

УДК 621.9.048.4

DOI: 10.18372/0370-2197.4(109).20756

Г.Г. ЛОБАЧОВА, Є.В. ІВАЩЕНКО

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

СТВОРЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ПОКРИТТІВ НА СТАЛІ ЕЛЕКТРОІСКРОВИМ ЛЕГУВАННЯМ У КОМБІНОВАНИХ МІЖЕЛЕКТРОДНИХ СЕРЕДОВИЩАХ

Виявлено вплив складу комбінованого міжелектродного середовища в процесі електроіскрового легування (ЕІЛ) титаном та хромом на структуру, мікротвердість та стійкість до зношування поверхневих шарів сталі Ст3. Встановлено зростання мікротвердості титанових покриттів до 6 – 7 ГПа, а хромових – до 5 – 5,2 ГПа завдяки наявності в них нітридів (TiN, CrN) та карбідів (TiC, Cr₇C₃). Стійкість до зношування зразків з покриттями в умовах тертя-ковзання без мастила впродовж 5 годин у 6,14 – 10,32 разів більше значення необробленої сталі Ст3.

Ключові слова: електроіскрове легування (ЕІЛ), сталь, хром, титан, середовище, аргон, пропан-бутан, мікротвердість, зносостійкість

Вступ. Підвищення експлуатаційних характеристик робочих поверхонь деталей машин та різального інструменту можна досягти шляхом вдосконалення існуючих видів обробки. Останнім часом широкого розповсюдження набули методи локального зміцнення, зокрема, електроіскрове легування (ЕІЛ) [1 – 3].

За рахунок хімічної, термічної та механічної взаємодії електродів з будь-яких електропровідних матеріалів на катоді (деталі) формується зміцнене зносостійке покриття. Суттєвий вплив при цьому здійснює міжелектродне середовище, в якому проводиться обробка [1, 3].

Зазвичай під час ЕІЛ як насичувальне середовище використовується повітря. Літературні дані та результати особистих експериментів [1, 3] свідчать про інтенсивну взаємодію матеріалів електродів та елементів середовища з утворенням нових унікальних структур на оброблюваній поверхні. Якщо в якості легувального аноду використовується нітридо-, оксидо- або карбідоутворюючий матеріал, а середовище містить елементи проникнення (азот, кисень, вуглець), то легований шар на катоді може містити нітриди, оксиди та карбіди. В результаті цього поверхнева мікротвердість та зносостійкість матеріалу з покриттям зростає у порівнянні з необробленою поверхнею.

Але, водночас, активна взаємодія електродів з елементами міжелектродного середовища сприяє накопиченню на них вторинних структур з великою кількістю фаз проникнення. Це може призвести до створення покриття, схильного до розтріскування або відшаровування від основи.

Усунути подібні недоліки можна контролюванням електричних та часових параметрів обробки або ж проведенням ЕІЛ у міжелектродних середовищах комбінованого складу.

Зокрема, ЕІЛ в атмосфері аргону – інертного газу, в якому не міститься елементів проникнення, ймовірність утворення вторинних структур на поверхні легувального електроду та сталевій підкладці значно зменшується. Під час такої обробки легований шар складається переважно з продуктів взаємодії елементів електродів.

Мета даної роботи полягає у вивченні впливу складу комбінованого міжелектродного середовища під час ЕІЛ Ti- та Cr-анодами на структурно-фазовий склад, мікротвердість та стійкість до зношування поверхні сталі Ст3.

Матеріали та методи досліджень. Досліджуваним матеріалом обрана сталь звичайної якості марки Ст3 з огляду на її достатню міцність, високий рівень пластичності, хорошу зварюваність та невисоку вартість у порівнянні з легованими сталями.

Як легувальні аноди застосовані хром (до 99,9 мас. % Cr) та титан (до 99,9 мас. % Ti) з урахуванням їхньої високої карбідо- та нітридоутворюючої здатності.

В роботі проведено процеси ЕІЛ сталі Ст3 хромом та титаном у середовищах, склад яких змінюється двічі у межах одного технологічного процесу у послідовності: аргон – азот; пропан-бутан – аргон. Міжелектродними середовищами були гази: азот – як джерело азоту, пропан-бутан – як джерело вуглецю; аргон – як інертна атмосфера.

