

УДК 621.9.048.4

**ВПЛИВ СКЛАДУ МІЖЕЛЕКТРОДНОГО СЕРЕДОВИЩА НА СТРУКТУРУ ТА МІКРОТВЕРДІСТЬ СПЛАВІВ ЗАЛІЗА ПРИ ЕЛЕКТРОІСКРОВОМУ ЛЕГУВАННІ ЦИРКОНІЄМ, ТИТАНОМ, ХРОМОМ**

**Г. Г. Лобачова, Є. В. Івашченко**

Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут”  
вул. Політехнічна, 35, 03056, м. Київ, Україна. E-mail: [ivashchenko@kpm.kpi.ua](mailto:ivashchenko@kpm.kpi.ua); [lgg22@ukr.net](mailto:lgg22@ukr.net)

**Ю. М. Гаврилюк**

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського  
вул. Першотравнева, 20, 39600, м. Кременчук, Україна. E-mail: [kimv@kdu.edu.ua](mailto:kimv@kdu.edu.ua)

Досліджені структура, фазовий склад та мікротвердість покриттів, одержаних на залізі та сталі Ст.3 в процесі електроіскрового легування (ЕІЛ) цирконієм, титаном, хромом у міжелектродних середовищах різного складу (повітря, пропан-бутан, гас, аргон, азот, рідкий азот). Встановлено збільшення мікротвердості поверхневих зон сплавів заліза від 3,5 до 11 ГПа, що зумовлено насиченням легованого шару елементами втілення.

**Ключові слова:** електроіскрове легування, насичувальне середовище, легований шар, сплави заліза, цирконій, титан, хром.

**INFLUENCE OF INTERELECTRODE ENVIRONMENT CONTENT ON STRUCTURE AND MICROHARDNESS FE-ALLOYS AT THE ELECTRIC-SPARK ALLOYING BY ZIRCONIUM, TITANIUM, CHROME**

**G. G. Lobachova, Ye. V. Ivashchenko**

National technical university of Ukraine “Kyiv polytechnic institute”  
vul. Polytechnichna, 35, 03056, Kyiv, Ukraine. E-mail: [ivashchenko@kpm.kpi.ua](mailto:ivashchenko@kpm.kpi.ua); [lgg22@ukr.net](mailto:lgg22@ukr.net)

**Yu. M. Gavrilyuk**

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University  
vul. Pershotravneva, 20, 39600, Kremenchuk, Ukraine. E-mail: [kimv@kdu.edu.ua](mailto:kimv@kdu.edu.ua)

The structure, phase composition and microhardness of the coatings obtained on Fe and steel St.3 at the Electric-spark alloying (ESA) by zirconium, titanium, chrome in the interelectrode environments of different content (air, propane-butane, kerosene, argon, nitrogen, liquid nitrogen) were investigated. The increase in microhardness of Fe-alloys surface zones from 3,5 to 11 GPa was established, which is due to saturation of the alloyed layer by interstitial elements.

**Key words:** Electric-spark alloying, saturate environment, alloyed layer, Fe-alloys, zirconium, titanium, chrome.

**ВЛИЯНИЕ СОСТАВА МЕЖЭЛЕКТРОДНОЙ СРЕДЫ НА СТРУКТУРУ И МИКРОТВЕРДОСТЬ СПЛАВОВ ЖЕЛЕЗА ПРИ ЭЛЕКТРОІСКРОВОМ ЛЕГИРОВАНИИ ЦИРКОНИЕМ, ТИТАНОМ, ХРОМОМ**

**Г. Г. Лобачёва, Е. В. Івашченко**

Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт”  
ул. Политехническая, 35, 03056, г. Киев, Украина. E-mail: [ivashchenko@kpm.kpi.ua](mailto:ivashchenko@kpm.kpi.ua); [lgg22@ukr.net](mailto:lgg22@ukr.net)

**Ю. Н. Гаврилюк**

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского  
ул. Первомайская, 20, 39600, г. Кременчуг, Украина. E-mail: [kimv@kdu.edu.ua](mailto:kimv@kdu.edu.ua)

Исследованы структура, фазовый состав и микротвёрдость покрытий, полученных на железе и стали Ст.3 в процессе электроіскрового легирования (ЭИЛ) цирконием, титаном, хромом в межэлектродных средах разного состава (воздух, пропан-бутан, керосин, аргон, азот, жидкий азот). Установлено увеличение микротвёрдости поверхностных зон сплавов железа от 3,5 до 11 ГПа, что обусловлено насыщением легируемого слоя элементами внедрения.

