

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ ЕЛЕКТРОІСКРОВОГО ЛЕГУВАННЯ ДЛЯ ПОКРАЩЕННЯ ЯКОСТІ ПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ МЕТАЛЕВИХ ДЕТАЛЕЙ: ФАКТОРИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ

Охріменко В. О., Гапонова О. П., Дегула А. І.
Сумський державний університет

Анотація. Електроіскрове легування (ЕІЛ) є перспективною технікою модифікації поверхонь, яка дозволяє створювати покриття з унікальними властивостями завдяки обробленню металів високоенергетичними імпульсами. ЕІЛ забезпечує високу міцність з'єднання між легованим шаром і базовим матеріалом, а також ефективність за низької витрати енергії. Предметом дослідження є процес ЕІЛ для підвищення якості та збільшення терміну експлуатації покриттів, що забезпечують комплексний захист від корозії і зношування. Важливо враховувати енергетичні параметри, електродні матеріали, середовище легування та такі технологічні параметри, як швидкість оброблення та режим охолодження.

Ключові слова: електроіскрове легування, покриття, трибологія, білий шар, дифузія.

Вступ

На сьогодні розвиток машинобудування пов'язаний із впровадженням передових технологічних процесів, спрямованих на підвищення тривалості терміну придатності, надійності та ефективності деталей й інструментів, зокрема в екстремальних умовах експлуатації.

Однією з перспективних технік зміцнення поверхні та модифікації є електроіскрове легування (ЕІЛ), основою для якого є оброблення металів високоенергетичними потоками матеріалів та енергії [1]. Цей метод дозволяє формувати поверхневі структури з унікальними фізико-механічними та трибологічними характеристиками. Його особливістю є висока міцність зв'язку між легованим шаром і базовим матеріалом, а також можливість нанесення на поверхню різноманітних матеріалів, які проводять електричний струм. Цей процес визначається низькою витратою енергії та легкістю робіт.

Незважаючи на значні переваги електроіскрового легування, велика кількість досліджень акцентує увагу переважно на енергетичних аспектах процесу, тоді як продуктивність є недостатньо вивченою. Це створює певні складнощі для його впровадження в промисловість. Потреба в оптимізації параметрів ЕІЛ є важливою для забезпечення максимальної ефективності та рентабельності виробництва [2–5]. З огляду на сучасні вимоги до матеріалів і деталей, зокрема в умовах високих температур, корозії та зношування, подальші дослідження в цьому напрямі є вкрай актуальними.

Аналіз публікацій

Сутність методу ЕІЛ.

Метод електроіскрового легування (ЕІЛ) полягає в застосуванні імпульсного іскрового розряду між електродом і підкладкою з металу, що призводить до плавлення матеріалу електрода та його проникнення до поверхневого шару підкладки за високих температур. Це сприяє утворенню легованого поверхневого шару [5, 6].

Сам процес ЕІЛ відбувається за зменшення відстані між анодом і катодом на відстань, яка буде рівною до пробію електроіскрового розряду (рис 1).

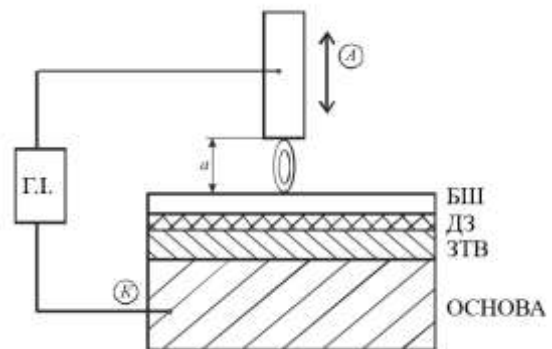


Рис. 1. Загальна схема процесу електроіскрового легування: А – легувальний електрод (анод); К – поверхня (катод); а – міжелектродний проміжок; Г.І. – генератор імпульсів; БШ – білий шар; ДЗ – дифузійна зона; ЗТВ – зона термічного впливу; ОСНОВА – оброблюваний матеріал

Коли електроди, анод (рис. 1) і катод наближаються один до одного, напруженість

електричного поля зростає і за певної відстані стає достатньою для виникнення іскрового розряду. Завдяки цим явищам ЕІЛ може поліпшувати механічні й хімічні характеристики поверхні, а також підвищувати твердість, зносостійкість і корозійну стійкість виробів [7, 8].

Процес електроіскрового легування охоплює складні фізичні, хімічні, а також термодинамічні явища [9].

Існує дві основні категорії процесів розряду в технології ЕІЛ: іскровий [10–11] і дуговий [12]. У випадку іскрового розряду електрод наближається до основи, де висока щільність теплової енергії призводить до плавлення матеріалу електрода та його осадження на поверхні підкладки. Цей процес може бути реалізований у формі контактного або безконтактного розряду, кожен із яких має свої особливості.

Контактний іскровий розряд передбачає локальне генерування миттєвого струму, що викликає високу температуру та плавлення електрода. Розплавлений матеріал розбризкується на підкладку, утворюючи стійкий шар [10]. У випадку безконтактного розряду підтримується певна відстань між електродом і підкладкою, що сприяє пробою діелектрика та створює умови для осадження матеріалу [11].

Дуговий розряд визначається генеруванням плазмової дуги між електродом і підкладкою під час імпульсного розряду, що плавить матеріал електрода та створює зміцнений поверхневий шар. Через короткотривалість розряду та мінімальний тепловий вплив цей метод меншою мірою впливає на основу [12]. Дослідники роботи [10] розглядають електроіскрове легування як гібридний процес, що складається з таких різноманітних технік, як зварювання й осадження з парової фази.

Незалежно від типу розряду основна мета полягає в покращенні поверхневих характеристик матеріалу. Через складність цього процесу науковці ще не достатньою мірою вивчили механізми, але подальші дослідження можуть містити цінну інформацію для вдосконалення технології ЕІЛ.

Дослідження технологій ЕІЛ

Однією з ключових особливостей формування покриттів за допомогою ЕІЛ є можливість створення багатшарових структур із різними фізико-хімічними властивостями [13]. Ці шари можуть складатися з матеріалів

з високою твердістю [14–18], корозійною стійкістю [8,13] або ж спеціальними трибологічними характеристиками. Як зазначають автори, покриття на основі вуглецю [19] та азоту [8, 19] можуть значною мірою підвищувати зносостійкість і термін експлуатації деталей, дозволяючи їм ефективно працювати в умовах підвищених навантажень. Завдяки цьому ЕІЛ починають застосовувати у виробництві інструментів, машинобудуванні, авіації та інших галузях промисловості, де важливі висока якість і надійність покриттів.

