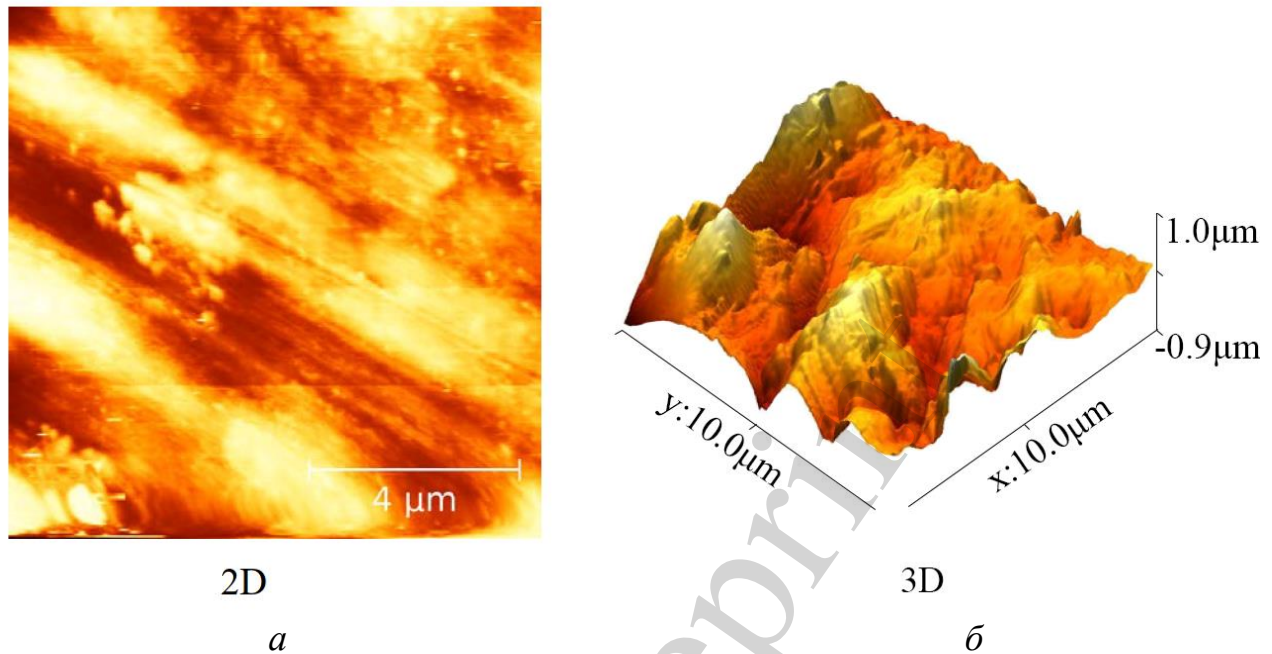


Рис. 5. Топографія поверхні зразка, обробленого електродом Т15К6 на режимах  $U=120$  В;  $C=34$  мкФ ( $E=0,25$  Дж):  
*a* – двовимірна площина; *б* – тривимірна площина

