

ТЕОРІЯ РУЙНУВАННЯ І ЗМІЦНЕННЯ МЕТАЛІВ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИМИ МЕТОДАМИ

Розглянуто реакції при передаванні енергії електродними речовинами, які виникають у між-електродному середовищі, внаслідок нагрівання, удару або тертя. Показано, що в процесі розповсюдження по заряду, за рахунок підведеної енергії від шару до шару на основі тепло- і масопереносу горінням і детонацією, швидкість горіння залежить від складу газу в міжелектродному середовищі та його термодинамічної рівноваги і коливається від 10^{-3} до 100 м/с. Детонація поширюється течією газів і часток у межах $10 \div 10^3$ мкс.

It was shown that in the propagation process from charge by means of energy that sapplied from layer to layer on the base of heat- and mass transferring, burning and detonation. The rate of burning depends both from the gas composition in interelectrod medium and thermodynamically equilibration, but swain in such scope 10^{-3} -100 m/sec. The detonation propagates by means of gas stream and particles in a following rang $10 \div 10^3$ μ s.

Основні кількісні і якісні характеристики процесів електроерозійної обробки металів викладені у роботі [1], там же, проведена класифікація методів обробки за використаним електроерозійним обладнанням, намічені перспективи подальшого розвитку і застосування електроерозійних методів обробки, а також визначено термінологію, якою користуються в даній галузі.

Сутність процесу руйнування металів при електрофізичній обробці

Принципові схеми обробки металів дією імпульсних електричних розрядів, що виникають між електродом-інструментом і деталлю, які розташовані у діелектричному середовищі, описані в роботі [1].

Руйнування металу на ділянці деталі дією електричних імпульсів спричинюється в розплавленому стані силами вибуху і гідродинамічного удару – проходить плавлення і випаровування обох електродів в залежності від матеріалів, з яких вони зроблені, і полярності. Ерозія одного з електродів може переважати за умови його більшої стійкості до руйнування.

Прямою полярністю вважають процес, в якому деталь, що обробляється, є анодом. Цей процес супроводжується короткочасними імпульсами, які забезпечують високу температуру в момент розрядів. Обернену полярність, де деталь є катодом, використовують при електроімпульсній обробці значної тривалості і меншою температурою розрядів у порівнянні з електроіскровою обробкою, коли деталь є анодом.

Для дослідження зношення електроду-інструменту при обробці сталі використовувались мідні і графітовані електроди і генератори імпульсів малої густини струму і потужності (до 1 кВт). Імпульси задавалися генератором від 20 до 20000 імп/мкс. Вивчалось зношення мідних і графітованих електродів. Визначено, що при збільшенні тривалості імпульсів зношення електроду-інструменту знижується як для мідного, так і для графітованого електроду. У деяких випадках має місце нарощення шару (випадок з графітованим електродом).

При електроерозійній обробці досить точно визначається об'єм видалений електродом-інструментом і хвилинна продуктивність обробки, якщо відомо число імпульсів за хвилину. За енергією імпульсу можна регулювати шорсткість обробленої поверхні.

Технологічні параметри можна вираховувати з такого рівняння [1]:

$$P = k \cdot I^\alpha \cdot U^\beta \cdot C^\gamma, \quad (1)$$

де P – величина технологічного параметру, що розраховується, I – струм в робочому контурі, U – напруга між електродами, C – ємність (при електроімпульсній обробці відсутня), $k = \prod_{i=1}^n k_i$ – коефіцієнти, величина яких залежить від електроерозійної оброблюваності матеріалу деталі, хімічного складу електроду-інструменту, середовища, інтенсивності видалення продуктів ерозії із зони

обробки, способу підтримки оптимальної величини міжелектродного проміжку, конфігурації електроду-інструменту, способу обертання або коливання (механічного, електромеханічного) інструменту, полярності електродів і т. ін., α , β , γ – показники степенів, які визначають закон зміни I , U , C та інших факторів.