У сучасному машинобудуванні формування покриттів на поверхні деталей стало основним етапом у забезпеченні їхнього терміну експлуатації та надійності, а отже, у зменшенні собівартості виготовлення продукції. Зокрема це стосується виробів, що експлуатуються в умовах високих температур, інтенсивного тертя або агресивних середовищ [20]. Сучасними методами, зокрема електроіскровим легуванням (ЕІЛ), можна не лише зміцнити поверхню, а й суттєво покращити її функціональні властивості. Важливим аспектом ЕІЛ є можливість створення багатшарових покриттів, що забезпечують комплексний захист деталей [8, 12, 21–23] від корозії, зношування та інших видів руйнування. Такі покриття стають невід'ємною частиною сучасних високотехнологічних виробів, що працюють в екстремальних умовах.

Одним з перспективних напрямів у розвитку ЕІЛ є його поєднання з такими методами оброблення поверхонь, як хіміко-термічне [24–28] або лазерне [29]. Це дозволяє значно розширити можливості щодо створення покриттів із заданими властивостями.

Якщо комбінувати лазерне оброблення та ЕІЛ, це дозволить отримати покриття з підвищеною зносостійкістю та корозійною стійкістю, водночас зберігаючи високу міцність базового матеріалу [30]. Така синергія методів дозволяє створювати більш ефективні й економічно доцільні технологічні процеси, що відповідають найвищим стандартам якості.

Загалом інтеграція у виробничі процеси таких передових технологій, як ЕІЛ, значно підвищує конкурентоспроможність підприємств. Це досягається завдяки підвищенню якості продукції, зменшенню витрат на сировину й енергоресурси, а також оптимізації виробничих процесів.

Проте варто зазначити, що для максимального використання потенціалу ЕІЛ необ-

хідні подальші дослідження, спрямовані на оптимізацію процесів і розроблення нових матеріалів для легування.

Таким чином, електроіскрове легування, зокрема в поєднанні з іншими методами оброблення, є одним з основним процесом у сучасному машинобудуванні.

Воно дозволяє створювати високоефективні покриття, що забезпечують тривалу та надійну роботу деталей в умовах інтенсивного навантаження. Майбутнє цього методу пов'язане з подальшим розвитком технологій і матеріалів, що дозволить ще більше розширити сфери його застосування та підвищити ефективність у різних галузях промисловості.

Мета та постановка завдання

Метою роботи є дослідження впливу параметрів процесу електроіскрового легування (ЕІЛ) для підвищення тривалості терміну експлуатації і надійності. У роботі розглянуто методи формування покриттів з унікальними фізико-механічними властивостями, а також досліджено можливості поєднання ЕІЛ з іншими методами оброблення для досягнення комплексного захисту деталей від корозії, зношування та інших видів руйнування.

Виклад основного матеріалу

Електроіскрове легування (ЕІЛ) є основним методом зміцнення поверхневих шарів металевих деталей, який дозволяє створювати покриття з унікальними фізико-хімічними та механічними властивостями. Ефективність цього процесу залежить від декількох факторів, серед яких енергетичні параметри здійснюють основну функцію. Розглянемо основні з них [31–33]:

сила струму. Сила струму під час ЕІЛ визначає інтенсивність електричних розрядів між електродами і оброблюваною поверхнею. Висока сила струму збільшує кількість енергії, що передається в процесі легування, що також підвищує температуру в зоні оброблення.

Це призводить до більш інтенсивного плавлення та випаровування матеріалу електрода, який осідає на поверхні деталі. У такий спосіб можна досягти більшої глибини проникнення легувального матеріалу, що є важливим для деталей, які мають витримувати великі механічні навантаження. Однак надмірно висока сила струму може призвести до перегрівання й утворення тріщин або

інших дефектів на поверхні, тому її необхідно ретельно контролювати;

напруга. Напруга між електродом і деталлю є ще одним важливим параметром, який визначає енергію розряду, а отже, швидкість плавлення матеріалу електрода. Вища напруга сприяє утворенню більш потужних розрядів, що дозволяє наносити легувальний матеріал з більшою швидкістю. Це особливо корисно в процесі легування великих площ або деталей складної форми, де важлива швидкість й ефективність процесу. Водночас надмірно висока напруга може спричинити нестабільність процесу, а отже, нерівномірне нанесення покриття або навіть пошкодження поверхні деталі;

тривалість імпульсів. Тривалість імпульсів визначає, як довго триває кожен окремий розряд у процесі ЕІЛ. Довші імпульси забезпечують більше часу для передачі енергії до зони оброблення, що може призвести до глибшого проникнення матеріалу і кращої адгезії покриття до базового металу. Це важливо для створення товстих і стійких до зношування шарів, які забезпечують тривалий термін експлуатації деталі. З іншого боку, занадто довгі імпульси можуть призвести до перегріву зони контакту, що знижує якість покриття і збільшує ризик утворення дефектів;

частота імпульсів. Частота імпульсів визначає кількість електричних розрядів за одиницю часу. Вища частота імпульсів дозволяє збільшити швидкість нанесення покриття і досягти більш рівномірного розподілу матеріалу на поверхні деталі. Це особливо корисно в процесі оброблення великих або складних за формою деталей, де важлива висока продуктивність процесу. Проте занадто висока частота імпульсів може призвести до надмірного нагрівання поверхні, що може викликати термічні напруги й утворення мікротріщин.

Кожен з цих параметрів впливає на кінцевий результат процесу ЕІЛ, тому їх налаштування має бути ретельно підібраним відповідно до конкретних вимог до покриття й умов експлуатації деталі. Оптимізація цих параметрів дозволяє досягти високої якості покриття, підвищити продуктивність процесу та забезпечити тривалий термін експлуатації оброблених деталей в умовах інтенсивного зношування.