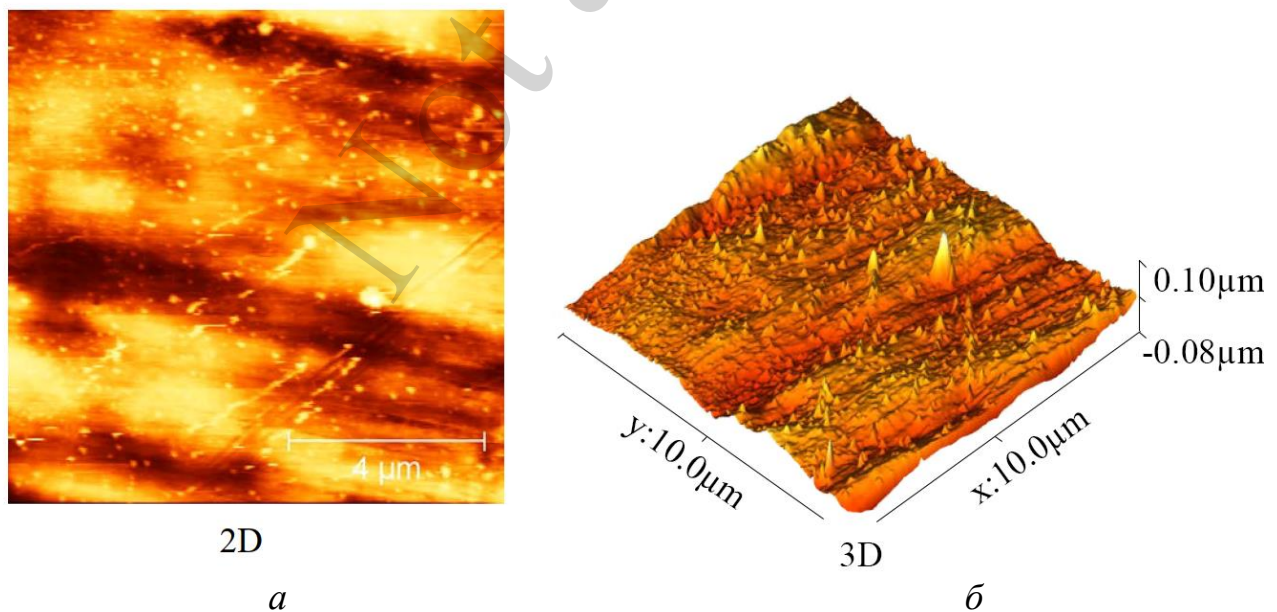


Рис. 6. Топографія поверхні зразка, обробленого електродом Ш2 на режимах  $U=80$  В;  $C=150$  мкФ ( $E=0,48$  Дж):  
*a* – двовимірна площина; *б* – тривимірна площина

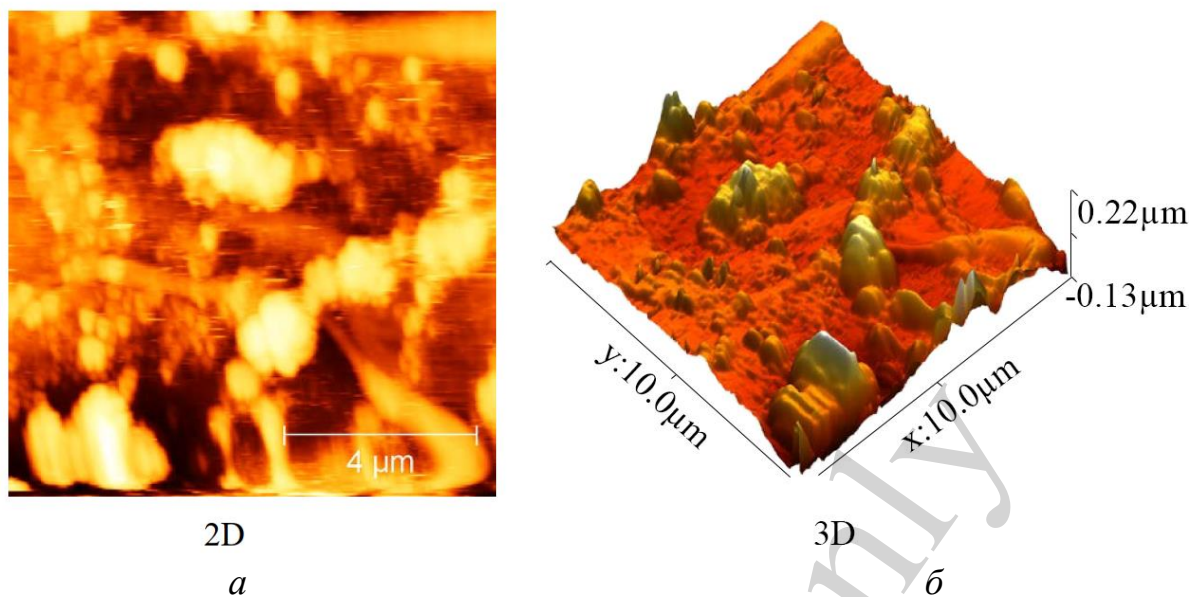


Рис. 7. Топографія поверхні зразка, обробленого електродом ИМХ2 на режимах  $U=160$  В;  $C=240$  мкФ ( $E=3,07$  Дж):  
*a* – двовимірна площина; *б* – тривимірна площина

