

МОДИФІКАЦІЯ ПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ КОНСТРУКЦІЙНИХ СТАЛЕЙ УДОСКОНАЛЕНИМ МЕТОДОМ ЦЕМЕНТАЦІЇ ЕЛЕКТРОІСКРОВИМ ЛЕГУВАННЯМ

Оксана Гапонова

доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри прикладного матеріалознавства та технології конструкційних матеріалів

Сумський державний університет, вул. Харківська, 116, Суми, Україна, 40007,
gaponova@pmtkm.sumdu.edu.ua

ORCID: 0000-0002-4866-0599

Віктор Охріменко

аспірант кафедри прикладного матеріалознавства та технології конструкційних матеріалів

Сумський державний університет, вул. Харківська, 116, Суми, Україна, 40007
v.okhrimenko@pmtkm.sumdu.edu.ua

ORCID: 0000-0002-3119-8262

Наталія Тарельник

кандидат економічних наук, доцент кафедри проектування технічних систем

Сумський державний університет, вул. Харківська, 116, Суми, Україна, 40007, natasha-tarelnik@ukr.net

ORCID: 0000-0002-6304-6925

У статті представлено дослідження інноваційного підходу до цементациї конструкційних сталей, що базується на використанні електроіскрового легування (ЕІЛ). Метою роботи є розробка та вдосконалення технології формування високоякісних покриттів, здатних значно підвищити зносостійкість та довговічність металевих деталей, мінімізуючи при цьому недоліки традиційних високотемпературних методів. Особливу увагу приділено технологічним особливостям виконання поверхневої обробки. Удосконалений метод ЕІЛ включає попередню обробку алюмінієвим електродом-інструментом, нанесення графітовмісної пасти та подальшу цементацию графітовим електродом при різних режимах обробки. Методика дослідження охоплювала аналіз шорсткості поверхні, металографічні дослідження мікроструктури (товщина та суцільність шарів), рентгеноструктурний аналіз фазового складу, вимірювання мікротвердості. Результати підтвердили, що збільшення енергії розряду підвищує товщину білого зміцненого шару та дифузійної зони. Виявлено утворення карбідів заліза ($\text{C}_{0.055}\text{Fe}_{1.945}$) та карбіду алюмінію (Al_4C_3), причому алюмінієвий підшар відіграє критичну роль у формуванні фаз, які підвищують твердість. Запропонований метод значно збільшує мікротвердість та покращує суцільність цементованого шару на сталях марок 20 і 40, при цьому практично не погіршуючи шорсткість поверхні. Таким чином, пропонується комбінована технологія поверхневого зміцнення методом ЕІЛ демонструє високу ефективність у скороченні часу процесу та модифікуванні структури покриття, що робить її перспективною для застосування у машинобудуванні для підвищення експлуатаційних характеристик відповідальних деталей.

Ключові слова: електроіскрове легування, мікроструктура, цементация, сталь, фазовий склад, мікротвердість.

Вступ. У сучасному машинобудуванні та матеріалознавстві постійно зростає попит на підвищення зносостійкості та довговічності металевих деталей, що працюють у складних експлуатаційних умовах. Зношування деталей є однією з ключових проблем, яка значно скорочує термін служби машин та механізмів, призводячи до простоїв та значних економічних втрат [1]. Для протидії цьому широко використовуються методи поверхневого зміцнення, що модифікують поверхневі шари матеріалу, надаючи їм підвищену твердість та опір зносу. Серед таких

методів цементация (насичення поверхневого шару вуглецем) є однією з найбільш ефективних і давно застосовуваних технологій [2]. Вона дозволяє створювати міцні поверхневі шари, що забезпечують високу стійкість до зношування, що є критично важливим для деталей, які експлуатуються у важких умовах, наприклад, у трансмісіях або елементах тертя [3].

Проте традиційні методи цементациї, що ґрунтуються на дифузійному насиченні поверхні за високих температур, мають ряд недоліків. До них належать значне енергоспоживання, необхідність

нагрівання всієї деталі до високих температур (що може призвести до її деформації), а також тривалий час, потрібний для досягнення необхідної глибини насичення вуглецем [4, 5]. Ці обмеження спонукають дослідників до пошуку нових, більш ефективних та економічних технологій.