Крім енергетичних параметрів, які здійснюють основну функцію в процесі електроіскрового легування (ЕІЛ), важливе значення мають властивості використовуваного мате-

ріалу електрода, а також середовище, в якому здійснюється процес легування. Від цих чинників залежить якість отриманого покриття, його фізико-хімічні властивості, стійкість до зношування та корозії.

Матеріал електрода є одним із основних факторів, що визначають властивості покриття. Правильний вибір матеріалу електрода дозволяє забезпечити такі оптимальні параметри покриття, як його твердість, зносостійкість, корозійна стійкість та адгезія до базового металу. Наприклад, використання графітових електродів під час ЕІЛ може сприяти утворенню на поверхні металу шарів з високим вмістом карбідів [19]. Карбіди є надзвичайно твердими частками, які забезпечують покриттю високу твердість і зносостійкість, що є критично важливими для деталей, які працюють в умовах високого тертя чи інших екстремальних навантажень.

Крім того, матеріал електрода може містити такі легувальні елементи, як нікель [33–34], хром, ванадій або молібден, які підвищують стійкість покриття до корозії та окислення. Електроди з вмістом нікелю [34–35] можуть бути використані для легування деталей, що працюють у агресивних середовищах, де стійкість до корозії є важливою вимогою. Вибір матеріалу електрода також впливає на структуру та фазовий склад покриття, що визначає його механічні властивості та процеси під час експлуатації.

Авторами роботи [36] методом електроіскрового легування було отримано покриття на сталі 40Х із металокерамічних матеріалів на основі сплаву Ni-Al і дибориду титанухрому. Досліджували вплив співвідношення металевої і тугоплавкої фаз у складі легувального електрода, а також параметрів процесу на кінетику масопереносу, товщину та склад покриттів.

Визначено, що збільшення вмісту металевої складової в електродному матеріалі сприяє активізації масопереносу, що призводить до збільшення товщини покриття до 700 мкм. Крім того, зміна режимів легування та хімічного складу електродів дозволяє контролювати такі характеристики покриття, як суцільність, шорсткість і товщину.

Середовище легування також здійснює одну з головних функцій у процесі ЕІЛ і формуванні покриттів. Залежно від середовища, в якому здійснюється легування, можна суттєво вплинути на властивості отриманого покриття. Легування може проводитися у вакуумі, в інертних газах (наприклад в ар-

гоні або гелії) або в активних газах (азот чи кисень). Кожне з цих середовищ по-різному впливає на структуру покриття.

Використання азотовмісного середовища [8, 28] під час легування сприяє утворенню на поверхні металу нітридів, які значно підвищують твердість і зносостійкість покриття. Нітриди мають високі механічні властивості, що робить їх ідеальними для застосування на деталях, які працюють у високонавантажених умовах. Водночас використання вакууму або інертних газів [28] дозволяє зменшити окислення покриття та забезпечити чистоту й однорідність поверхні, що особливо важливо для деталей, які працюють у високотемпературних середовищах.

Таким чином, ефективність процесу електроіскрового легування залежить не лише від енергетичних параметрів, але й від матеріалу електрода та середовища, в якому здійснюється легування. Комплексний підхід до вибору цих параметрів дозволяє отримати покриття з оптимальними характеристиками, що забезпечує тривалу та надійну експлуатацію деталей у різних умовах.

Також важливим є правильне налаштування процесу щодо таких технологічних параметрів, як швидкість оброблення, тиск контактної зусилля між електродом і оброблюваною поверхнею, а також режим охолодження.

Кожен з цих параметрів може суттєво вплинути на якість отриманого покриття, його однорідність і термін експлуатації. Оптимізація технологічних параметрів процесу електроіскрового легування (ЕІЛ) має вирішальне значення для досягнення бажаних характеристик покриття та забезпечення його стабільної якості. Розглянемо детальніше кожен з цих параметрів.

Швидкість процесу оброблення визначає, скільки матеріалу буде перенесено на поверхню деталі за певний час. Надто висока швидкість процесу може призвести до нерівномірного розподілу покриття та утворення таких дефектів, як мікротріщини або пори. Це може негативно вплинути на зносостійкість і корозійну стійкість покриття. З іншого боку, надто повільна швидкість оброблення може знизити продуктивність процесу, що є недоцільним у промислових умовах, де важлива не тільки якість, а й економічність виробництва. Тому важливо знайти оптимальний баланс, який забезпечить рівномірне та якісне покриття без надмірних витрат часу [37].

Тиск контактного зусилля між електродом і оброблюваною поверхнею також є важливим чинником у процесі ЕІЛ [38]. Надто високий тиск може призвести до надмірного зношення електрода та деформації поверхні деталі, що так само призведе до погіршення адгезії покриття. З іншого боку, надто низький тиск може спричинити неповне перенесення матеріалу на поверхню або нерівномірне покриття. Оптимальний тиск дозволяє забезпечити стабільний процес перенесення матеріалу та формування покриття з однорідною товщиною і без дефектів.

Режим охолодження впливає на температуру процесу, а отже, і на структуру та властивості отриманого покриття [39]. Якщо охолодження недостатнє, температура на поверхні може підвищитися до таких рівнів, які спричиняють небажані структурні зміни, наприклад утворення тріщин через термічні напруження.

З іншого боку, надмірне охолодження може призвести до надмірного охолодження зони контакту, що вплине на ефективність перенесення матеріалу та може знизити якість покриття. Тому правильний режим охолодження допомагає підтримувати оптимальні температурні умови для процесу ЕІЛ і забезпечити формування якісного покриття.

Усі ці технологічні параметри є взаємозалежними, і їх правильне налаштування дозволяє досягти максимальних результатів у процесі електроіскрового легування. Оптимізація цих аспектів не лише покращує якість покриття, але й підвищує ефективність виробництва, знижує витрати на матеріали та енергію, а також мінімізує ризик браку. У виробничих умовах важливо враховувати всі ці фактори та здійснювати постійний моніторинг процесу для забезпечення стабільної якості продукції.

Отже, ЕІЛ має великий потенціал у сучасному виробництві, але під час цього процесу необхідно враховувати й детально оптимізувати широкий спектр його параметрів. Електроіскрове легування як складний фізико-хімічний процес залежить від багатьох змінних, зокрема від сили струму, напруги, тривалості імпульсів, частоти їх повторення, матеріалу електрода, температури навколишнього середовища та інших факторів. Кожен з цих параметрів може суттєво вплинути на кінцевий результат – від товщини та структури легованого шару до таких його фізико-механічних характеристик, як твердість, зносостійкість і корозійна стійкість.

