

УДК 621.9.048.4

Є. В. ІВАЩЕНКО, Г. Г. ЛОБАЧОВА, О. В. ВОЗНЮК

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ*

### **ФОРМУВАННЯ ЗНОСОСТІЙКИХ ЗМІЦНЕНИХ ПОКРИТТІВ НА ПОВЕРХНІ СТАЛІ Ст.3 ПОСЛІДОВНИМ ЕЛЕКТРОІСКРОВИМ ЛЕГУВАННЯМ ХРОМОМ ТА МІДДЮ В ІНЕРТНОМУ СЕРЕДОВИЩІ ТА НА ПОВІТРІ**

*Досліджено вплив міжелектродного середовища при послідовному електроіскровому легуванні (ЕІЛ) хромом та міддю на мікроструктуру, фазовий склад, мікротвердість та зносостійкість поверхневого шару сталі Ст.3. Встановлено, що обробка в атмосфері аргону приводить до утворення покриттів 50 – 60 мкм, а обробка на повітрі – 40 мкм. Виявлено, що зносостійкість легованих шарів після ЕІЛ на повітрі у два рази перевищує значення покриттів після ЕІЛ в аргоні при обох послідовностях нанесення (Cr-Cu та Cu-Cr)*

**Ключові слова:** електроіскрове легування, сталь, зміцнення, зносостійкість, легований шар, хром, мідь, аргон, повітря.

**Вступ.** Проблема підвищення надійності та довговічності вузлів тертя машин та механізмів є однією з найбільш актуальних задач матеріалознавства [1]. Підвищення відносних швидкостей переміщення пар тертя, зростання питомих навантажень спонукають до необхідності створення нових та вдосконалення існуючих способів зміцнення поверхонь та збільшення їх зносостійкості. У зазначеному контексті актуальним є нанесення покриттів, зокрема методами, основаними на використанні концентрованих джерел енергії, а саме електроіскровим легуванням (ЕІЛ).

Електроіскрове легування є ефективним методом формування структурно-фазового стану, хімічного складу, і, відповідно, властивостей поверхневих шарів металів. У цьому методі використовуються концентровані потоки електричної енергії при проходженні імпульсних розрядів в міжелектродному середовищі, що приводить до перенесення матеріалу аноду (легуючий елемент) на поверхню катоду (деталі). Інтенсивні процеси нагрівання матеріалу з великими температурними градієнтами, підвищеним масоперенесенням легуючих елементів і надшвидким охолодженням призводять до утворення сплавів з фазовим складом, який неможливо отримати традиційними металургійними методами - пересичених твердих розчинів, інтерметалідних сполук та метастабільних проміжних фаз. При цьому склад міжелектродного середовища суттєво впливає на товщину легovanого шару та мікротвердість зміцненого покриття, що, в свою чергу, визначає його фізико-механічні властивості, у тому числі і зносостійкість [2].

Аналіз літературних даних свідчить про малу кількість робіт, присвячених вивченню впливу насичувального середовища на структуру, фазовий склад і властивості поверхневих шарів сталі Ст.3 після ЕІЛ хромом та міддю [2 – 6]. Тому це питання є актуальним завданням як у теоретичному, так і в практичному плані, і потребує подальшого дослідження.

**Постановка завдання.** З літературних джерел [2 – 5] відомо, що наявність карбідів та нітридів у поверхневих шарах металевих деталей суттєво підвищує їх

мікротвердість, а присутність пластичних металів, що можуть слугувати твердим мастилом, забезпечують високу зносостійкість.

При ЕІЛ хромом за рахунок взаємодії його з вуглецем, що міститься у сталі Ст.3 можливе формування дисперсних частинок карбідів, а при обробці на повітрі – формування нітридів та оксидів за рахунок взаємодії його з азотом повітря. Згідно з принципом Шарпі, виконання якого забезпечує високі антифрикційні і зносостійкі властивості сплаву, тверді структурні складові повинні залягати у вигляді ізольованих один від одного включень, а в'язкі – утворювати суцільну матрицю. Формування в'язкої складової буде відбуватися при ЕІЛ сталі міддю. Крім того, такі покриття будуть мати підвищену провідність і можуть використовуватись в рухомих контактах електричних пристроїв.

