

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕХНОЛОГІЇ НІТРОЦЕМЕНТАЦІЇ МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОІСКРОВОГО ЛЕГУВАННЯ

Гапонова Оксана Петрівна

доктор технічних наук, професор
Сумський державний університет, м. Суми, Україна
ORCID: 0000-0002-4866-0599
gaponova@pmtkm.sumdu.edu.ua

Охріменко Віктор Олександрович

аспірант
Сумський державний університет, м. Суми, Україна
ORCID: 0000-0002-3119-8262
v.okhrimenko@pmtkm.sumdu.edu.ua

Тарельник Наталія В'ячеславівна

кандидат економічних наук, доцент
Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна
ORCID: 0000-0002-6304-6925
natasha-tarelnik@ukr.net

Шуляк Михайло Леонідович

доктор, технічних наук, професор
Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна
ORCID: 0000-0001-7286-6602
m.l.shulyak@gmail.com

Запропоновано новий метод нітроцементзації сталевих поверхні, заснований на електроіскровому легуванні (ЕІЛ), який полягає в попередній обробці поверхні алюмінієвим електродом з подальшим нанесенням азотвмісної пасту і наступним легуванням графітовим електродом. Цей метод є інноваційним підходом до підвищення зносостійкості та міцності металевих матеріалів типу покриття-основа. Основна мета дослідження полягала у визначенні впливу енергетичних параметрів процесу легування на ключові показники якості отриманих покриттів. Досліджений вплив енергії розряду на товщину шару, мікротвердість, суцільність, шорсткість поверхні. Результати металографічних та дюрOMETричних досліджень свідчать про те, що азотовмісні покриття складаються зі зміцненого «білого» шару, який поступово переходить у дифузійну зону та основний метал. Отримані покриття мають товщину «білого шару» в межах 100-110 мкм. Результати дюрOMETричних свідчать про підвищення мікротвердості до 6800-10380 МПа. Фазовий склад покриттів представлений кубічним нітридом заліза та карбідом заліза, легованим феритом. Використання ЕІЛ дозволяє знизити енерговитрати і час обробки порівняно з традиційними методами хіміко-термічної обробки. Відсутність необхідності в повному нагріванні деталі знижує ризик термічних деформацій і зберігає вихідні механічні властивості основного металу. Запропонований метод нітроцементзації на основі електроіскрового легування є перспективною технологією для зміцнення поверхонь сталевих деталей. Використання комбінованого підходу, який включає попередню обробку алюмінієвим електродом, нанесення азотовмісної пасту та легування графітовим електродом, дозволяє досягти високих показників мікротвердості, товщини та суцільності покриттів. Це відкриває нові можливості для підвищення зносостійкості та довговічності важливих деталей та елементів насосного та компресорного обладнання, сприяючи розвитку сучасних технологій у галузі матеріалознавства та інженерії поверхонь. Подальші дослідження в цьому напрямку можуть бути спрямовані на оптимізацію технологічних параметрів процесу електроіскрового легування з метою підвищення ефективності та якості отриманих покриттів. Це може включати вивчення впливу різних типів електродів, режимів легування та умов обробки на структурні та механічні властивості покриттів.

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

DOI <https://doi.org/10.32782/msnau.2024.2.4>

Вступ. Для удосконалення поверхневих характеристик сталей широко використовується хіміко-термічна обробка. Однією з найпоширеніших технологій є нітроцементация робочих поверхонь деталей машин, що працюють в умовах зношування. Створюючи покриття шляхом

нітроцементации, деталі можна успішно використовувати для важко-навантажених елементів, які працюють у корозійному середовищі та в умовах зношування, таких як зубці шестерень, ходові гвинти верстатів, клапани двигунів внутрішнього згоряння тощо. Основними вимогами

до таких деталей є не лише їх висока стійкість до зношування, але і високі стандарти щодо шорсткості та якості поверхні (Aftandiliants et al. 2012; Maksymov et al. 2007).

Незважаючи на численні переваги методу хіміко-термічної обробки, існують певні недоліки, серед яких важливим є термічний нагрів всієї деталі, що може викликати структурні зміни. Також варто відзначити, що процес нітроцементзації зазвичай виконується в газовому середовищі, для чого потрібне габаритне та високовартісне обладнання. Однак найсуттєвішим недоліком є значна тривалість насичення поверхні, що може негативно впливати на ефективність та економічність виробничого процесу.

