

## МЕХАНІЗМ ПРОЦЕСУ ЕЛЕКТРОІСКРОВОГО ЛЕГУВАННЯ ІЗ ГАЗОВИМ ОСАДЖЕННЯМ

О.С. Завойко, С.М. Новіков

<sup>1</sup> Чернівецьке відділення НТУ "ХПІ", м. Чернівці, вул. Головна, 203а, тел. (03722) 72902

<sup>2</sup> Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, 58012, м. Чернівці, вул. Коцюбинського, 2, тел. (03722) 44834

Досліджено новий спосіб фізико-технічної обробки і зміцнення поверхонь за допомогою комбінування двох технологічних процесів – електроіскрового легування і газового осадження на сталеву поверхню.

Ці два процеси розвивають основи матеріалознавства та поглиблюють теорію електропереносу електродних матеріалів на сталеву основу, а також розширяють можливість застосування газових середовищ для отримання нових покриттів, пов'язаних з новими механічними і фізико-хімічними процесами їх застосування.

Електроіскрове легування дає можливість: значно підвищити зносостійкість і твердість металевих поверхонь деталей машин і технологічного оснащення з метою збільшення їх довговічності і заміни спеціальних сталей менш дефіцитними або більш дешевими; змінити електричні властивості струмопровідних поверхонь, зменшити перехідні опори електричних контактів, їх зношеність; збільшити шорсткість металічних поверхонь, наносити проміжні та перехідні шари для полегшення дужіння і процесу пайки, підвищити корозійну та вогнетривку стійкість, а також відновлювану властивість як деталей машин при ремонті, так і вимірних інструментів; отримувати омичні та випрямляючі контакти на напівпровідниках (нанесені покриття мають досконалий і міцний зв'язок з основним металом підкладки, оскільки супроводжуються високореакційними та дифузійними процесами).

Для вдосконалення процесу електроіскрового легування і отримання високої продуктивності при механізації та якості покриттів розроблено нову класифікацію джерел живлення для установок, які ще не діяли до цього часу і будуть використовуватися надалі в Україні.

Ключові слова: електроіскрове легування, поліконденсація, полікристалізація, газове осадження, реакційно-дифузійний процес, карбонітридні фази.

Исследован новый способ физико-технической обработки и упрочнения поверхностей с помощью комбинирования двух технологических процессов – электроискрового процесса легирования и газового осаджения на стальную поверхность.

Эти два процесса развивают основы материаловедения и углубляют теорию электропереноса электродных материалов на основу сталей, а также расширяют возможности применения газовых сред для получения новых покрытий, связанными с новыми механическими и физико-химическими процессами их применения.

Электроискровое легирование позволяет: значительно повысить износостойкость и твердость металлических поверхностей деталей машин и технологической оснастки с целью увеличения срока их эксплуатации и замены спецсталей менее дефицитными, изменить электрические свойства токоведущих поверхностей, изменить переходные сопротивления электрических контактов, их износ, способствовать нанесению промежуточных и переходных слоев, увеличить коррозионную и температурную стойкость, а также восстановительную способность при ремонте, получать омические и выпрямляющие контакты на полупроводниках (нанесенные покрытия имеют совершенную и крепкую связь с основным металлом подкладки, поскольку сопровождаются высокорекреакционными и диффузионными процессами).

Для совершенствования процесса электроискрового легирования и получения высокой производительности при механизации и качества покрытий разработана новая классификация источников питания для установок, которые не действовали до времени, но будут использоваться на Украине.

Ключевые слова: электроискровое легирование, поликонденсация, поликристаллизация, газовое осаднение, реакционно-диффузионный процесс, карбонидные соединения.

This article considered the new physical-technical obtained and strengthening with help double processes electric lightning ligature and gas connection condensation on steel in the new picture.

This two process penetration the theory binding material, electrodynamic frictional induction electrode material on steel basic and developed practical making gas solution dipping with the obtained new composite types will continue of protective coatings based on metals with new mechanical and physical-chemical process of need.

Special priority rating in future research will be given to working out theoretical bases and production processes of obtaining high-strength materials reinforced with metal and ways of predetermining lasting stress-strain characteristics with a view to establishing principles of designing composite materials with clear-cut anisotropic characteristics, outlining new spheres of national economy which could use composite materials; theoretical and experimental research in materials for outer space; studying process which take place in materials under the effect of vacuum, low temperatures, various types of radiation and meteoritic particles; developing materials for space engineering, machine interpolice contact ligature in steel.

*The chapter of the article will inform the reader of how new protective ligature coatings prolong service life of machines, mechanisms, instruments and other equipment, and will tell you about the main task materials and their use in systems and structures that determine the level of the modern scientific and technical progress of the obtained in new equipment, power-plant.*

Key words: process electric lightning ligature, gas condensation, binding material, electrodynamic frictional induction, protective coating, high-strength material.