Метою даної роботи є дослідження мікроструктури, фазового складу, мікротвердості та зносостійкості поверхневих шарів сталі Ст.3 після послідовного ЕІЛ карбідоутворюючим металом (Cr) та металом, що не утворює карбіди (Cu) у інертному середовищі (аргон) та на повітрі

**Методика та техніка експерименту.** Процеси ЕІЛ сталі Ст.3 хромом і міддю були проведені у середовищах повітря і аргону за такими послідовностями нанесення елементів: Cr–Cu та Cu–Cr. ЕІЛ сталі Ст.3 було проведено на установці «ЕЛИТРОН–26А». Робоча напруга обробки складала 70 В, робочий струм – 3 А, тривалість обробки становила 270 секунд при частоті коливання аноду  $50 \pm 3$  Гц, енергії розряду 1,0 Дж та тривалості імпульсу 200 мкс.

Мікроструктура зразків досліджувалася за допомогою мікроскопу «МИМ-10» з фотографуванням цифровою камерою DCM 310.

Рентгенофазовий аналіз здійснено на установці «Ultima IV» у Со-випромінюванні.

МікродюрOMETричний аналіз проводився на мікротвердомірі ПМТ-3 під навантаженням на індентор 20 г.

Випробування зразків на стійкість до зношування проводилися за схемою «площина по площині» за умов сухого тертя-ковзання протягом 3 годин під навантаженням 4 кг. Матеріалом контртіла виступала загартована та відпущена інструментальна сталь Р6М5 з твердістю 64 HRC. Випробування проводилися на оригінальній машині тертя, розробленій та виготовленій на кафедрі фізики металів Національного технічного університету «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» [2]. Величина зношування оцінювалася зважуванням зразка через кожні 20 хвилин випробування на лабораторних електронних вагах AXIS AD50 (точність визначення маси складає 0,0005 г).

Показник інтенсивності зношування  $I$ ,  $\text{кг}/\text{м}^2$  розраховувався за втратою маси [2], як співвідношення втрати маси зразка  $\Delta m$ , кг до площі поверхні тертя зразка  $s$ ,  $\text{м}^2$ .

**Результати досліджень.** За результатами мікроструктурного аналізу виявлено, що після ЕІЛ на повітрі за обома послідовностями легування (Cr-Cu та Cu-Cr) отримано шари товщиною 40 мкм. Під легованим шаром спостерігається вузька зона термічного впливу (рис. 1, а).

При ЕІЛ в атмосфері аргону за схемами хром-мідь та мідь-хром формуються леговані шари товщиною 50 та 60 мкм, відповідно (рис. 1, б).

За даними рентгенофазового аналізу після обробки на повітрі в поверхнево-му шарі присутні наступні фази:  $\alpha$ -заліза, міді та хрому. Після обробки в атмос-

фері аргону в легованому шарі крім рефлексів від  $\alpha$ -заліза, міді і хрому, зафіксовано рефлекси від карбіду хрому  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ .

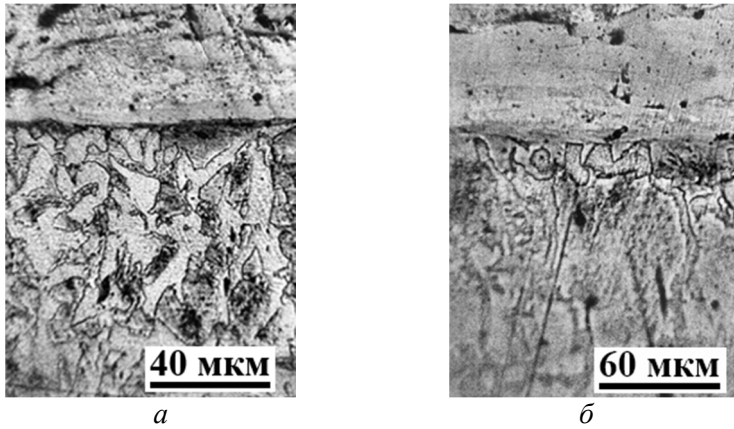


Рис. 1. Мікроструктура поверхневої зони сталі Ст.3 після ЕІЛ: Cr-Cu на повітрі (а), Cu-Cr в аргоні (б)