Удосконалення технологічного процесу обробки відповідальних деталей машин у сучасних умовах часто досягається за допомогою електроіскрового легування (ЕІЛ) – одного з перспективних методів поверхневого зміцнення виробів. Цей метод дозволяє отримати поверхневий шар із унікальними фізико-механічними і трибологічними властивостями, не впливаючи при цьому на мікроструктуру основного металу (деталі). Перевагою є можливість збільшення товщини зносостійкого поверхневого шару виробів, що в свою чергу дозволяє замінити дорогі матеріали для виготовлення деталей на більш доступні. Технологія ЕІЛ є простою, не вимагає складного і дорогого устаткування, має невисоку електроємність, особливо порівняно з хіміко-термічною обробкою (Tarel'nyk et al. 2016; Mosina 2013; Radek et al 2010).

В останні роки набули популярності комбіновані методи обробки поверхні, які включають в себе поєднання двох чи більше технологій нанесення покриттів, зокрема хіміко-термічну обробку у поєднанні з ЕІЛ (Ivashchenko et al. 2010; Khranovska et al. 2010). Дослідження авторів у (Ivashchenko et al. 2010) вказує на те, що ця технологія може бути використана для обробки деталей, які працюють у умовах тертя. Застосування комбінованих методів дозволяє досягти збільшення товщини та мікротвердості покриття (Khranovska et al. 2010). Автори підкреслюють, що регулювання мікротвердості покриття можливе шляхом зміни послідовності процесу насичення поверхневого шару, що в свою чергу дозволяє вибрати оптимальний режим для конкретного виробу.

У роботі (Zavoiko et al. 2013) вивчено метод отримання покриття шляхом електроіскрового легування в різних газових середовищах, таких як аргон, водень та азот. Легування проводилося за допомогою твердо-сплавних електродів. Визначено, що твердість покриття при послідовному насиченні азотом та твердим сплавом зросла порівняно з нанесенням покриттів у повітряному середовищі.

Однією з перспективних технік обробки для локального зміцнення виробів, при цьому уникаючи повного нагрівання деталі, є лазерна обробка (ЛО). За допомогою ЛО можна досягти підвищення міцності поверхневого шару виробу майже на 40% (Sim et al. 2019). У проведених дослідженнях використовувалося лазерне азотування в газовій камері, заповненій азотовмісним середовищем, здійснене на сталі AISI P21. Ефект зміцнення пояснюється утворенням на поверхні нітридів алюмінію, який присутній у сталі у даному випадку.

Отже, вищеописані методи поверхневого зміцнення виробів, такі як хіміко-термічна обробка, електроіскрове легування (ЕІЛ) та лазерна обробка (ЛО). Перспективними є методи із використанням концентрованих потоків енергії – ЕІЛ та ЛО, вони є представниками сучасних технологій, що забезпечують поверхням унікальні властивості і поліпшують властивості металевих поверхонь. Метод ЕІЛ, завдяки своїй ефективності та простоті устаткування, визначається як багатообіцяючим методом, дозволяє отримувати високоякісні поверхневі структури на металевих деталях. Вивчення впливу енергетичних параметрів та методики обробки дозволяє розробляти оптимальні стратегії легування, а зниження електроємності порівняно із хіміко-термічною обробкою робить його ефективним з точки зору енергозбереження.

Аналіз основних публікацій. Постановка проблеми дослідження. Електроіскрове легування (ЕІЛ) є сучасним методом для формування поверхневих шарів металевих деталей, але його ефективність визначається численними факторами, серед яких особливе значення мають енергетичні параметри. Дослідження показують, що зі збільшенням енергії розряду погіршується шорсткість поверхні, що свідчить про потребу в удосконаленні методики методу. Одним зі шляхів усунення недоліків, що виникають під час ЕІЛ є комбінування з іншими методами поверхневої обробки, наприклад, поверхневою пластичною деформацією (ППД) та використання метал-полімерних матеріалів, які показують свою ефективність згідно з дослідженнями (Tarel'nyk et al. 2016; Mosina 2013).

Загальний успіх методу ЕІЛ виявляється в його здатності створювати покриття з використанням як струмопровідних, так і неструмопровідних матеріалів, використання насичувальних середовищ у вигляді пасти. Це підтверджується результатами наукових досліджень (Radek et al 2010; Ivashchenko et al. 2010; Khranovska et al. 2010; Zavoiko et al. 2013), які демонструють збільшення товщини покриттів, їх мікротвердості та суцільності при використанні удосконалених методів ЕІЛ.