Виходячи з таких представлень, проведена класифікація формул для визначення технологічних параметрів електроерозійної обробки металів [1]:

- продуктивність обробки [мм³/хв]

$$Q = k \cdot C^{2/3} \cdot U^{3/2} \cdot I^{2/3}, \quad (2)$$

- оптимальна питома потужність [кВт/мм²]

$$P_F = \frac{0,4 \cdot 10^{-2} \cdot I \cdot U}{F}, \quad (3)$$

де F – площа оброблюваної поверхні,

- коефіцієнт оброблюваності R_γ ,
- час обробки [хв]

$$T_M = 7,5 \frac{I_{\text{сер}}}{R_\gamma} \cdot h, \quad (4)$$

де h – припуск на обробку,

- час обробки для трубчатого електроду-інструменту [хв]

$$T_M = (0,008 \div 0,01) \cdot \frac{I_{\text{сер}}}{R_\gamma} \cdot L \cdot \psi \cdot h, \quad (5)$$

де L – довжина кола трубчатого електроду, ψ – безрозмірна стала для певного металу, що обробляється..

Руйнування металу при дії електричних розрядів супроводжується ерозією і переносом речовини від одного електроду до другого, а також видалення продуктів руйнування у міжелектродний проміжок.

Кількість розплавленої і випареної речовини при електричній ерозії характеризується коефіцієнтом ерозії ω [см³/Кл або г/Кл] за формулою [2]:

$$M = \omega \cdot q, \quad (6)$$

де q – заряд, що протікає через розряд.

Коефіцієнт ерозії в (6) приведений для порівняння з формулою (1) за ознаками, викладеними вище, а саме оброблюваності матеріалу, хімічного складу електроду-інструменту, міжелектродного середовища, інтенсивності видалення продуктів ерозії і т.ін.

Для кількісної оцінки переносу речовини з аноду на катод (підставний електрод) вводиться коефіцієнт переносу [2]:

$$\gamma = \omega - \delta, \quad (7)$$

де δ – втрати речовини, пов'язані з виходом її за межі зони розряду (міжелектродного проміжку), або поверненням на основний електрод.

При досягненні динамічної рівноваги потенціалів на електродах і відкладенні продуктів переносу, в деякий інтервал часу при певній ерозії речовини $\omega = \omega(t)$ виникає насичення [2]. Помічено, що при змінній полярності електродів ерозія і кількість продуктів переносу на підставному електроді визначається сумарним ефектом полярності. Уніполярний розряд сприяє направленості переносу навіть в умовах несприятливого співвідношення в ерозійній стійкості постійного (зразок) і підкладного електроду.

Кількісне співвідношення газоподібної і рідкої фази в продуктах ерозії і переносу визначається типом і параметрами розряду, і залежить від теплофізичних властивостей матеріалу електродів.

При електричному розряді прийнято розрізняти два види дозування речовини: перенесення речовини при фіксованих електродах і контактної іскрове перенесення. Це означає, що перенесення речовини проходить при виникненні дуги змінного струму, високовольтній та низьковольтній іскрі – при цьому постійний і підкладний електроди розділені фіксованим міжелектродним проміжком [2,3].

Перенесення речовини в електричному розряді при фіксованих електродах здійснюється пароструменевим витоком парів і викидом полум'я, конвекцією, дифузією, переносом заряджених частинок електричним полем і механізмом подібним до катодного розпилення [4].

Фізична сутність ерозії і переносу характеризується явищами в перехідній зоні між стовпом газового розряду і електродами, а також густиною енергії на катоді (радіуси плям $r_k < r_a$) і переважаючою загальною енергією на катоді, що виділяється внаслідок бомбардування його іонами, над енергією на аноді. Відмічається залежність коефіцієнта ерозії ω від тривалості імпульсів струму t . При цьому швидкість переносу речовини катодною течією в електричному розряді за гідродинамічною теорією визначається за співвідношенням [2]:

$$v = k \cdot \sqrt{\frac{2\chi}{\chi+1} \cdot \frac{RT}{A}}, \quad (8)$$

де k – корегуючий емпіричний коефіцієнт $\approx 0,3$, який враховує умови адиабатичного розширення течії газів, χ – відносна теплоємність (для металічної пари $\approx 1,66$), R – універсальна газова стала,

T – температура в катодному шарі (5000°C і вище),
 A – атомна вага.

