

## ВИСОКОПРОДУКТИВНИЙ МЕТОД ЦЕМЕНТАЦІЇ СТАЛЕВИХ ДЕТАЛЕЙ МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОІСКРОВОГО ЛЕГУВАННЯ

Коноплянченко Євген Владиславович

кандидат технічних наук, доцент  
Сумський національний аграрний університет

ORCID: 0000-0003-4814-1796

email: yevhen.konoplianchenko@snau.edu.ua

В статті представлений новий спосіб цементациї сталевих деталей електроіскровим легуванням (ЕІЛ), який дозволяє підвищити продуктивність процесу цементациї та зносостійкість її поверхневого шару. Спосіб відрізняється тим, що в якості матеріалу аноду застосовують порошок графіту, а катодом є деталь з низьковуглецевої або середньовуглецевої легованої сталі. Легування порошком графіту проводять з продуктивністю 0,028-0,056 хв/см<sup>2</sup>, при варіюванні енергії розряду в діапазоні 0,6-4,3 Дж. При використанні в якості матеріалу катоду сталі 12Х18Н10Т формується поверхневий шар підвищеної твердості товщиною від 4-5 до 100-150 мкм, а при легуванні сталі 40Х з продуктивністю 0,044 хв./см<sup>2</sup> та енергією розряду 2,8 Дж поверхневий шар підвищеної твердості має товщину більше 0,15 мм. Шорсткість поверхні (Ra) при цьому відповідає 0,6-0,7 мкм.

**Ключові слова:** електроіскрове легування; продуктивність; порошок графіту; сталь; товщина шару; шорсткість.

DOI: <https://doi.org/10.32845/msnau.2021.2.4>

### Вступ

На протязі свого терміну служби механічне обладнання зазнає шкідливих наслідків процесу зношування, що в більшості випадків означає втрату матеріалу деталей до стадії, коли вони більше не можуть ефективно виконувати призначені їм функції. Цей процес відбувається з різною швидкістю, залежно від технологічного призначення обладнання, навантажень, експлуатаційних особливостей, матеріалу деталей та впливу навколишнього середовища. З метою підвищення зносостійкості вузлів тертя велика увага приділяється як матеріалу контактуючих поверхонь, так і способам їх формування. Протягом останніх десятиліть інженерія поверхонь стала ключовою технологією передових застосувань, пропонує нові підходи до формування поверхонь деталей з особливими фізичними, хімічними або механічними властивостями. Розроблені нові методи обробки поверхні, які успішно застосовуються в промисловості для підвищення зносостійкості деталей машин. Задачею сьогодення є створення нових високопродуктивних методів модифікації поверхні, на базі енергоефективних та ресурсозберігаючих технологій.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Для надання поверхневого шару сталі високої твердості та зносостійкості, для підвищення границі контактної витривалості та границі витривалості при згинанні та крученні традиційно використовують спосіб цементациї, який викону-

ють методом хіміко-термічної обробки (ХТО), полягає у дифузійному насиченні поверхневого шару сталі вуглецем при нагріванні у відповідному середовищі - карбюризаторі. Як правило, цементацию здійснюють при температурах, в межах 930-950°С, коли є стійким аустеніт, що розчиняє вуглець у великій кількості. Кінцевих властивостей цементовані вироби набувають у результаті гартування та низького відпуску, що здійснюються після цементациї. Зазвичай, цементациї піддають низьковуглецеві (0,1-0,18%), частіше леговані сталі. Цементациї піддають великогабаритні деталі зі сталей з підвищеним вмістом вуглецю (0,203%). Вибір таких сталей необхідний для того, щоб серцевина виробу, яка не насичується вуглецем при цементациї, зберігала високу в'язкість після гартування [1]. Процес гартування виробів супроводжується утворенням в них значної залишкової напруги у результаті нерівномірного розподілення температури по перерізу та неоднакової зміни об'єму різних зон. Через сумісну дію температурної та структурної напруги у цементованому шарі виникають напруги стиснення, а у серцевині - напруги розтягнення. Залишкові напруги спричинюють деформації виробів, іноді досить значні [2]. Крім того, суттєвим недоліком способу є необхідність захисту окремих ділянок деталі, які не підлягають зміцненню, спеціальними покриттями, обмазками та ін., висока трудомісткість, собівартість, велика тривалість процесу та екологічна безпека (рис.1).



