

УДК 621.31

**Радько Іван Петрович**, канд.техн.наук, доцент,**Мархонь Михайло Володимирович**, асистент

Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна. Вул. Героїв Оборони, 15, м. Київ, Україна, 03041, (067) 661-57-44

**АНАЛІЗ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ РУХУ І НАГРІВАННЯ ЧАСТОК В ПОТОЦІ ПЛАЗМИ ПРИ ВІДНОВЛЕННІ КОНТАКТНИХ ВУЗЛІВ**

*В статті розглянуто явища, які мають місце на шляху руху частки порошку від моменту входження в контакт з плазмовим струменем до моменту їх дотику до основи. Обґрунтовані закономірності і математичні залежності процесу утворення покриттів.*

**Ключові слова:** енергія, плазма, теплообмін, контактні матеріали, електрична дуга.

**Радько Іван Петрович**, канд. техн. наук, доцент**Мархони Михаил Владимирович**, ассистент

Национальный университет биоресурсов и природопользования, г. Киев, Украина. Ул. Героев Обороны, 15, г. Киев, Украина, 03041, (067) 661-57-44

**АНАЛИЗ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ДВИЖЕНИЯ И НАГРЕВА ЧАСТИЦ В ПОТОКЕ ПЛАЗМЫ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ КОНТАКТНОГО УЗЛА.**

*В статье рассмотрены явления, которые имеют место на пути движения частицы порошка с момента вхождения в контакт с плазменной струей до момента их прикосновения к основанию. Обоснованные закономерности и математические зависимости процесса образования покрытий.*

**Ключевые слова:** энергия, плазма, теплообмен, контактные материалы, электрическая дуга.

**Radko Ivan Petrovich**, Ph.D., associate Professor**Marhoni Mikhail Vladimirovich**, assistant

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyev, Ukraine. Str. Heroes of Defense, 15, Kyev, Ukraine, 03041, (067) 661-57-44

**THE ANALYSIS OF PHYSICAL AND CHEMICAL PROCESSES OF MOTION AND HEATING OF PARTICLES IN THE PLASMA AT RESTORATION CONTACT ASSEMBLY.**

*The article describes the phenomena that take place in the path of the powder particles from the time of entering into contact with the plasma jet until they touch the ground. Reasonable patterns and mathematical relationships of the formation of coatings.*

**Keywords:** energy, plasma, heat, contact materials, electrical arc.

**Постанова проблеми**

Визначити процеси зміни хімічного складу напиленого матеріалу внаслідок термічного розкладання, взаємодії поверхні частки з елементами оточуючого середовища, а також взаємодії в об'ємі частки у випадку напилювання генерогенних порошкових контактах матеріалів та морфологічні зміни у напиленому матеріалі внаслідок явищ шарування при плавленні, зіткненні і руйнуванні часток в замкненому газовому потоці.

**Аналіз останніх досліджень**

Цілий комплекс явищ, що мають місце на шляху руху частки порошку від моменту входження в контакт з плазмовим струменем до моменту їх дотику до підкладки, може бути розбитий на наступні чотири основні групи:

а) газодинамічні процеси, що викликають прискорення і гальмування руху частки і визначають час її перебування в різноманітних зонах, а також запас кінетичної енергії в момент зустрічі з підкладкою;

б) процеси теплообміну, що супроводжуються фазовими перетвореннями (плавлення, випаровування), в результаті яких частка до моменту участі її у формуванні покриття набуває визначений запас теплової енергії;

в) процеси зміни хімічного складу вихідного напиленого матеріалу внаслідок термічного розкладання, взаємодії поверхні частки з елементами оточуючого середовища (киснем,

азотом тощо), а також взаємодії в об'ємі частки у випадку напилювання гетерогенних порошкових матеріалів;

г) морфологічні зміни в напиленому порошковому матеріалі внаслідок явищ шарування при плавленні, зіткненні і руйнуванні часток в запиленому газовому потоці.