За даними мікродюрOMETричного аналізу встановлено, що легування на повітрі в послідовності хром-мідь призводить до створення на поверхні двох шарів: першого з мікротвердістю 1,8 ГПа, та другого з мікротвердістю 3,6 ГПа (рис. 2, а).

При ЕІЛ в послідовності мідь-хром мікродюрOMETричним аналізом виявлено, що характер розподілу мікротвердості кардинально змінюється, твердість поверхневого шару зростає до 4,7 ГПа і плавно зменшується до 2,5 ГПа (рис. 2, б).

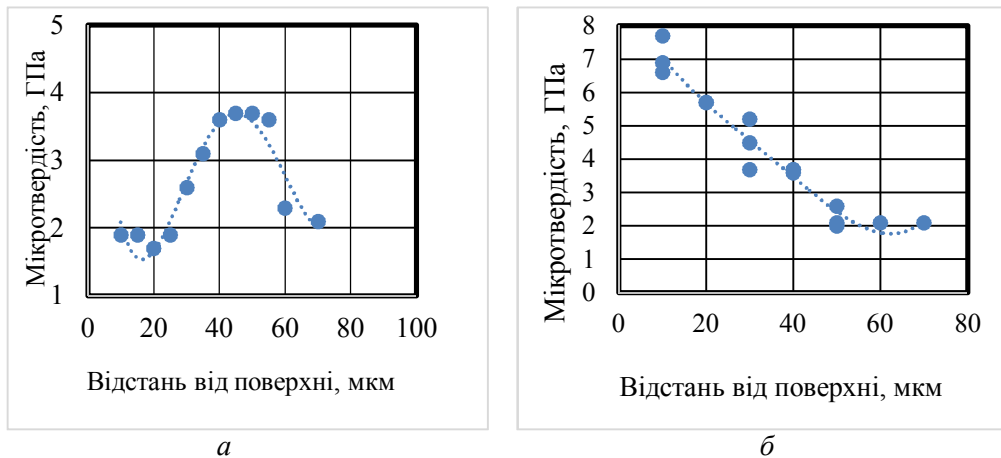


Рис. 2. Мікротвердість поверхневої зони сталі Ст.3 після ЕІЛ на повітрі за схемами: Cr-Cu (а), Cu-Cr (б)

ЕІЛ в послідовності хром-мідь у аргоні призводить до створення на поверхні сталі шару з максимальною мікротвердістю 3,9 ГПа на глибині 30 мкм (рис. 3, а).

При ЕІЛ в послідовності мідь-хром, характер розподілу мікротвердості змінюється, твердість біля поверхні зростає до 7,7 ГПа і плавно зменшується до 2,5 ГПа (рис. 3, б).