Враховуючи електромагнітні сили для молекул газу і парів металу, максимальна швидкість у потоці, в залежності від сили струму в розряді, що більша 100 А [2,3] –

$$v_{\max} = \sqrt{\frac{2}{\pi \cdot \rho} \cdot \frac{I}{r}}, \quad (9)$$

де ρ – густина пари, I – сила струму, r – радіус плями. Швидкість переносу речовини при пароструменевому витоку парів знаходиться в межах 200÷400 м/с.

При короткочасних імпульсах великої потужності ерозія створюється тепловими вибухами до 50000°C з швидкостями у декілька тисяч м/с. Співвідношення швидкостей факелів з катоду і аноду залежить від властивостей матеріалів електродів.

Суть процесу руйнування металів та зміни їх енергетичного стану при дослідженні процесу електроіскрового переносу

Руйнування електродів дією електроіскрових розрядів за певних режимів роботи електроіскрових апаратів супроводжується ефектом переносу електродного матеріалу від одного електроду (аноду) до іншого (катоду). Раніше в роботі [5] цей процес названо – електроіскрове легування (ЕІЛ).

Для аналізу досліджень процесу електроіскрового зміцнення (легування) металічних поверхонь накопичено значний науковий матеріал [1-9], приведені дані по руйнуванню (ерозії) аноду і збагаченню (легуванню) катоду продуктами ерозії, а також по структурних і фазових змінах, залишкових напругах і розподілу елементів у приповерхневих шарах. Однак, практично не досліджено як елементарні стадії іскрового розряду впливають на ерозію і перенос речовини, який вплив на ці процеси енергетичних параметрів розряду [6]. Встановлення закономірностей такого впливу склало мету даної роботи. В подальшому проаналізовано, що ступінь руйнування підкладки суттєво зростає із збільшенням тривалості розряду, представлена залежність величини швидкості руйнування (ерозії) електроду від сили струму при незмінній тривалості розряду ($\tau \approx 1,5$ мкс).

Порівнюючи передбачення авторів [2,3] про швидкість ерозії, перенос електродної речовини в умовах дії сили струму і радіуси плям з нашими уявленнями, спостерігаємо їх узгодження, однак, точні залежності необхідно представляти у вигляді рівнянь і співвідношень. Дані таблиць з

роботи [5] підтверджують виведені співвідношення (8), (9). Разом з тим, не розраховані коефіцієнти переносу згідно формули (7) і коефіцієнти ерозії згідно (6) для використаних електродних матеріалів, що ускладнює їх застосування і призначення режимів обробки процесу електроіскрового легування на різних апаратах.

Теоретичні проблеми ЕІЛ електроіскровою обробкою сформульовані в [7], де вказується, що електродинаміка легко пояснює всі відомі дослідні дані, отримані дослідниками в даній області. Але, в деяких роботах були отримані результати по від'ємному приросту катода при ЕІЛ, які висунули ряд нових запитань, які потребують пояснення [6]. В нашій роботі вивчався схожий механізм створення ерозійних ямок на катоді і аноді при одиничних розрядах в атмосферних умовах на електродах, виготовлених із фольги товщиною 100 мкм. Використовувалося при цьому як джерело живлення імпульсів струму генератор ЭФИ-46 на V та VI режимах.

В роботах [3,7] відмічено принципову важливість схоплюваності між електродами. Ця особливість властива електроіскровому легуванню в повітрі і реалізується вона як, наприкладі, із застосуванням електродів із фольги, так і при ЕІЛ реальних деталей та інструменту. Багатьма дослідниками вона означена як "залипання". Таке фізичне явище можна пояснити, вводячи поняття імпульсної поляризації поверхневих шарів електродів, що зближуються.

Механізм імпульсної поляризації металів і сплавів заслуговує окремих досліджень, але, в першому наближенні, він розглядається як взаємодія локальних об'ємів електродів з додатним і від'ємним потенціалом просторових структур з поляризованими атомними поверхнями, електричні потенціали яких сумуються в момент проходження імпульсу струму в розрядному контурі. Цей ефект імпульсної поляризації металів має вибуховий характер, фізичну природу якого потрібно дослідити експериментально та описати теоретично.