Рис. 1. Процес традиційної цементациї методом хіміко-термічної обробки [3].

Останнім часом всесвітнього поширення набув спосіб електроіскрового легування (ЕІЛ), металевих поверхонь, суттю якого є процес перенесення матеріалу на оброблювану поверхню іскровим електричним розрядом. Спосіб має низку специфічних особливостей:

- можливе дифузійне збагачення поверхні катода (деталі) складеними елементами анода (легувального електрода) без зміни розміру деталі;
- відсутність об'ємного нагрівання деталі;
- проста технологія ЕІЛ металевих поверхонь, а необхідна апаратура є малогабаритною та транспортабельною [4].

Однією із специфічних особливостей ЕЕЛ є те, що процес легування може відбуватися без перенесення матеріалу анода на поверхню катода, без приросту матеріалу, тобто відбувається дифузійне насичення поверхні деталі складовими елементами (елементом) анода, наприклад, при ЕЕЛ графітовим електродом [5]. Метод ЕЕЛ графітовим електродом заснований на процесі дифузії (насичення поверхневого шару деталі вуглецем) і має певну схожість з різновидом хіміко-термічної обробки – цементацією.

Робота [6] ілюструє спосіб цементації сталевих деталей шляхом електроерозійного легування графітовим електродом-анодом (ЦЕІЛ) вказаних деталей - катодів, який відрізняється тим, що в якості матеріалу катода використовують низьковуглецеві леговані сталі аустенітного класу, причому легування здійснюють з продуктивністю 1,0-5,0 хв./см<sup>2</sup> і з формуванням поверхневих шарів товщиною від 4-5 до 320-350 мкм. Крім цього спосіб відрізняється тим, що електроерозійне легування здійснюють з варіюванням розряду у діапазоні 0,036-6,8 Дж. Однак, вищенаведений спосіб має суттєві недоліки:

1. Дуже низька продуктивність, яка складає 1,0-5,0 хв./см<sup>2</sup>.
2. Висока шорсткість поверхні,  $R_a = 0,9-14,0$  мкм, відповідно при енергії розряду  $W_p = 0,036-6,8$  Дж.
3. Необхідність додаткової обробки поверхні для зниження шорсткості і підвищення зносостійкості деталей.

В [7] метою роботи було підвищення якості поверхневих шарів сталевих деталей (зниження шорсткості, підвищення товщини цементованого шару, мікротвердості і суцільності), шляхом вдосконалення способу цементації методом ЕІЛ, за рахунок спільного застосування при легуванні компактного графітового електрода-інструменту і порошку графіту.

Для досліджень використовували дві серії зразків зі сталі 20 і 40Х.

У першій серії зразки обробляли за традиційною технологією – на одному режимі і з однаковою продуктивністю при ЦЕІЛ компакним електродом-інструментом.

У другій серії зразки обробляли поетапно: на першому етапі здійснюється ЦЕІЛ поверхні зразка, відповідно до обраної енергії розряду і з продуктивністю 1 хв./см<sup>2</sup>; на другому етапі сформовану на першому етапі поверхню деталі наносили, ретельно втираючи, порошок графіту у вигляді суспензії, виготовленої у співвідношенні ~80% порошку графіту і 20% вазеліну; на третьому етапі, не чекаючи висихання, проводили ЦЕІЛ, обробленої на другому етапі поверхні, причому на тому ж режимі і з такою ж продуктивністю, як і на першому етапі.

Слід відмітити, що при традиційному способі, при використанні будь-якого режиму, на самому початку процесу ЦЕІЛ на оброблюваній поверхні зразка (деталі) підвищується

шорсткість і при цьому кожний наступний розряд проходить через найбільш виступаючу частину поверхні, а поверхня між виступами не піддається легуванню вуглецем. Звідси невисока суцільність, глибина дифузії вуглецю і зони підвищеної твердості.