Детальна оптимізація процесу ЕІЛ вимагає комплексного підходу, що складається не лише з експериментальних досліджень, але й з розроблення теоретичних моделей, які дозволять краще визначити взаємодію між параметрами процесу та результатом легування. Наприклад, використання сучасних комп'ютерних технологій для моделювання процесу дозволяє передбачити процеси матеріалу під час легування й уникнути помилок на стадії виробництва. Це не лише підвищує якість отриманих покриттів, але й значно знижує витрати на виробництво, оскільки дозволяє оптимізувати використання матеріалів та енергії.

Крім того, комплексний підхід до оптимізації ЕІЛ має враховувати специфічні вимоги до кінцевого продукту. Для деяких деталей критично важливими є характеристики, що забезпечують стійкість до зношування або корозії, тоді як для інших ключовою може бути твердість або адгезія покриття. Розуміння і врахування цих вимог дозволяє точно налаштувати процес ЕІЛ для досягнення оптимальних результатів у кожному конкретному випадку.

Практичне застосування технології ЕІЛ

У дослідженні [8] проаналізовано вплив режимів електроіскрового легування на характеристики алітованих покриттів, які були здійснені в два етапи. Спочатку проводили оброблення електродом з алюмінію за енергії розряду $W_p = 0,52 - 6,8$ Дж. На наступному етапі на поверхню наносили азотомісню пасту та здійснювали подальше алітування за енергії розряду $0,52 - 2,6$ Дж і продуктивності $0,2 - 0,4$ см²/хв.

Аналізуючи цю статтю було визначено, що після другого етапу зі зменшенням продуктивності в разі відбувається зниження шорсткості поверхневого шару, а в разі збільшення енергії розряду збільшується мікротвердість покриттів у поверхневій та перехідній зонах.

У разі використання пасту з алюмінієвою пудрою відбувається незначне збільшення товщини «білого шару» та його мікротвердості. Додавання графітового порошку до алюмінієвої пудри призводить майже до незмінності товщини «білого шару», але спостерігається збільшення рівня мікротвердості як в «білому шарі», так і в перехідній зоні.

У роботі [19] автори наводять новий метод нітроцементзації сталейних поверхонь на

основі ЕПЛ. Він складається з оброблення алюмінієвим електродом, нанесення азотовмісної пасти та подальшого легування графітовим електродом. Така технологія поєднує переваги кількох методів, забезпечуючи високу твердість і зносостійкість покриттів. Отримані покриття складаються зі зміцненого «білого» шару», дифузійної зони та основного металу. Їхня мікротвердість досягає 10380 МПа, що значно перевищує результати традиційної нітроцементзації.

Метод є енергоефективним і економічним, оскільки зменшує час оброблення та запобігає термічним деформаціям. Його застосування перспективне для збільшення терміну експлуатації деталей насосного та компресорного обладнання.

Висновки

Отже, лише через поєднання технологічних інновацій, глибоких знань про матеріали та ретельну оптимізацію процесу електроіскрового легування можна повною мірою реалізувати його потенціал. Це не лише збільшить термін експлуатації та надійність деталей, але й сприятиме значному зниженню витрат на виробництво й обслуговування техніки, що є критично важливим у сучасних умовах високої конкуренції на ринку промислових технологій.

Acknowledgement

Результати частково отримано в межах науково-дослідного проекту «Розробка екологічно безпечних технологій модифікації поверхні деталей обладнання електростанцій комбінованими методами, заснованими на електроіскровому легуванні» за фінансування Міністерства освіти і науки України (держ. реєстр. № 0124U000539, Сумський державний університет).

Література

1. Застосування електроіскрового легування з метою підвищення працездатності трибо систем / О. П. Гапонова та інші. *Компресорне та енергетичне машинобудування*. № 2(52). 2018. С. 2–5.
2. Matysik P., Józwiak S., Czujko T. Characterization of Low-Symmetry Structures from Phase Equilibrium of Fe-Al System – Micro structures and Mechanical Properties. *Materials*. 2015. 8(3). P. 914–931. <https://doi.org/10.3390/ma8030914>
3. Tarelnyk1 V. B., Gaponova O. P. Investigation of the Formation Processes of Aluminized Layers Obtained by Electrospark Alloying. Part II. Mathematical Model of the Aluminizing Process. *Metalofizika I noveishie tekhnologii*. 2019. Vol.

- 41 Is. 11. С.1483–1498. <https://doi.org/10.15407/mfint.41.11.1483>
4. Tarel'nik V. B., Konoplyanchenko V. B., Kosenko P. V., Martsinkovskii V. S. Problems and Solutions in Renovation of the Rotors of Screw Compressors by Combined Technologies. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2017. № 53. P. 540–546. <https://doi.org/10.1007/s10556-017-0378-7>
5. Koshuro V., Fomina M., Fomine A., Rodionov I. Metal oxide (Ti, Ta)-(TiO₂, TaO) coatings produced on titanium using electro spark alloying and modified by induction heat treatment. *Compos. Struct.* 2018. 196. 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.05.005>
6. Wang D., Gao J., Deng S., Wang W. A novel particle planting process based on electrospark deposition. *Mater. Letters*. 2022. 306. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2021.130872>
7. Іванова Е. В. Феноменологічна модель електроіскрового легування: зб. праць конференції *Якість в виробничих та соціально-економічних системах*. 2016. С. 183–185.
8. Гапонова, О. П. Охріменко В. О. Тарельник Н. В. Аналіз впливу параметрів електроіскрового легування на структурний стан алітованих поверхонь. *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету: зб. наук. пр.* 2023. № 103. С. 66–71. URL: <https://dspace.khadi.kharkov.ua/handle/123456789/19171>
9. Burkov A. A. The effect of discharge pulse energy in electrospark deposition of amorphous coatings. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*. 2022. 58. P. 1018–1027. <https://doi.org/10.1134/s2070205122050057>
10. Jin B. D., Zhao W. S., Cao G. H., Wang Z. L., Xiao K. Fabrication of micro structure using EDM deposition. *Materials Science Forum*. 2006. V. 532–533. P. 305–308. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.532-533.305>
11. Frangini S., Masci A. A study on the effect of a dynamic contact force control for improving electrospark coating properties. *Surface and Coatings Technology*. 2010. № 204. P. 2613–2623. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2010.02.006>
12. Iakovou R., Bourithis L., Papadimitriou G. Synthesis of boride coatings on steel using plasma transferred arc (PTA) process and its wear performance. *Wear*. 2002. 252. P. 1007–1015 [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(02\)00056-X](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(02)00056-X)
13. Лобачова Г. Г. Поверхневе зміцнення сплавів заліза електроіскровим легуванням цирконієм, титаном, хромом та хімікотермічною обробкою: автореф. дис. ...канд. техн. наук: 05.16.01. Київ, 2012. 20 с.
14. Присяжнюк П. М., Криль Я. А. Розроблення електроіскрових покриттів на основі карбідосталей NbC-сталь Гадфільда. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічно-*