Відомості про значення теплової і кінетичної енергії частки, її розміри, форму і хімічний склад є необхідними при аналізі процесів формування покриття. Для обґрунтування вибору тих чи інших загальних закономірностей і математичних залежностей, що отримані в теорії двофазних потоків, необхідно складання характеристики плазмового струменю з точки зору умов протікання газу і його взаємодії з дисперсною складовою. Перш за все, це відноситься до значення числа Рейнольдса ( $Re$ ). Розрахункова оцінка показала, що для різноманітних умов напилювання величина  $Re$  знаходиться в межах 0,5–22 (ламінальний режим протікання газу).

Що стосується теплофізичних характеристик, то тут найбільшу цікавість являє критерій Біо ( $Bi$ ). Розрахункові значення свідчать про широкий діапазон його можливих змін в залежності від роду напиленого матеріалу і складу плазмоутворюючого газу (0,001–5,5), тобто про нагрівання частки як при відсутності температурного градієнту, так і при суттєвому перепаді температур між їх поверхнею і центром.

Другим теплофізичним критерієм, що характеризує умови теплообміну, є критерій Фур'є. Він визначає час переходу процесу теплообміну в квазістаціонарний стан, вирівнювання температури по перерізу частки.

Виходячи з положення, що частка порошку взаємодіє з неізотермічним затопленим струменем плазми, яка володіє радіальним і осьовим градієнтами температури і швидкостей можна оцінити сили, що взаємодіють на неї в цих умовах [1, 2]:

- силу аеродинамічного опору;
- силу, що обумовлена градієнтом тиску в потоці;
- силу прискорення часток шару газу, який прилягає до поверхні (приєднаної маси);
- силу, яка обумовлена нестационарністю процесу і залежить від характеру руху частки за попередній період (сила Басе);
- силу, що обумовлена інерцією об'єму газу, який витіснила частка;
- силу земного тяжіння частки;
- силу термофорезу, що обумовлюється наявністю температурного градієнту в потоці;
- силу, яка обумовлена обертанням частки внаслідок градієнту швидкості обтічного потоку (сила Магнуса).

Розрахункова оцінка величини цих сил показує, що якщо перша з них складає  $50 \times 10^{-3}$  Н, то сили Басе і Магнуса знаходяться приблизно на рівні  $3 \times 10^{-3}$  Н і  $2 \times 10^{-3}$  Н відповідно, а інші  $10^{-3} - 10^{-5}$  Н [3].

Нагрівання часток в плазмовому струмені при значенні критерію Кнудсена  $Kn < 1$  в основному визначається конвективним теплообміном і оцінюється за критерієм Нусельта ( $Nu$ ). В більшості випадків вважають, що теплопровідність часток і їх розміри такі, що тепловідвід з поверхні всередину частки і її теплообміні з газом не відіграє суттєвого значення ( $Bi < 0,1$ ). Радіальний розподіл швидкостей і температури газу і часток в плазмовому струмені може бути описаний профілями Шліхтинга. Режим протікання газу поблизу поверхні частки в ряді випадків може відповідати протіканню із ковзанням [3].

При формуванні плазмового покриття окрім напиленого матеріалу приймає участь і безпосередньо основа (матеріал контактотримача апарата), а отже, до кількості факторів, що впливають на цей процес, входять:

- склад матеріалу основи з його теплофізичними і фізико-хімічними характеристиками;
- стан поверхні основи (наявність різного роду плівок, величина жорсткості, нагрівання тощо);
- термічна дія на основу газового струменю.

Таким чином, етап формування покриття являє собою складний комплекс різного роду явищ що впливають на отримання покриття з бажаним рівнем властивостей.

Феноменологічний аналіз явищ, що протікають на стадії відновлення контактів комутаційних апаратів, дозволяє виділити основні із них [4]: удар частки по поверхні; деформацію частки; термічні процеси в зоні контакту; виникнення сил зчеплення частки з контактною поверхнею; встановлення термічної рівноваги системи покриття - основа з оточуючим середовищем і формування залишкової напруги. Вказані явища не розділені в часі і загалом накладаються одне на одне [3]

Прослідкуємо за розвитком контактних процесів при ударі та затвердінні часток покриття на основі, температура якої послідовно підвищується. Проведені нами експерименти були виконані для модельного металу - срібла. Срібло не дуже окислюється під час проведення дослідів і, крім того, внаслідок високої пластичності срібла, осередки захвату мають чітко виражений рельєф після відділення часток від основи по межі контакту. Це гарно видно на рисунку де на поверхні основи під часткою, що приварилася, а потім механічно видаленої, гарно простежується рельєф поверхні. На початку взаємодії частки з основою в їх контактні утворюються осередки захвату. Після відривання часток від основи на поверхні в осередках захвату залишаються сліди металу, який був вирваний з часток (світлі виступи - осередки захвату).