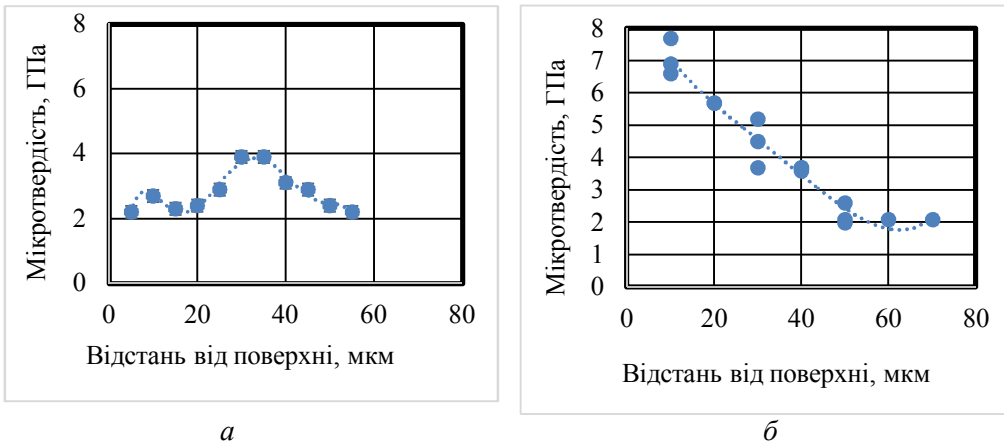


Рис. 3. Мікротвердість поверхневої зони сталі Ст.3 після ЕІЛ в атмосфері аргону за схемами: Cr-Cu (а), Cu-Cr (б)

Випробування на зносостійкість (рис. 4) показали, що стійкість до зношування зразків після ЕІЛ на повітрі в послідовності хром-мідь у 10 разів більша, ніж у зразка без обробки, а при легуванні в послідовності мідь-хром – у 9 разів.

Після проведення випробування на зносостійкість покриттів, одержаних в атмосфері аргону, було встановлено, що стійкість до зношування при легуванні в послідовності хром-мідь в 4 рази, а в послідовності мідь-хром – в 5 разів більша, ніж у необробленого зразка (рис. 4).

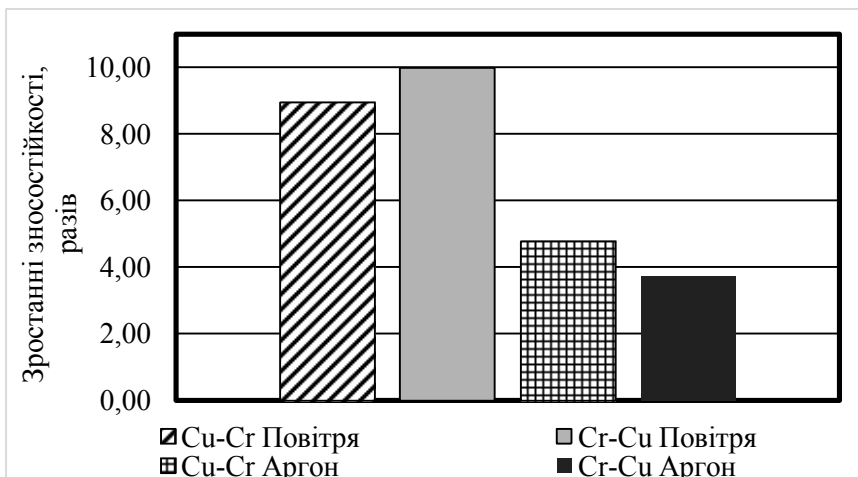


Рис. 4. Зростання зносостійкості шарів після ЕІЛ на повітрі та в аргоні

Як свідчать результати експериментів, склад атмосфери при ЕІЛ впливає на товщину, мікротвердість та зносостійкість легованих шарів.

ЕІЛ в аргоні призводить до збільшення товщини шару у порівнянні з обробкою на повітрі. Таке збільшення товщини покриття в аргоні може бути пов'язане з тим, що при відсутності кисню та азоту в інертній атмосфері не утворюються вторинні структури на анодах (оксиди та нітриди), що покращує масоперенесення елементів з аноду на катод і сприяє зростанню товщини шару.

Збільшення мікротвердості легованого шару при ЕІЛ в аргоні, у порівнянні з ЕІЛ на повітрі (см. рис. 2 та рис. 3), може бути зумовлено утворенням дисперс-

них карбідів в результаті взаємодії хрому з вуглецем, що переноситься з основи сталі Ст. 3. ЕІЛ на повітрі може призводити до зв'язування частини вуглецю киснем, і таке зменшення його концентрації може сприяти зменшенню кількості карбиду хрому, що і призводить до зменшення мікротвердості шару в порівнянні з обробкою в аргоні, де кисень відсутній.