Електроіскрове легування (ЕІЛ) відкриває нові можливості, забезпечуючи локальне зміцнення поверхні без значного термічного впливу на весь виріб [6]. ЕІЛ – це імпульсний процес, під час якого короточасні електричні розряди між електродом і оброблюваною поверхнею спричиняють локальне плавлення та перенесення матеріалу, внаслідок чого формується покриття з високою адгезією [7]. Цей метод дає змогу модифікувати робочу поверхню, створювати функціональні покриття із застосуванням електродів-інструментів (ЕІ) зі заздалегідь визначеним хімічним складом. Застосовуючи графітові ЕІ, можна здійснювати цементацію методом ЕІЛ у конкретних зонах без потреби в нагріванні всієї деталі, що робить цю технологію енергоощадною та екологічно чистою [8, 9]. Більше того, завдяки високим швидкостям охолодження, характерним для ЕІЛ, можна формувати унікальні мікроструктури, такі як нанокристалічні або аморфні, що додатково покращує властивості покриття [7].

Об'єднання переваг технології цементації з унікальними можливостями ЕІЛ дозволяє створювати високоякісні вуглецеві покриття з покращеними фізико-механічними характеристиками.

Аналіз основних публікацій. Ефективність цементації методом електроіскрового легування (ЕІЛ), як сучасного підходу до формування поверхневих шарів металевих деталей, значною мірою залежить від численних взаємопов'язаних факторів. Дослідження показали, що одним із ключових аспектів є енергетичні параметри розряду, які безпосередньо впливають на характеристики утвореного покриття. Зокрема, зі збільшенням енергії розряду часто спостерігається погіршення шорсткості поверхні, що вказує на потребу в оптимізації методики [10].

Для усунення цих недоліків та подальшого удосконалення методу ЕІЛ активно досліджуються інтегровані підходи, що поєднують його з іншими технологіями поверхневої обробки. Прикладом є комбінування ЕІЛ з поверхневою пластичною деформацією (ППД), лазерною обробкою або нанесення після ЕІЛ метал-полімерних композитів, які, згідно з роботами авторів [11-13], демонструють значне покращення властивостей. Процес ЕІЛ допомагає створити

покриття зі струмопровідних, неструмопровідних матеріалів, пастоподібних сумішей тощо [14-17].

Детальний аналіз впливу параметрів роботи обладнання ЕІЛ у широкому діапазоні енергій розряду (W_p) представлений у роботах [16, 17]. Ці дослідження підкреслюють, що такі характеристики, як амплітуда струму, тривалість імпульсу та частота розрядів, відіграють критичну роль у формуванні поверхневого шару. Крім того, налаштування електричної схеми та параметрів генератора імпульсів є необхідними для досягнення оптимальних результатів.

Час нанесення покриття при ЕІЛ також має суттєве значення для визначення глибини та якості утвореного модифікованого шару. Дослідження матеріалів електродів виявляють, що їхній вибір істотно впливає на результати взаємодії з основним матеріалом деталі, змінюючи хімічний склад і морфологію покриття. Середовище в якому відбувається ЕІЛ, визначає хімічні реакції на поверхні деталі, що необхідно враховувати для досягнення бажаних властивостей. Також, розташування електродів впливає на розподіл електричного струму та теплових потоків на поверхні деталі, що безпосередньо позначається на рівномірності та якості легованого шару [17].

Незважаючи на значний потенціал методу ЕІЛ для формування високоякісних поверхневих шарів металевих деталей, існують певні ключові проблеми, які вимагають подальшого наукового осмислення та вдосконалення. Зокрема, погіршення шорсткості поверхні при збільшенні енергії розряду є однією з таких проблем при виготовленні відповідальних виробів таких як підшипники ковзання, вали, шестерні та інші [10]. У цих випадках після ЕІЛ може знадобитися додаткова фінішна обробка, така як полірування, шліфування, хонінгування, щоб досягти необхідного рівня шорсткості. Підвищені рівні енергії можуть призводити до нерівномірності та збільшення мікроефектів на поверхні, що ускладнює подальші операції фінішної обробки та обмежує застосування деталей у високонавантажених вузлах.

Крім того, варто враховувати, що зниження продуктивності процесу ЕІЛ може негативно позначитися на кінцевій якості покриттів. Дослідження показують, що це призводить до зменшення товщини "білого" шару та дифузійної зони, а також до зниження мікротвердості, що погіршує захисні властивості отриманих покриттів [10-14]. Також, неоднорідність покриття є ще

одним викликом, оскільки порушення технології ЕІЛ може призвести до нерівномірного легування по всій площі поверхні виробу [17].