ЕІЛ проводили на установці “Елітрон-26А” за напруги 60 – 70 В; струму 2 А, частоті коливань аноду 50 ± 3 Гц, енергії розряду 1 Дж.

Загальна схема пристрою для ЕІЛ у комбінованих насичувальних середовищах зі спеціально виготовленою камерою [1] наведена на рисунку 1.

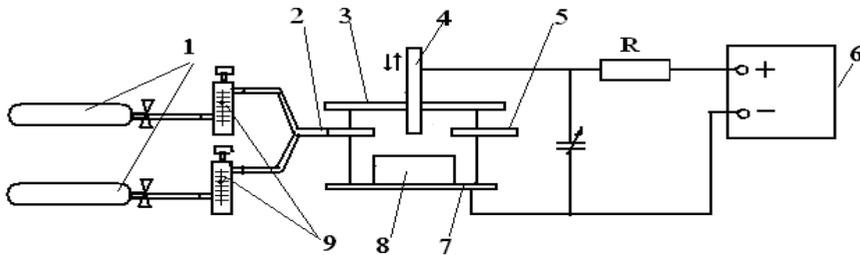


Рис. 1. Загальна схема пристрою для ЕІЛ у комбінованих газових середовищах:
1 – газові балони; 2 – трубка для газопостачання; 3 – камера; 4 – вібруючий електрод (анод); 5 – трубка для газовідведення; 6 – джерело живлення; 7 – контактна плита;
8 – зразок (катод); 9 – ротаметри.

Процеси ЕІЛ склалися з двох стадій тривалістю по 3 хвилини кожна. На першій стадії оброблення здійснювалося в одному концентрованому середовищі, а на другій стадії – в іншому. Легувальний анод при цьому не змінювався, а камера залишалася герметичною.

Мікроструктуру досліджували на мікроскопі «МІМ-10». Для мікродіорометричного аналізу застосовували прилад «ПІМТ-3М». Фазовий аналіз проведено на дифрактометрі «Rigaku Ultima-IV» у мідному випромінюванні.

Для випробувань зразків на стійкість до зношування використовували оригінальну машину тертя, виготовлену на кафедрі фізичного матеріалознавства

та термічної обробки НН ІМЗ ім. Є.О. Патона «КП імені Ігоря Сікорського». Тестування зразків площею 1 см^2 проводили шляхом тертя-ковзання без мастила за схемою «площина по площині» під навантаженням 4 кг протягом 5 годин. Як контртіло використана інструментальна сталь Р6М5 після гартування та відпуску.

Показник інтенсивності зношування (I , кг/м^2 [1]) покриттів оцінювали гравіметричним методом через кожні 20 хвилин випробування за співвідношенням втрати маси зразка Δm , кг до площі поверхні тертя зразка s , м^2 . Маса зразків визначалася за допомогою лабораторних електронних вагів AXIS AD50 (точність визначення маси складає 0,0005 г).

Аналіз результатів та обговорення. На відміну від ЕІЛ у комбінованих середовищах з елементами проникнення [1, 3], обробка в атмосфері інертного газу передбачає формування легованого шару, який складається переважно з продуктів взаємодії елементів електродів. Надання такому покриттю більшої твердості та зносостійкості можливо проведенням процесу легування в атмосфері, що містить азот або вуглець.

Враховуючи зазначене вище, нами використані нові технологічні прийоми обробки, схеми яких зазначено в таблиці 1.

Таблиця 1

Характеристика процесів ЕІЛ сталі Ст3

Матеріал аноду	Міжелектродне середовище	
	I стадія	II стадія
Cr	аргон	азот
Ti	аргон	азот
Cr	пропан-бутан	аргон
Ti	пропан-бутан	аргон

Мікроструктурний аналіз поверхневої зони сталі Ст.3 після проведення процесу ЕІЛ Ti-анодом у середовищах, що змінювалися у послідовності аргон – азот, виявив формування суцільного покриття товщиною 20 – 25 мкм. Після ЕІЛ хромом товщина покриття складає 40 – 50 мкм. Зміна послідовності обробки у середовищах за схемою пропан-бутан – аргон сприяє утворенню титанового покриття товщиною 30 – 35 мкм та хромового покриття – до 50 мкм.