Енергетичний процес руйнування електродів при розряді високих енергій

Електрична енергія в розрядному проміжку перетворюється в тепло, перетворюючи середовище (повітря) в іонізований газ з високим тиском і температурою. Подібне явище виникає при проходженні потужного електричного струму по металевому провіднику, якщо сила струму достатня для його швидкого перетворення в пар. Ці явища дуже швидкоплинні і в обмеженому

об'ємі мають вибуховий характер. Якщо середовище відсутнє і дія проходить у вакуумі [8], енергія вибуху перетворюється в кінетичну енергію продуктів ерозії, що розлітаються у всіх напрямках з великою швидкістю – вибухова хвиля здійснює механічний удар на поверхні, які розташовані довкола. Цей ефект названо вибуховою емісією електронів. Віддаль на яку вибухова сила передає свою дію при розряді довільної енергії зростає пропорційно до енергії вибуху в степені 1/3. Пропорційно цій же величині зростає інтервал часу дії цієї хвилі. Типовим прикладом вибуху є – вибух хімічних речовин, здатних до швидкого хімічного розкладу. При цьому енергія міжмолекулярних з'єднань виділяється у вигляді тепла. Так повітря за дії іскри розкладається на складові: H_2 , O , N певної концентрації, в залежності від термодинамічної рівноваги стану.

Вибухова речовина, або наслідки її розпаду, стиснені ударною хвилею, переходить в стан, за якого хімічний розпад протікає дуже швидко. В результаті проміжок, в якому звільняється енергія, зосереджений в тонкому шарі, що прилягає до фронту ударної хвилі. В даному випадку, енергія, що виділяється, підводиться від зовнішнього джерела у вигляді генерованих імпульсів розряду задаючого генератора. Явища вибухового характеру виникають також при дії на речовину сфокусованого лазерного випромінювання, тобто, розглядається процес швидкого звільнення енергії, який починається внаслідок раптового руйнування оболонки, яка стримує газ з високим тиском. Подальші дослідження відіграють важливу роль у розвитку фізики нерівноважних процесів, яка вивчає явища переносу маси реагуючих речовин, імпульсу енергії, що передається в різних середовищах, а також механізми фазових переходів речовин і кінетику швидких хімічних реакцій [10].

Швидкодія хімічних реакцій, що проходять, проявляється у вигляді вибухової ударної хвилі, яка розповсюджується від, так званої, ділянки збіжних контактів електродів іскрового проміжку мікронерівностей їх поверхонь [8]. Ударна хвиля інтенсивністю $10 \div 15 \text{ Гн/м}^2$ викликає великі швидкості деформацій металу при високому рівні напруг, що приводить до інтенсивного розвитку пластичних зсувів в мікрооб'ємах (розорієнтація малокутових границь, дислокації, дефекти металів, виникнення субграниць). При цьому густина дефектів і, відповідно, зміцнення мікрооб'ємів виявляється більш значним, ніж при деформації у звичайних умовах, тобто, твердість і міцність

збільшуються, а пластичність і ударна в'язкість зменшуються.

Для подальших досліджень, за вище приведеними вимогами, необхідно зробити теоретичне обґрунтування процесів видалення продуктів еродуючих речовин, визначити втрати речовини електродів за межами зони розряду δ (7), або їх перенос на електрод у складі з'єднань і окисних шарів. Також потрібно приділити увагу питанням пасивації поверхневих шарів, коли проходить насичення і активація процесу переносу.

Активация переносу пов'язана з носіями зарядів – електронами і позитивними іонами в газовому електродному проміжку (в деяких випадках подібну роль виконують від'ємні іони). В проміжку існують n_e електронів і n_i іонів. Під дією електричного поля \vec{E} виникають сили $e\vec{E}$, і частки рухаються вздовж ліній поля з середніми швидкостями дрейфу v_e і v_i .