Таблиця 2

Параметри поверхні початкового і модифікованих зразків

Зразок/Параметр	Характерний розмір структури D, нм	$Ra$ , мкм	Висота найбільшого виступу профілю $Rp$ , нм	Глибина найбільшої западини профілю $Rv$ , нм
Сталь 15ХГН2ТА (початкова)	2000-2500	$\approx 1,6$	379,0	344,8
Покриття ЛЕ Т15К6	200-250	$\approx 2,5$	477,3	378,5
Покриття ЛЕ Ш2	150-200	$\approx 3,2$	504,1	485,7
Покриття ЛЕ ИМХ2	250-300	$\approx 6,3$	538,3	484,4

Отримані значення (табл. 2) характерних розмірів структурних елементів поверхні показують, що в модифікованих зразках в порівнянні з початковим станом вони зменшуються в 8-13 разів. Мінімальні розміри параметра D отримані при обробці електродом Ш2 [1, 17].

З метою дослідження впливу фрикційної взаємодії полімерних контрзразків з металевими зразками після їх ЕЕО на топографію поверхонь тертя було проведено дослідження поверхонь тертя на атомно-силовому (к-АСМ) і растровому електронному мікроскопах (рис. 8, 9).

На зображеннях поверхонь зразків, отриманих за допомогою контактної атомно-силової мікроскопії, видно, що топографія поверхонь на доріжці тертя і поза доріжкою відрізняються (рис. 8). На рис. 8 показано, що висота нерівностей поверхні на ділянках після тертя вище, ніж на ділянках поверхні поза доріжкою

тертя. Це може бути пов'язано з формуванням на поверхні зразків плівки фрикційного перенесення.

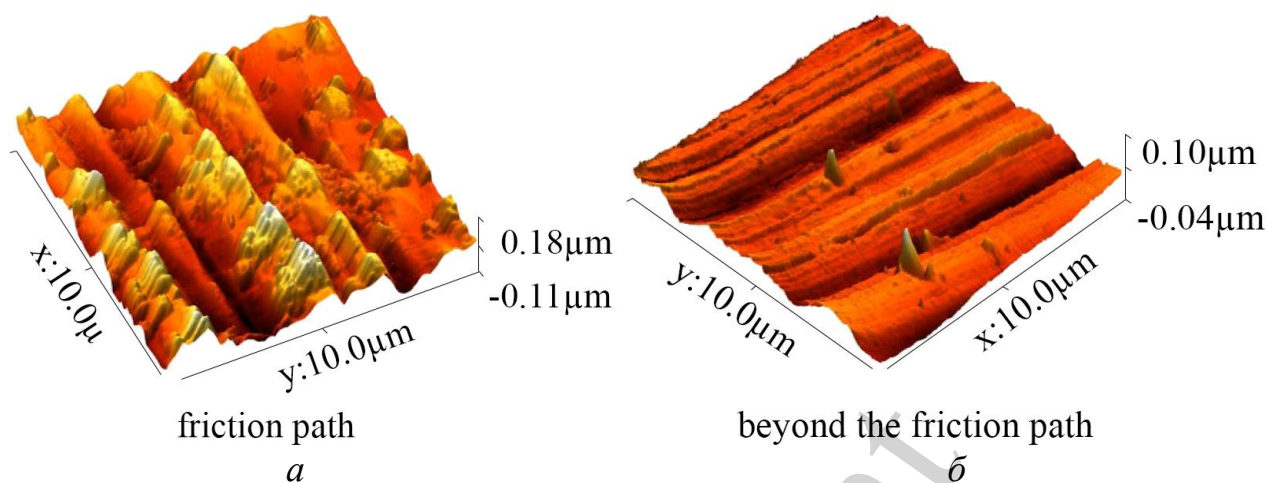


Рис. 8. Топографія поверхні зразка із сталі 15ХГН2ГА, обробленого електродом ИМХ2 ( $U=120$  В;  $C=150$  мкФ;  $t=4$  хв/см<sup>2</sup>), після випробування на тертя та зношування: *a* – доріжка тертя; *б* – поза доріжкою тертя

