

УДК 621.791.927

**Биковський О. Г., Лаптева Г. М., Пасько М. П.****ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ ПЛАЗМОВОГО ПОКРИТТЯ  
В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД ВИДУ НАПИЛЮВАНИХ МАТЕРІАЛІВ**

Властивості плазмових покриттів визначаються фізико-хімічними процесами, які відбуваються між підкладкою і частинками, а також між самими частинками в покритті при їх сплавленні, деформації і затвердінні. Останнє залежить від кінетики і механізму контактної взаємодії частинок, а це визначає властивості і працездатність покриттів [1].

Відомо, що міцність покриття в значній мірі залежить від енергетичних характеристик (струму, напруги, витрати плазмоутворюючого та транспортуючого газів) та стану поверхні напилюваної основи.

Незважаючи на велику кількість публікацій за даною тематикою [2–8], деякі важливі питання, такі як температура плазмового потоку з металевими частинками, тиск його на підкладку, змочування і розтікання напиленого матеріалу по підкладці, висвітлені недостатньо і не мають однозначного трактування.

Плазмове напилення струмоведучим дротом може виконуватися в широких діапазонах технологічних параметрів залежно від конструкції плазмотрона [9]. Зміна параметрів впливає на фракційний склад напилюваних частинок і ступінь їх окислення, кількість перенесеного ними тепла, температуру виробу, термічний цикл нанесеного покриття, його міцність, щільність і продуктивність самого процесу.

Зміна параметрів режиму впливає на фракційний склад напилюваних частинок і ступінь їх окислення, кількість перенесеного ними тепла, температуру виробу, термічний цикл нанесеного покриття, його міцність, щільність і продуктивність самого процесу [10].

Одним з важливих параметрів є заглиблення катода та відстань катод-анод. За результатами випробувань прийнято, що для струмів 160–170 А заглиблення катода має становити 0,5 мм, а відстань катод – анод в межах 9–11 мм, при цьому зберігається висока стабільність процесу.

Маса переносимих частинок істотно залежить від витрати плазмоутворюючого і транспортуючого газів. Дослідження проводили на струмах 160–170 А, причому спочатку змінювали витрату повітря при постійній витраті аргону, а потім витрату аргону при незмінній витраті повітря. В якості оптимальної була прийнята витрата повітря 15–17 м<sup>3</sup>/год, а витрата аргону  $Q_{Ar} = 1,8$  м<sup>3</sup>/год.

Ступінь взаємодії металу з газовим середовищем в значній мірі залежатиме від дистанції напилення. Встановлено, що найбільша міцність, визначена методом штифтової проби, була досягнута на дистанції 90–100 мм і склала 80 МПа.

Оскільки очевидно, що розміри і температура напилюваних плазмою частинок визначають кінетику формування як самого покриття, так і контактної зони між покриттям і основою, було проведено вимірювання температури шляхом калориметрирування розпилюваних матеріалів у вигляді струмоведучих дротів та порошків з урахуванням одночасного впливу плазмового потоку [11].

Розпилення здійснювалося дротами та порошками різного складу на параметрах режиму, які зазвичай використовуються при промисловому напиленні деталей машин [12].

Встановлено, що температура плазмово-металевого потоку вище температури кипіння відповідних матеріалів, тому частина матеріалу випаровується або згорає. Наприклад при розпиленні алюмінію або дроту, до складу якого входить графіт, частина матеріалу вигорає через підвищення температури внаслідок додаткового прирощення ентальпії під час протікання екзотермічних реакцій. В той час як при розпиленні мідного, бронзового або сталевих суцільнотягнутого дротів 20–25 % металу переноситься в пароподібному стані (табл. 1).

Таблиця 1

Результати розрахунку частки матеріалу, що вигорів  $\gamma_x$  та випарився  $\gamma_e$  в плазмовому струмені

| Розпилюваний матеріал | $t_{\text{поток}} ,$<br>°C | $q_k ,$<br>кДж/(кг град.) | $m_M ,$<br>кг | $\gamma_x$ | $\gamma_e$ |
|-----------------------|----------------------------|---------------------------|---------------|------------|------------|
| Al                    | 7520                       | 10,9                      | 0,0137        | 0,102      | -          |
| Cu                    | 2640                       | 4,773                     | 0,0381        | -          | 0,202      |
| Бронза БрКМц3-1       | 3160                       | 4,773                     | 0,0292        | -          | 0,255      |
| Нп65Г                 | 3000                       | 6,34                      | 0,0202        | -          | 0,236      |
| ПП-100Х15М2Г2Р        | 5140                       | 6,34                      | 0,016         | 0,085      | -          |

Очевидно, що форма та розміри розпилюваних частинок впливатимуть на міцнісні та спеціальні властивості напилених шарів, тому представляється необхідним визначити їх фракційний склад.

Розпорошені частинки виймали з калориметра, просушували, просівали крізь сита, кожна фракція зважувалася на аналітичних вагах. Встановлено, що на 86 % покриття формується з частинок розміром 0,063 мм та менше, причому частка пилоподібних частинок становила 47 %. Вони в свою чергу знижують міцнісні властивості напиленого шару на 25–30 %, тому рекомендується пошарова обробка напилюваної поверхні швидкообертаючоюся сталевією шіткою. Для формування покриття частинками з розмірами 0,1–0,4, які мають найбільшу міцність зчеплення з основою, необхідно дотримуватися вищезазначених параметрів режиму.

Аналогічні дослідження та розрахунки були проведені для порошкоподібних матеріалів.