У (Sim et al. 2019; Garonova et al. 2023) представлений аналіз вплив різних параметрів роботи обладнання ЕІЛ в широкому діапазоні енергій розряду (W_p). Вони свідчать про те, що параметри, такі як амплітуда струму, тривалість імпульсу та частота розрядів, впливають на формування поверхневого шару. Також важливо налаштувати електричну схему та параметри генератора імпульсів для досягнення найкращих результатів.

Час, який витрачається на процес ЕІЛ, має значення для глибини та якості утвореного поверхневого шару. Дослідження матеріалів електродів свідчать, що різні матеріали можуть впливати на результати взаємодії з базовим матеріалом деталі по-різному.

Характер середовища, у якому відбувається ЕІЛ, також визначає хімічні реакції на поверхні деталі, що важливо враховувати для досягнення бажаних результатів. Розташування електродів має значення, оскільки воно впливає на розподіл електричного струму та тепла на поверхні деталі.

Усе це свідчить про складний характер методу ЕІЛ і вимагає подальших досліджень для досягнення

оптимальних умов обробки та найкращих результатів у формуванні поверхневих шарів сталевих деталей.

Хоча метод ЕІЛ показав себе як перспективний для формування поверхневих шарів металевих деталей, виявлені в ході наукових досліджень недоліки вимагають його подальшого удосконалення.

Однією з ключових проблем методу є погіршення шорсткості поверхні при збільшенні енергії розряду під час ЕІЛ. Наукові дослідження, зокрема ті, що описані у працях (Okhrimenko. 2022), підтверджують, що підвищені рівні енергії можуть призводити до нерівномірності на поверхні, що ускладнює подальші обробки та використання деталей. Ще однією проблемою є зниження продуктивності процесу ЕІЛ, що може призвести до погіршення якості отриманих покриттів. Дослідження (Tarelnyk et al. 2016; Mosina 2013; Okhrimenko 2022) показують, що значне зниження продуктивності може негативно вплинути на товщину «білого» шару, дифузійну зону та мікротвердість, роблячи покриття менш ефективними. Неоднорідність покриття є ще однією проблемою, оскільки розташування електродів та їх рух може впливати на рівномірність легування на поверхні (Garopova et al. 2023). Крім того, важливо враховувати вплив складу середовища на процес ЕІЛ, оскільки хімічний вміст газів або рідини може визначати якість та характеристики утвореного шару (Garopova et al. 2023). Нарешті, використання спеціального насичувального середовища – пасти, необхідного для створення умов для легування, може призвести до додаткових витрат матеріалів та ресурсів.

Для подолання цих недоліків проводяться дослідження з метою оптимізації параметрів ЕІЛ, визначення умов для зниження шорсткості поверхні, поліпшення продуктивності та узагальнення впливу різних факторів на формування покриттів. Оптимальне поєднання енергетичних та геометричних параметрів, а також врахування різноманітних факторів, сприяє покращенню якості покриттів. Нові дослідження важливі для подальшого розвитку та вдосконалення технології ЕІЛ у виробництві та промисловості.

Мета роботи: вдосконалення технології підвищення якості поверхні виробів виготовлених із конструкційних сталей, шляхом розробки нового способу отримання нітридних покриттів, синтезованих методом електроіскрового легування, дослідження структури та фазового складу отриманих покриттів.

Методика дослідження. Процес нанесення покриття включав два етапи. Першим етапом було нанесення підшарку алюмінію за допомогою установки «Елітрон-52А». Для ЕІЛ використовувалась енергія розряду від 0,13 до 3,40 Дж. Електрод, виготовлений із алюмінієвого дроту діаметром 3,0 мм марки АТ, використовувався для формування шару алюмінію. Потім на оброблену поверхню наносилась пастоподібна суміш, яка складалась з приблизно 45% сечовини та 45% жовтої кров'яної солі, і 10% вазеліну. Електроіскрове легування проводилося електродом-інструментом, у вигляді графітового стержня марки ЕГ-4 та розміром 3х3х25 мм. Для ЕІЛ графітовим електродом використовували таку ж установку і такі ж режими енергії розряду, що і при алітуванні. У якості підкладки використовували сталь 20 і 40.

Оцінка шорсткості поверхні після обробки проводилась за допомогою профілограф-профілометра 201, а результати відображалися у вигляді графіку на екрані комп'ютера.

Металографічний та дюрOMETричний аналізи виконувалися за стандартними методиками, використовуючи оптичний мікроскоп «МІМ-7» та прилад ПМТ-3, відповідно.

Рентгеноструктурний аналіз проводився на дифрактометрі ДРОН-3 у режимі вимірювання СоКа.

