

УДК 621.9.048

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2023.103.0.66

## АНАЛІЗ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОІСКРОВОГО ЛЕГУВАННЯ НА СТРУКТУРНИЙ СТАН АЛІТОВАНИХ ПОВЕРХОНЬ

Гапонова О. П.<sup>1</sup>, Охріменко В. О.<sup>1</sup>, Тарельник Н. В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Сумський державний університет

<sup>2</sup>Сумський національний аграрний університет

**Анотація.** У роботі досліджено вплив режимів електроіскрового легування на параметри алітованих покриттів. Технологія алітування сталених поверхонь складається з двох етапів. Енергію розряду та продуктивність вибирали таку, за якою шорсткість поверхні зменшується в 4 рази. Металографічні дослідження продемонстрували, що покриття складається із «білого» шару, дифузійної зони й основного металу. У процесі використання пасти з алюмінієвою пудрою відбувається збільшення як товщини «білого» шару, так і його мікротвердості. В обох варіантах другого етапу досягнута суцільність покриття на рівні 100 %.

**Ключові слова:** електроіскрове легування, алітування, поверхневий шар, шорсткість, суцільність покриття.

### Вступ

На сьогодні в сучасному машинобудуванні все частіше застосовують нові передові технологічні процеси, які сприятимуть підвищенню терміну експлуатації, надійності та забезпеченню ефективності роботи деталей та інструментів, навіть у найважчих умовах роботи.

Перспективними методами зміцнення поверхні та модифікації є техніки, основою яких є оброблення металів і сплавів високоенергетичними потоками матеріалів та енергії. Сучасними способами оброблення металевих поверхонь є електроіскрове легування (ЕІЛ), що дозволяє отримувати поверхневі структури з унікальними фізико-механічними та трибологічними характеристиками. Особливістю електроіскрового легування є висока міцність зв'язку між легуваним шаром та базовим матеріалом, а також можливість нанесення на поверхню будь-яких матеріалів, які проводять електричний струм. Цей процес має низьку витрату енергії, і він є простим для здійснення.

Під час розроблення технологій поверхневого оброблення зазвичай враховуються лише енергетичні параметри оброблення, наприклад енергія розряду, і зовсім не враховують вплив продуктивності ЕІЛ на формування покриттів.

Незважаючи на значні переваги цього методу, його використання для покращення поверхневого шару в промисловості не є поширеним, оскільки відсутня інформація, необхідна для оптимізації параметрів процесу.

Відомо, що алітування забезпечує захист від корозії і окиснення поверхневих шарів металу за підвищених температур. Традиційним способом формування алітованих покриттів є хіміко-термічне оброблення.

Автори роботи [1] досліджували стійкість до корозії алюмінієвих покриттів на прикладі сталі Ст3. Дослідження демонструють, що зі збільшенням товщини покриття (отриманого електроіскровим легуванням) зростає стійкість до атмосферної корозії. Також було зазначено, що пористість алюмінієвих шарів не є визначальним фактором. За наявності пор та електроліту (вологи) відбувається процес електрохімічної корозії, в якому покриття є анодом, а сталь – катодом. За наявності пор на поверхні покриття, доки воно не розчинилося і сталь була захищена завдяки анодному механізму, діє електрохімічний захист. У випадку, коли пори не утворювалися на поверхні покриття через електроіскрове легування, діяв механізм екранування для захисту базового матеріалу від корозії. Захист може збільшуватись зі збільшенням оксидних шарів на поверхні покриття.

Згідно з дослідженнями [1, 2], алюмінієві покриття, отримані електроіскровим легуванням за допомогою алюмінієвого електрода, ефективно захищають базовий матеріал від впливу фосфорнокислих та водно-сольових середовищ.

Отже, дослідження параметрів ЕІЛ, енергії розряду та продуктивності на формування структури алітованих покриттів є актуальним.

### Аналіз публікацій

На формування шару під час алітування методом ЕІЛ впливає велика кількість чинників, насамперед це енергетичні параметри. Під час збільшення енергії розряду погіршується шорсткість поверхні. У роботах [3, 4] зазначено, що усунути цей недолік ЕІЛ можна способом поверхневої деформації (ППД) або за допомогою використання металополі-

мерних матеріалів [5]. Також можна знизити шорсткість, застосувавши ЕІЛ алюмінієвим електродом, але на менших режимах [6]. Результати досліджень доводять ефективність такої технології.