Інша картина в пропонованому у [7, 8] способі. На другому етапі западини між виступами шорсткостей заповнюються порошком графіту і вже на третьому етапі процес ЕІЛ протікає не тільки по виступах шорсткостей, а й по поверхні порошку графіту, що збільшує суцільність легованого шару до 100%. Крім того, повторна ЦЕІЛ на третьому етапі пропонованої технології призводить до насичення сталі вуглецем, збільшення глибини дифузії вуглецю порівняно з традиційною ЦЕІЛ, і в умовах прискореного охолодження після ЦЕІЛ «білий» шар має більш високу мікротвердість (9932 МПа), що зберігається на відстані до 50-70 мкм від поверхні.

Як показали останні дослідження в області технології формування електроіскрових покриттів, впровадження високотехнологічних роботизованих комплексів (рис. 2) вирішило проблему точності позиціонування, суцільності покриття, відтворення просторової форми поверхні, але питання шорсткості поверхні та продуктивності процесу ЕІЛ залишилися не вирішеними.

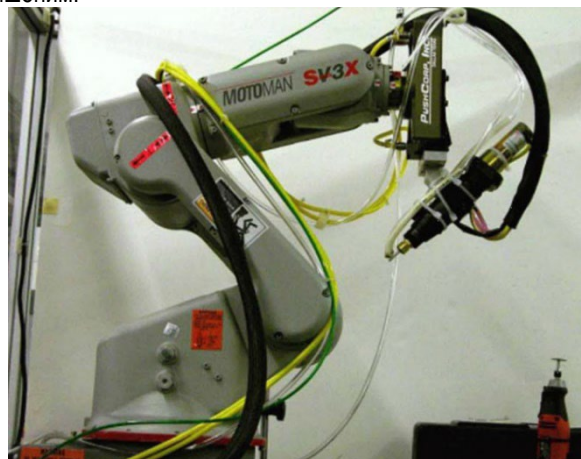


Рис. 2. Робот Motoman SV3X з блоком силового керування PushCorp, оснащений ЕІЛ модулем [11]

В [10] автором запропоновано, спосіб ЦЕІЛ для обробки поверхонь виробів, який на відміну від традиційної хіміко-термічної обробки, є способом фінішної обробки. При цьому способі характеристики зміцненого шару (ступінь цементації і глибина) поліпшуються при веденні процесу.

Таким чином, **метою роботи** було створення способу цементації сталевих деталей електроіскровим легуванням, який би дозволив знизити шорсткість поверхневого шару деталі, підвищити його зносостійкість, та значно пришвидшити продуктивність процесу.

#### Методи досліджень

Метод ЕІЛ був реалізований на установці моделі «Елітрон 52-А». Енергія розряду варіювалася у діапазоні 0,6-6,8 Дж. В якості катода використовували зразки розміром 10×10×10 мм зі сталі 12Х18Н10Т та сталі 40Х. В якості анода використовувався порошок графіту. Шорсткість вимірювали профілографом-профілометром моделі 201 заводу «Калібр». Металографічні і дюрOMETричні дослідження отриманих покриттів проводили за стандартними методиками з використан-

ням оптичного мікроскопа «Неофот-2» і приладу ПМТ-3, відповідно.

Поставлену задачу вирішували тим, що при цементації сталевих деталей ЕІЛ графітовим електродом, в якості матеріалу катода використовували низьковуглецеві леговані сталі аустенітного класу, а легування здійснювали порошком графіту з продуктивністю 0,028-0,056 хв/см<sup>2</sup> і з формуванням поверхневих шарів товщиною від 4-5 до 100-150 мкм.

Зразок зі сталі 12Х18Н10Т і сталі 40Х, розміром 10х10х10 мм, розташовували в центрі циліндричної металевої ємкості діаметром 60 мм і висотою 50 мм на висоті 10 мм до днища (рис. 3) і використовували в якості катода (-). В ємність, яка була приєднана до вібратору (рис. 4) установки електроіскрового легування моделі «Елітрон-52А» засипали порошок графіту і вона виступала в якості аноду (+).



Рис. 3. Розташування зразка в металевій ємності.

#### Результати досліджень

Результати досліджень поверхневих шарів, сформованих в результаті ЦЕІЛ, хромонікелевої нержавіючої сталі аустенітного класу марки 12Х18Н10Т та сталі 40Х наведені в таблиці.