- го університету нафти і газу. 2013. № 2. С. 155–164.
15. Гадалов В. Н., Абашкін Р. Є. Зміцнення швидкорізальних сталей. *Сучасні інструментальні системи, інформаційні технології та інновації: матеріали VIII міжнародної науково-технічної конференції*. 2011. С. 119–124.
16. Спосіб нітроцементзації поверхонь сталевих деталей методом електроіскрового легування (EIL): пат. 150385 Україна на корисну модель, МПК (2006), B23H 1/00, B23H 5/00, B23H 9/00, C23C 8/20 (2006.01). C23C 8/22; заявл. 30.08.2021; опубл. 10.02.2022. Бюл. № 6.
17. Tarelnyk V. B., Gaponova O. P., Melnyk V. I. The Surfaces Properties of Steel Parts with Wear-Resistant Coatings of the 1M and 90 % BK6 + 10 % 1M Composition Applied by the Method of Electrospark Alloying with the Use of Special Technological Environments. Pt. 1. The Strengthened-Surfaces' Structural State Features. *Metalofizika I noveishie tekhnologii*. 2023. Pt. 1. Vol. 45. P. 663–686. <https://doi.org/10.15407/mfint.45.05.0663>
18. Tarelnyk V.B., Gaponova O.P., Tarelnyk N. V., and et. The Surfaces Properties of Steel Parts with Wear-Resistant Coatings of the 1M and 90% BK6 + 10% 1M Composition Applied by the Method of Electrospark Alloying with the Use of Special Technological Environments. Wear Resistance, Topographic and Mechanical Properties. *Metalofizika I noveishie tekhnologii*. 2023. Pt. 2. Vol. 45. С. 773–794. <https://doi.org/10.15407/mfint.45.06.0773>
19. Гапонова О. П., Охріменко В. О., Тарельник Н. В. Підвищення ефективності технології нітроцементзації методом електроіскрового легування. *Вісник сумського національного аграрного університету: науковий журнал*. 2024. № 2(56). С. 27–33. <https://doi.org/10.32782/msnau.2024.2.4>
20. Проблеми експлуатації компресорного та насосного обладнання в сучасній промисловості: монографія / В. Б. Тарельник та ін. 2020. 410 с.
21. Yin K., Bian X., Han N., Yao Y. Zhou, J. Effect of the addition of Al-Ti-C master alloy on the microstructure and microhardness of a cast Al-10Mg alloy. *Journal of University of Science and Technology Beijing, Mineral, Metallurgy, Material*. 2006. № 13. P. 149–153. [https://doi.org/10.1016/S1005-8850\(06\)60033-9](https://doi.org/10.1016/S1005-8850(06)60033-9)
22. Shafyei H., Salehi M., Bahrami A. Fabrication, microstructural characterization and mechanical properties evaluation of Ti/TiB/TiB₂ composite coatings deposited on Ti6Al4V alloy by electrospark deposition method. *Ceramics International*. 2020. № 46. P. 15276–15284. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.03.068>
23. Zamulaeva E. I., Levashov E. A., Sviridova T. A., Pulsed electrospark deposition of MAX phase Cr₂AlC based coatings on titanium alloy. *Surf. Surface and Coatings Technology*. 2013. № 235. P. 454–460. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2013.08.002>
24. Радько О. В. Кумуржи О. Ю. Абразивна стійкість сталі 46Х13 після зміцнення методом термоциклічного іонно-плазмового азотування. *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил*. 2013. № 34. С. 156–160.
25. Вплив середовища легування та додаткового азотування на мікротвердість, структуру та фазовий склад залізної підкладки / К. М. Храмовська та ін. *Фізична інженерія поверхні*. 2010. № 4. С. 371–375.
26. Бородій Ю. П. Підвищення стійкості розділових штампів комбінованими методами поверхневого зміцнення: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.03.05. Харків, 2013. 26 с.
27. Іващенко Є. В., Лобачова Г. Г., Мазанко В. Ф. Формування поверхневого зміцненого шару при хіміко-термічній обробці заліза, поєднаній з електроіскровим легуванням. *Металознавство та обробка металів*. 2010. С. 39–42.
28. Каплун П. В. Науково-прикладні основи застосування безводного іонного азотування для підвищення контактної міцності трибосистем: дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.04. Хмельницький, 2018. 358 с.
29. Афанасьєва О. В., Лалазарова Н. О., Федоренко Є. П. Лазерна поверхнева обробка матеріалів: монографія: Харків: ХНУРЕ, ХНАДУ, 2020. 100 с.
30. Єрко О. О., Копилов В. І. Абразивна зносостійкість електроіскрових композиційних покриттів на основі ZrB₂: *матеріали VI всеукраїнської науково-технічної конференції студентів, аспірантів та наукових співробітників*. Київ. 2018. С. 5–6.
31. Лабунець В. Ф. Присяжнюк В. В., Мельник О. В. Електроіскрове легування конструкційної легованої сталі 30ХГСНА для деталей вузлів тертя. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2019. № 5. С. 81–84. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2019-146-5-81-84>
32. Гапонова О. П., Тарельник Н. В., Охріменко В. О. Вплив енергетичних параметрів і часу легування на якість алітованих покриттів, отриманих методом електроіскрового легування. *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2023): тези доповідей XIII міжнародної науково-практичної конференції*. 2023. С. 57–58.
33. Мазурик А. О., Мелашенко К. В., Лобачова Г. Г. Електроіскрове легування сталі ст.3 нікелем, вольфрамом та вуглецем: *матеріали IV міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів. Актуальні задачі сучасних технологій*. 2015. С. 62.
34. Xie Y. J., Wang M. C. Epitaxial MCrAlY coating on a Ni-base superalloy produced by electrospark deposition. *Surface and Coatings Technology*. 2006. № 201. P. 3564–3570. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.08.107>

