

ОСОБЛИВОСТІ АНАЛІЗУ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ РУХУ ТА НАГРІВАННЯ ЧАСТОК У ПОТОЦІ ПЛАЗМИ ПІД ЧАС ВІДНОВЛЕННЯ КОНТАКТНИХ ВУЗЛІВ

*І. П. Радько, кандидат технічних наук
Національний університет біоресурсів
і природокористування України
e-mail: radko@nubip.edu.ua*

Анотація. Розглянуто явища, які відбуваються на шляху руху частки порошку від моменту входження в контакт із плазмовим струменем до моменту їх дотику до основи. Обґрунтовано закономірності й математичні залежності процесу утворення покриттів.

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

Етап формування покриття є складним комплексом різного роду явищ, що впливають на отримання покриття з бажаними властивостями.

Мета досліджень – визначити процеси зміни хімічного складу напиленого матеріалу внаслідок термічного розкладання, взаємодії поверхні частки з елементами навколишнього середовища, а також взаємодії в об'ємі частки у випадку напилювання гетерогенних порошкових контактів матеріалів та морфологічні зміни у напиленому матеріалі внаслідок явищ шарування при плавленні, зіткненні й руйнуванні часток у замкненому газовому потоці.

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

Щодо теплофізичних характеристик, то тут найбільший інтерес становить критерій Біо (Bi). Розрахункові значення свідчать про широкий діапазон його можливих змін залежно від роду напиленого матеріалу і складу плазмоутворюючого газу (0,001–5,5), тобто про нагрівання частки як за відсутності температурного градієнта, так і за суттєвого перепаду 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 зумовлена градієнтом тиску в потоці;
- силу прискорення часток шару газу, який прилягає до поверхні (приєднаної маси);
- силу, яка зумовлена нестационарністю процесу і залежить від характеру руху частки за попередній період (сила Басе);
- силу, що зумовлена інерцією об'єму газу, який витіснила частка;
- силу земного тяжіння частки;
- силу термофорезу, що зумовлюється наявністю температурного градієнта в потоці;
- силу, що зумовлена обертанням частки внаслідок градієнта швидкості обтічного потоку (сила Магнуса).

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

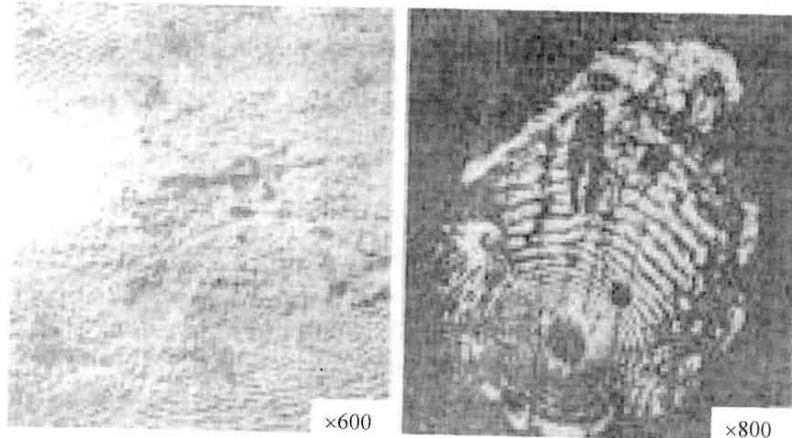
При формуванні плазмового покриття, окрім напиленого матеріалу, бере участь і безпосередньо основа (матеріал контактотримача апарата), а отже, до кількості факторів, що впливають на цей процес, входять:

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

Результати досліджень. Феноменологічний аналіз явищ, що протікають на стадії відновлення контактів комутаційних апаратів, дає змогу виокремити основні з 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 навколишнім середовищем і формування залишкової напруги. Ці явища не розділені в часі й загалом накладаються одне на одне [3].

Простежимо за розвитком контактних процесів під час удару та затвердіння часток покриття на основі, температура якої послідовно підвищується. Ці експерименти ми виконали для модельного металу – срібла. Срібло не дуже окислюється під час проведення дослідів і, крім того, унаслідок високої пластичності срібла, осередки захвату мають чітко виражений рельєф після відокремлення часток від основи по межі контакту. Це добре 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 контакт

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). На металах розміри осередків захвату, що спостерігали за допомогою растрового скануючого мікроскопа, становлять 200–700 нм.



а

б

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 – вигляд контактної поверхні частки, що відірвана від основи

Аналіз процесів, що відбуваються під час удару та деформації частки, дав змогу зробити принципово важливий висновок – можливість взаємного термічного впливу часток при газоплазмовому напилюванні досить мала й імовірність попадання нової розплавленої частки на ще не загусту, 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, водночас, наявність і елементів механічного зачеплення і міжмолекулярної взаємодії, тобто взаємодія в цьому випадку має комплексний характер із одночасною реалізацією деяких механізмів зчеплення покриття з основою.

