

**РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ НАНЕСЕННЯ Al-C-S ПОКРИТТІВ СТАЛЬНИХ ПОВЕРХОНЬ  
МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОІСКРОВОГО ЛЕГУВАННЯ****Гапонова Оксана Петрівна**

кандидат технічних наук, доцент

Сумський державний університет

ORCID 0000-0002-4868-0599

email: gaponova@pmtkm.sumdu.edu.ua

**Гецович Євген Мойсейович**

доктор технічних наук, професор

Сумський національний аграрний університет

ORCID 0000-0003-4868-1573

email: e.getsovich@i.ua

Проведений аналіз шляхів підвищення ефективності роботи насосного обладнання у сільському господарстві. Актуальним є застосування нових технологій підвищення якості робочих поверхонь деталей модернізованих вузлів. У роботі запропонована нова технологія отримання комплексних Al-C-S покриттів, отриманих методом ЕІП на сталевих поверхнях, з метою підвищення твердості, зносостійкості та припрацьовуваності поверхонь тертя. Досліджені особливості структуроутворення Al-C-S покриттів, отриманих методом ЕІП. Вивчено вплив режимів ЕІП на якісні параметри Al-C-S-покриттів. При значному збільшенні енергії розряду (з 0,52 до 6,8 Дж) відбувається зростання шорсткості поверхні і зменшення суцільності покриття. Мікроструктурний аналіз Al-C-S-покриттів на сталі 20 показав, що суцільність і товщина «білого» шару становить 50% і 60 мкм, відповідно (при  $W_p = 6,8$  Дж). У свою чергу мікротвердість на поверхні складає 9000 МПа. Досліджений розподіл сірки в покритті: кількість сірки максимальна на поверхні і зменшується від поверхні до основи. Пропоновану технологію отримання Al-C-S покриттів застосовано для підвищення зносостійкості та забезпечення припрацьовуваності поверхонь шийок колінчастого валу поршневого компресору ЗВШ-1,6-3/46. Показано, що розроблену технологію рекомендується застосовувати у промислових умовах.

**Ключові слова:** сільське господарство, електроіскрове легування, покриття, мікроструктура, колінчастий вал, насос.

DOI: <https://doi.org/10.32845/msnau.2020.1.1>**Вступ**

У сільському господарстві використовується широкий спектр насосного обладнання, призначеного для вирішення різних практичних завдань: від поливу сільськогосподарських угідь до відкачування продуктів життєдіяльності худоби.

Як відомо, основними об'єктами сільськогосподарського водопостачання та водовідведення є: житлово-комунальний сектор, тваринницькі ферми і комплекси, агропромислові підприємства. Централізовані системи, що їх обслуговують, в основному включають: водозабірні споруди, насосні станції, очисні споруди, водонапірні башти, резервуари чистої води, магістральні водоводи і водопровідні мережі.

Пріоритетним напрямком у розвитку систем сільськогосподарського водовідведення є застосування комплектних каналізаційних насосних станцій з заглибними насосами, використання гвинтових і шнекових насосів для транспортування гною, а також оснащення очисних споруд заглибними мішалками, що дозволяють підвищити ефективність очищення стічних вод.

Необхідно відзначити, що інтенсивне будівництво фермерських, дрібних підсобних господарств і малих селищ, що проводиться в даний час, вимагає також розвитку локальних систем водопостачання та водовідведення. Правильний вибір і раціональне використання насосної техніки забезпечить надійну і ефективну роботу локальних систем.

Підвищення ефективності роботи насосного обладнання можна вирішити застосуванням нових модернізованих

вузлів: роторів, підшипників ковзання, торцевих ущільнень, з'єднувальних муфт та ін., що відповідають сучасному рівню розвитку і забезпечують високу надійність експлуатації агрегатів на всіх технологічних режимах.

**Аналіз публікацій**

Збільшення надійності та терміну експлуатації сучасних машин призвело до необхідності використання деталей, виготовлених з матеріалів і сплавів з поліпшеними властивостями. Поліпшення властивостей цих деталей забезпечується, як правило, застосуванням високолегованих сталей, що обумовлює великі витрати дефіцитних легуючих елементів. Особливо гостро склалася ситуація в Україні, що не має необхідних ресурсів для виробництва високолегованих сплавів з нікелем, хромом, ванадієм, молібденом, вольфрамом. У свою чергу, застосування високолегованих сталей і сплавів призводить до підвищення собівартості деталей машин, що пов'язано зі збільшенням ціни вихідних матеріалів при їх виробництві, ускладненням технологічного процесу, пов'язаного з особливостями їх механічної та термічної обробки.