**Ключевые слова:** электроіскровое легирование, насыщающая среда, легируемый слой, сплавы железа, цирконий, титан, хром.

**АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ.** Сучасне машинобудування потребує розробки нових технологій зміцнення поверхонь деталей машин та інструменту для підвищення їх експлуатаційних характеристик. Електроіскрове легування (ЕІЛ) є одним із відомих методів поверхневої обробки матеріалів концентрованими потоками енергії [1, 2], основними перевагами якого є можливість створення локальних покриттів при використанні електродів з будь-яких струмопровідних матеріалів; висока адгезія основного та нанесеного матеріалу; низька енергоємність процесу; простота здійснення технологічних операцій та

інше. За рахунок хімічної, термічної та механічної взаємодії електродів та впливу міжелектродного середовища на катоді (деталі) формується поверхневий шар зміненої структури. Покращенні властивості поверхневого шару можуть бути досягнуті за рахунок насичення матеріалу електродів елементами втілення та створення в процесі ЕІЛ дрібнодисперсних частинок карбідів або нітридів матеріалу легувального електроду.

Огляд літературних джерел свідчить про те, що значна кількість робіт присвячена дослідженню структури та властивостей покриттів, отриманих у

процесі ЕІЛ на повітрі [1–3], але приділяється недостатньо уваги вивченню впливу міжелектродного середовища на формування легованого шару.

Актуальність поставленої задачі зумовлена необхідністю вдосконалення електроіскрової обробки шляхом створення умов для інтенсивної взаємодії елементів міжелектродного середовища з анодом і катодом у процесі ЕІЛ. На основі наших попередніх експериментів і даних із літературних джерел [1, 2] можна зробити висновок про те, що міжелектродне середовище здійснює суттєвий вплив на властивості легованих шарів, зокрема на мікротвердість.

У зв'язку із вищевикладеним метою роботи є дослідження впливу складу насичувального міжелектродного середовища на структуру, поверхневу мікротвердість сталі Ст.3 та заліза в процесі ЕІЛ цирконієм, титаном і хромом.

**МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.** В роботі проведено процеси ЕІЛ зразків зі сталі Ст.3 і Fe-армко Zr-, Ti-, Cr-анодами у середовищах: повітря, пропан-бутан, аргон, азот, газ, рідкий азот. Обробку здійснювали на установці “Елітрон – 22” за сили струму розряду 2 – 3 А, напруги в міжелектродному проміжку 60 – 70 В, частоти механічних коливань аноду 50 Гц, відносної тривалості обробки 3 хвилини.

Дослідження поверхні сплавів заліза після ЕІЛ проводилося методами мікроструктурного, фазового рентгенівського та мікродюрOMETРИЧНОГО аналізу.

Експериментальні дані, отримані після проведення процесів ЕІЛ заліза анодами з цирконію, титану та хрому в пропан-бутані, газі, а також на повітрі наведені в табл. 1, з якої видно, що збільшення мікротвердості поверхневої зони спостерігається після усіх процесів електроіскрової обробки.

Таблиця 1 – Характеристики поверхневих шарів Fe-армко після ЕІЛ у середовищах

Матеріал аноду	Середовище	Товщина легованого шару, мкм	Протяжність зони підвищеної мікротвердості, мкм	Мікротвердість легованого шару, ГПа	Фазовий склад поверхневого шару
Zr	повітря	20	30	8	Zr, $\alpha$ -Fe, ZrO <sub>2</sub>
	пропан-бутан	45	70	8,5	Zr, ZrC
	газ	25	40	10	Zr, $\alpha$ -Fe, ZrC
Ti	повітря	25	40	6	Ti, $\alpha$ -Fe, TiO <sub>2</sub>
	пропан-бутан	40	50	6,9	$\alpha$ -Ti, Fe <sub>2</sub> Ti, TiC
	газ	20	60	5,5	$\alpha$ -Fe, $\alpha$ -Ti, Fe <sub>2</sub> Ti
Cr	повітря	20	45	3,5	FeCr, $\alpha$ -Fe
	пропан-бутан	30	50	4,2	Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> , FeCr
	газ	15	60	4	Cr, Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub> , FeCr