Результати дослідження. Звичайно, особливості формування структури покриттів методом ЕІЛ важливі для розуміння процесу і для вдосконалення методу. У сформованому покритті можна виділити три основні ділянки: білий шар, дифузійна зона і основа – сталь.

Білий шар утворюється на поверхні деталі під дією високої температури і високого тиску, що супроводжує електричні розряди. В результаті взаємодії матеріалу деталі з інтенсивною плазмою, що утворюється, відбувається іонізація газів навколишнього середовища та розрядних продуктів, що призводить до утворення білого шару. Цей шар має відмінну мікроструктуру та склад, порівняно з основою (Lobachova. 2012).

Дифузійна зона – це область, що знаходиться між білим шаром і основою. У цій зоні відбувається дифузія металів з електродів та пасти до матеріалу деталі та зворотна дифузія. Цей процес визначає властивості покриття, такі як мікроструктура, хімічний склад і механічні властивості (Lobachova. 2012).

Основа – це базовий матеріал деталі, на якому утворюється покриття. Властивості основи також можуть змінюватися під впливом процесу ЕІЛ, зокрема, вона може пройти певну обробку або змінити свою мікроструктуру через тепло і дифузію металів з електродів (Lobachova. 2012).

Отже, структура покриття, утвореного методом ЕІЛ, складається з різних зон, кожна з яких має свої унікальні характеристики і властивості. Розуміння цих особливостей дозволяє краще контролювати процес та покращувати якість та ефективність отриманих покриттів.

На рисунку 1 представлені мікроструктури поверхневого шару зразка сталі 20 після проведення нітроцементації методом ЕІЛ з попереднім формуванням підшару алюмінію. Він був отриманий за допомогою електрода-інструмента, виготовленого з алюмінію, під час ЕІЛ із енергією розряду $W_p = 3,40$ Дж. Нітроцементація здійснювалась шляхом ЕІЛ графітовим електродом, з попереднім нанесенням азотовмісної пасти. ЕІЛ проводили при $W_p = 0,13; 0,52$ та $3,40$ Дж.

У порівнянні з азотуванням методом ЕІЛ, технологія якого описана у (Garopova et al. 2023), товщина «білого шару» та дифузійна зона після нітроцементації виявилися більшими. Цей ефект особливо помітний, із значним збільшенням параметру товщини, пропорційним зростанню енергії розряду під час нанесення підшару з алюмінію в процесі ЕІЛ.

На рис. 2 представлено графік розподілу мікротвердості у шарі після нітроцементації. На графіку позначені

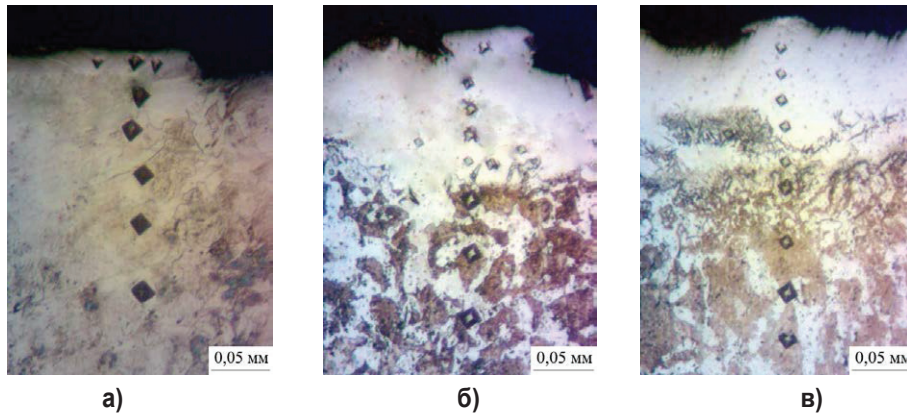


Рис. 1. Мікроструктури нітроцементованого поверхнього шару на сталі 20 з підшаром з алюмінію і легування при енергії розряду: а – 0,13; б – 0,52 і в – 3,40 Дж