Склад робочого середовища є фактором, що визначає фазовий склад та кінцеві властивості поверхневого шару, утвореного електроіскровим легуванням [17]. Процес може відбуватися в різних середовищах: повітря, захисний газ, вакуум, рідини, пасту тощо. Кожен варіант середовища по-своєму впливає на хімічні реакції в зоні розряду, дозволяючи контролювати формування покриття або, навпаки, вносити небажані домішки.

При проведенні ЕІЛ на повітрі кисень та азот можуть активно взаємодіяти з розплавленим металом, утворюючи оксиди або нітриди. Хоча це економічно вигідно, такий метод менш контрольований. Для точнішого формування шару використовують захисні газові середовища, такі як інертний аргон або гелій, що запобігають небажаним реакціям [18], або реакційні гази (наприклад, азот чи метан) для цілеспрямованого введення елементів у покриття, як це робиться при отриманні нітридних або карбідних шарів [4]. ЕІЛ також може відбуватися в рідинних середовищах – діелектричних для стабілізації розряду, або з активними компонентами для додаткового легування, що розширює можливості модифікації поверхні [7].

Особливо ефективними є спеціальні насичувальні середовища (СНС) у вигляді паст, що складаються з порошків легуючих елементів та сполучних речовин. СНС дозволяють точно дозувати та вводити в зону розряду різні компоненти (наприклад, графіт, бор), які важко використовувати як електроди. Це сприяє формуванню унікальних фаз, що значно підвищує твердість, зносостійкість або корозійну стійкість покриття [6, 16].

Хоча використання СНС може збільшити витрати матеріалів та часу на їх приготування, це виправдано можливістю формування високоякісних, функціональних покриттів зі специфічними властивостями, які неможливо досягти іншими методами.

Сьогодні активно проводяться дослідження, спрямовані на вивчення та коригування параметрів ЕІЛ, визначення умов для зниження шорсткості поверхні, підвищення продуктивності та узагальнення впливу різних факторів на формування покриттів. Оптимізація параметрів енергетичних, часових та геометричних параметрів, а також врахування різноманітних фізико-хімічних факторів є ключовим для подальшого покращення якості та розширення сфер застосування технології ЕІЛ у виробництві та промисловості.

Метою даної роботи є вдосконалення технології цементації конструкційних сталей за допомогою електроіскрового легування (ЕІЛ) з використанням вуглецевмісних матеріалів та алюмінієвого підшару, що спрямована на підвищення якості, товщини та суцільності зміцнених поверхневих шарів, а також вдосконалення процесу для досягнення бажаних експлуатаційних характеристик деталей.

Методика дослідження. Для досягнення поставлених цілей щодо підвищення якості, товщини та суцільності зміцнених поверхневих шарів конструкційних сталей, нами розроблено та застосовано інноваційний підхід до цементації, що базується на комбінації традиційних принципів насичення вуглецем з перевагами електроіскрового легування (ЕІЛ). Цей метод дозволяє мінімізувати недоліки високотемпературної обробки та забезпечити локалізоване зміцнення поверхні. На рисунку 1 подана схема ЕІЛ.

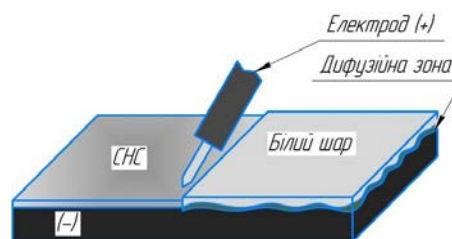


Рис. 1. Схема нанесення покриття за допомогою ЕІЛ

Зміцнення поверхонь здійснювалося на зразках зі сталі марки 20 та 40 розміром 15×15×8мм. Обробка проводилася на установці ЕІЛ моделі "Елітрон-52А" (рис. 2), яка забезпечує регулювання енергії розряду (W_p) в діапазоні 0,05–6,80Дж. Для даного дослідження були обрані наступні значення енергії розряду: 0,13Дж, 0,52Дж та 3,40Дж.