### Вступ

Електроіскрове легування супроводжується різноманітними фізико-хімічними перетвореннями [1].

Основний ефект отримується через вірність вибору електричних параметрів режиму обробки, конструкції установки, легуючих матеріалів електродів та міжелектродного середовища, реакційної системи застосованих газів (легуючих – CO<sub>2</sub>, NC, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, повітря; несучих – H<sub>2</sub>, N, Ar).

Електроіскрове легування дозволяє: значно підвищити зносостійкість і твердість металічних поверхонь деталей машин і технологічної оснастки з метою збільшення їх довговічності і заміни спеціальних сталей менш дефіцитними.

Існує декілька моделей процесу електроіскрового переносу одних матеріалів на інші, що пояснюють окремі експериментальні факти [2, 3, 4].

### Основні методи дослідження та нова класифікація джерел живлення установок (електроіскрових апаратів)

Основною метою даної роботи є отримання зносостійких покриттів на основі вуглецевих сталей У10 за допомогою електроіскрового легування сумісно з процесом газового осадження у контрольованій газовій атмосфері (аргон, водень).

Як електродні матеріали використовувалися: T20K4 та W(CO)6.

Більшість дослідників процесу електроіскрового переносу матеріалу аноду на катод у газовому середовищі розповсюджують (іноді невірно) закономірності процесу електроіскрової розмірної обробки в середовищі рідкого діелектрика на процес електроіскрового легування, тоді як процеси, що проходять при електроіскровому легуванні в газовому середовищі (аргон, водень, кисень, азот, вуглекислий газ, криптон, аміак, пропан-бутан) набагато складніший, адже в цьому випадку діє контакт електродів.

Електричний струм у газах – газовий розряд – складне фізико-хімічне явище, значно відмінне від потоку в твердих і рідких провідниках. За нормальної температури й тиску в газі дуже мало вільних заряджених частинок (іонів, електронів), тому повітря зазвичай поводить себе як ізолятор. Однак під дією різних фізико-хімічних чинників (факторів високої температури, сильного електричного поля, ультрафіолетового випромінювання тощо) в повітряному середовищі з'являються вільні електрони, додатні і від'ємні іони, присутність яких надає газу властивості електропровідності [5].

Процес виникнення електронів у нейтральному середовищі називається його іонізаці-

єю. Для того, щоб у газі міг проходити струм провідності пов'язаний з переносом заряду, заряджені частинки повинні утворюватися в газі шляхом руйнування нейтральних атомів і молекул або поступати в газ ззовні – з оточуючих газ твердих і рідких тіл чи газових сумішей.

Якщо процес руйнування нейтральних молекул газу називається іонізацією, то процес випускання (витоку) заряджених частинок твердими, рідкими, газоподібними речовинами – емісією. Обидва ці процеси проходять під дією зовнішніх фізико-хімічних факторів: прикладеної до газу напруги і пройденого через газ (суміш газів) струму. Якщо струм у газі викликаний зовнішніми чинниками, то розряд називається несамостійним. Якщо для підтримання струму необхідна певна кількість заряджених частинок і вони утворюються в газі або отримуються із оточуючих газ тіл (електродів), завдяки прикладеній до газу напруги і протікаючому через газ струму, то такий розряд називається самостійним. Струм у газі може бути незмінним за величиною і напрямком, а може змінюватися з часом і за напрямком. При зміні струму одночасно змінюється механізм процесу утворення заряджених частинок у потоці газу, а отже й електроперенос, тоді розряд називається неупорядкованим (невстановленим). Серед неупорядкованих форм розряду важливе місце займає процес переходу розряду із несамостійного в самостійний. Такий процес називають пробоем газового проміжку, або збудженням газового розряду. За час руху електрону між зіткненнями з нейтральними частинками газу він набуває доповнювальну енергію і, якщо його енергія буде достатньою для іонізації частинок газу, то кількість частинок (іонізованих) у газі буде збільшуватись, а в напрямі від катода до аноду буде проходити електронний потік (лавіна), залишаючи після себе малорухомі додатні іони, що утворюють додатний просторовий заряд. Треба врахувати ту обставину, що іонізація молекул газу проходить при їх зіткненнях не тільки з електродами, але й додатними іонами, а під дією бомбардування катода додатними іонами виникає доповнююча (вторинна) емісія електронів [1, 5].

Пояснення процесу перенесення анодної речовини на катод за умови електромеханічного контакту враховує всі відомі ефекти і чинники: температуру, електроопір, густину струму, теплопровідність, теплоту плавлення і випаровування, ефект Нотінгама, температурну залежність автоелектронної емісії, силові поля магнітного поля, електродинамічні, статичні сили, процеси інверсії, конверсії, попереднього насичення тощо [1, 5].