Перенос зарядів в напрямку \vec{E} відповідає густині струму [7]

$$j = n_e \cdot e \cdot v_e + n_i \cdot e \cdot v_i. \quad (10)$$

Середньоквадратична швидкість часток в плазмі розряду визначається із виразу [7]:

$$v \approx 1,6 \cdot 10^2 \sqrt{T/A}, \quad (11)$$

де A – атомна маса, T – температура газу. Значення середньоквадратичних швидкостей різних часток при $T \approx 6000 \text{ К}$ приведені в [7], для електронів складає $v = 5 \cdot 10^5 \text{ м/с}$, для іонів вуглецю C – $v = 4 \cdot 10^3 \text{ м/с}$.

Відомі такі види емісії електронів твердими тілами: термоелектронна, автоелектронна (або електростатична), фотоелектронна (з зовнішнім ефектом), вторинна, яка виникає при бомбардуванні твердого тіла важкими частками (атомами, іонами) або потоком первинних електронів [7] і вибухова [8].

При термоелектронній емісії електрони провідності вільно переміщуються у всьому об'ємі металу, але не можуть вийти за його межі – цьому перешкоджає електричне поле з поверхневим потенціальним бар'єром. Форма і висота бар'єру визначається роботою виходу $\phi = \Phi/e$, значення якої визначається періодичною функцією атомного номера елементу і приблизно в 2 рази менше потенціалу іонізації тієї речовини, через яку здійснюється розряд [7].

В [6] проведена класифікація за емісійними постійними, пов'язаних з роботою виходу, для деяких металів (W , Fe , Th , Cs , Li , і т.д.).

Розрахунок густини термоемісійного струму і

уявлення про розподіл електронів в плазмі розряду дає вираз Річардсона-Дешмана [7]:

$$j_{ТЭ} = a \cdot T^2 \cdot \exp\left(-\frac{\phi}{kT}\right), \quad (12)$$

де постійна $a=4\pi \cdot m \cdot k^2 \cdot e/h^3 \approx 1,2 \text{ } \square/(\text{мм}^2 \cdot \text{К})$, h – величина міжелектродного проміжку, m – маса речовини випареного металу, ϕ – робота виходу.

Густина струму автоелектронної емісії при наявності прискорюючого поля дорівнює [7]:

$$j_{ат} = a \cdot T^2 \cdot \exp\left[-(\phi - \Delta\phi)/(kT)\right]. \quad (13)$$

В умовах мікрозварювальної дуги електрони, імітовані катодом, зустрічають нейтральні атоми стовпа дуги і іонізують їх на шляху свого пробігу. В процесі переносу частинки в плазмі розряду, на поверхні електродів утворюють оксиди, плівки шлаку, хімічні сполуки, які сильно впливають на роботу виходу ϕ і величину a . Проходить деяка пасивація шарів, процес нарощування шарів припиняється, потрібна активація процесу переносу. Густина струму автоелектронної емісії (електростатичної емісії) визначається формулою Фаулера–Нордгейма [7]:

$$j_{аэ} = \gamma \cdot E^2 \cdot \exp\left(-\frac{3/2 b \cdot \phi \cdot e}{E}\right), \quad (14)$$

де γ , b – константи, залежні від металу катода. Чим більше \vec{E} , тим вужче бар'єр і більша $j_{аэ}$.

Для збільшення емісійних властивостей електродів використовують покриття з торію, лантану, барію на вольфрамі та ін. ($\phi=1,5 \dots 2,7 \text{ В}$). Збільшення емісії пояснюється утворенням на поверхні електроду дипольного шару, поверненого додатковим (позитивним) зарядом зовні (у випадку електроіскрового легування де зразок є катодом, а легуючим електродом є анод).

Вибухову емісію електронів в α -плямах і емісійних центрах потрібно розглядати окремо. Необхідно врахувати, що розряди між електродами проходять в повітряному середовищі, тому його складові: N , \square_2 , \square_2 – різко знижують емісію з поверхні катода, і на певному етапі легування інтенсивність переносу електродної (анодної) речовини на катод зменшується. Слід зазначити, що окисли або суміжні плівки суттєво впливають на емісію електронів при температурах менших ніж температура їх кипіння, так як при більш високих температурах – вони випаровуються [7].

Зберігаючи єдину термінологію і класифікацію для електродів, що плавляться при мікрозварювальних і зварювальних процесах, а також, як різновид процес ЕІЛ, для процесів мікрозварювання, що супроводжуються переносом мікро-

частинок у мікроскопічних дугових умовах, введено поняття *Me*-дуги і *W*-дуги.