Окрім позитивного впливу середовища аргону на нарощування покриття, не менш важливу роль відіграє природа матеріалу легувального електроду. Подібність типів та величини періодів кристалічних ґраток хрому та заліза, які, взаємодіючи між собою, утворюють тверді розчини необмеженої розчинності, дає підставу прогнозувати ефективність нарощування покриття.

Під легованим шаром знаходиться зона термічного впливу, особливістю якої є дрібні зерна. Це пов'язано з періодичною дією іскрового розряду, коли відбувається надшвидке нагрівання та охолодження локальних ділянок поверхні, що призводить до перекристалізації, а також до утворення твердих розчинів на базі матеріалу основи.

За даними мікродорометричного аналізу виявлено, що зміна середовища з аргону на азот в процесі обробки дозволяє підвищити мікротвердість легованих шарів на сталі Ст3 до 7,4 ГПа після ЕІЛ титаном та до 5,2 ГПа у випадку легування хромом. При зміні середовища з пропан-бутану на аргон

мікротвердість титанового покриття складає 6 ГПа, а хромового – 5 ГПа. Розподіл мікротвердості за глибиною сталевих зразків наведено на рис. 2.

Підвищення поверхневої мікротвердості можна пояснити наявністю у легованих шарах фаз α -Fe, γ -Fe та різних типів фаз проникнення – нітридів (CrN, TiN) та карбідів (Cr_7C_3 , TiC) перехідних металів, що утворилися під час взаємодії титану та хрому з азот- або вуглецьмістким середовищем. Наявність різних модифікацій заліза (α -Fe, γ -Fe) свідчить про те, що відбувається перекристалізація поверхневого шару під дією електричних розрядів, надшвидкісного нагрівання та охолодження локальних ділянок матеріалу. Наслідком цього є зміна концентраційного складу поверхні.

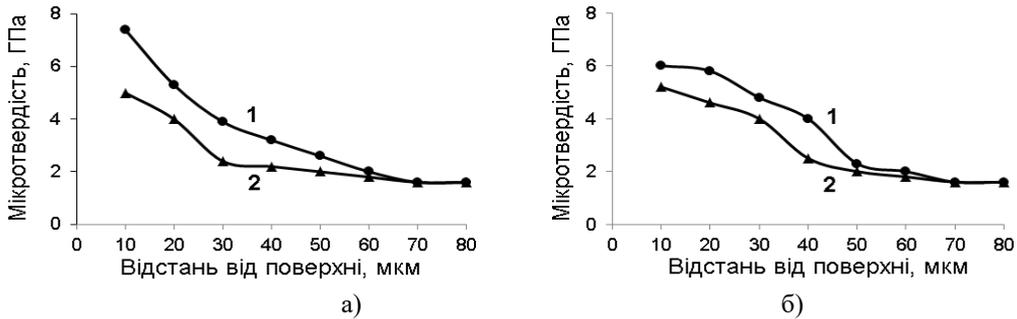


Рис. 2. Мікротвердість поверхні сталі Ст3 після ЕІЛ в середовищах, що змінюються у послідовності: а – аргон – азот; б – пропан-бутан – аргон; 1 – Ті-анод, 2 – Сг-анод.

Випробування на зносостійкість протягом 5 годин усіх досліджуваних зразків з покриттями показали високу стійкість до зношування у порівнянні із вихідними зразком сталі Ст.3, що не піддавався обробці (рис. 3).