Зі збільшенням тривалості імпульсів зростає загальна кількість елементарних актів пере-

несення, насичення, ерозії, народження і знищення емісійних центрів. Для утворення нових емісійних центрів (виникнення інтенсивної автоелектронної емісії) необхідно збільшення потенціалу катодного факелу відносно катоду [8]. Коли руйнується емісійний центр, його приповерхневий розплавлений об'єм застигає і переходить в твердий стан при напруженості електричного поля, що дорівнює нулеві ( $E=0$ ). Характерний час такого процесу [1]:

$$t = h \cdot \sqrt{\frac{\delta}{\alpha_H}}, \quad (1)$$

де  $\delta_H$  – коефіцієнт поверхневого натягу,  
 $h$  – висота виступу.

За час самоликвідації затвердіють лише виступи висотою, яка не перевищує [1]

$$h = \frac{\lambda^2 \cdot T_{пл}^2}{\delta \cdot \varepsilon_{пит}} \alpha_H, \quad (2)$$

де  $\varepsilon_{пит}$  – питома теплота плавлення.

Зазвичай на поверхні електродів присутні ізоляційні плівки та різні неметалічні включення. В результаті вибухових процесів на катоді через хмаринку іонізованих парів виникає катодний факел – плазмове утворення. В такому стані попереду руху – електрони з енергією 70–80 eV, за ними слідує іони легких елементів, далі іони матеріалу аноду ( $Fe^+$ ,  $Ni^+$ ,  $W^+$  тощо), адсорбованих газів та різних забруднень ( $H_2$ ,  $O_2^+$ ,  $Si^+$ ). Швидкість іонів суттєво відмінна – найбільша вона у водню, найменша у важких іонів, наприклад,  $W^+$  рухається зі швидкістю 8–11 км/с.

Перерозподіл швидкостей розширення катодного факелу та руху фронтальної частини плазми як результат газодинамічних реакційних процесів описано в роботі [1].

При електроіскровому легуванні металічних поверхонь надійний результат залежить від ряду взаємозв'язаних умов, таких як інтенсивність процесу (кількості матеріалу, перенесеного на облицювальну поверхню за одиницю часу), величини енергії, що виділяється в міжелектродному проміжку, частоти слідування імпульсів, від легуючого і легованого матеріалу, легуючого газу і газу-носія, що використовується при введенні їх у міжелектродний простір ззовні.

Характер електропереносу контактів досліджувався за допомогою макро-, мікроструктурного, мікродіорометричного аналізів, скануючої електронної мікроскопії робочої поверхні, а також шліфів, виготовлених на косому і прямому зрізах робочого шару і його зколів.

Продукти ерозії вивчалися за допомогою оптичного спектрального і рентгенівського аналізів. При цьому слід зазначити, що високі швидкості охолодження вторинної сформованої структури сприяє диспергуванню оплавлених тугоплавких зон, що свідчить про зниження ерозії при переважному переносі матеріалу електроду-аноду у паровій фазі.

На робочій поверхні електродів в процесі вибухового руйнування емісійних центрів спо-

стерігається: домішкова плівка; раковини, що обумовлені вибуховим випаровуванням, окремі мікротріщини, що викликані термічною втомою матеріалу.

Для вдосконалення процесу електроіскрового легування і отримання високої продуктивності та якості покриттів розглянемо розроблену класифікацію джерел живлення установок, які діяли до цього часу і будуть використовуватися надалі (рис. 1).

На сьогоднішній день рівень автоматизації електроіскрового легування залишається на низькому рівні. Проблема, яку потрібно було вирішити, має комплексний характер і розподіляється на такі чотири основні складові:

1) розробка систем джерел живлення для електроіскрового легування;

2) розробка комплексу системної просторової орієнтації електродів відносно складнопрофільної оброблюваної поверхні;

3) розробка програмного забезпечення для коректування технологічного процесу електроіскрового легування матеріалів з наперед заданими властивостями досконалості структур та текстур;

4) розробка і впровадження зовнішніх чинників: легуючих газів і газів-носіїв для супроводження процесу легування електродними матеріалами основи сталей та напівпровідникових матеріалів.