Ще однією перевагою методу ЕІЛ є можливість формування покриттів як зі струмопровідних, так і неструмопровідних елементів, (сірка, бор, азот тощо). Але для цього необхідно створити між електродами (легувальним електродом і деталлю) спеціальне насичувальне середовище, до складу якого будуть належати необхідні елементи. У роботах [5, 6] зазначено, що під час застосування такого способу ЕІЛ збільшується товщина покриттів, їхня мікротвердість і суцільність.

У літературі наведені дослідження впливу різноманітних параметрів роботи обладнання ЕІЛ у великому діапазоні енергій розряду ( $W_p$ ). Ці дослідження демонструють великий спектр можливостей, які пропонує метод ЕІЛ.

У [7] було визначено, що характеристики поверхневого шару, який утворюється під час електроіскрового легування (ЕІЛ), підпорядковуються кільком факторам. Наведено аналіз цих факторів та їхній вплив на процес формування поверхневого шару [7]:

- властивості утвореного поверхневого шару можуть змінюватися залежно від параметрів імпульсних іскрових розрядів, зокрема амплітуди струму, тривалості імпульсу та частоти розрядів. Також важливим чинником є налаштування електричної схеми та параметрів генератора імпульсів, які можуть впливати на ефективність процесу ЕІЛ і якість утвореного шару;

- час, який витрачається на процес ЕІЛ, може впливати на глибину та якість утвореного поверхневого шару;

- матеріал, з якого виготовлені електроди, може впливати на характеристики утвореного шару. Різні матеріали можуть взаємодіяти з базовим матеріалом оброблюваної деталі по-різному;

- тип середовища, в якому здійснюється процес ЕІЛ, може визначати хімічні реакції, на поверхні оброблюваної деталі. Склад газів або рідини може впливати на якість та характеристики утвореного шару;

- відносне розташування електродів під час процесу ЕІЛ може визначати розподіл електричного струму та тепла на поверхні деталі. Рух електродів також може впливати на рівномірність та якість легування.

Варто зазначити, що, незважаючи на збільшення енергії розряду в процесі ЕІЛ, існують конкретні значення параметрів, за яких показники, зокрема товщина «білого» шару, дифузійна зона та мікротвердість, є стабільними. Але загальна тенденція є такою, що значне зниження продуктивності процесу ЕІЛ [2, 3] має негативний вплив на якість отриманих покриттів.

Отже, з огляду на стабільність певних показників за певних параметрів варто зазначити, що зниження продуктивності процесу ЕІЛ може впливати на якість утворених покриттів. Така динаміка важлива для визначення оптимальних умов процесу оброблення та для досягнення найкращих результатів у формуванні поверхневих шарів сталевих деталей методом ЕІЛ.

### Мета і постановка завдання

Метою роботи є аналіз впливу продуктивності процесу алітування методом ЕІЛ на структуроутворення.

### Методика дослідження

Дослідження здійснювали на зразках зі сталі 20. Як електрод-інструмент використовували алюмінієвий електрод у вигляді дроту.

ЕІЛ здійснювали за двома варіантами зменшення продуктивності щодо наведеної в табл. 1.

Таблиця 1 – Традиційна відповідність енергії розряду ЕІЛ продуктивності

Енергія розряду ( $W_p$ ), Дж	0,52	1,3	2,6
Продуктивність, $\text{см}^2/\text{хв}$	0,5–0,6	0,6–0,7	0,8–1,0

У табл. 2 наведені дані цих варіантів:

- перший, якщо продуктивність була зменшена ~ в два рази;
- другий, якщо продуктивність була зменшена ~ в чотири рази.

Таблиця 2 – Досліджувана залежність продуктивності ЕІЛ від енергії розряду

Енергія розряду ( $W_p$ ), Дж		0,52	1,3	2,6	4,6	6,8
Продуктивність, $\text{см}^2/\text{хв}$	1-й варіант	0,5–0,6	0,6–0,7	0,7–1,0	1,0–1,2	1,2–1,5
	2-й варіант	0,2–0,3	0,3–0,4	0,4–0,5	0,5–0,6	0,6–0,7

Кожний з варіантів складається з двох етапів:

на *першому етапі* здійснювали оброблення алюмінієвим електродом за енергії розряду  $W_p = 0,52$ – $6,8$  Дж і продуктивності згідно з табл. 2.