### 5. 3. Результати досліджень мікротвердості і триботехнічних властивостей покриттів сталевих зразків

На рис. 9 показані зображення поверхонь після триботехнічних випробувань, отриманих методом растрової електронної мікроскопії. Ділянки поверхні зразків на доріжці тертя помітно відрізняються від ділянок поверхні поза доріжкою. На ділянці доріжки тертя добре видно полімерна плівка фрикційного перенесення (ФП), структурована у напрямі ковзання. На ділянці поряд з доріжкою тертя є присутнім островкове покриття без плівки ФП [15]. Таким чином, встановлено, що при фрикційній взаємодії сталевих зразків, оброблених методом ЕЕО, з полімерними контрзразками на поверхні тертя сталевих зразків формується тонка плівка ФП. Це призводить до зміни топографії поверхонь зі збільшенням висоти мікронерівностей і структуризацією плівки перенесення у напрямі ковзання.

Триботехнічні властивості структур, що формуються на сталевій основі при ЕЕО, оцінювали за швидкістю зношування полімерних контрзразків при терті ковзання по модифікованій поверхні сталевих зразків [18, 19]. Сталеві зразки обробляли електродом ИМХ2. З метою отримання наочного уявлення про вплив рівня енергетичної дії на зносостійкість (швидкість зношування) пари тертя за результатами випробувань були побудовані залежності  $J=f(E)$  (рис. 10).

Отримані залежності (рис. 10) швидкості зношування полімерних контрзразків дозволяють зробити висновок, що зі збільшенням енергії імпульсу при ЕЕО сталевих зразків швидкість зношування полімерного контрзразка знижується в 1,2–1,3 рази. При цьому збільшення тривалості ЕЕО робить незначний вплив на швидкість зношування полімерних контрзразків (на  $\sim 3$  %). Також було показано, що швидкість зношування металополімерної пари тертя із зразками, модифікова-



ними ЕЕО, менше, ніж цей параметр у пари тертя із загартованим зразком, приблизно в 1,6–2 рази.

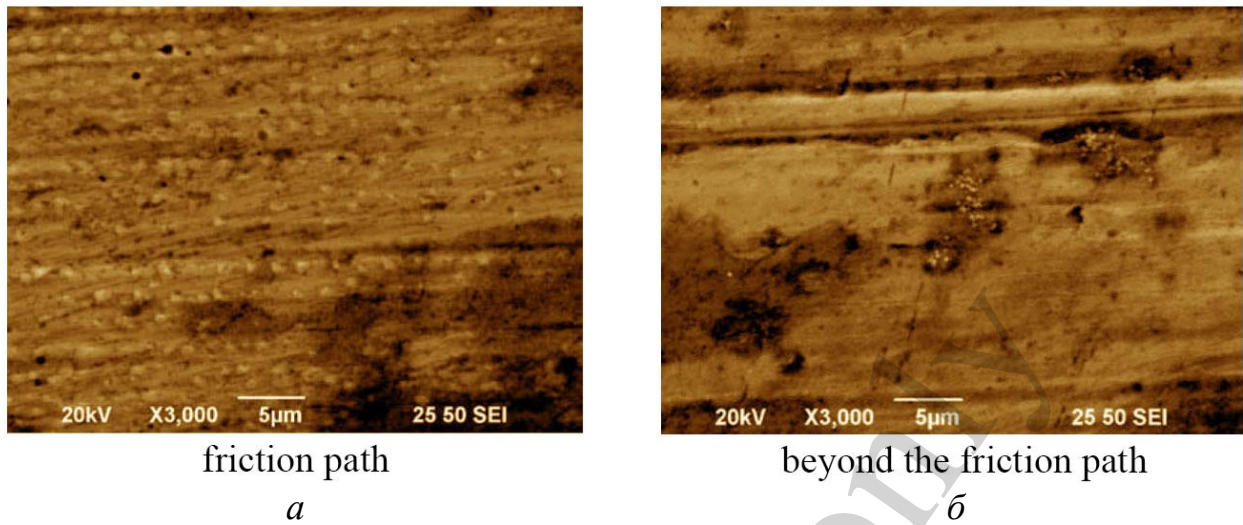


Рис. 9. Поверхня зразка із сталі 15ХГН2ГА, обробленого електродом ИМХ2 ( $U=120$  В;  $C=150$  мкФ;  $t=4$  хв/см<sup>2</sup>), після випробувань на тертя та зношування: *a* – доріжка тертя; *б* – поза доріжкою тертя