Найвищу мікротвердість (10 ГПа) має легований шар, одержаний при легуванні заліза цирконієм у рідкому міжелектродному середовищі, що містить вуглець (газ). Відповідно, найвищий коефіцієнт зміцнення поверхні (8,33), розрахований із відношення значень максимальної мікротвердості легованого шару до мікротвердості нелегованої основи (1,2 ГПа), буде також для цього ж процесу. Проведення ЕІЛ цирконієм у газовому середовищі, що містить вуглець (пропан-бутані), призводить до суттєвого збільшення товщини легованого шару (45 мкм). При цьому глибина зони підвищеної мікротвердості становить 70 мкм.

Встановлено, що середовище, яке містить вуглець, у процесі електроіскрового легування активніше впливає на зростання поверхневої мікротвердості, ніж повітряне. На нашу думку, таке підвищення значень мікротвердості поверхні заліза при ЕІЛ в пропан-бутані та газі, пов'язано з дифузійним насиченням вуглецем розплавленої під дією електричної іскри ділянки матеріалу катоду та матеріалу легувального електроду. В результаті такого процесу утворюються дрібнодисперсні карбіди легувального елемента та тверді розчини втілення на основі матеріалів електродів із подальшим формуванням при надшвидкому охолодженні мартенситних структур.

Після проведення ЕІЛ поверхні сталі Ст.3 у середовищах повітря, пропан-бутану, аргону, азоту та рідкого азоту відмічається загальна тенденція збільшення мікротвердості покриття із закономірним зменшенням її значень за глибиною внаслідок зниження концентрації легувального елемента.

У процесі ЕІЛ на повітрі при незначній тривалості процесу концентрація легувального металу та його проникнення вглиб основи настільки невеликі, що у поєднанні з інтенсивним окрихченням шару за рахунок кисню повітря призводить до монотонного зниження мікротвердості за глибиною до зони термічного впливу. Так, мікротвердість поверхні сталі при легуванні цирконієм становить 8,4 ГПа, при легуванні титаном – 7,8 ГПа, при легуванні хромом – 6,8 ГПа, по закінченні легованого шару – спадає до 2,3 ГПа, а при переході до матриці має значення 1,5 ГПа.

За даними металографічного аналізу структура зміцнених шарів складається з легованого шару та зони термічного впливу (ЗТВ). При ЕІЛ цирконієм у легованій зоні виявляється складова сірого кольору, яка, очевидно, утворилася в результаті насичення киснем при обробці на повітрі. Леговані шари характеризуються суцільністю та рівномірністю при легуванні Zr мають товщину до 50 мкм, при легуванні Ti – до 20 мкм та при легуванні Cr – 25 мкм. Особливістю зони термічного впливу протяжністю від 10 мкм для хромового до 35 мкм для цирконієвого покриття є подрібнення зерен. Це може бути пов'язано з періодичною дією іскрового розряду в процесі короткочасного швидкісного нагрівання і наступного швидкого охолодження, що призводить до  $\alpha \leftrightarrow \gamma$  перекристалізації, а також до утворення твердих розчинів втілення.

Легування сталі у середовищі пропан-бутану призводить до створення на поверхні покриттів товщиною 40–60 мкм, за якими спостерігається зона термічного впливу шириною 3–5 мкм. Найбільшу мікротвердість має зразок, легований цирконієвим анодом – 10,4 ГПа, а найменшу – легований хромо-вим анодом – 8,6 ГПа.

Пошаровий рентгенофазовий аналіз сталі Ст.3 після ЕІЛ цирконієм у вуглецевому середовищі показав, що на поверхні зразка виявлені фази Zr, ZrC. На глибині 30–50 мкм зафіксовані фази Zr, ZrC,  $\alpha$  – Fe, а починаючи з 60 мкм тільки  $\alpha$  – Fe, що відповідає матеріалу основи.

Результати мікродюрOMETричного аналізу свідчать, що після обробки поверхні сталі цирконієм, титаном і хромом у середовищі аргону зростає мікротвердість легованих шарів до значень 7; 7,1 і 4 ГПа відповідно.