Технологічне застосування *Me*-дуг – зварювання та різання електродом, що плавиться, а *W*-дуг – зварювання напливаючими електродами, плазмове зварювання, різання і напилення.

W-дуги – унікальні серед електричних розрядів, завдяки тому, що вони можуть горіти при напругах менших, ніж потенціал іонізації струму, який проходить через газ. Ця дуга при $U_g \approx 9-11 \text{ В}$ може горіти в потоці, наприклад, аргону, потенціал іонізації якого 15,7 В і мінімальний потенціал збудження 11,5 В [9]. В цьому випадку завдяки високій температурі виникає інтенсивна термоіонізація.

Витрата *W*-електрода при зварюванні може значно збільшитись при перевищенні струму, або при підключенні його на зворотну полярність (випадок електроіскрового легування). Допустима густина струму для *W*-електродів вища на постійному струмі прямої полярності – $20 \div 30 \text{ А/мм}^2$ і приблизно в 3-8 разів більша при зварюванні на оберненій полярності, а саме $160 \div 240 \text{ А/мм}^2$ [9].

Кінетика хімічних реакцій і дифузійних процесів на електродах при електроіскрових процесах і переносі

Електроіскровий процес переносу – швидкоплинний процес, який супроводжується хімічними реакціями між електродами і оточуючим середовищем (атмосфера, шлаки, продукти ерозії, електродні утворення на поверхні, скупчення, оксиди, окисли), високими температурами і дифузійними процесами. За таких високих швидкостей дифузійних процесів змінюються концентрації в околі електродних зон, їх структура, мікрорельєф, енергетична активність, електрофізичні і електрохімічні параметри [3].

При утворенні хімічних з'єднань молекули і атоми перебудовуються і створюють нові хімічні з'єднання і продукти реакції в залежності від зовнішніх чинників – P , T , C . Реакції протікають в одному з незворотних напрямків до положення рівноваги. [9].

Для виведення системи з положення рівноваги і приведення одного моля реагуючих речовин у реакційно дійовий стан, введено поняття енергії активації. Ця енергетична функція узагальнює питання побудови і складу реагуючих масових речовин, регулює і трансформує способи їх збудження при термічному, радіаційному і електронно-ударному процесі.

При зіткненні молекул реагуючих речовин активними будуть вважатися ті, що володіють енергією, яка дорівнює або більша за енергію активації. Енергія активації пов'язана із швидкостями перебігу реакцій і температурою, у відповідності з рівнянням Максвелла-Больцмана:

$$K_T = K_0 \cdot \exp(-E_a / (RT)), \quad (15)$$

де K_T – константа швидкості хімічних реакцій, K_0 – постійний коефіцієнт, E_a – енергія активації хімічної реакції, R – газова стала, T – температура.

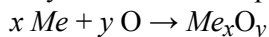
Енергія активації визначається для кожного дослідного випадку шляхом визначення констант швидкості реакцій і їх температур окремо, стосовно до методів хімічної термодинаміки. Особливо високими є рівні енергії активації при дифузійних процесах для твердих металів. Наприклад, торій дифундує в об'ємі вольфраму, за енергії активації 502 кДж/моль, а при поверхневій дифузії енергія активації – 273 кДж/моль. Відповідно змінюються і коефіцієнти дифузії, так як рівняння для коефіцієнта дифузії – аналогічно рівнянню константи швидкості хімічної реакції [7]:

$$D_T = D_0 \cdot \exp(-Q / (RT)),$$

де D_T – коефіцієнт дифузії при температурі T , D_0 – постійний коефіцієнт, Q – енергія активації дифузії.

Енергія активації дифузії Q завжди нижча ніж енергія активації хімічної реакції E_a , тому за високих температур найбільш ймовірний дифузійний режим.