Рис. 2. Установа «Елітрон-52А» для проведення ЕІЛ

Процес цементації методом ЕІЛ включав основні етапи:

1) ЕІЛ алюмінієм – алітування. В якості електрода-інструмента використовували алюмінієвий дріт діаметром 3,0 мм марки АТ (ГОСТ 14838-78). Нанесення алюмінію проводилося при енергіях розряду 0,13 Дж, 0,52 Дж та 3,40 Дж.

2) Нанесення СНС на алітовану поверхню. Склад СНС: 80% порошку графіту та 20% вазеліну.

3) Цементация графітовим електродом. Як ЕІ використовували графітовий стрижень марки ЕГ-4 розміром 3×3×25 мм. Обробка проводилася при енергіях розряду 0,13 Дж, 0,52 Дж та 3,40 Дж.

Для всебічної оцінки характеристик отриманих покриттів проводився комплекс досліджень. Шорсткість поверхні зразків після ЕІЛ визначалася за допомогою приладу профілограф-профілометр мод. 201 заводу «Калібр». Результати вимірювань відображалися на моніторі комп'ютера у вигляді профілограм.

Для вивчення мікроструктури, оцінки суцільності, товщини та будови зон (білого зміцненого шару, дифузійної зони та зони термічного впливу) підготовлених зразків використовувався оптичний мікроскоп «МІМ-7». Підготовка зразків виконувалася за стандартною методикою.

Розподіл мікротвердості в поверхневому шарі та по глибині шліфу від поверхні визначався на мікротвердомірі ПМТ-3. Вимірювання проводилися вдавлуванням алмазної піраміди під навантаженням 0,05 Н згідно до ГОСТ 9450-76.

Фазовий склад покриттів досліджувався за допомогою дифрактометра ДРОН-3 у СоКа-випромінюванні. Параметри зйомки: анодна напруга 30 кВ, анодний струм 24 мА. Рентгенограми виконувалися за схемою покрокового сканування з експозицією 2 секунди на кожній точці. Обробка отриманих даних проводилася з використанням програмного забезпечення.

Результати дослідження. Аналіз мікроструктури покриттів, отриманих методом ЕІЛ, виявив їхню типову будову: білий зміцнений шар, дифузійна зона та основа. Білий шар, що утворюється безпосередньо під впливом електричних розрядів, характеризується унікальною мікроструктурою, обумовленою надзвичайно високими температурами та тисками в зоні розряду, а також подальшим швидким охолодженням. Дифузійна зона, розташована між білим шаром та основою, є результатом проникнення елементів з електродів та насичувальної пасту в базовий матеріал.

На рис. 3, а представлена мікроструктура зразка сталі 20, що пройшла електроіскрове легування алюмінієм ($W_p=3.4$ Дж). Зображення наочно показує чітке відокремлення алюмінієвого покриття від основного металу. Рис. 3, б зображає мікроструктуру після цементації на сталі 20.

Білий шар, який утворився на поверхні металів, часто описуються в науковій літературі як такий, що має мартенситно-аустенітну структуру. Ця структура характеризується дрібногочастою морфологією та високою щільністю дефектів у кристалічній ґратці. Формування таких дрібногочастих структур у "білому шарі" зазвичай пояснюється субструктурною взаємодією дефектів у кристалічній структурі матеріалу.

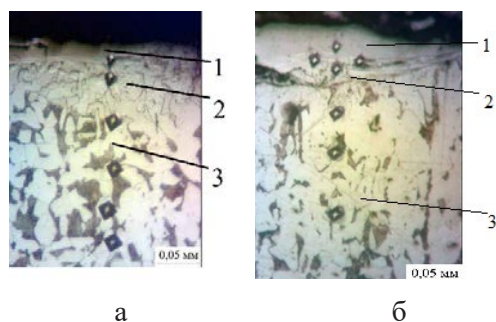


Рис. 3. Мікроструктура поверхневого шару зразка сталі 20 після ЕІЛ: а - електродом-інструментом з алюмінію, $W_p=0,52$ Дж; б - після цементації ЕІЛ за запропонованої технології, $W_p=0,52$ Дж. Позначки: 1 – «Білий шар»; 2 – Зона дифузії, 3 – Зона основного металу

Під "білим шаром" розташована дифузійна зона. Для неї характерна неповна перекристалізація, тобто поряд із новими зернами, що виникли внаслідок термічного впливу, співіснують також зерна вихідного металу.