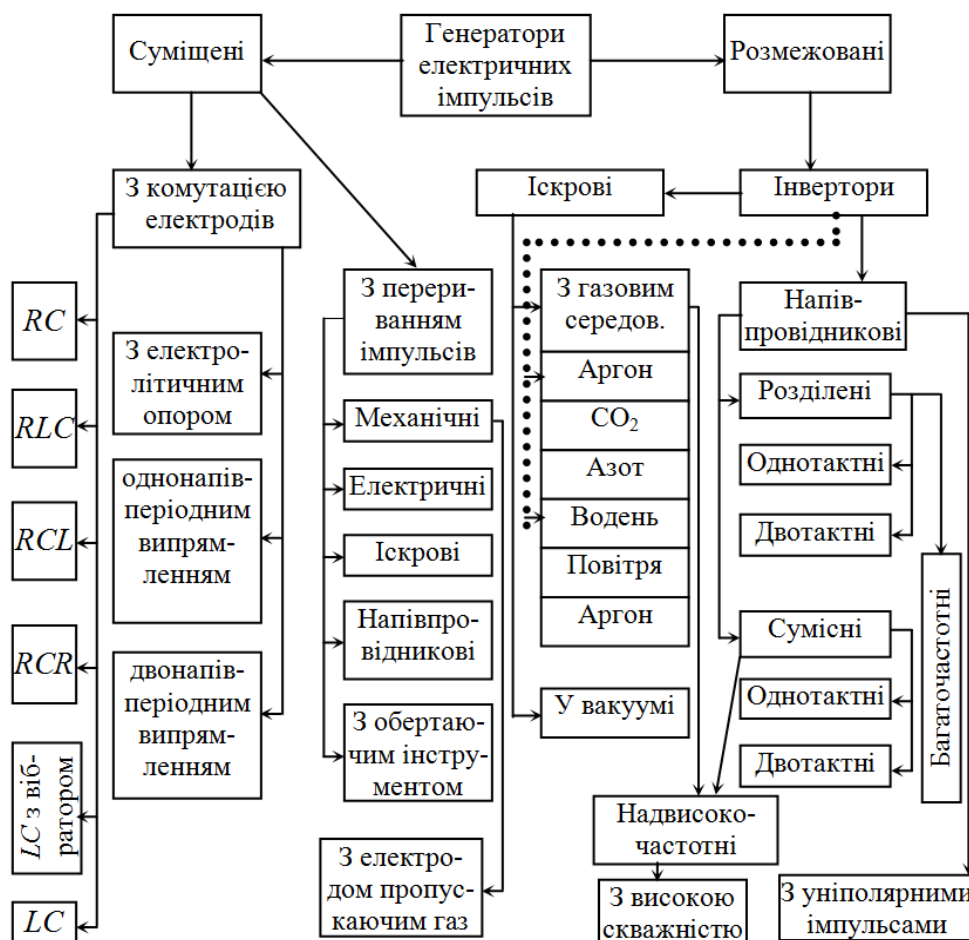
До першої групи відносяться пошуки у напрямку зростання потужності генераторів, розширення частотних характеристик, зменшення силових контурів генераторів, розширення можливостей отримання різних по величині і формі імпульсів, досягнення гнучкості регулювання амплітуди і жорсткості системи. (6) Результати теоретичних робіт в цьому напрямку дали можливість їх широкого впровадження у виробництво.

Першопочаткові системи першої групи базувалися на традиційних, досконало розроблених методах стабілізації напруги, струму, потужності міжелектродного проміжку (регулювання швидкості подачі, зміщення електроду), що дало змогу обробляти тільки тіла з єдиним параметром – шляхом обертання деталі правильної форми (диск, циліндр, вал тощо) у площині. При цьому в одних установках легування здійснювалось електромагнітними вібробуджувачами, закріпленими у супорті станка, в інших – обертальними дисками електротримачів із закріпленими в них легуючими електродами – обертальними головками.

За призначенням і характером визначених вимог системи автоматичної орієнтації електродів у просторі відносно поверхні деталі, друга складова підрозділяється на такі види:

– однокоординатні системи, які автоматично коректують положення електроду у напрямку, перпендикулярному до оброблюваної поверхні (розроблена значна кількість регулюючих систем);

– двокоординатні автоматичні системи, що забезпечують необхідне поперечне і вертикальне переміщення електродів;



Крамками виділена схема ділянки легування використаних газів: аргон, водень

Рисунок 1 – Класифікація генераторів електричних імпульсів

– трикоординатні системи орієнтації, що забезпечують поперечне, осьове і кутове положення електроду відносно площини (конфігурації) обробки у функції кривизни легуючого профілю за наперед заданими програмними характеристиками (Ельфа – 754);

– комбіновані системи орієнтації електродів у газовому середовищі із автоматичним налаштуванням на контрольовані системи осадження газових сумішей при поліконденсації на основу металів.

Проблема реалізації системи третьої складової поки що не вирішена тому, що потребує створення для контролю за параметрами відповідних давачів, аналізаторів за критеріями якості і досконалості структур в процесі легування. При цьому складно виділити збурення і відхилення в системі, їх сумісну дію на кінцевий результат та параметри процесу легування.

Особливостями четвертої складової проблеми є використання зовнішніх чинників (електромагнітних полів, тисків газів, реактивно діючих флюсів, тощо), які суттєво змінюють властивості міжелектродного простору, ускладнюючи або прискорюючи процес електропеченосу електродних речовин, конденсуючих парів розтоплених металів, кристалізуючи на поверхні деталей інтерметаліди, карбіди та напівпровідникові з'єднання [4, 5, 7, 8].