На *другому етапі* на поверхню, що зазнала алітування на 1-му етапі, перед подальшим ЕІЛ алюмінієвим електродом наносили насичувальну пасту, яка містить алюмінієву пудру (вазелін (10 %) і алюмінієва пудра (90 %)), або графітовий порошок і алюмінієву пудру (вазелін (10 %), алюмінієва пудра (45 %) та порошок графіту (45%)) і, не чекаючи висихання пасти, здійснювали процес алітування за енергії розряду  $0,52$ – $2,6$  Дж і продуктивності  $0,2$ – $0,4$  см<sup>2</sup>/хв. Енергію розряду та продуктивність має бути такою, за якої шорсткість поверхні зменшується в 4 рази.

Процес ЕІЛ здійснювали на обладнанні моделі «Елітрон 52А» з використанням різних режимів.

Шорсткість поверхні визначали на приладі профілограф-профілометр мод. 201 заводу «Калібр» способом зняття та оброблення профілограм.

Металографічний та дюрOMETричний аналізи здійснювали за стандартними технологіями на оптичному мікроскопі «МІМ-7» та на приладі ПМТ-3.

### Результати досліджень

На рис. 1 наведено мікроструктури покриттів сталі 20 після алітування за допомогою ЕІЛ з алюмінієвою пудрою рис. 1, а) та з алюмінієвою пудрою з графітовим порошком (рис. 1, б).

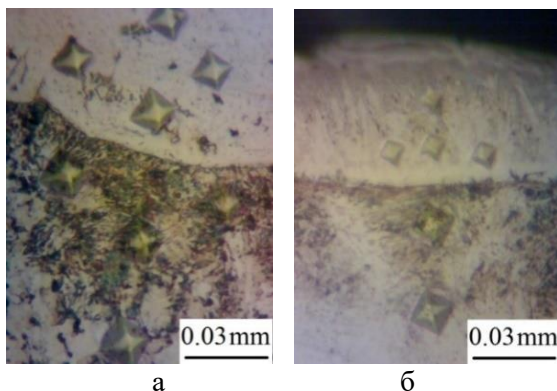


Рис. 1. Структури поверхневих шарів сталі 20 після алітування з використанням насичувальної пасти, яка містить алюмінієву пудру (а) й алюмінієву пудру та порошок графіту (б)

Отримане покриття мало зовнішній «білий» шар, дифузійну зону та основу з ферито-перлітною структурою. Відповідно до результатів досліджень, застосування нової технології дозволило отримати покриття з повною інтеграцією шару та товщиною до 85 мкм.

У разі використання графітового порошку на другому етапі алітування спостерігається збагачення поверхні вуглецем, що призводить до збільшення мікротвердості поверхневих шарів та дифузійної зони (згідно з табл. 3).

Під час дослідження мікротвердості покриттів (рис. 2) було визначено, що зі збільшенням енергії розряду мікротвердість покриттів зростає.

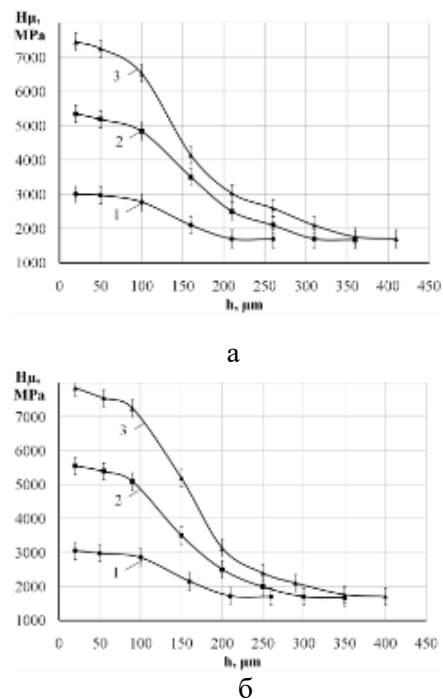


Рис. 2. Розподіл мікротвердості в поверхневому шарі сталі 20 після алітування на другому етапі з використанням насичувальної пасти, яка містить алюмінієву пудру (а) й алюмінієву пудру та порошок графіту (б)

Позначення на графіках: 1 – на першому етапі  $W_p = 2,6$  Дж, на другому  $W_p = 0,52$  Дж; 2 – на першому етапі  $W_p = 4,6$  Дж, на другому  $W_p = 0,52$  Дж; 3 – на першому етапі  $W_p = 6,8$  Дж, на другому  $W_p = 1,3$  Дж

Найбільші показники мікротвердості спостерігаються під час оброблення зразків зі сталі 20: на першому етапі  $W_p = 6,8$  Дж, на другому  $W_p = 1,3$  Дж. Мікротвердість покриттів складала  $2450 \pm 70$  МПа (у перехідній

зоні) і  $7450 \pm 20$  МПа (у зоні «Білого шару») у випадку застосування першої технології (з додаванням алюмінієвої пудри) та  $2250 \pm 50$  МПа (у перехідній зоні) й  $7850 \pm 20$  МПа (у зоні «Білого шару») у випадку використання другої технології (з додаванням алюмінієвої пудри та графітового порошку).