Безпосередньо під дифузійною зоною знаходиться основний метал, який у випадку сталі 20 має типову ферито-перлітну структуру.

Дослідження показали, що товщина білого шару та дифузійної зони зростає зі збільшенням енергії розряду (табл. 1) під час нанесення алюмінієвого підшару. Це свідчить про інтенсифікацію процесів масопереносу та дифузії вуглецю при вищих енергетичних режимах. Енергія розряду також суттєво впливає на механічні характеристики покриття, що підтверджує можливість контролювати властивості модифікованого шару шляхом регулювання енергетичних параметрів ЕІЛ.

Рентгенівський дифракційний аналіз зразків після цементації з попередньо нанесеними алю-

Таблиця 1

Якісні параметри ЦЕІЛ, отримані на сталі 20 та сталі 40

Енергія розряду, Дж	Товщина зміцненого шару, мкм	Мікротвердість зміцненого шару, МПа	Шорсткість поверхні, Ra, мкм	Суцільність покриття, %
Без підшару алюмінію [18]				
Сталь 20				
0,13	50-70	9932	1,0	100
0,52	80-100	10796	3,7	
3,4	100-230	10796	4,8	
Сталь 40				
0,13	60-80	11351	1,0	100
0,52	90-110	11787	3,8	
3,4	130-240	11824	4,7	
З підшаром алюмінію при Wp = 0,13 Дж				
Сталь 20				
0,13	55-75	10153	1,0	100
0,52	85-110	11930	3,6	
3,4	100-230	11995	4,8	
З підшаром алюмінію при Wp = 0,52 Дж				
Сталь 20				
0,13	60-80	10 320	1,0	100
0,52	90-120	11 950	3,8	
3,4	130-240	12100	4,8	
З підшаром алюмінію при Wp = 3,40 Дж				
Сталь 20				
0,13	70-90	10370	1,0	100
0,52	100-130	12050	3,7	
3,4	140-260	12200	4,9	
З алюмінієвим підшаром при Wp = 0,13 Дж				
Сталь 40				
0,13	80-100	11760	1,0	100
0,52	110-140	12240	3,7	
3,4	140-280	12375	4,9	

мінієвими підшарами методом ЕІЛ дозволив ідентифікувати ключові фази, що утворюються. Виявлено наявність об'ємноцентрованої кубічної (ОЦК) легованої феритної фази, дифракційні піки якої повністю перекриваються з піками тетрагонального карбіду заліза $C_{0.055}Fe_{1.945}$. Присутність цього карбіду заліза є прямим свідченням успішного насичення поверхні вуглецем. Крім того, були ідентифіковані дифракційні піки ромбоєдричного карбіду алюмінію Al_4C_3 .

Аналіз фазового складу покриттів засвідчив, що наявність алюмінієвого проміжного шару відіграє критичну роль у формуванні фаз, які значно підвищують твердість зміцненого шару.

Утворення карбіду алюмінію та його взаємодія з карбідами заліза сприяє утворенню твердих структур на поверхні.

Цементация сталей марок 20 і 40 за допомогою ЕІЛ при різних значеннях енергії розряду (W_p) призводить до значного підвищення мікротвердості поверхневого шару. Це є прямим наслідком утворення твердих карбідних фаз (карбідів заліза та алюмінію) та модифікації мікроструктури, що позитивно може вплинути на стійкість до зношування.

Дослідження показали, що запропонований метод цементации сприяє покращенню суцільності "білого" шару. Це важливо для забезпечення

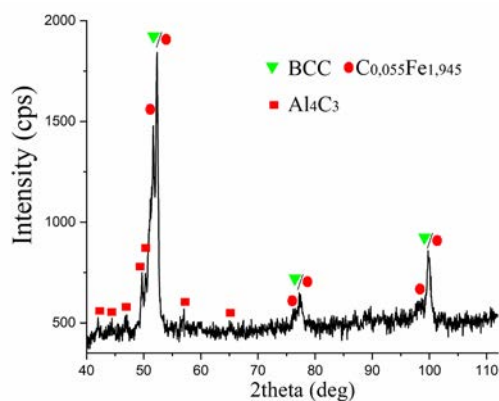


Рис. 4. Рентгенограми поверхневих шарів зразків зі сталі 40 з підшаром алюмінію після обробки методом ЕІЛ при $W_p = 0,52$ Дж

рівномірного захисту поверхні від зношування та підвищення її довговічності.