Мікроструктури поверхневих зон після ЕІЛ цирконієм і титаном є нерівномірними за товщиною (30 – 55 мкм) легованими покриттями, які мають два шари різної травимості (“сірий” та “білий”). Можна припустити, що “сіра” складова утворилася з продуктів крихкого руйнування матеріалу аноду. Її товщина складає 25 мкм для титанового покриття та 40 мкм – для цирконієвого. Легований шар характеризується наявністю тріщин, які утворилися під дією напружень, викликаних неоднорідністю хімічного складу “сірої” та “білої” ділянок із різними коефіцієнтами термічного розширення. Протяжність зони термічного впливу, яка знаходиться між покриттям і матрицею, складає 5 – 10 мкм.

У процесі ЕІЛ сталі хромом в аргоні утворюється суцільний, рівномірний шар товщиною 35 – 42 мкм, без тріщин і пор. В зоні термічного впливу спостерігається подрібнення зерен, що є результатом швидкісної кристалізації.

Легування сталі у міжелектродному середовищі, що містить азот призводить до формування суцільних і рівномірних покриттів (рис. 1). Товщина таких шарів 90 – 100 мкм при ЕІЛ цирконієм, 42 – 45 мкм при ЕІЛ титаном та 50 – 55 мкм при ЕІЛ хромом.

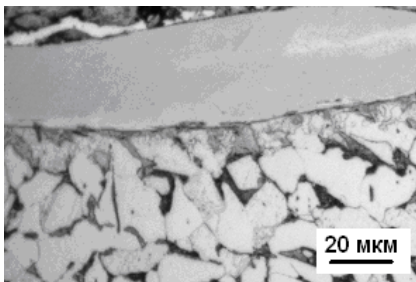


Рисунок 1 – Мікроструктури поверхні сталі Ст.3 після ЕІЛ титаном у середовищі азоту

Рентгенофазовий аналіз цирконієвого покриття, одержаного в процесі ЕІЛ у азоті та рідкому азоті, виявив фази:  $\alpha$ -Fe, Zr, ZrN, ZrO<sub>2</sub>.

Мікротвердість поверхневих ділянок сталі при легуванні у середовищі, що містить азот наведена на рис. 2 і 3.

Отримані результати дозволяють зробити висновок про те, що процеси ЕІЛ у міжелектродних середовищах різного складу призводять до зміцнення поверхні сталі Ст.3. Порівняльна характеристика коефіцієнтів зміцнення легованого шару наведена на рис. 4. Найбільший коефіцієнт зміцнення має покриття Zr, отримане при легуванні в середовищі азоту.

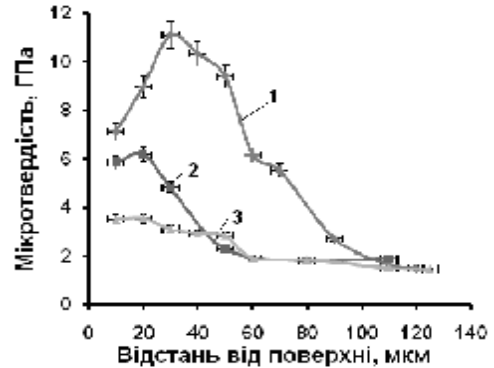


Рисунок 2 – Розподіл мікротвердості у поверхневих шарах сталі Ст.3 після ЕІЛ у середовищі азоту: 1 – Zr-анод; 2 – Ti-анод; 3 – Cr-анод

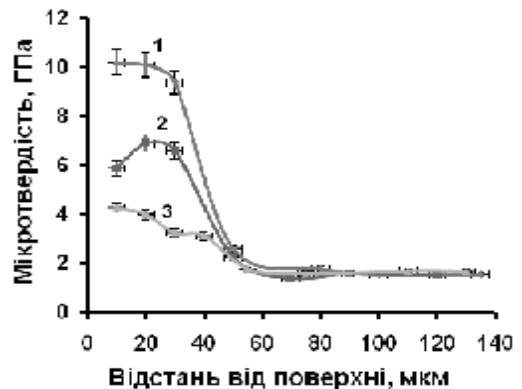


Рисунок 3 – Розподіл мікротвердості у поверхневих шарах сталі Ст.3 після ЕІЛ у середовищі рідкого азоту: 1 – Zr-анод; 2 – Ti-анод; 3 – Cr-анод

Окрім того, відмічена загальна особливість структури поверхневих шарів сталі після ЕІЛ у всіх використаних середовищах – темнотравлена складова, що, ймовірно, пов’язано з підвищеним вмістом вуглецю. Це можна пояснити тим, що перехідні метали (анооди), розплавлені під дією іскрового розряду, активно взаємодіють з вуглецем, що міститься в матриці, з утворенням карбідів.