### Результати експериментів і їх обговорення

Розглянемо схему, за якою проведено дослідження з легування металокерамічного сплаву на поверхню вуглецевої сталі У10 (рис. 2). Дослідження проводилось на лабораторній установці ЛЕГ-1 зі застосуванням визначених в [1] режимів, але з використанням газу-носія: аргону, водню.

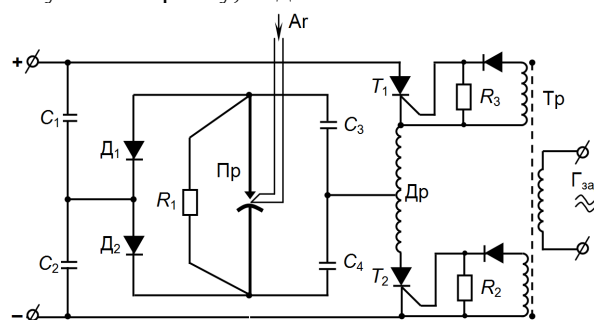


Рисунок 2 – Принципова електрична схема тиристорного генератора на основі послідовного інвертора джерела струму установки ЛЕГ-1

Попередньо отримані результати досліджень підтвердили висновки про те, що у загальному випадку осадженню електроіскрового

покриття на катоді передусе ерозійне руйнування його поверхні. Після цього порції розплаву, що переносяться із аноду, послідовно, із кожним циклом розряду взаємодіють із розплавом матеріалу у катодних впадинах.

Рідкофазна взаємодія електродних матеріалів визначає високу міцність зчеплення із підкладиною, властиву електроіскровим шарам [9]. При цьому осадження покриття проходить тільки в межах еродованих околиць на катоді, але верхній шар покриття, що виступає над висхідною поверхнею катоду (підкладини), практично відповідає складу аноду.

У принциповій схемі джерела живлення електроіскрової механізованої установки ЛЕГ-1 імпульси струму розрядного контуру (на схемі виділено жирною лінією) не проходять ані по керованих кремнієвих вентилях, ані по некерованих. Генератор є послідовним інвертором, який утворений конденсаторами  $C_1$  і  $C_2$ , дроселем ДР і тиристорами  $T_1$  і  $T_2$ . Навантаженням інвертора є міст, плечі якого утворені накопичувальними конденсаторами  $C_3$  і  $C_4$  і вентилями  $D_1$  і  $D_2$ . У діагональ мосту включений іскровий проміжок Пр, шунтований резистором  $R_1$ . Управління тиристорами здійснюється від малопотужного генератора, прямокутні імпульси напруги якого подаються на обмотку трансформатора Тр. Із вторинних витків трансформатора протифазні сигнали подаються на запуск тиристорів. Отже, управляючий імпульс відкриває тиристор  $T_1$ , при цьому в ланцюгу протікає струм, що викликає на дроселі Др е.р.с., яка запирає тиристор  $T_2$ . Внаслідок симетрії схеми аналогічний процес проходить при подачі управляючого імпульсу на тиристорі  $T_2$ .

Генератор, зібраний за цією схемою, здійснює перетворення енергії постійного струму в енергію уніполярного імпульсного струму, що виділяється в іскровому проміжку. Частота проходження імпульсів дорівнює подвоєній частоті задаючого генератора  $\Gamma_{зад}$ . До міжелектродного проміжку підводиться газ-носієй (аргон, водень) через центральну осьову частину легуючого електроду так, що складаються певні умови направленого переносу від аноду на катод (деталь). Подібні схеми, які діють в реакційних системах газового осадження у вакуумних установках типу ВУ-1М, УВН-2,5-6,5.

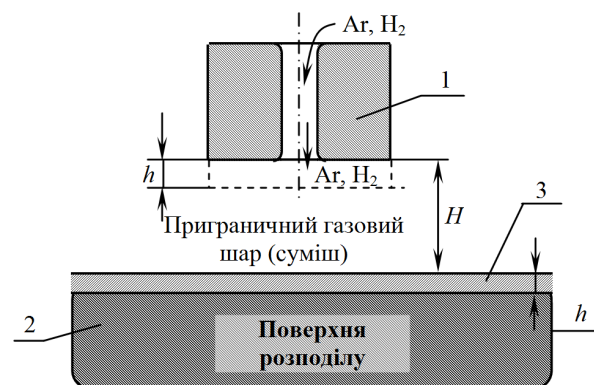
За нашою методикою розраховано параметри технологічного процесу електроіскрово-газового переносу електродного матеріалу із металокерамічного сплаву Т20К4 та з карбонілу вольфраму  $W(CO)_6$ .

Кількісну оцінку електричної ерозії контактів проводили за визначеними характеристиками: маси електродної речовини  $m$  (у грамах), видаленої із робочої поверхні; швидкості ерозії  $\gamma$  (у г/с); коефіцієнта електропереносу  $\chi$  (у г/кулон, або ат/ел. заряд) за методикою, описаною в [1].