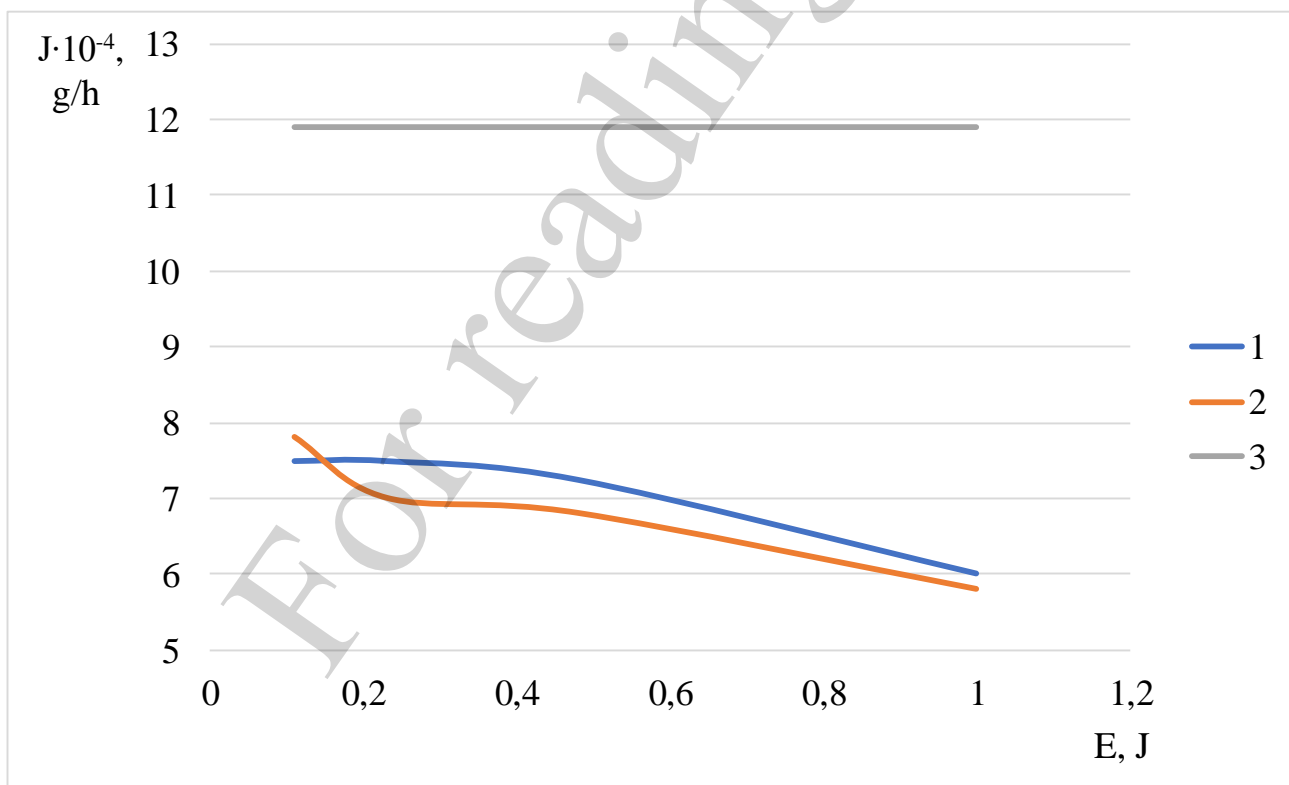


Рис. 10. Залежність швидкості зношування полімерних контрзразків від енергії імпульсу при електроерозійній обробці зразків із сталі 15ХГН2ГА: 1 – зразки з тривалістю електроерозійної обробки 4 хв/см<sup>2</sup>; 2 – зразки з тривалістю електроерозійної обробки 5 хв/см<sup>2</sup>; 3 – зразок загартований без електроерозійної обробки