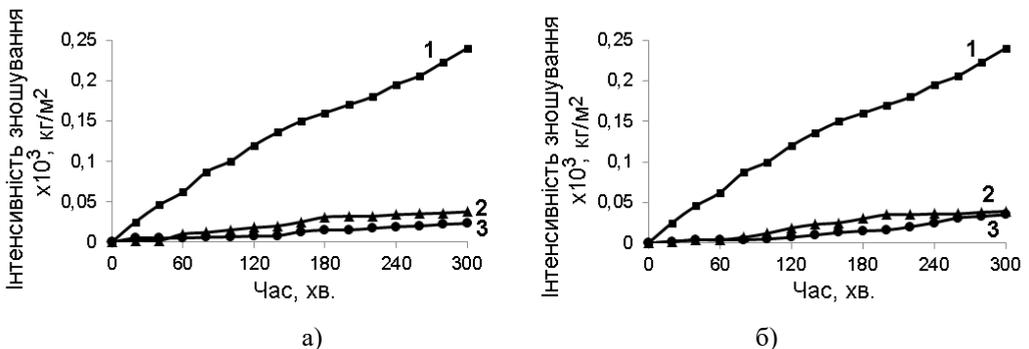


Рис. 3. Кінетичні криві інтенсивності зношування поверхні сталі Ст3 після ЕІЛ в середовищах, що змінюються у послідовності: а – аргон – азот; б – пропан-бутан – аргон; 1 – без обробки, 2 – з Сг-покриттям, 3 – з Ті-покриттям.

Кількісна оцінка зносостійкості розраховувалася за співвідношенням інтенсивності зношування сталі Ст3 без покриття до аналогічного показника сталі Ст3 з покриттям. Як видно з таблиці 2, найбільшу зносостійкість має титанове покриття, одержане під час ЕІЛ у атмосферах аргон – азот.

Зважаючи на наявність фаз проникнення у кожному з досліджуваних покриттів, можна припустити, що утворюється структура, яка відповідає правилу Шарпі – пластичний твердий розчин з включеннями твердих частинок карбідних та нітридних фаз.

Таблиця 2

Порівняння зносостійкості поверхні сталі Ст3 після двостадійного ЕІЛ

Послідовність зміни середовищ	Підвищення зносостійкості у порівнянні з поверхнею вихідного зразка (без обробки), разів (за 5 годин тертя)	
	Cr-анод	Ti-анод
Аргон – азот	6,38	10,32
Пропан-бутан – аргон	6,14	6,83

Висновки.

Показана можливість формування функціональних покриттів на сталі Ст3 електроіскровим легуванням титаном та хромом у комбінованих міжелектродних середовищах.

Найбільшу мікротвердість мають титанові покриття після ЕІЛ як зі зміною складу середовища у послідовності аргон – азот (7,4 ГПа), так і у послідовності пропан-бутан – аргон (6 ГПа), у порівнянні з хромовими (5 – 5,2 ГПа), що пов'язано з більш високою здатністю титану до утворення фаз проникнення.

Товщина хромових покриттів (40 – 50 мкм) перевищує товщину титанових покриттів (20 – 35 мкм), що зумовлено утворенням твердих розчинів необмеженої розчинності Cr-Fe.

Встановлено збільшення стійкості до зношування покриттів протягом 5 годин сухого тертя-ковзання «площина по площині» після двостадійного ЕІЛ у 6,14 – 10,32 разів у порівнянні з поверхнею сталі Ст3 без обробки.

Список літератури

1. 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, НТУУ «КПІ», 2012. – 200 с. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/2313>
2. Тищенко А.І. Розподіл атомів вуглецю та азоту в твердих розчинах втілення-заміщення на основі заліза та його вплив на фізико-механічні властивості сплавів : автореф. дис. на здобуття наук. ступеню канд. фіз.-мат. наук : спец. 01.04.13 “Фізика твердого тіла” / І.А. Тищенко. – Київ, 2005. – 20 с. <http://search.nbuv.gov.ua/aref/20081124042064>
3. Сидоренко С.І. Створення зміцнених покриттів на низьковуглецевій сталі методом електроіскрового легування у середовищах змінного складу / С.І. Сидоренко, Є.В. Іващенко, Г.Г. Лобачова, Ю.М. Гаврилюк // Нові технології. Науковий вісник Ін-ту економіки і нових технологій. – 2013. – № 3 – 4 (41-42). – С. 3 – 7. http://nbuv.gov.ua/UJRN/NewTech_2013_3-4_3

Стаття надійшла до редакції 15.11.2025.