Згідно із сучасними положеннями, увесь процес взаємодії частки з напиленою поверхнею можна представити складеним із 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 й виникнення сил типу Ван-дер-Ваальсових достатньо наявності першої стадії. Процес з'днання на другій та третій стадіях визначається трьома основними параметрами – температурою в контакті, тривалістю процесу і величиною прикладеного тиску.

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

При газоплазмовому напилюванні в стадії активації поверхні основи, у свою чергу, вирізняють три фази:

а) локальне зниження активаційного енергетичного бар'єра поверхні основи під дією тиску від удару частки внаслідок пружних викривлень решітки і пластичної деформації;

б) перехід в активований стан групи атомів у цій локальній області за рахунок внутрішньої енергії коливання атомів у твердому тілі, тобто термічна активація;

в) розпад активованого комплексу, в результаті чого, залежно від напруженого стану, утворюється нове атомне угруповання (осередок взаємодії) або вихідні поверхневі зв'язки.

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

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

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

σ_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 τ .

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 ν_D – частота власних коливань атомів;

T_k – температура у зоні взаємодії;

k – стала Больцмана;

E_a – ефективна (уявна) енергія активації процесу;

S – коливальна і конфігураційна ентропія активації процесу в зоні хімічної взаємодії. Унаслідок малої величини S : $\exp(S/k) \approx 1$.

Вираз (2) якісно правильно відображує 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 зумовлена 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 газоплазмовому напилюванні. Вважається, що пластична деформація не може бути головним механізмом її активації при плазмовому напилюванні зі швидкостями часток нижчими за 60 м/с. Підтвердженням є той факт, що в лунці, утвореній на поверхні основи шляхом її пластичної деформації при ударі напиленої частки, не вся поверхня вступає у взаємодію, а лише її локальні ділянки. Крім того, розрахункові оцінки та експериментальні виміри густини дислокацій, що генеровані в поверхневому шарі матеріалу основи при напилюванні, показують, що пластична деформація може призвести до активації не більше, ніж 0,1 частини поверхні контакту.

Висновки

Аналіз сучасних думок про взаємодію напилених часток з основою дає змогу зробити такі висновки:

1. Хімічна взаємодія між напиленими частками та основою значною мірою визначає міцність зчеплення газоплазмових покриттів. Кінетика такої реакції лімітується стадією активації поверхні основи.

2. Існуючі відомості про міцність зчеплення газоплазмових покриттів недостатньо повно відображують основні закономірності процесу утворення з'єднання матеріалів при напилюванні, до речі, дискретність хімічної взаємодії, активуючий вплив попередньої обробки основи, роль навколишнього 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 є, на нашу думку, найбільш доцільним шляхом вивчення цих процесів.

Список літератури

1. Тушинский Л. И. Исследование структуры и физико-механических свойств покрытий / Л. И. Тушинский, А. В. Плохов. – Новосибирск : Наука. Сиб. отд., 1986 – 197 с.

2. Апарати комутаційні низьковольтні. Загальні технічні умови: ДСТУ 3020-95. – [Чинний від 1996-07-01]. – К. : Держспоживстандарт України, 1995. – 36 с.

3. Буткевич Г. В. Дуговые процессы при коммутации электрических цепей / Г. В. Буткевич. – М. : Энергия, 1973. – 172 с.

4. Радько И. П. Диффузия электроконтактных материалов при коммутации тока / И. П. Радько // Електрифікація та автоматизація сільського господарства. – 2005. – № 2.

5. Электрические контакты: Труды совещания (11–14 декабря 1982 г.) / отв. редактор Б. С. Сотсков. – М. : Энергия, 1983. – 680 с.

**ОСОБЕННОСТИ АНАЛИЗА ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
ДВИЖЕНИЯ И НАГРЕВА ЧАСТИЦ В ПОТОКЕ ПЛАЗМЫ
ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ КОНТАКТНЫХ УЗЛОВ**

И. П. Радько

Аннотация. *Рассмотрены явления, происходящие на пути движения частицы порошка от момента вхождения в контакт с плазменной струей до момента их касания основания. Обоснованы закономерности и математические зависимости процесса образования покрытий.*

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

**FEATURES ANALYSIS OF PHYSICAL AND CHEMICAL PROCESSES
TRAFFIC AND HEATING PLASMA PARTICLE FLOW IN CONTACT
WITH RESTORATION UNITS**

I. Radko

Annotation. *The phenomena that occur in the path of the powder particles from the moment of entry into contact with the plasma jet till touching the base was studied in the article. The patterns and mathematical dependences of coating formation process were grounded.*

Key words: *energy, plasma, heat transfer, contact materials, electrical arc*