При включенні установки поступово збільшували ре-

жим (енергію розряду), починаючи з 0,01 Дж. Частинки графіту, в відмінності від компактного електроду-інструменту з графіту, не забезпечують гарантованого проходження електричного імпульсу між катодом і анодом. При цьому завдяки дії вібратору розташування часток порошку графіту постійно змінюється. При плавному збільшенні енергії розряду настає такий момент, що ланцюг для проходження електричного струму нарешті замикається і відбувається пробій проміжку між електродами (анодом і катодом), який з'являється як би каталізатором початку процесу ЦЕІЛ. Підвищення температури в зоні «пробою» іскри, початок горіння, поява газу усе це стимулює хаотичне замикання і розмикання ланцюжка між електродами тобто короткочасний процес ЦЕІЛ який постійно стимулюється дією вібратору. Процес повністю припиняється, коли вигорає весь порошок графіту. При цьому значна його частина залишається на поверхні зразка.

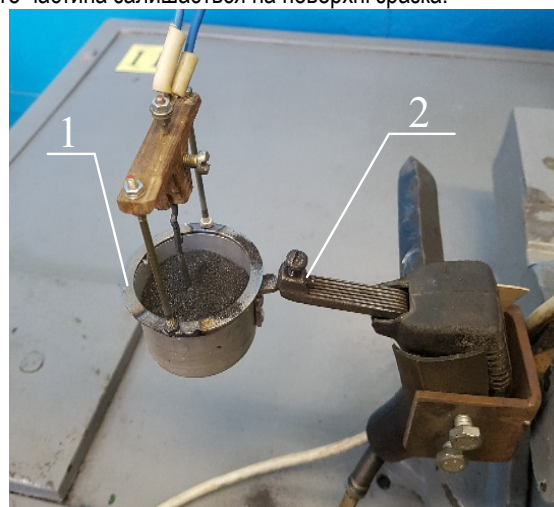


Рис. 4. Новий спосіб ЦЕІЛ:

1 - ємність з порошком графіту; 2 - вібратор

В нашому випадку при енергії розряду  $W_p=0,6$  Дж відбувся «пробій» електродного проміжку між анодом і катодом, який був заповнений порошком графіту. Процес ЦЕІЛ протікав ~20 с.

Таблиця – Залежність параметрів якості сталевих поверхонь при традиційному і пропонованому способі цементації методом ЕІЛ

Марка сталі	Енергія розряду, ( $W_p$ ), Дж	Продуктивність, см <sup>2</sup> /хв	Глибина шару, мкм	Мікротвердість на поверхні, HV	Шорсткість, Ra, мкм
Традиційний спосіб цементації ЕІЛ (патент № 82948)[6]					
12Х18Н10Т	0,6	1	30	950	0,8-0,9
	1,4		71	900	1,0-1,8
	2,8		96	840	5,1-6,7
	3,4		101	870	8,3-9,0
	6,8		115	900	11,0-14,2
Пропонований спосіб цементації ЕІЛ					
12Х18Н10Т	0,6	0,056	20	750	0,5-0,6
	1,4	0,51	40	730	0,5-0,6
	2,8	0,044	60	750	0,6-0,7
	3,4	0,040	70	700	0,7-0,8
	4,3	0,032	90	710	0,8-0,9
	6,8	0,028	80	670	0,9-1,2
40Х	2,8	0,044	150	960	0,6-0,7



По мірі зростання енергії розряду зменшувався час протікання процесу ЦЕІЛ і при  $W_p = 6,8$  Дж складав вже 10с. Враховуючи всю площу поверхні зразка, яка складає  $6 \text{ см}^2$  продуктивність процесу ЦЕІЛ склала  $0,028 \text{ хв./см}^2$  (див таблицю).

#### Висновки:

1. Запропонований новий спосіб ЦЕІЛ, який значно з  $1,0-5,0 \text{ хв./см}^2$  до  $0,028 - 0,056 \text{ хв./см}^2$  збільшує продуктивність процесу і з  $0,9-14,0$  до  $0,5-1,1 \text{ мкм}$ , зменшує шорсткість

(Ra) сформованого поверхневого шару. При цьому товщина сформованих шарів може досягати  $0,15 \text{ мм}$ , мікротвердість HV до 960 при суцільності 100%.