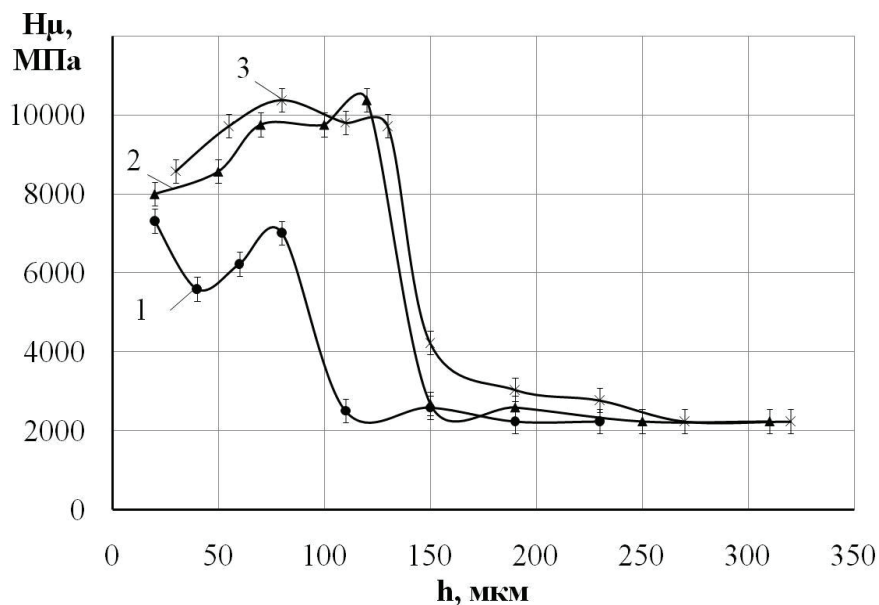


Рис. 2. Розподіл мікротвердості за глибиною нітроцементованого шару від поверхні зразка сталі 20 після ЕІЛ при енергії розряду: 1 – 0,13; 2 – 0,52 і 3 – 3,40 Дж

криві 1, 2 та 3 після ЕІЛ за різних режимів обробки. Необхідно відмітити, що енергія розряду здійснює значний вплив на механічні властивості (твердість) отриманого шару, підкреслюючи важливість управління цими параметрами для досягнення необхідних характеристик матеріалу.

Результати досліджень мікротвердості, товщини і суцільності «білого шару» та вимірювання шорсткості зразків із сталі 20 та сталі 40 після нітроцементування наведені у табл. 1.

Отримані нітроцементовані покриття підлягали рентгеноструктурному аналізу. Виявлено формування ОЦК твердого розчину на основі заліза, кубічного нітриду заліза та карбіду заліза. Рентгенограми представлені на рис. 3. Науково визначено, що у вказаних фазах може відбуватися часткове заміщення атомів вуглецю атомами азоту, що свідчить про важливий етап формування покриття під час процесу ЕІЛ. Крім того, ймовірно, що алюміній може розчинятися як

у фериті, так і в нітриді заліза. Також можлива його присутність у підшарі між покриттям і підкладкою. Ці висновки вказують на складну природу формування фаз та взаємодії елементів під час процесу нітроцементування методом ЕІЛ, що може виявитися значущим для подальших робіт з оптимізації та вдосконалення процесу обробки.

Один із типових фазових складів після нітроцементування методом ЕІЛ включає в себе азотування поверхні за участю атомів азоту. У результаті цієї реакції утворюється азотна фаза, яка може бути різними кристалічними структурами, такими як Fe_4N , Fe_3N , або Fe_2N , залежно від умов процесу та складу вихідних матеріалів. Крім того, може утворюватися карбонітридна фаза, зазвичай $Fe_3(CN)$ (легований цементит), яка є твердою і володіє високою мікротвердістю. Ці фази зазвичай розподілені у матриці твердого розчину на основі заліза.

Фази, утворені під час нітроцементування методом ЕІЛ, можуть значно підвищити твердість поверхнього

Параметри нітроцементованих шарів, отриманих методом ЕІЛ на сталі 20

Енергія розряду, Дж	Товщина «білого» шару, мкм	Мікротвердість «білого» шару, МПа	Шорсткість, мкм			Суцільність «білого» шару, %
			Ra	Rz	Rmax	
Без підшару алюмінію [Tarelnyk et al. 2021 (патент)]						
Сталь 20						
0,13	10-20	6665	0,8	1,9	6,5	80
0,52	30-40	7689	1,2	2,1	8,1	90
3,40	80-110	9731	4,1	11,3	25,1	100
Сталь 40						
0,13	20-30	7135	0,9	2,2	7,3	90
0,52	30-50	7920	1,3	2,7	8,7	100
3,40	80-120	9932	4,7	16,2	35,1	100
3 підшаром алюмінію, отриманого при $Wp = 0,13$ Дж						
Сталь 20						
0,13	10-25	6850	0,9	1,9	7,5	80
0,52	10-30	8010	1,5	2,1	8,3	90
3,40	30-40	9930	5,6	12,4	28,5	100
3 підшаром алюмінію, отриманого при $Wp = 0,52$ Дж						
0,13	20-35	6900	0,9	2,0	7,5	85
0,52	30-45	8300	1,7	2,2	8,7	100
3,40	50-70	9800	5,7	12,7	28,7	100
3 підшаром алюмінію, отриманого при $Wp = 3,4$ Дж						
Сталь 20						
0,13	60-70	7150	1,1	2,1	7,5	90
0,52	60-80	9721	1,6	2,3	9,1	100
3,4	90-110	10050	5,9	13,3	28,9	100
Сталь 40						
0,13	50-70	7320	1,2	2,2	7,3	100
0,52	60-80	10380	1,9	2,9	8,7	100
3,4	80-110	10380	6,3	16,8	31,1	100