При гетерогенній хімічній реакції продукти можуть закривати контактну поверхню деяким неперервним шаром, наприклад, твердою речовиною, дифузійні процеси в якій розвиваються повільно. В цих випадках процес окислення металу буде продовжуватись в режимі отримання оксиду по правилу Піллінга-Бедворса по реакції:



із об'єму витраченого металу $V_{\text{Me}} = \frac{x \cdot A_{\text{Me}}}{\rho}$, де

A_{Me} – атомна маса, ρ – густина металу. Об'єм отриманого оксиду металу:

$$V_{\text{Me}_x \text{O}_y} = \frac{M_{\text{Me}_x \text{O}_y}}{\rho_{\text{Me}_x \text{O}_y}},$$

де $M_{\text{Me}_x \text{O}_y}$ і $\rho_{\text{Me}_x \text{O}_y}$ – молекулярна маса і густина оксиду.

З ростом товщини плівки оксиду пов'язане питання про пасивацію шару на контактних по-

верхнях електродів. Запропоновано пасивацію оцінювати фактором суцільності поверхні [9]:

$$\alpha = \frac{V_{\text{Me}_x \text{O}_y}}{V_{\text{Me}}} = \frac{M_{\text{Me}_x \text{O}_y} \cdot \rho_{\text{Me}}}{x \cdot A_{\text{Me}} \cdot \rho_{\text{Me}_x \text{O}_y}}.$$

Окисні плівки, названі захисними, що пасивують метал, оцінюються критерієм α , який дійсно відображає умови різновіщинності і лімітується кінетикою хімічної реакції при встановлених параметрах дифузії. Цей критерій приймає значення $\alpha=1,2 \div 1,6$, і може змінюватись відповідно до умов проходження розряду між електродами за параболічним законом росту [9].

Високі концентрації СО в газовій атмосфері викликають процес карбідоутворення, насичуючи поверхню електродів вуглецем. Сімейство d -металів, або перехідних, утворюють багаточисельні карбіди, які володіють високою твердістю (TiC, ZrC, NbC, Cr₂₃C₆, α -оС, WC) – близькою до твердості алмазу, електропровідністю – електронною або напівпровідниковою, стають зміцнюючими фазами, в залежності від режимів обробки.

За високих температур, присутній в повітрі азот завжди, в якійсь мірі, бере участь в процесі переносу при електроіскровій обробці, і реагуючи з багатьма елементами утворює нітриди. Наприклад, реагуючи з кремнієм, присутнім в сплаві заліза, утворює нітрид кремнію Si₃N₄, який має напівпровідникові властивості.

Необхідно відмітити, що в силу своєї рухомості Н (водень), при середній допустимій концентрації в повітрі, утворює лінію сплавлення для металів не утворюючих гідридів і зону термічного впливу для гідроутворюючих металів, при цьому виникають дефекти (дислокації, тріщини і т.д.).

Однією з важливих особливостей проведення окислювально-відновних реакцій і утворення рівноваги потенціалів міжелектродного середовища і поверхонь електродів, є утворення мінеральних фаз у вигляді шлакових з'єднань. Шлаки це – рідкі мінеральні фази, які віддаляють дзеркало поверхні електродів від безпосередньої дії газової атмосфери. Через тонкі шари шлаку дифундують гази, або оксиди металів на границю розподілу з газами, там окислюються та, повертаючись до поверхні електродів, передають захоплений кисень. Рівновага між компонентами шлакової та металеві фаз визначається узагальненим законом розподілу [9].

За типом взаємодії з металічною мікроованою

при дії електроіскрових розрядів шлаки розділяються на окислювальні та відновлювальні. В рідкому стані шлак проводить електричний струм і є електролітом, що взаємодіє з оксидами металів і утворює цілі комплекси. В ці комплекси можуть входити з'єднання на основі FeO , CaO , SiO_2 , TiO_2 , Cr_2O_3 і т.д., в залежності від того, який склад електродів застосовується. В цьому багатокомпонентному розчині різні компоненти впливають один на одного і тому коефіцієнти активності приймають різні значення [6,9]:

$$a_i = \gamma_i \cdot N_i \quad (16)$$

Виходячи з основних положень термодинаміки можна теоретично визначити взаємодію між іонами на підставі методу розрахунку їх коефіцієнтів активності, а саме обчислення енергії Гіббса для всієї системи або складу регулярного іонного розчину.