## 6. Обговорення результатів експериментальних досліджень модифікації сталевих зразків за допомогою технології їх електроерозійної обробки

При визначенні механізму формування покриттів різного фазового складу залежно від хімічного складу ЛЕ проводилось методом рентгенофазового аналізу поверхонь модифікованих зразків. Отриманні результати експериментальних досліджень модифікації сталевих зразків за допомогою технології їх електроерозійної обробки підтвердили, що фазовий склад покриттів визначається хімічним складом ЛЕ [20]. Встановлено, що товщина формованого покриття залежить від хімічного складу матеріалу легуючого електроду і енергетичних режимів ЕЕО. Так найбільша товщина покриття утворюється при обробці електродом ИМХ2, що в 4 рази більше, ніж при обробці серійним електродом Т15К6. Підвищення енергетичних режимів ЕЕО призводить до збільшення товщини покриття не залежно від матеріалу ЛЕ, що дозволяє рекомендувати ЕЕО електродом Т15К6, ИМХ2, Ш2 для підвищення зносостійкості і відновлення зношених поверхонь деталей вузлів тертя машин. Встановлено, що мікротвердість покриттів залежить від режимів ЕЕО і матеріалу ЛЕ. Експериментальні залежності мікротвердості покриттів від напруги і розрядної місткості конденсаторів мають екстремальний характер з максимумами при напрузі  $U=120-140$  В і розрядній ємності  $C=120$  мкФ [21].

Діаграми (рис. 2) товщин покриттів сталевих зразків при різних матеріалах електродів також показують, що при ЕЕО електродом ИМХ2 на основі карбиду вольфраму з добавками компонентів, що утворюють з матеріалом основи необмежені тверді розчини, отримана найбільша товщина покриття (210 мкм). Це можна пояснити тим, що введення бору і кремнію до складу ЛЕ уповільнює утворення оксидних плівок у формованій структурі, що робить позитивний вплив на суцільність і збільшення товщини покриття. Крім того, введення бору зменшує ерозійну стійкість ЛЕ, внаслідок чого підвищується масоперенос матеріалу електроду на оброблювану поверхню. Використання електроду Ш2 також призводить до утворення покриттів, що перевищують товщину покриттів, сформованих електродом марки Т15К6, в 1,7–2 рази [1, 22]. Це пояснюється тим, що мінеральна сировина (шеелітовий концентрат) у складі матеріалу електроду створює захисну атмосферу в зоні ЕЕО, перешкоджаючи вигоранню ерозійних часток і сприяючи інтенсифікації масопереносу матеріалу електроду. В ході досліджень [1, 17] сталевих зразків на структуру і фазовий склад покриттів отримані результати дозволяють використати ЕЕО для відновлення зношених поверхонь прецизійних пар тертя в межах до 100 мкм.

Приведені результати хімічного складу зразків (табл. 1), оброблених електродом Т15К6, Ш2 і ИМХ2, показують, що елементний склад початкової поверхні зразка із сталі 15ХГН2ТА відрізняється від складу покриттів і поверхневих шарів зразків, модифікованих ЕЕО різними електродом. У модифікованих зразках не встановлена наявність ряду елементів сталі 15ХГН2ТА: хрому, марганцю і нікелю при обробці електродом Т15К6, хрому і марганцю при обробці електродом Ш2, марганцю і титану при обробці електродом ИМХ2. При цьому встановлена присутність вольфраму (ЛЕ Т15К6), кисню (ЛЕ Ш2) і кремнію (ЛЕ ИМХ2), що можна

пояснити ерозією легуючих елементів і їх малою концентрацією в сталі, а також взаємодією елементів електродів із сталлю.

Методом контактної атомно-силової мікроскопії визначено значне (у 8-13 разів) зменшення характерних розмірів структурних елементів ( $D$ ) в покриттях, сформованих ЕЕО різними електродами, порівняно з початковою (немодифікованою) поверхнею. Також встановлено, що при ЕЕО утворюються поверхні з висотними параметрами шорсткості ( $Ra$ ,  $Rv$ ,  $Rp$ ), характерними і сумірними з аналогічними параметрами поверхні, отриманими при чистовій механічній обробці [23]. При цьому в результаті ЕЕО електродом ИМХ2 спостерігається найбільше збільшення параметра шорсткості  $Ra$  в 3,9 рази, що пояснюється більш високим рівнем енергетичної дії при обробці цим легуючим електродом [24].