шару. Наприклад, азотна фаза має властивості, які сприяють підвищенню мікротвердості та зносостійкості. Карбідна фаза також відома своєю високою твердістю і може значно покращити механічні властивості матеріалу. Додатково, рівномірний розподіл цих фаз у матриці забезпечує більш однорідну твердість та зносостійкість по всій робочій поверхні деталі.

Дослідження інших вчених підтверджують важливість фазового складу для аналізу формування механічних властивостей поверхневого шару, а також визначають оптимальні умови процесу для досягнення бажаних результатів. Наприклад, деякі дослідження показують, що контрольоване азотування може покращити твердість та зносостійкість, але неправильно налаштовані параметри можуть призвести до появи небажаних фаз або дефектів, що негативно впливають на механічні властивості.

Досліджувані методи формування азотвмісних покриттів за допомогою електроіскрового легування (ЕІЛ) можуть бути успішно використані для зміцнення поверхні важливих деталей та елементів компресорного обладнання, таких як поршневі, циліндричні та відцентрові компресори. Це пояснюється декількома причинами:

- підвищення твердості, що призведе до зменшення зношування. Деталі компресорного обладнання, особливо ті, що працюють у важких умовах, часто піддається значному зносу через тривалу експлуатацію. Нанесення нітридних покриттів може підвищити зносостійкість поверхні деталей, зменшуючи потребу в ремонті та підвищуючи їх тривалість служби;

- корозійна стійкість. Відомо, що азотвмісні покриття забезпечують антикорозійні властивості (Baiduch et al. 2009). Елементи компресорного обладнання можуть піддаватися корозії через взаємодію з агресивними середовищами або робочими рідинами. Нітридні покриття утворюють захисний шар на поверхні, що забезпечує стійкість до корозії та збільшує термін служби обладнання;

- покращення механічних властивостей: нанесення нітридних покриттів може підвищити твердість, міцність та зносостійкість поверхні деталей, що особливо важливо для компресорного і насосного обладнання, що працюють при важких тискових та температурних умовах;

- покращення ефективності. Оптимізовані поверхні компресорного і насосного обладнання допомагають знизити тертя та покращують ефективність роботи, що може призвести до зменшення енергоспоживання та підвищення продуктивності.

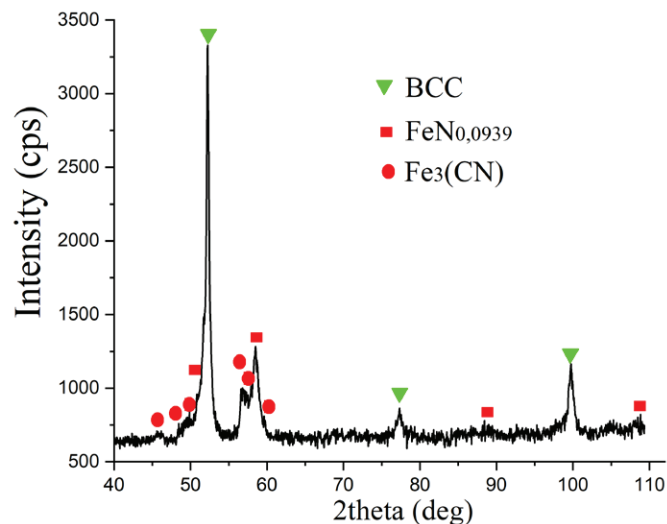


Рис. 3. Рентгенограми поверхневих шарів зразків зі сталі 40 з підшаром алюмінію після обробки методом ЕІЛ (нітроцементация) при $W_p = 0,52$ Дж

Таким чином, застосування нітридних покриттів за допомогою методу електроіскрового легування може значно покращити технічні характеристики та тривалість служби відповідального обладнання, забезпечуючи надійну та ефективну роботу у різних умовах експлуатації.