ЦЕІЛ сталей 20 і 40 методом ЕІЛ збільшує шорсткість поверхні пропорційно зростанню енергії розряду (W_p) (табл. 1). Це пов'язано з інтенсивнішим плавленням і випаровуванням матеріалу при вищих енергіях, що призводить до утворення глибших кратерів. Проте, попереднє нанесення алюмінієвого підшару методом ЕІЛ суттєво зменшує інтенсивність цього зростання шорсткості.

Таке зменшення шорсткості пояснюється кількома факторами: алюмінієвий підшар виступає захисним бар'єром, знижуючи пряму ерозію сталі; його пластичність сприяє утворенню більш однорідних розплавів та рівномірнішому застиганню; і, формування карбідів алюмінію в покритті сприяє утворенню щільнішої та гладкішої структури. Таким чином, алюмінієвий підшар не тільки покращує механічні властивості, але й позитивно впливає на топографію поверхні.

Запропонований метод цементації з використанням електроіскрового легування значно скорочує час насичення вуглецем порівняно з традиційними методами (хіміко-терміною обробкою

(ХТО)) та покращує структуру покриття. Це робить його перспективним для обробки відповідальних деталей, де критично важливі підвищені показники зносостійкості та довговічності. Комбінація ЕІЛ з алюмінієвим підшаром демонструє синергетичний ефект, забезпечуючи формування високоякісних, твердих та суцільних карбідних покриттів на поверхні сталевих деталей.

Висновки. Проведене дослідження цементації за допомогою ЕІЛ виявило значний потенціал цього методу для підвищення зносостійкості металевих деталей:

1. ЕІЛ є ефективною альтернативою традиційній цементації, дозволяючи локальне зміцнення поверхонь без значних енерговитрат та термічного впливу на всю деталь.

2. При підвищенні енергії розряду товщина «білого шару» та дифузійної зони збільшується, але також і збільшуються показники шорсткості покриттів.

3. Формування алюмінієвого шару перед сприяє формуванню фаз, зокрема карбідів алюмінію, що підвищує твердість, і може позитивно вплинути на зносостійкість покриттів.

4. Метод забезпечує збільшення мікротвердості та покращення суцільності "білого" шару на сталях 20 і 40, при цьому мінімально впливаючи на шорсткість.

5. Запропонований метод ЕІЛ скорочує час насичення вуглецем і покращує структуру покриття у порівнянні з ХТО, роблячи його перспективним для обробки відповідальних деталей та відкриваючи шлях для подальших досліджень з оптимізації процесу.

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

ЛІТЕРАТУРА

1. Straffelini G., Gialanella A. *Wear of Metals*. Springer, 2017.
2. Totten K., Webster G. E., George B. R. W. *Steel Heat Treatment*. ASM International, 2007. <https://doi.org/10.1201/NOF0849384523>
3. Kareem Almsd J. *Carburizing of Steel. International Journal of Materials Science and Applications*. 2014. V. 4. P. 11–14. <https://doi.org/10.11648/j.ijmsa.s.2015040201.13>
4. Haponova O., Tarelnyk A., Moscicki M., Tarelnyk V. Investigating the effect of electrospark alloying parameters on structure formation of modified nitrogen coatings. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*, Vol. 72, No. 1, 2024, pp. 27–36. <https://doi.org/10.24425/bpasts.2024.150802>
5. Gaponova O., Tarelnyk A., Moscicki M., Tarelnyk V. *The Formation of C-S Coatings by Electrospark Alloying with the Use Special Process Media*. ResearchGate, 2024.