У табл. 3 результати містять дослідження відповідно до першого варіанта алітування сталі 20 (де продуктивність була зменшена в два рази) на другому етапі. Ця суміш містить алюмінієву пудру (перший варіант) та алюмінієву пудру з порошком графіту (другий варіант). У роботі досліджувались енергії

розряду  $W_p = 2,6; 4,6$  і  $6,8$  Дж на першому етапі процесу легування.

У табл. 3 наведені результати дослідження в умовах, якщо продуктивність була зменшена приблизно в чотири рази, згідно з першим і другим варіантами алітування сталі 20. Під час другого етапу була використана насичувальна паста, яка містить алюмінієву пудру (перший варіант) та алюмінієву пудру й графітовий порошок (другий варіант). Дослідження здійснювали за енергіями розряду  $W_p = 2,6; 4,6$  і  $6,8$  Дж на першому етапі легування.

Таблиця 3 – Якісні параметри поверхневих шарів зразків сталі 20 після ЕІЛ

	Режим	Продуктивність, $\text{см}^2/\text{хв}$	Товщина, мкм		Максимальна мікротвердість, МПа		Суцільність «білого» шару, %
			«білого» шару	перехідної зони	«білого» шару	перехідної зони	
З нанесенням алюмінієвої пудри на 2-му етапі	I етап – ЕІЛ АІ $W_p = 2,60$ Дж, II етап – ЕІЛ АІ $W_p = 0,52$ Дж	I етап – 0,8, II етап – 0,5	до 65	до 65	$3000 \pm 20$	$2100 \pm 200$	100
	I етап – ЕІЛ АІ $W_p = 4,60$ Дж, II етап – ЕІЛ АІ $W_p = 0,52$ Дж	I етап – 1,0, II етап – 0,6	до 75	до 80	$5350 \pm 20$	$2100 \pm 200$	100
	I етап – ЕІЛ АІ $W_p = 6,8$ Дж, II етап – ЕІЛ АІ $W_p = 1,30$ Дж	I етап – 1,5, II етап – 0,8	до 85	до 130	$7450 \pm 20$	$2450 \pm 70$	100
З нанесенням алюмінієвої пудри та порошку графіту на 2-му етапі	I етап – ЕІЛ АІ $W_p = 2,60$ Дж, II етап – ЕІЛ АІ $W_p = 0,52$ Дж	I етап – 0,8, II етап – 0,5	до 70	до 60	$3050 \pm 20$	$2050 \pm 50$	100
	I етап – ЕІЛ АІ $W_p = 4,60$ Дж, II етап – ЕІЛ АІ $W_p = 0,52$ Дж	I етап – 1,0, II етап – 0,6	до 75	до 80	$5550 \pm 20$	$2100 \pm 50$	100
	I етап – ЕІЛ АІ $W_p = 6,8$ Дж, II етап – ЕІЛ АІ $W_p = 1,3$ Дж	I етап – 1,5, II етап – 0,8	до 75	до 100	$7850 \pm 20$	$2250 \pm 50$	100

Зі збільшенням енергії розряду на першому етапі легування алюмінієвим електродом спостерігається зростання мікротвердості та товщини «білого» шару й дифузійної зони. Як і в попередньому випадку, використання консистентної суміші з графітом призводить до збільшення мікротвердості.

Під час аналізу рис. 1–2 та табл. 3 було визначено, що після використання другого етапу алітування зі зменшенням продуктив-

ності в 2 рази відбувається зниження шорсткості поверхневого шару. Цей ефект є більш виразним у разі використання пасти, яка містить алюмінієву пудру та порошок графіту.

Під час використання пасти з алюмінієвою пудрою відбувається незначне збільшення товщини «білого шару» та його мікротвердості. Додавання графітового порошку до алюмінієвої пудри майже не змінює товщину «білого шару», але спостерігається збі-

льшення мікротвердості як в «білому шарі», так і в перехідній зоні. У обох варіантах другого етапу досягнута суцільність покриття на рівні 100 %.