Значна кількість параметрів виробу визначають стан поверхневого шару матеріалу, з якого вона виготовлена [1]. Очевидно, що використання дефіцитних і дорогих матеріалів в усьому об'ємі виробу недоцільно.

Традиційним методом підвищення зносостійкості поверхонь тертя є хіміко-термічна обробка (ХТО): цементация, азотування, нітроцементация, що, зазвичай, проводять у шахтних печах. У процесі ХТО деталі піддаються жолоблен-

ню та викривленню, причому більшою мірою при цементації. Крім того, основним недоліком всіх видів ХТО є значна тривалість процесу, необхідність використання високовартісного обладнання, низька продуктивність процесу, екологічна небезпека [2].

Перспективним методом підвищення зносостійкості і відновлення зношених поверхонь є електроіскрове легування (ЕІЛ). ЕІЛ є одним з найбільш простих і доступних з технологічної точки зору. Серед його переваг, таких, як локальність, мала витрата енергії, відсутність об'ємного нагрівання матеріалу, висока міцність зчеплення покриття з основним металом, необхідно виділити простоту автоматизації процесу, «вбудовуваність» в технологічний процес виготовлення деталей, екологічна безпека тощо.

Відомі способи цементації методом ЕІЛ [3], алітування [4], комбіновані технології, що включають ЕІЛ [5]. Останнім часом задачі, що ставляться перед методом ЕІЛ ускладнилися. Під час роботи деталей машин в екстремальних умовах від поверхневого шару вимагається комплекс фізико-механічних властивостей, наприклад, підвищення зносостійкості та жаростійкості, зносостійкості та спеціальних триботехнічних властивостей тощо. Як відомо, цементація

методом ЕІЛ сприяє підвищенню твердості та зносостійкості робочим поверхням [3, 6], сульфидування поверхні сприяє запобіганню схоплювання контактуючих поверхонь при терті ковзання [7], алітування забезпечує підвищення твердості та жаростійкості [4, 8]. Таким чином, актуальним є розробка екологічно безпечного способу нанесення багатокомпонентних Al-C-S покриттів методом ЕІЛ.

**Метою роботи** є вдосконалення технології отримання комплексних Al-C-S покриттів, отриманих методом ЕІЛ на сталевих поверхнях, і запропонувати її впровадження у виробництво.

#### Методика

Для дослідження використовували зразки зі сталі 20, 40 розміром 15x15x8 мм, на які наносили консистентну речовину, що включала сірчану мазь з вмістом сірки 33,3 % і алюмінієву пудру марки ПАД-0 (ГОСТ 5494-95). Максимальна кількість пудри становила 56 %. Подальше збільшення кількості пудри призводило до зниження адгезії з поверхнею, що підлягає алітуванню. Не чекаючи висихання мазі, здійснювали ЕІЛ заданих поверхонь зразків графітовим електродом марки ЕГ-4 ОСТ 229-83 на установці моделі «Елітрон-52А» з різною енергією розряду (табл. 1).

Таблиця 1 – Залежність продуктивності ЕІЛ від енергії розряду

Енергія розряду ( $W_p$ ), Дж	0,13	0,52	2,6	4,9	6,8
Продуктивність, $\text{см}^2 / \text{хв}$	0,5-0,8	1,0-1,3	1,5-2,0	2,0-2,5	2,5-3,0

Шорсткість поверхні після ЕІЛ вивчали шляхом зняття і обробки профілограм на приладі профілограф-профілометр моделі 201.

Металографічний аналіз покриттів проводили за допомогою оптичного мікроскопу МІМ-7, а дюрOMETричні дослідження – на приладі ПМТ-3 за стандартними методиками.

Якісний аналіз і кількісний склад покриттів на зразках проводився із застосуванням растрового електронного мікроскопа РЕММ-102 виробництва ВАТ "SELMI", оснащено-

го рентгенівським мікроаналізатором.