Спільний вплив напруги і розрядної місткості при ЕЕО викликає зменшення швидкості зношування. Для підвищення зносостійкості пари тертя необхідно збільшувати розрядну місткість і анодно-катодну напругу.

Тому подальший напрям досліджень полягає в встановленні оптимальних режимів при ЕЕО за допомогою методу планування факторного експерименту і статистичної обробки отриманих даних. А також дослідженні впливу режимів ЕЕО сталевих поверхонь на зносостійкість металополімерної трібосистеми.

## 7. Висновки

1. Досліджено взаємозв'язок фізико-хімічних процесів енергомасопереносу і формування модифікованих структур в поверхневому шарі і зносостійких покриттів на оброблюваній поверхні при ЕЕО. Найбільший ефект підвищення мікротвердості забезпечується при ЕЕО електродом ИМХ2 з напругою  $U=140$  В і ємністю  $C=120$  мкФ. При обробці електродом Т15К6 максимальна мікротвердість отримана при напрузі  $U=120$  В і ємності  $C=150$  мкФ.

2. Встановлено закономірності процесу поверхневого модифікування сталі 15ХГН2ТА і формування зносостійких покриттів, що відображають вплив хімічного складу матеріалу електродів і режимів обробки на елементний і фазовий склад, товщину, мікротвердість і зносостійкість формованих покриттів. Найбільше збільшення параметра шорсткості  $Ra$  до 6,3 і параметра  $RP$  до 538,3 нм спостерігається при обробці електродом ИМХ2.

3. Отримано експериментальні залежності швидкості зношування металополімерних пар тертя від технологічних режимів ЕЕО сталевих деталей. Завдяки такому механізму, що встановлено на основі трибологічних досліджень, дозволить досягти заданих параметрів зносостійкості пар тертя. Зі збільшенням енергії імпульсу при ЕЕО сталевих зразків швидкість зношування полімерного контрзразка знижується в 1,2–1,3 рази.

## Література

1. Алимбаева, Б. Ш., Марченко, Д. Д. (2009). Поверхностное упрочнение стальных деталей с помощью технологии электроискрового легирования. Повышение надежности и прочности деталей при ремонте с внедрением перспективных методов упрочнения: материалы международной научно-практической конференции, 8 (09), 154–178.