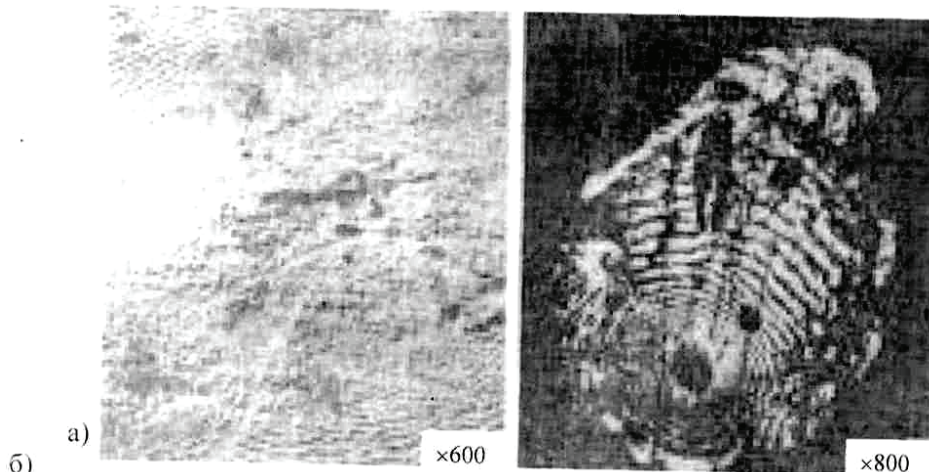


Рисунок. Фрактографія поверхні основи (матеріал СрМ-0,2) під привареною срібною часткою:

- а) утворення шару покриття: велика частка накрила меншу за розміром і відірвала її від основи; б) вид контактної поверхні частки, що відірвана від основи.

На металах розміри осередків захвату, що спостерігали за допомогою растрового скануючого мікроскопу, складають 200-700 нм. По мірі розвитку реакції кількість осередків збільшується і при міцності зчеплення, що близька до максимальної, вони практично зливаються, заповнюючи всю центральну область  $D_x$  деформованої частки. Діаметр плями хімічної взаємодії  $D_x$  звичайно дещо більше діаметра напиленої частки  $D_x \approx D$ . Рівність діаметрів пояснюється тим, що на площі діаметром інтенсивно діє тиск при ударі та деформації частки. Ближче до краю частки тиск знижується і краї приварюються гірше. Однак, при сильному нагріванні основи або перегріванні частки температура, мабуть, компенсує недолік тиску і частки приварюються повністю  $D_x \approx D$  по всьому діаметру  $D$ .

Накладаючись одна на одну, частки утворюють шар покриття. Якщо когезія часток вища, ніж їх адгезія, то при відриванні покриття руйнування відбувається між основою і часткою.

Аналіз процесів, що відбуваються при ударі і деформації частки, дозволив зробити принципово важливий висновок - можливість взаємного термічного впливу часток при газоплазмовому напилюванні досить мала і імовірність попадання нової розплавленої частки на ще не загуслу, що напилена раніше, може не братися до уваги. Це суттєво полегшує аналіз

процесу утворення покриття, зводячи його до дослідження контактної взаємодії окремих часток.

Більшість дослідників віддають зараз перевагу гіпотезі утворення сил зчеплення при напилюванні переважно за рахунок міжатомних зв'язків, признаючи в той же час наявність і елементів механічного зачеплення і міжмолекулярної взаємодії, тобто взаємодія в цьому випадку носить комплексний характер з одночасною реалізацією деяких механізмів зчеплення покриття з основою.