### Висновки

1. Результати проведених досліджень підтвердили вдосконалення технології алітування завдяки впливу продуктивності процесу ЕІЛ алюмінієвим електродом-інструментом на параметри якості поверхневих шарів сталевих деталей;

2 застосування алітування в два етапи в обох варіантах, якщо використовувати насичувальну пасту, що містить алюмінієву пудру або алюмінієву пудру та графітовий порошок, сприяє збільшенню мікротвердості «білого шару» й дифузійної зони (зокрема за наявності графіту), а також зниженню шорсткості поверхні. Суцільність покриття в обох варіантах другого етапу досягнута на рівні 100%;

3 для практичної реалізації рекомендується здійснювати процес алітування за першим варіантом: перший етап – ЕІЛ алюмінієвим електродом з енергією розряду  $W_p = 4,6-6,8$  Дж, другий етап – нанесення насичувальної пасти, яка містить алюмінієву пудру та графітовий порошок. Електроіскрове легування варто здійснювати зі зниженою приблизно на половину продуктивністю.

### Література

1. Matysik P., Józwiak S., Czujko T. Characterization of Low-Symmetry Structures from Phase Equilibrium of Fe-Al System. *Microstructures and Mechanical Properties*. *Materials*. 2015. 8(3). P. 914–931; doi:10.3390/ma8030914.
2. Аналіз якості алітованих поверхневих шарів, отриманих методами електроіскрового легування / Кирик Г. В. та ін. *Порошкова металурія*. 2017. № 12. С. 97–107.
3. *Chemical and Petroleum Engineering* / Tarel'nik V. B., Konoplyanchenko E. V., Kosenko P. V., Martsinkovskii V. S. 53. No. 7–8: 540 (2017). <https://doi.org/10.1007/s10556-017-0378-7>.
4. Estimating Qualitative Parameters of Aluminized Coating Obtained by Electric Spark Alloying Method / Gaponova, O. et al. (2019). *Advances in Thin Films, Nanostructured Materials, and Coatings*. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-13-6133-3\\_25](https://doi.org/10.1007/978-981-13-6133-3_25).
5. Quality Analysis of Aluminized Surface Layers Produced by Electrospark Deposition / Kirik G. V. et al. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2018. Vol. 56. Issue 11–12. P. 688–696. URL:<https://doi.org/10.1007/s11106-018-9944-6>.

696. URL:<https://doi.org/10.1007/s11106-018-9944-6>.

6. Aluminizing of Metal Surfaces by Electric-Spark Alloying / Tarelynyk V. B., Gaponova O. P., Tarelynyk N. V., Myslyvchenko O. M. *Progress in Physics of Metals*. 2023. 24. No. 2. P. 282–318. <https://doi.org/10.15407/ufm.24.02.282>
7. *Philosophical Magazine* / Gharghoury M. A., Weatherly G. C., Embury J. D., Root J. 1999. 79. P.1671–1696.

### References

1. Matysik P., Józwiak S., Czujko T. Characterization of Low-Symmetry Structures from Phase Equilibrium of Fe-Al System. *Microstructures and Mechanical Properties*. *Materials*. 2015. 8(3). P. 914–931; doi:10.3390/ma8030914.
2. Analiz kachestva alitirovannykh poverhnostnykh sloev obtained by methods of electrospark alloying / Kyryk G. V. et al. *Powder metallurgy*. 2017. No. 12. P. 97–107.
3. *Chemical and Petroleum Engineering* / Tarel'nik V. B., Konoplyanchenko E. V., Kosenko P. V., Martsinkovskii V. S. 53. No. 7–8: 540 (2017). <https://doi.org/10.1007/s10556-017-0378-7>.
4. Estimating Qualitative Parameters of Aluminized Coating Obtained by Electric Spark Alloying Method / Gaponova, O. et al. (2019). *Advances in Thin Films, Nanostructured Materials, and Coatings*. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-13-6133-3\\_25](https://doi.org/10.1007/978-981-13-6133-3_25).
5. Quality Analysis of Aluminized Surface Layers Produced by Electrospark Deposition / Kirik G. V. et al. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2018. Vol. 56. Issue 11–12. P. 688–696. URL:<https://doi.org/10.1007/s11106-018-9944-6>.
6. Aluminizing of Metal Surfaces by Electric-Spark Alloying / Tarelynyk V. B., Gaponova O. P., Tarelynyk N. V., Myslyvchenko O. M. *Progress in Physics of Metals*. 2023. 24. No. 2. P. 282–318. <https://doi.org/10.15407/ufm.24.02.282>
7. *Philosophical Magazine* / Gharghoury M. A., Weatherly G. C., Embury J. D., Root J. 1999. 79. P.1671–1696.