Збільшення стійкості до зношування легованих шарів, отриманих при ЕІЛ на повітрі, у порівнянні з зносостійкістю шарів, отриманих в аргоні, ймовірно зумовлено формуванням дисперсних нітридів і оксидів хрому, які мають високу твердість і знаходяться в м'якій складовій на основі міді.

### Висновки

Встановлено, що послідовне електроіскрове легування хромом та міддю сталі Ст.3 в атмосфері аргону та на повітрі приводить до формування легованих шарів з підвищеною мікротвердістю та зносостійкістю, що в 4 – 10 разів перевищує зносостійкість сталі.

Показано, що атмосфера міжелектродного середовища суттєво впливає на товщину легованого шару: обробка в аргоні приводить до утворення шару товщиною до 50-60 мкм, а обробка на повітрі – 40 мкм.

Виявлено, що при ЕІЛ на повітрі формуються покриття з більшою у два рази зносостійкістю ніж при обробці в аргоні за обома послідовностями ЕІЛ – (Cr-Cu та Cu-Cr).

### Список літератури

1. Мулин Ю.И. Особенности формирования структуры и свойств покрытий, нанесенных методом электроискрового легирования на сталь // Физика и химия обработки материалов. – 2006. – № 4. – С. 60-66.
2. Лобачова Г.Г. Поверхневе зміцнення сплавів заліза електроіскровим легуванням цирконієм, титаном, хромом та хіміко-термічною обробкою: дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.16.01 "Металознавство та термічна обробка металів" / Г.Г. Лобачова. - Київ, 2012. - 200 с.
3. Электроискровое легирование металлических поверхностей / [Г.В. Самсонов, А.Д. Верхотуров, Г.А. Бовкун, В.С. Сычев]. – К.: Наукова думка, 1976. – 220 с.
4. Электродные материалы для электроискрового легирования / [А.Д. Верхотуров, И.А. Подчерняева, Л.Ф. Прядко, Ф.Ф. Егоров]. – М.: Наука, 1988. – 224 с.
5. Верхотуров А.Д. Технология электроискрового легирования металлических поверхностей / А.Д. Верхотуров, И.М. Муха. – К.: Техніка, 1982. – 181 с.
6. Береснев В.М. Некоторые аспекты повышения стойкости рабочих поверхностей трения / В.М. Береснев, В.Т. Толок, В.И. Гриценко // ФИП. – 2004. – Т. 2, № 1 – 2. – С. 42 – 48.

Стаття надійшла до редакції 07.06.2018

**Івашенко Євген Вадимович** – канд. техн. наук, доцент кафедри фізики металів Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, м. Київ, Україна, тел. (044)204-97-74, [ivashchenko@kpm.kpi.ua](mailto:ivashchenko@kpm.kpi.ua).

**Лобачова Галина Геннадіївна** – канд. техн. наук, старший викладач кафедри фізики металів Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, м. Київ, Україна, [lgg22@ukr.net](mailto:lgg22@ukr.net).

**Вознюк Олександра Володимирівна** – студентка кафедри фізики металів Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, м. Київ, Україна, [alexandra.vvoznuk112358@gmail.com](mailto:alexandra.vvoznuk112358@gmail.com).

*Ie.V. IVASHCHENKO, G.G. LOBACHOVA, O.V. VOZNYUK*

### **FORMATION OF WEAR RESISTED HARDENED COATINGS ON THE SURFACE STEEL AT SUCCESSIVE ELECTRIC-SPARK ALLOYING BY CHROME AND COPPER IN THE PROTECTIVE ENVIRONMENT AND IN AIR**

The purpose of this work is to study the microstructure, phase composition, microhardness and wear resistance of the steel (article 3) surface layers after the successive Electric-spark alloying (ESA) by carbide forming metal (Cr) and the metal that does not form carbides (Cu) in inert medium (argon) and in air in the following sequences of elements application: Cr-Cu and Cu-Cr.