35. Umanskyi O., Poliarus O., Ukrainets M., Antonov M. Physical-Chemical Interaction in NiAl-MeB2 Systems Intended for Tribological Applications. *Welding Journal*. 2015. № 94. P. 225–230.
36. Вплив хімічного складу електродних матеріалів та режимів легування на властивості електроіскрових покриттів. Інтенсивність масопереносу та склад покриттів / В. П. Коновал. *Порошкова металургія*. 2014. № 01/02. С. 41–51.
37. Завойко О. С. Теоретичні основи електротехнології зміцнення металів: навч. посібник. Чернівці: Рута, 2003. 123 с.
38. Завойко О. С. Теорія міжатомних перетворень покриттів, металів і сплавів фізичного матеріалознавства. Чернівці: Рута, 2009. Т. 1. 183 с.
39. Завойко О. С. Теоретичне матеріалознавство в теоріях міжатомних перетворень покриттів, металів, сплавів. Чернівці: Рута, 2012. Т. 4. 103 с.

References

1. Gaponova, O. P., Voloshko, T. P., Kovalyk, Ya. I., Marchenko, M. A. (2018). Zastosuvannya elektroiskrovoho lehuвання z metoiu pidvyshchennia pratsezdatsnosti trybosystem [The application of electrospark alloying in order to increase the performance of tribosystems]. *Kompressorne ta enerhetychne mashyno-buduvannia*. 2(52). 2–5 [in Ukrainian].
2. Matysik, P., Jóźwiak, S., Czujko, T. (2015). Characterization of Low-Symmetry Structures from Phase Equilibrium of Fe-Al System – Micro structures and Mechanical Properties. *Materials*. 8(3). P. 914–931. <https://doi.org/10.3390/ma8030914> [in English].
3. Tarelnyk, V. B., Gaponova, O. P. (2019). Investigation of the Formation Processes of Aluminized Layers Obtained by Electrospark Alloying. Part II. Mathematical Model of the Aluminizing Process. *Metalofizika I noveishie tekhnologii*. Vol. 41 Is. 11. P.1483–1498. <https://doi.org/10.15407/mfint.41.11.1483> [in English].
4. Tarelnik, V. B., Konoplyanchenko, V. B., Kosenko, P. V., Martsinkovskii, V. S. (2017). Problems and Solutions in Renovation of the Rotors of Screw Compressors by Combined Technologies. *Chemical and Petroleum Engineering*. № 53. P. 540–546. <https://doi.org/10.1007/s10556-017-0378-7> [in English].
5. Koshuro, V., Fomina, M., Fomine, A., Rodionov, I. (2018). Metal oxide (Ti, Ta)–(TiO₂, TaO) coatings produced on titanium using electro spark alloying and modified by induction heat treatment. *Compos. Struct.* 196. p. 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.05.005> [in English].
6. Wang, D., Gao, J., Deng, S., Wang, W. (2022). A novel particle planting process based on electrospark deposition. *Mater. Letters*. 306.
7. Ivanova, E. V. (2016) Fenomenologichna model elektroiskrovoho lehuвання [Phenomenological model of electrospark alloying]. *Stattia v zbirnyku prats konferentsii: “Yakist v vyrobnychkyh ta sotsialno – ekonomichnykh systemakh”*. P.183–185 [in Ukrainian].
8. Gaponova, O. P. Okhrimenko, V. O. Tarelnyk, N. V. (2023) Analiz vplyvu parametriv elektroiskrovoho lehuвання na strukturnyi stan alitovanykh poverkhon [Analysis of the influence of electrospark alloying parameters on the structural state of alloyed surfaces]. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho avtomobilno-dorozhnoho universytetu: zb. nauk. Pr.* 103. 66–71. URL: <https://dspace.khadi.kharkov.ua/handle/123456789/19171> [in Ukrainian].
9. Burkov, A. A. (2022). The effect of discharge pulse energy in electrospark deposition of amorphous coatings. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*. 58. 1018–1027. <https://doi.org/10.1134/s2070205122050057> [in English].
10. Jin, B. D., Zhao, W. S., Cao, G. H., Wang, Z. L., Xiao, K. (2006). Fabrication of micro structure using EDM deposition. *Materials Science Forum*. 532–533. 305–308. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.532-533.305> [in English].
11. Frangini, S., Masci, A. (2010). A study on the effect of a dynamic contact force control for improving electrospark coating properties. *Surface and Coatings Technology*. 204. 2613–2623. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2010.02.006> [in English].
12. Iakovou, R., Bourithis, L., Papadimitriou, G. (2002). Synthesis of boride coatings on steel using plasma transferred arc (PTA) process and its wear performance. *Wear*, 252. 1007–1015. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(02\)00056-X](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(02)00056-X) [in English].
13. Lobachova, H. H. (2012) Poverkhneve zmitsnennia splaviv zaliza elektroiskrovym lehu-vanniam tsyrkoniiem, tytanom, khromom ta khimikoter-michnoi obrobkoiu [Surface strengthening of iron alloys by electrospark alloying with zirconium, titanium, chromium and chemical thermal treatment]: avtoref. dys. ...kand. tekhn. nauk: spets. 05.16.01. Kyiv [in Ukrainian].
14. Prysiazhniuk, P. M., Kryl, Ya. A. (2013) Rozroblennia elektroiskrovyykh pokryttiv na osnovi karbidostalei NbC-stal Hadfilda [Development of electrospark coatings based on carbide steel NbC-Hadfield steel]. *Naukovyi visnyk Ivano-Frankivskoho natsionalnoho tekhnichno-ho universytetu nafty i hazu*. 2. 155–164. [in Ukrainian].
15. Hadalov, V. N., Abashkin, R. Ye. (2011) Zmitsnennia shvydkorizalnykh stalei [Strengthening of high-speed steels]. *Suchasni instrumentalni systemy, informatsiini tekhnologii ta innovatsii: materialy VIII Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konfe-rentsii: u dvokh chastynakh*, 119–124 [in Ukrainian].