2. Bayati, M. R., Molaei, R., Janghorban, K. (2011). Surface alloying of carbon steels from electrolytic plasma. *Metal Science and Heat Treatment*, 53 (1), 91–94. doi: <https://doi.org/10.1007/s11041-011-9347-5>
3. Bunshah, F. (2001). *Handbook of Hard Coatings. Deposition Technologies, Properties and Applications*. William Andrew, 560.
4. Kanayev, A. T. (2008). Plasma Surface Hardening of Crests of Wheels of a Rolling Stock. *Materialy IV Mezinarodnivedecko-prakticka conference VEDA TEORIE A PRAXE-2008*. Praha, 56–60.
5. Meletis, E. I., Nie, X., Wang, F. L., Jiang, J. C. (2002). Electrolytic plasma processing for cleaning and metal-coating of steel surfaces. *Surface and Coatings Technology*, 150 (2-3), 246–256. doi: [https://doi.org/10.1016/s0257-8972\(01\)01521-3](https://doi.org/10.1016/s0257-8972(01)01521-3)
6. Newbery, A. P., Grant, P. S. (2009). Arc Sprayed Steel: Microstructure in Severe Substrate Features. *Journal of Thermal Spray Technology*, 18 (2), 256–271. doi: <https://doi.org/10.1007/s11666-009-9300-y>
7. Mazhyn, S., Laila, Z., Michael, S. (2012). Electrolytic-plasma cementation influence of regimes on phase structure and steel 30CrMnSi hardening. 2012 7th International Forum on Strategic Technology (IFOST). doi: <https://doi.org/10.1109/ifost.2012.6357723>
8. Ulianitsky, V., Shtertser, A., Zlobin, S., Smurov, I. (2011). Computer-Controlled Detonation Spraying: From Process Fundamentals Toward Advanced Applications. *Journal of Thermal Spray Technology*, 20 (4), 791–801. doi: <https://doi.org/10.1007/s11666-011-9649-6>
9. Witke, T., Schuelke, T., Schultrich, B., Siemroth, P., Vetter, J. (2000). Comparison of filtered high-current pulsed arc deposition ( $\phi$ -HCA) with conventional vacuum arc methods. *Surface and Coatings Technology*, 126 (1), 81–88. doi: [https://doi.org/10.1016/s0257-8972\(00\)00544-2](https://doi.org/10.1016/s0257-8972(00)00544-2)
10. Yerokhin, A. L., Nie, X., Leyland, A., Matthews, A., Dowey, S. J. (1999). Plasma electrolysis for surface engineering. *Surface and Coatings Technology*, 122 (2-3), 73–93. doi: [https://doi.org/10.1016/s0257-8972\(99\)00441-7](https://doi.org/10.1016/s0257-8972(99)00441-7)
11. Lewis, S. R., Lewis, R., Olofsson, U. (2011). An alternative method for the assessment of railhead traction. *Wear*, 271 (1-2), 62–70. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2010.10.035>
12. Lewis, S. R., Lewis, R., Richards, P., Buckley-Johnstone, L. E. (2014). Investigation of the isolation and frictional properties of hydrophobic products on the rail head, when used to combat low adhesion. *Wear*, 314 (1-2), 213–219. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.11.024>
13. Bhushan, B. (2013). *Introduction to Tribology*. John Wiley & Sons. doi: <https://doi.org/10.1002/9781118403259>
14. Zaspá, Y., Dykha, A., Marchenko, D., Matiukh, S., Kukurudzyak, Y. (2020). Exchange interaction and models of contact generation of disturbances in tribosystems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (5 (106)), 25–34. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.209927>
15. Dykha, A., Marchenko, D., Artyukh, V., Zubiekhina-Khariat, O., Kurepin, V. (2018). Study and development of the technology for hardening rope blocks

by reeling. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (1 (92)), 22–32. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126196>

16. Butakov, B. I., Marchenko, D. D. (2013). Promoting contact strength of steel by rolling. *Journal of Friction and Wear*, 34 (4), 308–316. doi: <https://doi.org/10.3103/s106836661304003x>

17. Marchenko, D. D., Dykha, A. V., Artyukh, V. A., Matvyeyeva, K. S. (2020). Studying the Tribological Properties of Parts Hardened by Rollers during Stabilization of the Operating Rolling Force. *Journal of Friction and Wear*, 41 (1), 58–64. doi: <https://doi.org/10.3103/s1068366620010122>

18. Раскин, Л. Г., Серая, О. В. (2008). Нечеткая математика. Харьков: Парус, 352.

19. Хартман, К., Лецкий, Э., Шефер, В. и др. (1977). Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов. М.: Мир, 552.

20. Mezrin, A. M. (2009). Determining local wear equation based on friction and wear testing using a pin-on-disk scheme. *Journal of Friction and Wear*, 30 (4), 242–245. doi: <https://doi.org/10.3103/s1068366609040035>

21. Togawa, K., Arai, S., Uwatoko, M. (2012). Influence of Traction Sheave P.C.D. Difference on Sheave and Rope. *The Proceedings of the Elevator, Escalator and Amusement Rides Conference*, 2011, 31–34. doi: <https://doi.org/10.1299/jsmeearc.2011.31>

22. Dykha, A., Marchenko, D. (2018). Prediction the wear of sliding bearings. *International Journal of Engineering & Technology*, 7 (2.23), 4. doi: <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i2.23.11872>

23. Ryu, J. B., Chae, Y. H., Kim, S. S. (2005). A Fundamental Study of the Tribological Characteristics of Sheave Steel against a Wire Rope. *Key Engineering Materials*, 297-300, 1382–1387. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.297-300.1382>

24. Erdonmez, C., Imrak, C. (2009). Modeling and numerical analysis of the wire strand. *Journal of Naval Science and Engineering*, 5 (1), 30–38. URL: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/105285>