Згідно сучасних положень, увесь процес взаємодії частки з напиленою поверхнею можна представити складеним з трьох стадій: утворення фізичного контакту; активація контактних поверхонь та утворення хімічних міжатомних зв'язків на межі розділу; розвиток об'ємної взаємодії (релаксація мікронапруги, рекристалізація, гетеродифузія, утворення нових фаз).

Для забезпечення механічного зчеплення і виникнення сил типу Ван-дер-Ваальсових достатньо наявності першої стадії. Процес з'єднання на другій та третій стадіях визначається трьома основними параметрами - температурою в контакті, тривалістю процесу і величиною прикладеного тиску.

У всіх випадках важливим моментом є деформація і розтікання часток, що забезпечує фізичний контакт напиленої частки з поверхнею. Ступінь деформації частки і досконалість утвореного контакту з напиленою поверхнею залежить від великої кількості факторів: теплової і кінетичної енергії часток, властивостей матеріалу розплаву (в'язкості, теплоємності теплопровідності, поверхневого натягу тощо), стану напиленої поверхні тощо.

Термодинамічна імовірність здійснення хімічної взаємодії характеризується зменшенням вільної енергії системи, а кінетика – енергетичним бар'єром, котрий необхідно подолати атомам для переходу з одного стійкого стану в інший (енергією активації взаємодії).

Найбільш повільною, на нашу думку, і, мабуть, обмежуючою стадією при напилюванні є активація поверхні основи. Стадія утворення фізичного контакту в результаті деформації і розтікання частки, а також наступні за активацією процеси перерозподілення електронної густини і викликане ними перегрупування атомів (власне хімічна взаємодія) протікають набагато швидше.

При газоплазмовому напилюванні в стадії активації поверхні основи в свою чергу виділяють три фази:

- 1) локальне зниження активаційного енергетичного бар'єру поверхні основи під дією тиску від удару частки внаслідок пружних викривлень решітки і пластичної деформації;
- 2) перехід в активований стан групи атомів в цій локальній області за рахунок внутрішньої енергії коливання атомів в твердому тілі, тобто термічна активація;
- 3) розпад активованого комплексу, в результаті чого в залежності від напруженого стану утворюється нове атомне угрупування (осередок взаємодії) або вихідні поверхневі зв'язки.

В граничному випадку активований стан являє собою дисоціацію або розрив зв'язків, поверхневих атомів, тобто процес руйнування. На цій основі робиться висновок про єдину природу руйнування і з'єднання твердих матеріалів. Внаслідок термомеханічного характеру процесу руйнування в загальному випадку активація матеріалу основи також носить термомеханічний характер.

Розвиток реакції на межі взаємодії фаз, тобто плями контакту, можна приблизно визначити за відносної міцності зчеплення [5]:

$$\frac{\sigma(\tau)}{\sigma_m} = \frac{N(\tau)}{N_0} \quad (1)$$

де  $\sigma(\tau)$  – міцність, що досягається за час  $\tau$ ;



$\sigma_m$  – максимальна міцність, яку можна отримати при завершенні процесу;

$N_0$  – кількість атомів на поверхні основи або частки, що знаходиться у фізичному контакті;  $N_{(\tau)}$  – кількість атомів із кількості  $N_0$ , що прореагували за час  $\tau$ .

Кінетика такої взаємодії загалом описується виразом [5]:

$$\frac{dN}{d\tau} = \nu_D (N_0 - N) \exp\left(-\frac{E_a}{kT_k}\right) \exp(S/k) \quad (2)$$

де  $\nu_D$  – частота власних коливань атомів;

$T_k$  – температура в зоні взаємодії;

$k$  – стала Больцмана;

$E_a$  – ефективна (уявна) енергія активації процесу;

$S$  – коливальна і конфігураційна ентропія активації процесу в зоні хімічної взаємодії.

Внаслідок малої величини  $S$ :

$$\exp(S/k) \approx 1.$$

Вираз (2) якісно правильно відображає процеси хімічної взаємодії при напилюванні, але має ряд суттєвих недоліків для її кількісної оцінки. Основним з них є невизначеність ефективної енергії активації  $E_a$ , [5] яка обумовлена її залежністю від тиску, швидкості деформації, стану поверхні основи, часу взаємодії тощо.