Висновки

1. Пропонований новий спосіб нітроцементация методом електроіскрового легування (ЕІЛ), який може застосовуватися на виробництві відповідальних деталей. Нова методика обробки дозволяє зменшити час насичення деталі азотом, покращити структурний стан покриття.

2. При нітроцементация сталей 20 та 40 з різною енергією розряду (W_p), підвищується мікротвердість, суцільність «білого шару» та шорсткість поверхні.

3. Якщо попередньо на поверхню сталей 20 та 40 наносити підшарок алюмінію методом ЕІЛ, то збільшується

товщина та мікротвердість покриття, а також суцільність «білого шару», а показники шорсткості покриття майже не змінюються.

4. Нанесення підшарку алюмінію методом ЕІЛ, при $W_p < 0,13$ Дж не призведе до помітних змін якості поверхні після нітроцементация, а збільшення енергії розряду $W_p > 3,40$ Дж призводить до росту шорсткості.

5. Проведений рентгенографічний аналіз показав утворення нітридних фаз, які призводять до збільшення мікротвердості.

Фінансування. Результати частково отримано в рамках науково-дослідної роботи «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).

Бібліографічні посилання:

1. Aftandiliants Ye. H., Zazymko O. V., Lopatko K. H. (2013). *Materialoznavstvo: pidruchnyk*. [Materials science: textbook]. Kyiv: Lira-K (in Ukrainian).
2. Baidych L.E., Rohozha Yu. A. (2009). *Koroziina stiikest azotovanykh shariv na staliakh v shyrokomu diapazoni pH: stattia*. [Corrosion resistance of nitroded layerson steel in a wide range of pH: article]. Khmelnytsk: Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. №5. (in Ukrainian).
3. Gaponova O. P., Okhrimenko V. O., Myslyvchenko O. M., Tarelyk N. V. (2023). *Vdoskonalennia tekhnolohii azotuvannia metodom elektroiskrovoho lehuвання: stattia*. [Improvement of nitriding technology by electrospark treatment: article]. Kyiv: Metaloznavstvo ta obrobka metaliv. №29 (105). (in Ukrainian). <https://doi.org/10.15407/mom2023.01.058>.
4. Ivashchenko Ye. V., Lobachova H. H., Mazanko V. F. (2010). *Formuvannia poverkhnevoho zmitsnenoho sharu pry khimiko-termichnii obrobtsi zaliza, poiednani z elektroiskrovym lehuванняm: stattia*. [The surface hardened layer formation the chemical-heat treatment of iron, combined with electric-spark alloying: article]. Kyiv: Metaloznavstvo ta obrobka metaliv. (in Ukrainian). <http://dSPACE.nbuv.gov.ua/handle/123456789/63618>
5. Khranovska K. M., Mazanko V. F., Ivashchenko Ye. V., Lobachova H. H. (2010). *Vplyv seredovyshcha lehuвання ta dodatkovoho azotuvannia na mikrotverdost, strukturu ta fazovyi sklad zaliznoi pidkladky: stattia*. [Influence of the alloying environment and additional nitriding on the microhardness, structure and phase composition of the iron substrate: article]. *Fyzycheskaia ynzheneryia poverkhnosti*. T.8. № 4. (in Ukrainian). <http://dSPACE.nbuv.gov.ua/handle/123456789/98919>
6. Lobachova H. H. (2012). *Modelni uivlennia pro struktarno-fazovi peretvorennia u poverkhnevyykh sharakh splaviv zaliza v protsesi EIL karbido- ta nitrydo-utvoriuiuchymy elementamy u nasychuvalnomu mizhelektrodonomu seredovyskhi*

z elementamy vtilennia : avtoref. dys. [Model representations of structural and phase transformations in the upper layers of iron alloys in the EIL process by carbide- and nitride-forming elements in a saturating interelectrode medium with impact elements: autoref. thesis]. Kyiv: NTUU « KPI im. I. Sikorskoho». (in Ukrainian).

7. Maksymov V. H., Hryhorova T. M. (2007). Osnovy rozrakhunku, proektuvannia ta ekspluatatsii tekhnolohichnoho obladdannia: Konspekt lektsii. [Basics of calculation, design, and operation of technological equipment: Synopsis of lectures.]. Odesa: Nauka i tekhnika. (in Ukrainian).