16. Spisib nitrotsementatsii poverkhon stalevykh detalei metodom elektroiskrovoho lehuвання (EIL): pat. 150385 Ukrainy na korysnu mo-del, MPK (2006), B23H 1/00, B23H 5/00, B23H 9/00, C23C 8/20 (2006.01), C23C 8/22; zaiavl. 30.08.2021; opubl. 10.02.2022, Biul. № 6 [in Ukrainian].
17. Tarelnyk, V. B., Gaponova, O. P., Melnyk, V. I. (2023). The Surfaces Properties of Steel Parts with Wear-Resistant Coatings of the 1M and 90 % BK6 + 10 % 1M Composition Applied by the Method of Electrospark Alloying with the Use of Special Technological Environments. The Strengthened-Surfaces' Structural State Features. *Metalo fizika I noveishie tekhnologii*. 45. Pt. 1. 663–686. <https://doi.org/10.15407/mfint.45.05.0663>
18. Tarelnyk, V. B., Gaponova, O. P., Tarelnyk, N. V. (2023). The Surfaces Properties of Steel Parts with Wear-Resistant Coatings of the 1M and 90 % BK6 + 10 % 1M Composition Applied by the Method of Electrospark Alloying with the Use of Special Technological Environments. Wear Resistance, Topographic and Mechanical Properties. *Metalo fizika I noveishie tekhnologii*. 45. Pt. 2. 773–794. <https://mfint.imp.kiev.ua/ua/abstract/v45/i06/0773.html>
19. Gaponova, O. P., Okhrimenko, V. O., Tarelnyk, N. V. (2024). Pidvyshchennia efektyvnosti tekhnologii nitrotsementatsii metodom elektroiskrovoho lehuвання [Improving the efficiency of nitrocementation technology with electrospark alloying]. *Visnyk sumskoho natsionalnoho ahrarnoho universytetu: naukovyi zhurnal*. 2(56). 27–33. <https://doi.org/10.32782/msnau.2024.2.4> [in Ukrainian].
20. Tarelnyk, V. B., Konoplianchenko, Ye. V. (2020). *Problemy ekspluatatsii kom-presornoho ta nasosnoho obladnannia v suchasniy promyslovosti* [Problems of operation of compressor and pumping equipment in modern industry]: monohrafiia [in Ukrainian].
21. Yin, K., Bian, X., Han, N. (2006). Effect of the addition of Al-Ti-C master alloy on the microstructure and microhardness of a cast Al-10Mg alloy. *Journal of University of Science and Technology Beijing, Mineral, Metallurgy, Material*. 13. 149–153. [https://doi.org/10.1016/S1005-8850\(06\)60033-9](https://doi.org/10.1016/S1005-8850(06)60033-9) [in English].
22. Shafeyi, H., Salehi, M., Bahrami, A. (2020). Fabrication, microstructural characterization and mechanical properties evaluation of Ti/TiB/TiB₂ composite coatings deposited on Ti6Al4V alloy by electro-spark deposition method. *Ceramics International*. 46. 15276–15284. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.03.068> [in English].
23. Zamulaeva, E. I., Levashov, E. A., Sviridova, T. A. (2013). Pulsed electrospark deposition of MAX phase Cr₂AlC based coatings on titanium alloy. *Surf. Surface and Coatings Technology*. 235. 454–460. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2013.08.002> [in English].
24. Radko, O. V. Kumurzhy, O. Yu. (2013). Abrazyvna stiiikist stali 46Kh13 pislia zmitsnennia metodom termotsyklichnoho ionno-plazmovoho azotuvannia [Abrasive resistance of steel 46X13 after strengthening by the method of thermocyclic ion-plasma nitriding]: *zbirnyk naukovykh prats Kharkivskoho universytetu Povitrianykh Syl*, 34. 156–160 [in Ukrainian].
25. Khranovska, K. M. Mazanko, V. F., Ivashchenko, Ye. V., Lobachova, H. H. (2010). Vplyv seredovyscha lehuвання ta dodatkovoho azotuvannia na mikrotverdist, strukturu ta fazovyi sklad zaliznoi pidkladky [Influence of the alloying environment and additional nitriding on the microhardness, structure and phase composition of the iron substrate]. *Fizychna inzheneriia poverkhni*. 4. 371–375 [in Ukrainian].
26. Borodii, Yu. P. (2013). *Pidvyshchennia stiiikosti rozdilovykh shtampiv kombinovanyymi metodamy poverkhnevoho zmitsnennia* [Increasing the stability of separation stamps by combined methods of surface strengthening]: avto-ref. dys. ...kand. tekhn. Nauk: 05.03.05 [in Ukrainian].
27. Ivashchenko, Ye. V., Lobachova, H. H., Mazanko, V. F. (2010). Formuvannia poverkhnevoho zmitsnenoho sharu pry khimiko-termichnii obrobtii zaliza, poiednani z elektroiskrovym lehuванняm [Formation of a surface hardened layer during chemical and thermal treatment of iron combined with electrospark alloying]. *Metalo znastvo ta obrobka metaliv*. 39–42 [in Ukrainian].
28. Kaplun, P. V. *Naukovo-prikladni osnovy zastosuвання bezvodnevoho ionnoho azotuvannia dlia pidvyshchennia kontaktnoi mitsnosti trybosystem* [Scientific-applied foundations of the use of anhydrous ionic nitriding to increase the contact strength of tribosystems]: dys. ...d-ra tekhn. nauk [in Ukrainian].
29. Afanasieva, O. V., Lalazarova, N. O., Fedorenko, Ye. P. (2020). *Lazerna poverkhneva obrobka materialiv* [Laser surface treatment of materials]: monohrafiia [in Ukrainian].
30. Yerko, O. O., Kopylov, V. I. (2018). Abrazyvna znosostiikist elektroiskrovyykh kompozytsiynykh pokryttiv na osnovi ZrB₂ [Abrasive wear resistance of electrospark composite coatings based on ZrB₂]: *materialy konferentsii, VI vseukrainska naukovo-tekhnicna konferentsiia ctudentiv, aspirantiv ta naukovykh spivrobitnykiv* 5–6.
31. Labunets, V. F. Prysiazhniuk, V. V., Melnyk, O. V. (2019). Elektroiskrove lehuвання konstrukt-siinoi lehovanoi stali 30KhHSA dlia detalei vuzliv tertia [Electric Spark Alloying of Structural Alloyed Steel 30HGSNA for Parts of Friction Units]. *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu*. 5. 81–84 [in Ukrainian].
32. Gaponova, O. P., Tarelnyk, N. V., Okhrimenko, V. O. (2023). Vplyv enerhetychnykh parametriv i chasu lehuвання na yakist alitovanykh pokryttiv, otrymanykh metodom elektroiskrovoho lehuвання [The influence of energy parameters and al-