2. Вибір граничних значень енергії імпульсів для легування вуглецем обумовлено природою взаємодії з твердими металами, що деформуються. Нижня границя енергії обмежується ефективністю способу. Збільшення енергії імпульсу вище верхньої границі при ЕІЛ порошком графіту не сприяє підвищенню якості поверхневого шару деталі.

#### Список використаної літератури.

1. Лахтин Ю. М., Леонтьева В. П. Материаловедение. - М.: Машиностроение, 1990. - 528 с.
2. Гаркунов Д.Н. Триботехника (износ и безызносность). - М.: «Издательство МСХА», 2001. - 616 с.
3. <https://industrialmetallurgy.com/what-is-carburizing-and-its-types/>
4. Электроискровое легирование металлических поверхностей / Гитлевич А.Е., Михайлов В.В., Парканский Н.Я., Ревутский В.М. / Кишинев: Штинца, 1985. - 196с.
5. Тарельник В.Б., Белоус А.В. Технология упрочнения поверхностей деталей машин методом электроэрозивной цементации // Вестник национального технического университета «ХПИ». – 2008. - №4. – С. 27-31.
6. Патент України на винахід № 82948, 23С 8/00. Спосіб цементації сталевих деталей електроерозійним легуванням/В.С. Марцинковский, В.Б. Тарельник, А.В. Белоус / Опубл. 25.03.2008, бюл. № 10.
7. V. B. Tarel'nyk, O. P. Gaponova, G. V. Kirik, Ye. V. Konoplianchenko, N. V. Tarel'nyk, and M. O. Mikulina, Cementation of Steel Details by Electrospark Alloying, Metallofiz. Noveishie Tekhnol., 42, No. 5: 655–667 (2020) (in Ukrainian), DOI: 10.15407/mfint.42.05.0655.
8. V. Tarel'nyk, O. Gaponova, V. Martsynkovskyy, Ie. Konoplianchenko, V. Melnyk, V. Vlasovets, A. Sarzhanov, N. Tarel'nyk, DuXin, Yu. Semirnenko, S. Semirnenko, T. Voloshko, O. Semernya, "Energy Dispersive X-Ray Microanalysis of Part Surface Layer Carburized by Electric Spark Alloying," 2020 IEEE 10th International Conference Nanomaterials: Applications & Properties (NAP), Sumy, Ukraine, 2020, pp. 01TFC13-1-01TFC13-9. (Added to IEEE Xplore: 06 January 2021) <https://doi.org/10.1109/NAP51477.2020.9309618>.
9. W. Wood, B. Adam, J. Kadali, R. Talla, and T. Langston, "Heat-Affected Zone Formation in Electrospark-Deposition Additive Manufacturing on Ultrahigh-Strength Steel," Materials Performance and Characterization 6, no. 3 (2017): 376-393. <https://doi.org/10.1520/MPC20160038>
10. Shevchenko, O.I. Ultrasound effect on electrospark cementation process (2020) IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 966 (1), art. no. 012071. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/966/1/012071>
11. <https://doi.org/10.25987/VSTU.2019.15.1.019>

*Konoplianchenko Ie. V., Sumy National Agrarian University (Ukraine)*

#### High-performance method of cementation of steel parts by electro spark alloying method

The article presents a new method of cementing steel parts by electrospark alloying (EIL), which allows to increase the productivity of the cementation process and the wear resistance of its surface layer. The method differs in that graphite powder is used as the anode material, and the cathode is a part made of low-carbon or medium-carbon alloy steel. Alloying with graphite powder is carried out with a capacity of  $0.028-0.056 \text{ min/cm}^2$ , with variations in discharge energy in the range of  $0.6-4.3 \text{ J}$ . When used as a cathode material steel 12X18H10T formed a surface layer of high hardness with a thickness of  $4-5$  to  $100-150 \text{ }\mu\text{m}$ , and when alloying 40X steel with a capacity of  $0.044 \text{ minutes/cm}^2$  and a discharge energy of  $2.8 \text{ J}$ , the surface layer of high hardness has a thickness of more than  $0.15 \text{ mm}$ . The surface roughness (Ra) corresponds to  $0.6-0.7 \text{ }\mu\text{m}$ .

Key words: electrospark alloying; productivity; graphite powder; steel; layer thickness; roughness.

Дата надходження до редакції: 29.04.2021