Температура плавлення шлаку і плівкових з'єднань в кратерах мікроступів, як правило, нижча ніж температури кристалізації утворених з'єднань в основному металі електродів, але вона впливає на умови проходження іскри і інтенсивність металургійних реакцій на границі метал-шлак, шлак-міжелектродний проміжок. При досягненні температури плавлення шлаку змінюється в'язкість, а саме взаємодія часток, що його складає. Іонні розчини, утворені на поверхні сталі, такі як Ca^{2+} , Na^+ , Si^{2+} , Fe^{2+} , F^- , O^{2-} , володіють малою в'язкістю, значення якої різко змінюється в момент кристалізації, а такі іонні розчини як Si_xO_y , або SiO_2 , володіють підвищеною в'язкістю, яка супроводжується значним переохолодженням.

Величина в'язкості тісно пов'язана з електропровідністю іонних розчинів [9]:

$$\eta \cdot \lambda = \text{const} \quad (17)$$

де η – в'язкість, λ – електропровідність. Тому визначення температур затвердіння шлакових систем можна проводити приладами для електричних вимірювань.

В останні роки розроблені способи газового захисту електродних матеріалів з використанням газових сумішей $\text{Ar} + \text{He}$, $\text{Ar} + \text{O}_2$, $\text{Ar} + \text{CO}_2$, $\text{CO}_2 + \text{O}_2$, та інших.

Електроіскрову обробку з оберненою полярністю можна вести у потоці аргону або гелію, з використанням електродів металокерамічних сплавів на основі сталі. В цих випадках відсутній перегрів металу, і перенесення електродної речовини здійснюється в більш оптимальних умовах. В цих же умовах проводиться легування

електродними матеріалами із хімічно активних, або рідких металів (Ti, Zr, Nb).

Висновки

На підставі досліджень зношення електродів-інструментів при електроерозійній обробці і електроіскровому легуванню інструментальних сталей знайдені співвідношення між продуктивністю обробки, потужністю ведення режиму роботи апаратів, коефіцієнтом оброблюваності матеріалів, коефіцієнтом переносу і коефіцієнтом ерозії матеріалу електроду. Також встановлено сутність факторів, що супроводжують електроіскрове легування, таких як швидкість перенесення речовин при пароструменевому витоку, потужність ерозії, густина енергії на катоді і тривалість імпульсів струму.

В роботі приводиться класифікація перехідних процесів між електродами за результатами останніх досліджень вибухових процесів між електродами.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Думне В.Э. Электроэрозионная обработка деталей. - Киев: Техника, 1975.
2. Таганов К.И. Спектральный анализ металлов и сплавов с предварительным отбором пробы. - М.-Л.: Госэнергоиздат, 1951.
3. Завойко О.С. Теоретичні основи процесів, що виникають на електродах при електроіскровому легуванні // Науковий вісник ЧНУ. Вип. 157: Фізика. Електроніка. - Чернівці: ЧНУ, 2003. - С.94-100.
4. Золотых Б.Н. Электроискровой контактный способ упрочнения металлических поверхностей. - М.-Л.: Госэнергоиздат, 1951.
5. Лазаренко Б.Р., Лазаренко Н.И., Бакал С.З., Мостика Г.П. Об электроискровом легировании металлических поверхностей в вакууме. // Электроискровая обработка металлов. - 1973. - №6. - С.34-36.
6. Композиционные слои и градиентные материалы и покрытия. Электрические контакты и электроды: Труды Института проблем материаловедения им. И.Н.Францевича НАН Украины. - Киев, 2001.
7. Жура В.И., Юхненко В.В., Назарец В.С. О механизме эрозии металлов при ЭИЛ // Электроискровая обработка материалов. - 1981. - №1. - С.29.
8. Сливков И.Н. Процессы при высоком напряжении в вакууме. - М.: Энергоатомиздат, 1986.
9. Теория сварочных процессов // Под. ред. В.В. Фролова. - М.: Высшая школа. 1988.
10. Минакова Р.В., Картузов В.В., Гречанюк Н.И. Прикладные аспекты синергетики при создании и применении материалов // Тез. докл. Междунар. конф. "Электрические контакты и электроды", 15-21 сентября 2003. - Кацивели, 2003. С.123-124.