Порівняльні характеристики наведено на рис. 4, 5, 6. Використання іскрового (тліючого) розряду в процесі переносу і кристалізації на деталі в газовій фазі сприяє прискоренню процесу і покращує якість осаджуваних шарів.

Прискорення процесу пояснюється кращою іонізацією газового середовища і перенесенням парів аноду на катод (осадженню), при цьому карбоніл вольфраму  $W(CO)_6$  розкладається у тліючому розряді газового проміжку за присутністю водню при тиску 0,5 атм і густині струму 500 мА/см<sup>2</sup>.

До переваги цього методу можна віднести можливість попереднього очищення поверхні оброблюваного виробу від окисних і інших забруднень катодним розпиленням і водневим відновленням електроіскровим методом, що суттєво покращує зчеплення покриття з основою і впливає на щільність, густину і досконалість текстури. Енергія активації процесу термодифузії вольфраму через газовий міжелектродний простір в аргонному середовищі вища, ніж для покриттів, отриманих без накладання електроіскрового (тліючого) розряду в повітряному просторі. Експериментально формування металічних шарів при піролізі карбонілу вольфраму проводилось у реакційно-термічних електроімпульсних умовах (рис. 3).



1 – електродний матеріал: Т20К4,  $W(CO)_6$ , анод; 2 – вуглецева інструментальна сталь У10, (зразок), (катод); 3 – відкладений (легований) електроіскровим способом шар (при використанні Т20К4 в умовах аргону – 120÷240 мкм, при використанні  $W(CO)_6$ , в умовах водню – 180÷200 мкм),  $h_1$  – об'єм витраченого аноду в процесі відкладання шару при електроіскровому процесі,  $h_2$  – об'єм відкладеного шару сконденсованої газової суміші електродного (анодного, катодного) матеріалу та газу-носія,  $H$  – приграничний об'єм газу-парової суміші електродного матеріалу аноду, катоду, газу-носія і повітря

**Рисунок 3 – Схема термо-, електро-, газореакційного розкладу електродних матеріалів**

Порівнявши результати роботи [1] і новостворену схему проведення досліду, можна зробити висновок, що показники продуктивності дещо зростають, а якість отриманого шару значно відрізняється структурою, так і за характеристиками [4, 5].

Фазовий склад шару модифікованої поверхні за даними мікроспектрального аналізу із скануванням в перерізі через шар розподілу, порівнювали із складеною діаграмою стану Fe-C-W-N легованого в повітряному, аргонному і водневому середовищі.

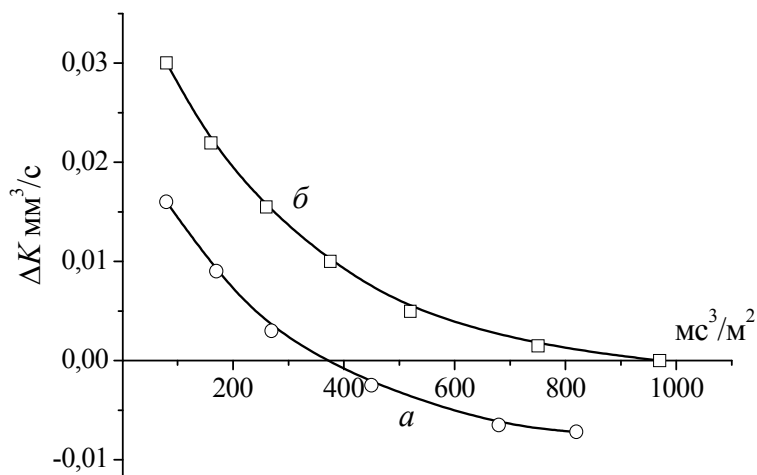


Рисунок 4 – Залежність питомого переносу матеріалу на катод із сталі У10 від часу легування сплавом Т20К4 в повітряному середовищі (а) і в аргонному середовищі (б) при 4-ому режимі роботи установки ЛЕГ-1 ( $I_{к.з.}=50 \text{ A}$ ,  $U=50 \text{ В}$ ,  $C_1=1200 \text{ мкФ}$ ,  $C_2=1200 \text{ мкФ}$ ,  $f=400 \text{ Гц}$ ) за схемою рис. 2