8. Mosina T. V. (2014) Electric-Spark Alloying of Composite Material of the Systems TiN–AlN and TiN–AlN–(Ni–Cr) as a Method for Applying Wear-Resistant Coatings: article. Refractories and Industrial Ceramics. №5 (54). (in English). <https://doi.org/10.1007/s11148-014-9616-0>

9. Okhrimenko V. O. (2022). Doslidzhennia vlastyvostei alitovanykh shariv pislia elektroiskrovoho lehuвання: tezy. [Investigation of the properties of alite layers after electrospark treatment: theses.]. Zaporizhzhia: Zaporizkyi natsionalnyi universytet. p.221-223. (in Ukrainian).

10. Radek N., Bartkowiak K. (2010) Performance properties of electro-spark deposited carbide-ceramic coatings modified by laser beam: article. Physics Procedia. Vol.5, Part A. (in English). <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2010.08.163>

11. Ahjin Sim, Chankyoo Park, Namhyun Kang, Yangdo Kim, Eun-Joon Chun. (2019). Effect of laser-assisted nitriding with a high-power diode laser on surface hardening of aluminum-containing martensitic steel: article. Optics and Laser Technology. №116. (in English). <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2019.03.040>

12. Tarel'nyk V. B., Martsynkovskiy V. S., Gaponova O. P., Sarzhanov O. A. Hapon O. O., Lazarenko A. D., Mikulina M. A. (2021). Sposib nitrosegmentatsii poverkhon stalevykh detalei: pat. Ukrainy na korysnu model [The method of nitrocementation over steel parts: pat. Ukraine on a custom model]. № 146373, S23S. № 7. (in Ukrainian).

13. Tarel'nyk V. B., Gaponova O. P., Konoplyanchenko Ye. V., Dovzhyk M. Ya. (2016). Investigation of Regularities of the Processes of Formation of Surface Layers with Electroerosive Alloying. Part I. article. Metallophysics and advanced technologies. Vol.38(№12). (in English). <https://doi.org/10.15407/mfint.38.12.1611>

14. Zavoiko O. S., Novikov S. M. (2013) Mekhanizm protsesu elektroiskrovoho lehuвання iz hazovym osadzhenniam: stattia. [The mechanism of the process of electrospark treatment with gas deposition: article]. Ivano-Frankivsk: Prospecting and Development of Oil and Gas Fields. №3. (in Ukrainian).

Haponova O. P., Doctor of Technical Sciences, Professor, Sumy State University, Sumy, Ukraine

Okhrimenko V. O., Postgraduate, Sumy State University, Sumy, Ukraine

Tarel'nyk N. V., Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

Shulyak M. L., Doctor of Technical Sciences, Professor, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

Improving the efficiency of nitrocementation technology with electrospark alloying

A new process for the nitro cementation of steel surfaces based on electrospark alloying (ESA) is proposed, which consists in the pretreatment of the surface with an aluminium electrode, followed by the application of a nitrogen-containing paste and subsequent alloying with a graphite electrode. This process is an innovative approach to increasing the wear resistance and strength of metallic materials of the coating-substrate type. The main goal of the investigation was to determine the effect of the energy parameters of the alloying process on the key quality indicators of the obtained coatings. The effect of discharge energy on layer thickness, microhardness, continuity and surface roughness was investigated. The results of metallographic and durometric tests indicate that nitrogen-containing coatings consist of a hardened «white» layer that gradually transitions to the diffusion zone and the substrate metal. The coatings obtained have a «white layer» thickness of 100-110 μm. The durometric tests show an increase in microhardness to 6800-10380 MPa. The phase composition of the coatings is represented by cubic iron nitride and iron carbide alloyed with ferrite. The use of ESA allows a reduction in energy consumption and processing time compared to traditional chemical heat treatment methods. The absence of the need for full heating of the part reduces the risk of thermal deformation and preserves the original mechanical properties of the base metal. The proposed method of nitro-cementation based on electrospark alloying is a promising technology for strengthening the surfaces of steel parts. The use of a combined approach involving pre-treatment with an aluminium electrode, application of a nitrogen-containing paste and alloying with a graphite electrode allows high microhardness, thickness and continuity of the coatings to be achieved. This gives new possibilities for increasing the wear resistance and durability of important parts and components of pumping and compressor equipment, contributing to the development of modern technologies in the field of materials science and surface engineering. Further research in this area could be aimed at optimising the technological parameters of the electrospark alloying process to improve the efficiency and quality of the coatings obtained. This may include studying the effect of different types of electrodes, alloying modes and processing conditions on the structural and mechanical properties of coatings.

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