Залишається спірним питання про роль пластичної деформації основи в кінетиці хімічної взаємодії матеріалів при газоплазмового напилюванні. Вважається, що пластична деформація не може бути головним механізмом її активації при плазмовому напилюванні з швидкостями часток нижче 60 м/с. Підтвердженням є той факт, що в лунці, яка утворена на поверхні основи шляхом її пластичної деформації при ударі напиленої частки, не всю поверхню вступає у взаємодію, а лише її локальні ділянки. Крім того, розрахункові оцінки і експериментальні виміри густини дислокацій, що генеровані в поверхневому шарі матеріалу основи при напилюванні, показують, що пластична деформація може призвести до активації не більше 0,1 частини поверхні контакту.

### Висновки

Аналіз сучасних думок про взаємодію напилених часток з основою дозволяє зробити наступні висновки:

1. Хімічна взаємодія між напиленими частками і основою в значній мірі визначає міцність зчеплення газоплазмових покриттів. Кінетика такої реакції лімітується стадією активації поверхні основи. Але відсутні ясні свідчення про головні механізми активації в конкретних умовах напилювання, перш за все, при підвищених швидкостях часток і дефектах поверхні основи.

2. Існуючі відомості про міцність зчеплення газоплазмових покриттів недостатньо повно відображають основні закономірності процесу утворення з'єднання матеріалів при напилюванні, до речі, дискретність хімічної взаємодії, активуючий вплив попередньої обробки основи, роль оточуючого газового середовища тощо.

3. Не існує кількісних оцінок впливу стану поверхні основи - дислокаційної структури, напруги, наявності плівок тощо - на міцність зчеплення покриттів.

Поєднання поглибленого теоретичного аналізу всіх різноманітних явищ, що відбуваються при плазмовому напилюванні покриттів контакт-деталей, з методами регресивного аналізу являє собою, на нашу думку, найбільш доцільний шлях вивчення цих процесів.

### Список використаної літератури:

1. Тушинський Л. И., Плохов А. В. Исследование структуры и физико-механических свойств покрытий. АН СССР, Сибирское отделение. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд. 1986–1996.

2. ДСТУ 3020-95. Апарати комутаційні низьковольтні. Загальні технічні умови.
3. Буткевич Г. В. дуговые процессы при коммутации электрических цепей. – М.: Энергия, 1973. – 172 с.
4. Радько І. П. Диффузия электроконтактных материалов при коммутации тока. Научно-виробничий журнал № 2 «Електрифікація та автоматизація сільського господарства» НАУ. – КНАУ. 2005.
5. Электрические контакты: труды совещания (11–14 декабря 1982 г.) Ответственный редактор Б. С. Сотсков. – М.: Энергия, 1983. – 680 с.

#### Referenses:

1. Tushnskiy L. I., Plohov A.V., (1986–1996) Investigation of the structure and physico-mechanical properties of the coatings. USSR Academy of Sciences, Siberian Branch, Novosibirsk: Nauka. Sib. Dep [Issldovanie strukturi i fiziko-mexanicheskix svoistv pokritii, AN SSSR, Sibirskoe otdelenie].
2. State standards of technical requirements. 3020-95. Vehicles are interconnect low-voltage. General technical requirements. [DSTU 3020-95. Aparati komutacijni niz'kovol'ni. Zagal'ni tehnicni umovi].
3. Butkevich G. V. (1973), Arc processes during switching circuits. [Dugorozriadnie procesi pri comuticii elektricheskix cepei], Energia, Moscow, 172 p.
4. Rad'ko I. P. (2005) Diffusion materials in electric-current switching. [Diffusiiia elektrokotaknix materialov pri komutacii toka], Scientific and Production Magazine № 2 “Electrification and Automation of Agriculture”.
5. Sotskov B. S. (1983), Electrical contacts: proceedings of the meeting (11–14 December 1982) [Elektriceskie kontakti: trydi soveschiania], Energia, Moskow, 680 p.

Поступила в редакцию 25.11 2015 г.