6. Mamu, M. S. Hassan M. M. R. Talukder. Electrosark Alloying of Titanium and Its Alloys: The Physical, Technological, and Practical Aspects. Part I. The Peculiarities of the Mass Transfer and the Structural and Phase Transformations in the Surface Layers and Their Wear and Heat Resistance. ResearchGate, 2014.
7. Gaponova O., Tarelnyk A., Tarelnyk V. Improvement of surface layer quality parameters of steel parts after nitrocarburizing by electrosark alloying method. Part 1. Features of the structural state and topography of steel surfaces after nitrocarburizing. ResearchGate, 2025.
8. Wu D., Li J., Tan J. Research on Wear Resistance of Carbonized 45 Steel by Electro-Spark Deposition Technology. Bulletin of Sumy National Agrarian University. The series: Mechanization and Automation of Production Processes, Vol. 25, No. 1, 2023, pp. 771–778.
9. Haponova O., Tarelnyk V., Mościcki T., Tarelnyk N. Hybrid Surface Treatment Technologies Based on the Electrosark Alloying Method: A Review. Coatings 2025, 15, 721. P 1–26. <https://doi.org/10.3390/coatings15060721>
10. Tarelnyk V. B., Mosina T. V., Pustovoi S. V. Combined surface treatment of steel parts by electrosark alloying and plastic deformation. Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2016. 52(4). 438–444.
11. Mosina T. V. Influence of electrosark alloying modes on the structure and properties of coatings with polymer components. Materials Science. 2013. 49(5). 682–687.
12. Radek N., et al. Effect of technological parameters on the structure and properties of electrosark deposited coatings. Surface and Coatings Technology. 2010. 204(12-13), 2004–2009.
13. Ivashchenko V. I., et al. Formation of wear-resistant coatings by electrosark alloying using powder electrodes. Powder Metallurgy and Metal Ceramics. 2010. 49(7-8), 469–476.
14. Khranovska N. M., et al. Improvement of wear resistance of machine parts by electrosark alloying. Journal of Friction and Wear. 2010. 31(2). 173–177.
15. Zavoiko P. A., et al. Influence of electrosark alloying parameters on the structure and properties of carbon coatings on steel. Functional Materials. 2013. 20(3). 391–396.
16. Sim W. J., et al. Effects of discharge energy on the characteristics of electrosark deposited coatings on tool steel. Surface and Coatings Technology, 2019. 374. 520–529.
17. Renna G., et al. Effect of ElectroSpark Process Parameters on the WE43 Magnesium Alloy Deposition Quality. Materials Today: Proceedings, 2023. 80(Part 1), 600–605.
18. Tarelnyk V. B., Gaponova O. P., Kirik G. V., Konoplianchenko Ye. V., Tarelnyk N. V., Mikulina M. O. Cementation of Steel Details by Electrosark Alloying. Metallofiz. Noveishie Tekhnol. 2020. 42. No. 5. 655–667. DOI: 10.15407/mfint.42.05.0655.

MODIFICATION OF SURFACE LAYERS OF STRUCTURAL STEELS BY AN IMPROVED CARBURIZING METHOD USING ELECTROSPARK ALLOYING

Oksana Gaponova

Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Applied Materials Science and Technology of Constructional Materials

Sumy State University, 116 Kharkivska str., Sumy, Ukraine, 40007, gaponova@pmtkm.sumdu.edu.ua

ORCID: 0000-0002-4866-0599

Viktor Okhrimenko

Postgraduate Student at the Department of Applied Materials Science and Technology of Constructional Materials

Sumy State University, 116 Kharkivska str., Sumy, Ukraine, 40007, v.okhrimenko@pmtkm.sumdu.edu.ua

ORCID: 0000-0002-3119-8262

Nataliia Tarelnyk

Candidate of Economic Sciences, Associate Professor at the Department of Technical Systems Design

Sumy State University, 116 Kharkivska str., Sumy, Ukraine, 40007, natasha-tarelnik@ukr.net

ORCID: 0000-0002-6304-6925

This article presents a study of an innovative approach to the carburization of structural steels based on electrosark alloying (ESA). The work aims to develop and improve a technology for forming high-quality coatings capable of significantly increasing the wear resistance and durability of metal parts, while minimizing the drawbacks of traditional high-temperature methods. Particular attention is paid to the technological features of surface treatment. The improved ESA method includes preliminary treatment with an aluminum electrode-tool, application of a graphite-containing paste, and subsequent carburization with a graphite electrode under various processing conditions. The research methodology covered the analysis of surface roughness, metallographic studies of microstructure (layer thickness and continuity),

X-ray diffraction analysis of phase composition, and microhardness measurements. The results confirmed that increasing the discharge energy enhances the thickness of the white strengthened layer and the diffusion zone. The formation of iron carbides ($C_{0.055}Fe_{1.945}$) and aluminum carbide (Al_4C_3) was detected, with the aluminum sublayer playing a critical role in forming phases that increase hardness. The proposed method significantly increases microhardness and improves the continuity of the carburized layer on 20 and 40 grade steels, practically without impairing surface roughness. Thus, the proposed combined surface strengthening technology using ESA demonstrates high efficiency in reducing process time and improving coating structure, making it promising for use in mechanical engineering to enhance the operational characteristics of critical parts.