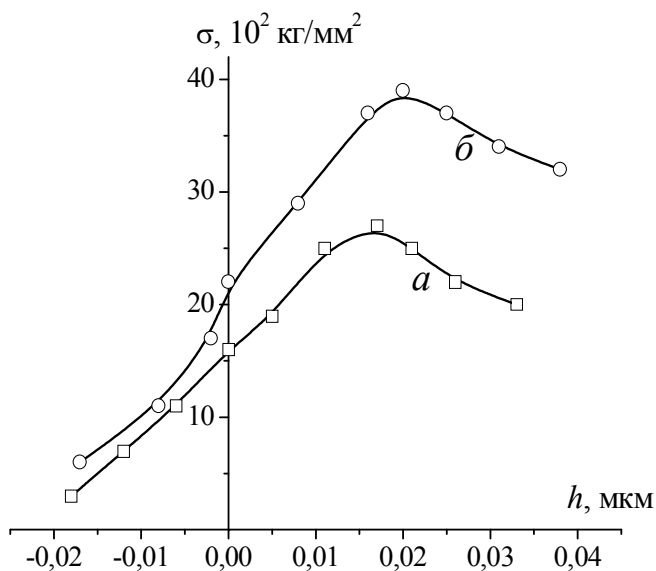


Рисунок 5 – Розподіл твердості в поверхневому шарі сталі У10 після легування електродом Т20К4 в повітряному (а) і аргонному середовищі (б) за режимом, вказаному на рис. 4

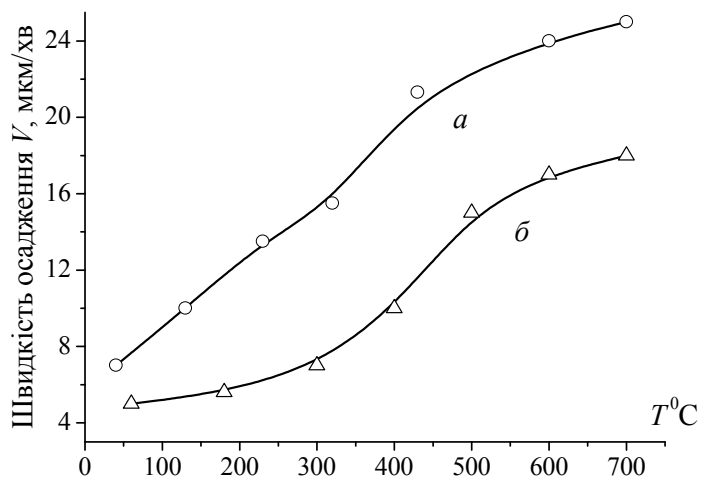
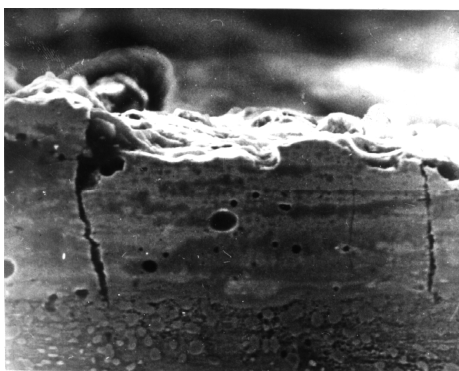


Рисунок 6 – Залежність швидкості електромасопереносу карбонілу вольфраму  $W(\text{CO})_6$  від температури підкладки сталі при тисках водню 1,5 атм (а), 0,5 атм (б)



**Рисунок 7 – Мікроструктура покриття, нанесеного на сталь У8 сплавом Т20к4 на 5-му режимі установки ЛЕГ-1**

На поверхні вуглецевої сталі У10 в процесі співударів з потоком неідеальної імпульсно-іскрової плазми вибухів утворюються шари із фазовим складом карбонітридного характеру:

$\epsilon$ -Fe<sub>2-3</sub>(NC),  $\gamma$ -фази, Fe<sub>3</sub>C.

Залізо та вольфрам утворюють за різних термодинамічних умов декілька інтерметалідних фаз при 1040°C: Fe<sub>2</sub>W ( $\lambda$ -фаза), Fe<sub>2</sub>W<sub>2</sub> ( $\epsilon$ -фаза) із раніше виділених  $\epsilon$ -фази та  $\delta$ -фази ( $\delta+\epsilon\rightarrow\lambda$ ). При більш форсованих режимах  $I_{к.з.}>100$  А в легованому шарі виявляються кристали  $\epsilon$ -Fe<sub>2</sub>W<sub>2</sub>, Fe<sub>10</sub>W<sub>3</sub>. При легуванні електродами Т20К4 в середовищі аргону утворюються дві зони (рис. 7). Перша – ділянка з великими зернами довільної форми, величиною 150ч270 мкм, твердістю 3700ч4200 кг/мм<sup>2</sup> із вкрапленнями подрібнених дисперсних частинок другої фази. Друга – має твердість подібну до даних роботи [4] – 780-900 МПа, в якій по всьому об'єму зустрічаються частинки карбідних включень із твердістю до 400 МПа, величиною 80-100 мкм. Зауважимо, що легування в середовищі аргону в поверхневих шарах, зміщених електроіскровим способом, містить значно меншу кількість мікротріщин, відколів, дислокаційних виходів (приблизно на 20%), але й підвищує швидкість перенесення легуючого матеріалу на підкладку сталі У10,[4].