Лобачова Галина Геннадіївна – канд. техн. наук, доцент кафедри фізичного матеріалознавства та термічної обробки Навчально-наукового Інституту матеріалознавства та зварювання ім. Є.О. Патона, Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, пр. Берестейський, 37, м. Київ, Україна, 03056, тел.: +380969752827, E-mail: lgg22@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-7264-3713>

Іващенко Євген Вадимович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри фізичного матеріалознавства та термічної обробки Навчально-наукового Інституту матеріалознавства та зварювання ім. Є.О. Патона, Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, пр. Берестейський, 37, м. Київ, Україна, 03056, тел.: +380969752827, E-mail: ivashchenkoe@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-8360-5042>

H.H. LOBACHOVA, Ye.V. IVASHCHENKO

CREATION OF FUNCTIONAL COATINGS ON STEEL BY ELECTRIC-SPARK ALLOYING IN COMBINED INTERELECTRODE ENVIRONMENTS

The influence of the combined interelectrode environment composition at the process of electric spark alloying (ESA) by titanium and chromium on the structure, microhardness and wear resistance of the St.3 steel surface layers was revealed. The change in the environment composition occurred in 2 stages according to new technological schemes: argon - nitrogen, propane-butane - argon. An increase in the microhardness of titanium coatings to 6–7 GPa, and chromium coatings to 5–5.2 GPa was established due to the presence of nitrides (TiN, CrN) and carbides (TiC, Cr₇C₃) in them. The wear resistance of samples with coatings under friction-sliding conditions without lubrication for 5 hours is 6.14–10.32 times greater than the value of untreated St.3 steel.

Key words: electrc-spark alloying (ESA), steel, chromium, titanium, environment, argon, propane-butane, microhardness, wear resistance

References

1. Lobachova H.H. Poverkhneve zmitsnennia splaviv zaliza elektroiskrovym lehuванням tsyrkoniiem, tytanom, khromom ta khimiko-termichnoi obrobkoi: dys. na zdobuttia nauk. stupenia kand. tekhn. nauk : spets. 05.16.01 «Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv» / H.H. Lobachova. – Kyiv, NTUU «KPI», 2012. – 200 s. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/2313>
2. Tyshchenko A.I. Rozpodil atomiv vuhletsiu ta azotu v tverdykh rozchynakh vtilennia-zamishchennia na osnovi zaliza ta yoho vplyv na fizyko-mekhanichni vlastyvoli splaviv : avtoref. dys. na zdobuttia nauk. stupeniu kand. fiz.-mat. nauk : spets. 01.04.13 “Fizyka tverdoho tila” / I.A. Tyshchenko. – Kyiv, 2005. – 20 s. <http://search.nbuv.gov.ua/aref/20081124042064>
3. Sydorenko S.I. Stvorennia zmitsnennykh pokryttiv na nyzkovuhletsevi stali metodom elektroiskrovoho lehuвання u seredovyschakh zminnoho skladu / S.I. Sydorenko, Ye.V. Ivashchenko, H.H. Lobachova, Yu.M. Havryliuk // Novi tekhnolohii. Naukovi visnyk In-tu ekonomiky i novykh tekhnolohii. – 2013. – № 3 – 4 (41-42). – S. 3 – 7. http://nbuv.gov.ua/UJRN/NewTech_2013_3-4_3

Halyna Lobachova – Ph.D., Senior lecturer in Department of Physical materials science and heat treatment of Y.O. Paton Institute of Materials Science and Welding, National Technical University of Ukraine, “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, 03056, Ukraine, Kyiv, ave. Beresteiskyi, 37, tel.number: +380969752827, E-mail: lgg22@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-7264-3713>

Yevgen Ivashchenko – Ph.D., Senior lecturer in Department of Physical materials science and heat treatment of Y.O. Paton Institute of Materials Science and Welding, National Technical University of Ukraine, “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, 03056, Ukraine, Kyiv, ave. Beresteiskyi, 37, tel.number: +380969752827, E-mail: ivashchenkoe@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-8360-5042>