Key words: electrospark alloying, microstructure, carburization, steel, phase composition, microhardness.

REFERENCES

1. Straffelini, G., & Gialanella, A. (2017). Wear of metals. Springer.
2. Totten, K., Webster, G. E., & George, B. R. W. (2007). Steel heat treatment. ASM International. <https://doi.org/10.1201/NOF0849384523>
3. Kareem Almsd, J. (2014). Carburizing of steel. International Journal of Materials Science and Applications, 4(2), 11–14. <https://doi.org/10.11648/j.ijmsa.s.2015040201.13>
4. Haponova, O., Tarelnyk, A., Mościcki, M., & Tarelnyk, V. (2024). Investigating the effect of electrospark alloying parameters on structure formation of modified nitrogen coatings. Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences, 72(1), 27–36. <https://doi.org/10.24425/bpasts.2024.150802>
5. Gaponova, O., Tarelnyk, A., Mościcki, M., & Tarelnyk, V. (2024). The formation of C-S coatings by electrospark alloying with the use of special process media. ResearchGate.
6. Mamu, M. S., Hassan, M. M. R., & Talukder, M. (2014). Electrospark alloying of titanium and its alloys: The physical, technological, and practical aspects. Part I. The peculiarities of the mass transfer and the structural and phase transformations in the surface layers and their wear and heat resistance. ResearchGate.
7. Gaponova, O., Tarelnyk, A., & Tarelnyk, V. (2025). Improvement of surface layer quality parameters of steel parts after nitrocarburizing by electrospark alloying method. Part 1. Features of the structural state and topography of steel surfaces after nitrocarburizing. ResearchGate.
8. Wu, D., Li, J., & Tan, J. (2023). Research on wear resistance of carbonized 45 steel by electro-spark deposition technology. Bulletin of Sumy National Agrarian University. Series: Mechanization and Automation of Production Processes, 25(1), 771–778.
9. Haponova, O., Tarelnyk, V., Mościcki, T., & Tarelnyk, N. (2025). Hybrid surface treatment technologies based on the electrospark alloying method: A review. Coatings, 15(6), 721, 1–26. <https://doi.org/10.3390/coatings15060721>
10. Tarel'nyk, V. B., Mosina, T. V., & Pustovoit, S. V. (2016). Combined surface treatment of steel parts by electrospark alloying and plastic deformation. Surface Engineering and Applied Electrochemistry, 52(4), 438–444.
11. Mosina, T. V. (2013). Influence of electrospark alloying modes on the structure and properties of coatings with polymer components. Materials Science, 49(5), 682–687.
12. Radek, N., et al. (2010). Effect of technological parameters on the structure and properties of electrospark deposited coatings. Surface and Coatings Technology, 204(12–13), 2004–2009.
13. Ivashchenko, V. I., et al. (2010). Formation of wear-resistant coatings by electrospark alloying using powder electrodes. Powder Metallurgy and Metal Ceramics, 49(7–8), 469–476.
14. Khranovska, N. M., et al. (2010). Improvement of wear resistance of machine parts by electrospark alloying. Journal of Friction and Wear, 31(2), 173–177.
15. Zavoiko, P. A., et al. (2013). Influence of electrospark alloying parameters on the structure and properties of carbon coatings on steel. Functional Materials, 20(3), 391–396.
16. Sim, W. J., et al. (2019). Effects of discharge energy on the characteristics of electrospark deposited coatings on tool steel. Surface and Coatings Technology, 374, 520–529.
17. Renna, G., et al. (2023). Effect of electrospark process parameters on the WE43 magnesium alloy deposition quality. Materials Today: Proceedings, 80(Part 1), 600–605.
18. Tarelnyk, V. B., Gaponova, O. P., Kirik, G. V., Konoplianchenko, Ye. V., Tarelnyk, N. V., & Mikulina, M. O. (2020). Cementation of steel details by electrospark alloying. Metallofizika i Noveishie Tekhnologii, 42(5), 655–667. <https://doi.org/10.15407/mfint.42.05.0655>



Стаття надійшла 16.06.2025
Стаття прийнята 19.08.2025
Опубліковано 29.09.2025