#### **Аналіз результатів дослідження та рекомендації**

Введення вільного газового аргону у склад суміші розтопленого і випаруваного в міжелектродному середовищі матеріалу змінює фазовий склад отриманого покриття – з'являється TiC, значно зменшується вміст W<sub>2</sub>C.

Введення вільного газового водню для легування поверхні вуглецевої сталі У10 електродом із карбонілу вольфраму представлено на рис.3. Враховуючи особливості переносу розтопленого в середовищі водню карбонілу вольфраму зазначимо, що легування проводилось у протоці газу при тиску 1,5 МПа, при температурі підкладки від 300°C до 500°C, (питома енергія активації лежить в межах 1,2·10<sup>14</sup> Дж/моль).

Починаючи з 350°C лежить область, де визначальним процесом є дифузія парів карбоні-

лу. При мас-спектроскопічному дослідженні термо-реактивно-імпульсного розкладу у водневому середовищі карбонілу вольфраму встановлено, що в початковий момент швидкість переносу невелика, а після того, як шар досягає певної величини, вона зростає і залишається постійною протягом певного часу легування. Це пояснюється каталітичною активністю шару.

Для того, щоб відрегулювати потрібну концентрацію паро-газової суміші міжелектродного з'єднання поблизу поверхні, необхідно підтримування на певних рівнях енергії розрядного проміжку, температури, тиску несучого (легуючого) газу і концентрації носіїв у розрядному реакційно-імпульсному об'ємі. За цих відпрацьованих режимах може здійснюватись процес легування поверхні з досконалою структурою і високим зчепленням.

#### **Висновки**

Розглянуто реакційну систему електропереносу при взаємодії електроіскрового імпульсного розряду в середовищі, заповненому газамі-носіями (азот, водень, аргон). Визначено перспективи використання легуючих газів на електроіскрових установках різного типового складу.

В процесі дослідження розроблено інтегрований підхід до вирішення проблем електроіскрового легування поверхонь із застосуванням нового комплексного способу обробки – осадження електродних матеріалів із парогазової фази на підставі застосування газів-носіїв і електроімпульсно-іскрового переносу.

Поглиблено теорію електропереносу електродних матеріалів та залишено на подальший розвиток процес поліконденсації елементів у газових середовищах та у вакуумі.

Більш досконалий і детальний розгляд процесів термо-електро-газодинамічного розкладу карбідів і карбонілів металів (Ti, W, Mo, Ta, V, Re, і т.д.), що контролюються дифузією парогазової суміші її концентрацією і тиском, викликає безсумнівний інтерес в межах даної тематики, подальших досліджень.

#### **Література**

1 Завойко О.С. Теоретичні основи електро-технології зміцнення металів./ О.С. Завойко. – Чернівці: Рута, 2003. – С. 8-24.

2 Сизоненко О.Н. Влияние высоковольтного электрического разряда на поверхностные явления в дисперсных системах // Международная конференция "Современное материаловедение: достижения и проблемы", Украина, Киев, 26-30 сентября 2005. – Киев: Академпериодика, 2005. – С. 336.

3 Источники питания для электроискрового легирования / Институт прикладной физики. – Кишинев: Штиинца, 1978. – С. 64.

4 Завойко О.С. Закономерности формирования упроченного слоя в углеродистых сталях металлокерамическими сплавами в процессе

электроискрового легирования / О.С. Завойко, В.З. Цальй // Международная конференция "Современное материаловедение: достижения и проблемы", Украина, Киев, 26-30 сентября 2005. – Киев: Академперіодика, 2005. – С. 536.

5 Завойко А.С. Электродинамические факторы в мостиковом переносе при электроискровом легировании / О.С. Завойко, С.Н. Новиков // Международная конференция "Современное материаловедение : достижения и проблемы", Украина, Киев, 26-30 сентября 2005. – Киев: Академперіодика, 2005. – С. 520.

6 Завойко О.С. Теорія міжатомних перетворень покриттів, металів і сплавів фізичного матеріалознавства, т. 1/ О.С. Завойко. – Чернівці: Рута, 2009. – С. 183.

7 Завойко О.С. Теоретичне матеріалознавство в теоріях міжатомних перетворень покриттів, металів, сплавів, т. 4 / О.С. Завойко. – Чернівці: Рута, 2012. – С. 101-103.

8 Сливков И.Н. Процессы при высоком напряжении в вакууме / И.Н. Сливков. – М.: Энергоиздат, 1986. – С. 68-74.

9 Электроискровое легирование металлических поверхностей / Под ред. Ю.Н. Петрова. – Кишинев: Штиинца, 1985. – С. 196.

*Стаття надійшла до редакційної колегії  
05.09.13*

*Рекомендована до друку  
професором Крилем Я.А.*

*(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)*

*д-ром фіз.-мат. наук Гасюком І.М.*

*(Прикарпатський національний університет  
ім. В. Стефаника, м. Івано-Франківськ)*