- loying time on the quality of alite coatings obtained by the method of electrosark alloying]. *Kompleksne zabezpechennia yakosti tekhnologichnykh protsesiv ta system (KZiATPS – 2023) tezy dopovidei XIII Mizhnarodnoi naukovopraktychnoi konferentsii* 57–58.
33. Mazuryk, A. O., Melashenko, K. V., Lobachova, H. H. (2015). Elektroiskrove lehuвання stali st.3 nikelom, volframom ta vuhletsem [Electrosark alloying of grade 3 steel with nickel, tungsten and carbon]. *Materialy IV Mizhnarodnoi naukovotekhnichnoi konferentsii molodykh uchenykh ta studentiv. Aktualni zadachi suchasnykh tekhnologii*. 62 [in Ukrainian].
34. Xie, Y.J., Wang, M.C. (2006) Epitaxial MCrAlY coating on a Ni-base superalloy produced by electrosark deposition. *Surface and Coatings Technology*. 201. 3564–3570. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.08.107> [in English].
35. Umanskyi, O., Poliarus, O., Ukrainets M., Antonov M. (2015) Physical-Chemical Interaction in NiAl-MeB₂ Systems Intended for Tribological Applications. *Welding Journal*. 94. 225–230 [in English].
36. Konoval, V. P., Umanskyi, O. P., Pa-nasiuk A.D., Lukianchuk O.F. (2014) Vplyv khimichnoho skladu elektrodnykh materialiv ta rezhymiv lehuвання na vlastyvoli elektrosarkovykh pokryttiv. I. Intensyvni masoperenosu ta sklad pokryttiv [The influence of the chemical composition of electrode materials and doping regimes on the properties of electrosark coatings. I. Intensity of mass transfer and composition of coatings]. *Poroshkova metalurhiia*. 01/02. 41–51 [in Ukrainian].
37. Zavoiko, O. S. (2003). *Teoretychni osnovy elektrotekhnologii zmitsnennia metaliv* [Theoretical foundations of electrotechnology of metal strengthening]; Navch. posibnyk. Chernivtsi: Ruta.
38. Zavoiko, O. S. (2009). *Teoriia mizhatomnykh peretvoren pokryttiv, metaliv i splaviv fizychnoho materialoznavstva* [The theory of interatomic transformations of coatings, metals and alloys of physical materials science]. t. 1. Chernivtsi: Ruta [in Ukrainian].
39. Zavoiko, O. S. (2012). *Teoretychne materialoznavstvo v teoriakh mizhatomnykh peretvoren pokryttiv, metaliv, splaviv* [Theoretical materials science in the theories of interatomic transformations of coatings, metals, alloys]. T. 4. Chernivtsi: Ruta [in Ukrainian].

Гапонова Оксана Петрівна, д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри прикладного матеріалознавства та технології конструкційних матеріалів, телефон +38 0542-64-09-49,

gaponova@pmtkm.sumdu.edu.ua

Охріменко Віктор Олександрович, аспірант, кафедра прикладного матеріалознавства та технології конструкційних матеріалів, +380956515610

v.okhrimenko@pmtkm.sumdu.edu.ua.

Дегула Андрій Іванович, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри прикладного матеріалознавства та технології конструкційних матеріалів degula@pmtkm.sumdu.edu.ua

Сумський державний університет, вул. Харківська, 116, Суми, 40007.

Application of electro-spark alloying methods for improving the quality of surface layers of metal parts: factors and prospects

Abstract: Problem. In modern mechanical engineering, there is a need to implement advanced technologies to enhance the service life and reliability of components and tools, particularly under extreme conditions. Electro-spark deposition (ESD) is a promising technique for surface modification, but existing studies primarily focus on its energetic aspects, leaving productivity insufficiently explored. This limits ESD's wider adoption in the industry. **Goal.** The goal is to optimize the ESD process parameters to maximize its effects, consider specific material requirements and operating conditions, and to explore potential integrations of ESD with other treatment methods, such as chemical-thermal and laser processing. **Methodology.** The research involves analyzing the ESD process to determine how adjusting various parameters-such as energy, electrode material, alloying environment, processing speed, and cooling mode-affects the quality, durability, and protective properties of coatings against corrosion and wear. **Results.** The study highlights that a comprehensive approach to optimizing ESD parameters can lead to high-quality coatings, improving production efficiency, lowering costs, and enhancing the overall competitiveness of manufacturing enterprises. **Originality.** The research offers novel insights by focusing on previously underexplored productivity factors in the ESD process, proposing parameter optimizations to achieve effective surface coatings. **Practical Value.** The optimized ESD process can reduce manufacturing costs, enhance coating durability and quality, and increase competitiveness in industries requiring high-performance surface treatments.

Key words: electrosark alloying, coating, tribology, white layer, diffusion.

Gaponova Oksana, D.Sc. Professor, Head of the Department of Applied Material Science and Technology of Constructional Materials, ORCID: 0000-0002-4866-0599, gaponova@pmtkm.sumdu.edu.ua

Okhrimenko Viktor, PhD student, Department of Applied Material Science and Technology of Constructional Materials ORCID: 0000-0002-3119-8262, v.okhrimenko@pmtkm.sumdu.edu.ua

Degula Andrii, PhD, Assistant Professor, Department of Applied Material Science and Technology of Constructional Materials ORCID: 0000-0003-4098-6145, degula@pmtkm.sumdu.edu.ua
Sumy State University, 116 Kharkivska St., Sumy, 40007, Ukraine.