According to the results of the microstructural analysis, it was found that after ESA in air, layers of 40  $\mu\text{m}$  thickness were obtained for both doping sequences. ESA by Cr-Cu sequence leads to the creation of two layers on the surface: the first, with a microhardness of 1.8 GPa, and the second, with a microhardness of 3.6 GPa. At ESA in the sequence of Cu-Cr the hardness of the surface layer increases to 4.7 GPa. According to the X-ray diffraction analysis in the surface layer the phases are present:  $\alpha$ -Fe, Cu and Cr. The wear resistance at ESA in the sequence of Cr-Cu is 10 times more than in the sample without processing, and when doped in a sequence of Cu-Cr in 9 times.

Under ESA in the atmosphere of argon, Cr-Cu and Cu-Cr schemes alloyed layers of 50 and 60  $\mu\text{m}$  in thickness, respectively were formed. ESA in the Cr-Cu sequence leads to the formation on the steel of layer with a microhardness of 3.9 GPa, and in the sequence of Cu-Cr – 7.7 GPa. X-ray diffraction analysis showed the presence of reflexes from  $\alpha$ -Fe, Cu and Cr and  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ . The wear resistance after ESA in the Cr-Cu sequence is 4 times more than in the sample without processing, and when doped in a sequence of Cu-Cr – in 5 times.

An increase in the microhardness of a doped layer under ESA in argon, in comparison with ESA in the air, may be due to the formation of disperse carbides.

ESA in air can lead to the binding of carbon by oxygen, and such a decrease in its concentration may contribute to the reduction of the chromium carbide amount, which also leads to a decrease in the microhardness of the layer compared to treatment in argon, where oxygen is absent.

The increase in the wear resistance of the doped layers obtained by ESA in air, compared with the wear resistance of the layers obtained in argon, is probably due to the formation of dispersed nitrides and chromium oxides, which have high hardness and located in a soft component based on copper.

**Key words:** Electric-spark alloying, steel, hardening, wear resistance, doped layer, chromium, copper, argon, air

### **References**

1. Mulyn Yu.I. Osoblyvosti formuvannya struktury ta vlastyvostry pokryttiv, nanosenykh metodom elektroiskrovoho lehuвання na stal' // Fyzyka ta khimiya obrobky materialiv. – 2006. – № 4. – S. 60–66.
2. Lobachova H.H. Poverkhneve posylennya splaviv zaliza z elektroiskrovymy metodamy lehuвання tsyrkoniyem, tytanom, khromom i khimiko-termichnoyu obrobkoyu: dys. na zdobuttya nauk. stupenya kand. tekhn. nauk: spets. 05.16.01 "Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv" / H.H. Lobachova. – Kyiv, 2012. – 200 s.
3. Élektroiskrovoe lehyrovanye metalllycheskykh poverkhnostey / [H.V. Samsonov, A.D. Verkhoturov, H.A. Bovkun, V.S. Sychev]. – K. : Naukova dumka, 1976. – 220 s.
4. Élektronnye materyaly dlya élektroiskrovoho lehyrovannya / [A.D. Verkhoturov, I.A. Podchernyaeva, L.F. Pryadko, F.F. Ehorov]. – M. : Nauka, 1988. – 224 s.
5. Verkhoturov A.D. Tekhnolohyya élektroiskrovoho lehyrovannya metalllycheskykh poverkhnostey / A.D. Verkhoturov, I.M. Mukha. – K. : Tekhnika, 1982. – 181 s.
6. Beresnev V.M. Nekotorye aspekty pidvyshchennya stomy kosti robochykh poverkhon' triye / V.M. Beresnev, V.T. Tolok, V.I. Hrytsenko // FYP. –2004. –T. 2, № 1–2. – S. 42–48.