#### Результати

При одночасному насиченні сталі вуглецем, сіркою і алюмінієм методом ЕІЛ при значному збільшенні енергії розряду (з 0,52 до 6,8 Дж) відбувається зростання шорсткості поверхні і зменшення суцільності покриття (табл. 2). На рис. 1 представлена профілограма поверхні зразка після ЕІЛ.

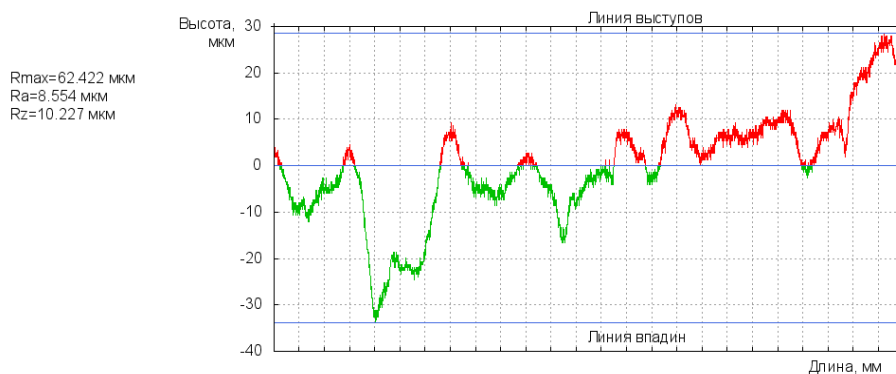


Рисунок 1 – Профілограма поверхневого шару зразка зі сталі 20 після ЕІЛ при  $W_p = 6,8$  Дж

Мікроструктурний аналіз Al-C-S-покриттів на сталі 20 залежно від енергетичних параметрів процесу ЕІЛ показав (рис. 2, а), що на поверхні формується «білий» шар, далі дифузійна зона і основний метал. Також необхідно відзна-

чити, що при ЕІЛ сталі 20 графітом суцільність і товщина «білого» шару становить 50% і 60 мкм, відповідно (при  $W_p = 6,8$  Дж). У свою чергу мікротвердість на поверхні складає 9000 МПа (рис. 2, б і табл. 2).

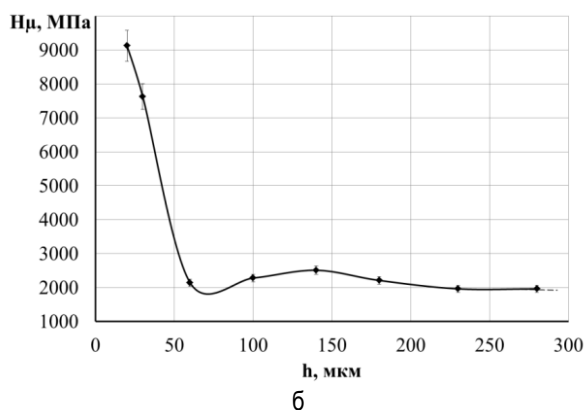
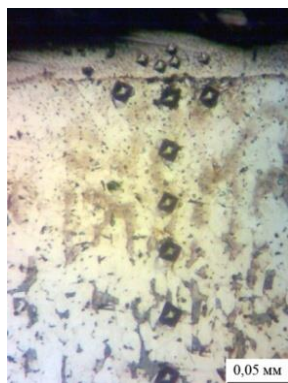


Рисунок 2 – Мікроструктура (а) і розподіл мікротвердості в поверхневому шарі (б) зразка сталі 20 після ЕІЛ графітом ( $W_p = 6,8$  Дж)

Таблиця 2 – Якісні параметри поверхневих шарів системи Al-C-S, отриманих методом ЕІЛ, на сталях 20 і 40

Енергія розряду, Дж	Товщина білого шару, мкм	Мікротвердість білого шару, МПа	Шорсткість, мкм			Суцільність білого шару, %
			Ra	Rz	Rmax	
<b>Сталь 20</b>						
0,52	150	9300±50	2,1	3,9	8,9	90
2,60	110	9200±70	4,2	8,7	30,2	80
6,8	до 60	9000±50	8,5	10,2	62,4	50
<b>Сталь 40</b>						
0,52	до 180	9500±50	1,9	3,8	8,7	90
2,60	до 130	9300±50	3,9	8,5	15,3	80
6,8	до 80	9100±50	7,8	11,3	58,1	60

У роботі [9] показано, що при електроіскровий обробці сплавів на основі заліза виникає значне зменшення розмірів блоків субструктури, збільшення щільності дефектів і зростання мікрвикривлень у зоні термічного впливу. Такі зміни в мікроструктурі і субструктурі сталі призводять до помітного підвищення мікротвердості «білого шару» (рис. 2). Певну роль у підвищенні твердості можуть грати елементи атмосфери (азот, кисень), які, переходячи під дією електри-

чних розрядів в активний стан, можуть взаємодіяти з поверхневими шарами і зміцнювати матеріал.