**Гапонова Оксана Петрівна**<sup>1</sup>, д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри прикладного матеріалознавства та технології конструкційних матеріалів, телефон +38 0542-64-09-49, [gaponova@pmtkm.sumdu.edu.ua](mailto:gaponova@pmtkm.sumdu.edu.ua);

**Охріменко Віктор Олександрович**<sup>1</sup>, аспірант кафедри прикладного матеріалознавства та технології конструкційних матеріалів, [v.okhrimenko@pmtkm.sumdu.edu.ua](mailto:v.okhrimenko@pmtkm.sumdu.edu.ua);

<sup>1</sup>Сумський державний університет, вул. Римсько-го-Корсакова, 2, м. Суми, 40007, +380956515610,



Тарельник Наталія В'ячеславівна<sup>2</sup>, кандидат економічних наук, доцент кафедри проектування технічних систем, [natasha-tarelnik@ukr.net](mailto:natasha-tarelnik@ukr.net).  
<sup>2</sup>Сумський національний аграрний університет, вул. Герасима Кондратьєва, 160, м. Суми, 40000.

### Analysis of the influence of electrospark alloying parameters on the structural state of alloyed surfaces

**Abstract: Problem.** Among the promising methods of surface hardening and modification are techniques based on the treatment of metals and alloys with high-energy flows of materials and energy. Among the modern methods of metal surface treatment is electrospark alloying (ESA), which allows obtaining surface structures with unique physical, mechanical and tribological characteristics. It is known that alitization provides metal surface layers with protection against corrosion and oxidation at elevated temperatures. The traditional method of forming alitized coatings is chemical-thermal treatment. The paper proposes a method of alitization by ESA. Many parameters influence the formation of the layer during alitization by the ESA method. First of all, it is the energy parameters. **Goal.** The aim of the work is to evaluate the effect of the ESA alloying process performance on the structure formation. **Methodology.** The study was carried out on samples of steel 20. An aluminium electrode in the form of a wire was used as a tool electrode for ESA. Different alloying modes were investigated, the discharge energy and performance were changed. The alloying was carried out in two stages. At the first stage, the aluminium electrode was used at classical performance values. At the second stage, the capacity was reduced by two and four times. At the second stage, a saturating paste containing aluminium powder was applied to the surface before the ESA. The microstructure of the obtained modified surfaces was examined under an optical

microscope, the surface roughness and microhardness distribution in the surface layer were determined. **Results.** The use of two-stage alitization increases the microhardness of the hardened layer and the diffusion zone, as well as reduces the surface roughness. The coating integrity was 100%. (originality) A new method of alitisation based on ESA is proposed, which allows to obtain 100 % continuity with high adhesion to the substrate. **Practical value.** For practical implementation, it is recommended to perform alitization according to the following variant: the first stage is ESA with an aluminium electrode with a discharge energy  $W_p = 4.6-6.8$  J, the second stage is the application of a saturation paste containing aluminium powder and graphite powder. Electrospark alloying should be carried out with a reduced productivity by about two times. **Key words:** electrospark alloying, alitization, surface layer, roughness, integrity of the coating.

**Haponova Oksana**<sup>1</sup>, Doctor of Technical Science, Professor, Head of the Department of Applied Material Science and Technology of Constructional Materials, Sumy State University, str. Rymskoho-Korsakova, 2, Sumy, 40007, phone +38 0542-64-09-49, [gaponova@pmtkm.sumdu.edu.ua](mailto:gaponova@pmtkm.sumdu.edu.ua);

**Okhrimenko Viktor**<sup>1</sup>, PhD student, Department of Applied Material Science and Technology of Constructional Materials, Sumy State University, str. Rymskoho-Korsakova, 2, Sumy, 40007, +380956515610, [v.okhrimenko@pmtkm.sumdu.edu.ua](mailto:v.okhrimenko@pmtkm.sumdu.edu.ua);

**Tarelnyk Nataliia**<sup>2</sup>, PhD of Economic Sciences, Associate Professor of the Department of Technical Systems Design, [natasha-tarelnik@ukr.net](mailto:natasha-tarelnik@ukr.net).

<sup>2</sup>Sumy National Agrarian University, Herasyma Kondratieva Street, Sumy, 40000,