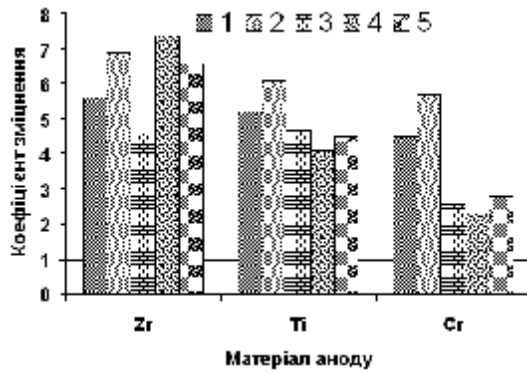


Рисунок 4 – Гістограма коефіцієнтів зміцнення поверхні сталі Ст.3 після ЕІЛ у середовищах:

1 – повітря; 2 – пропан-бутан; 3 – аргон;  
4 – азот; 5 – рідкий азот

Різниця покриттів за структурою та мікротвердістю дозволяє зробити висновок про те, що міжелектродне середовище, яке містить вуглець, азот, кисень, суттєво впливає на ерозію перехідних металів (цирконію, титану, хрому) з зв'язку з їхньою підвищеною здатністю до розчинення елементів втілення.

Збільшення мікротвердості легованого шару порівняно з твердістю легувального металу є результатом поліморфних перетворень, утворення твердих розчинів, інтерметалідів, оксидів, фаз втілення у поверхневому шарі катоду в процесі ЕІЛ.

**ВИСНОВКИ.** Встановлено, що в процесі ЕІЛ цирконієм, титаном та хромом в різних міжелектродних середовищах відбувається зміцнення поверхневих шарів на сплавах заліза. Найбільшу мікротвердість (10 – 11 ГПа) мають цирконієві покриття, одержані в середовищі пропан-бутану, гасу, азоту та рідкого азоту. Це може бути пов'язано з утворенням у них карбідів, нітридів, а також інтерметалідів матеріалів електродів.

Виявлено, що ЕІЛ цирконієм у середовищі азоту дає змогу отримати на сталі суцільні рівномірні за товщиною леговані шари завтовшки до 100 мкм.

Відповідно до зростання здатності елементів легувальних електродів утворювати карбіди або нітриди мікротвердість поверхневих шарів після електроіскрової обробки відповідними анодами збільшується у порядку Cr – Zr – Ti.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Самсонов Г.В., Верхотуров А.Д., Бовкун Г.А., Сычев В.С. Электроискровое легирование металлических поверхностей. – К.: Наукова думка, 1976. – 220 с.
2. Верхотуров А.Д., Муха И.М. Технология электроискрового легирования металлических поверхностей. – К.: Техніка, 1982. – 181 с.
3. Гитлевич А.Е., Михайлов В.В., Парканский Н.Я., Ревуцкий В.М. Электроискровое легирование металлических поверхностей. – Кишинев: Штиинца, 1985. – 198 с.

#### REFERENCES

1. Samsonov G.V., Verhoturov A.D., Bovkun G.A., Sychev V.S. Electric-spark alloying of metal surfaces. – Kyiv: Naukova dumka, 1976. – 220 p. [in Russian].
2. Verhoturov A.D., Muha I.M. Technology of Electric-spark alloying of metal surfaces. – Kyiv: Technika, 1982. – 181 p. [in Russian].
3. Gitlevich A.E., Mihailov V.V., Parkanskiy N.Ya, Revuckiy V.M. Electric-spark alloying of metal surfaces. – Kishinev: Shtiintca, 1985. – 198 p. [in Russian].

Стаття надійшла 04.02.2011.

Рекомендована до друку  
д.т.н., проф. Драгобецьким В.В.