Наявність у консистентній речовині сірки сприяє процесу сульфидування. У таблиці 3 представлена зміна вмісту сірки за глибиною від поверхні сталі 20 після ЕІЛ з енергією розряду 6,80 Дж. Так, на поверхні кількість сірки максимальна і зменшується в міру віддалення від поверхні.

Таблиця 3 – Вміст сірки в поверхневому шарі сталі 20 при одночасному насиченні сталі вуглецем, сіркою і алюмінієм методом ЕІЛ

Відстань від поверхні, мкм	20	40	60	80	100	120	140	160	180
Вміст сірки, %	0,21	0,15	0,12	0,09	0,08	0,05	0,05	0,03	0,03

Отже, дослідження показали, що отримані багатоконпонентні Al-C-S покриття мають достатню високу твердість (9000-9300 МПа), товщину (60-150 мкм) і суцільність (до 90%) шару. Шорсткість обробленої поверхні рекомендується зменшити застосуванням безабразивної ультразвукової фінішної обробки (БУФО) [13].

но для підвищення зносостійкості та забезпечення припрацьовуваності поверхонь шийок колінчастого валу поршневого компресору ЗВШ-1,6-3/46, виготовленого зі сталі 40X після термічної обробки (термополіпшення) (рис. 4). Нами показано, що пропонувану технологію рекомендується застосовувати у промислових умовах.

Розроблену технологію отримання Al-C-S застосова-

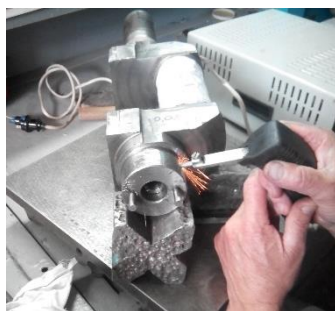


Рис. 4 – Електроіскрова обробка шийок колінчастого валу поршневого компресору ЗВШ-1,6-3/46: а – поверхня до обробки; б – процес ЕІЛ; в – поверхня після обробки

## Висновок

Таким чином, досліджені особливості структуроутворення Al-C-S покриттів, отриманих методом ЕІЛ. Вивчено вплив режимів ЕІЛ на якісні параметри Al-C-S-покриттів. При значному збільшенні енергії розряду (з 0,52 до 6,8 Дж) відбувається зростання шорсткості поверхні і зменшення суцільності покриття. Мікроструктурний аналіз Al-C-S-покриттів на сталі 20 показав, що суцільність і товщина «білого» шару становить 50% і 60 мкм, відповідно (при  $W_p = 6,8$  Дж). У свою чергу мікротвердість на поверхні складає 9000 МПа.

Наявність у консистентній речовині сірки сприяє процесу сульфидування: на поверхні кількість сірки максимальна і зменшується в міру віддалення від поверхні.

Пропоновану технологію отримання Al-C-S застосовано для підвищення зносостійкості та забезпечення прирацьовуваності поверхонь шийок колінчастого валу поршневого компресору ЗВШ-1,6-3/46. Показано, що пропоновану технологію рекомендується застосовувати у промислових умовах.

## Список використаної літератури:

1. Екологічна безпека експлуатації компресорного і насосного обладнання: монографія / В. А. Марцинковський, В. Б. Тарельник, Б. Антошевський та ін.; за ред. О.В. Радіонова. Суми: Сумський державний університет, 2018. 282 с.
2. Малькова Н.Ю. Недостатки процессов и перспективные способы химико-термической обработки. *Успехи современного естествознания*. 2007. № 12-1. С. 124-124.
3. Tarelynyk V.B., Gaponova O.P., Kirik G.V., Tarelynyk N.V., Mikulina M.O. Cementation of steel details by electrospark alloying. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2020. Vol. 42(5). P. 655-667. <https://doi.org/10.15407/mfint.42.05.0655>
4. Kirik G.V., Gaponova O.P., Tarelynyk V.B., Myslyvchenko O.M., Antoszewski B. Quality Analysis of Aluminized Surface Layers Produced by Electrospark Deposition. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2018. Vol. 56, Issue 11-12. P. 688–696. <https://doi.org/10.1007/s11106-018-9944-6>
5. Tarelynyk V., Konoplianchenko I., Gaponova O., Antoszewski B., Kundera C., Martsynkovskyy V., Dovzhyk M., Dumanchuk M., Vasilenko O. Application of Multicomponent Wear-Resistant Nanostructures Formed by Electrospark Alloying for Protecting Surfaces of Compression Joints Parts. *Microstructure and Properties of Micro- and Nanoscale Materials, Films, and Coatings (NAP 2019)*. Springer Proceedings in Physics. 2019. Vol. 240. P. 195–209. [https://doi.org/10.1007/978-981-15-1742-6\\_18](https://doi.org/10.1007/978-981-15-1742-6_18)
6. Спосіб цементації сталевих деталей електроискровим легуванням: пат. 142822 України на корисну модель: МПК (2020.01) C23C 8/00, C23C 28/00 / Тарельник В. Б., Марцинковський В.С., Гапонова О. П., Мисливченко О.М., Пирогов В.О., Гапон О. О., Лазаренко А. Д.; заявл. 11.02.2020; опубл. 25.06.2020, Бюл. № 12. С. 10.
7. Спосіб сульфидування поверхні сталевих і чавунних деталей методом електроерозійного легування: пат. 117528 України на винахід: МПК В23Н 1/04 (2006.01), C23C 8/60 (2006.01) / Тарельник В. Б., Марцинковський В. С., Білоус А. В., Жуков О. М., Косенко П. В., Гапонова О. П.; заявл. 24.11.2016; опубл. 10.08.2018, Бюл. № 15.
8. Кирик В. Г., Тарельник В. Б., Гапонова О. П., Конопляченко Е. В., Колодненко В. Н., Бало П. Н. Исследование свойств жаростойких функциональных покрытий, сформированных методом электроискрового легирования. *Компрессорное и энергетическое машиностроение*. №4 (54). С. 17–22.
9. Химухин, С. Н. Структура и свойства металлов и сплавов при электроискровом воздействии : монография / С. Н. Химухин, Хосенри, Э. Х. Ри. Хабаровск : Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2015. 127 с.
10. Тарельник В. Б. Модернизация и ремонт роторных машин: монография / В. Б. Тарельник, В. С. Марцинковский. Сумы: Издательство «Казацкий вал», 2005. 364 с.

**Gaponova O. P.**, Sumy State University (Ukraine)

**Getsovich E. M.**, Sumy National Agrarian University (Ukraine)

### **Development of technology for applying Al-C-S coatings of steel surfaces by electrospark alloying**

*The analysis of ways to improve the efficiency of pumping equipment in agriculture. The use of new technologies to improve the quality of the modernized units parts working surfaces is relevant. The paper proposes a new technology for obtaining complex Al-C-S coatings obtained by ESA on steel surfaces in order to increase the hardness, wear resistance and running-in of friction surfaces. The features of structure formation of Al-C-S coatings obtained by ESA are investigated. The effect of ESA modes on the quality parameters of Al-C-S-coatings on steels 20 and 40 was studied. With a significant increase in the discharge energy (from 0.52 to 6.8 J), the surface roughness increases and the coating continuity decreases. Microstructural analysis of Al-C-S-coatings on steel 20, that the continuity and thickness of the "white" layer is 50% and 60  $\mu\text{m}$ , respectively (at  $W_p = 6.8$  J). In turn, the microhardness on the surface is 9000 MPa. The distribution of sulfur in the coating has been studied: the amount of sulfur is maximum on the surface and decreases from surface to base. The proposed technology for obtaining Al-C-S coatings is used to increase wear resistance and ensure the running-in of the surfaces of the crankshaft journals of the 3VSh-1.6-3 / 46 piston compressor. It is shown that the developed technology is recommended to be applied in industrial conditions.*

**Key words:** agriculture, electrospark alloying, coating, microstructure, crankshaft, pump.

Дата надходження до редакції: 26.01.2020