Встановлено, що температура плазмових струменів з порошкоподібними частинками перевищує температуру кипіння цих матеріалів. Оскільки при використанні порошкоподібних матеріалів є можливим визначити температуру як плазми з металевими частинками, так і плазми без металу, то можна підрахувати, який відсоток ентальпії витрачається на нагрів напилюваного матеріалу при потраплянні його в потік плазми: для ПЦПК 63Н30 – 30 %, для ПКХТН 30 – 22 %, для ПРЛ 63 – 64 % (табл. 2).

Таблиця 2

Розрахунок теплових характеристик розпилених порошоків та газів

| Марка порошку,<br>найменування<br>газу | Температура, °C     |                          |                     |                      | $Q_k,$<br>кДж | $\gamma,$<br>% |
|--|---------------------|--------------------------|---------------------|----------------------|---------------|----------------|
|  | кипіння<br>речовини | різниця<br>в калориметрі | Плазма<br>з металом | Плазма<br>без металу |               |                |
| ПЦПК 63Н30                             | 3910                | 5,7                      | 6035                | –                    | 56,54         | 12             |
| ПКХТН 30                               | 3315                | 7,9                      | 6662                | –                    | 78,37         | 24             |
| ПРЛ 63                                 | 1822                | 4,9                      | 3110                | –                    | 48,61         | 33             |
| Ar + N <sub>2</sub>                    | –                   | 4,3                      | –                   | 8535                 | 38,69         | –              |
| Ar                                     | –                   | 3,9                      | –                   | 8640                 | 48,61         | –              |

У процесі взаємодії з плазмовим струменем відбувається диспергування початкових частинок, так що напилений шар формується майже на 100 % з фракцій розміром 0,063 і менше, причому частка частинок з розміром менше 0,05 мм становить 40–50 %.

Частина фракцій розміром 0,1 мм і більше не встигає розплавитися повністю і переносяться в твердорідкому стані та утворюють так звані «сплети», які часто перекривають один одного. Однак при цьому іноді залишаються ділянки, не заповнені металом, і окремі пори, що не забезпечує його суцільності і щільності (рис. 1).

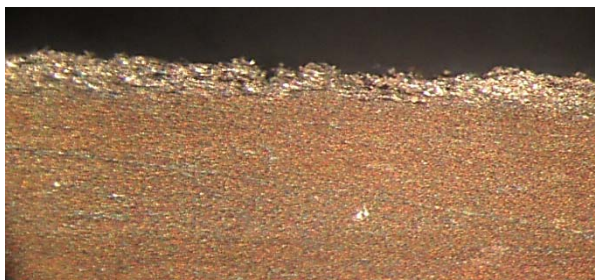


Рис. 1. Формування покриття, виконаного напиленням порошком ПЦПК 63Н30

Також було проведено пряме вимірювання величини тиску плазмових струменів з металевими компонентами, без них, а також тиск холодних газових струменів.

Встановлено, що вимірjana величина напірного тиску плазми з металевими порошкоподібними частками в середньому в 2 рази перевищує тиск чистого плазмового струменя. Холодний газовий струмінь з тими ж параметрами витрати практично не чинить тиску на підкладку, величина зусилля дії не перевищує 1 г. В свою чергу тиск струменю зі струмоведучим мідним дротом на порядок вище ніж при використанні порошкоподібних матеріалів, що сприяє формуванню якісного та більш щільного покриття у порівнянні з використанням порошків.

Характер взаємодії крапель рідкого сплаву в залежності від стану поверхні сталевий твердої основи: гладкої після прокатки та після дробоструминної обробки з  $R_z = 90$  мкм досліджувався на спеціальній установці для визначення поверхневого натягу методом лежачої краплі [13]. Вивчення характеру змочування і розтікання проводили на знімках, де чітко фіксувалися в часі різні стадії процесу: початок плавлення, розтікання рідкої фази, кінетика розтікання.

Крайовий кут змочування вимірювали з точністю до  $0,5^\circ$ , а лінійні розміри краплі з точністю до 0,1 мм. У всіх випадках тривалість дослідів на сталевий основі була прийнята однаковою для кожного поєднання сплав – необроблена основа і сплав – шорстка основа. Для визначення поверхневих характеристик вимірювалися розміри краплі при досягненні нею температури  $t_{пл} + (50...70)^\circ\text{C}$ .

Встановлено, що у всіх випадках досліджувані сплави краще розтікаються на шорсткій (розвинутій) поверхні, ніж на гладкій поверхні твердого тіла. Це пов'язано з тим, що поверхня, піддана дробоструминній обробці, активується в результаті процесів екструзії і інтрузії металу під дією механічної деформації і краще змочується в порівнянні з гладкою внаслідок збільшення капілярного тиску рідини, що рухається, при якому радіус кривизни звужуючогося меніска зменшується. При дробоструминній обробці на поверхні твердого тіла утворюються кругові вм'ятини, які в поперечному перерізі являють собою канали (капіляри) зі змінними поперечними перетинами які звужуються, так, що рідкий розплав проникає в них, утворюючи стійкий опуклий меніск, спрямований у сторону вузької частини. Рідина переміщається під дією зовнішнього тиску, радіус кривизни зменшується, капілярний тиск збільшується, і вона заповнює весь обсяг капіляра.

У всіх випадках величина роботи когезії вище роботи адгезії, внаслідок чого коефіцієнт розтікання має від'ємне значення.

Змочування металевими розплавами шорсткої поверхні супроводжується збільшенням фактичної площі контакту рідкої фази з твердою фазою (рис. 2, а), чого немає при контакті рідкої фази з плоскою поверхнею твердого тіла (рис. 2, б).

Були проведені дослідження впливу часу дробоструминної обробки на морфологію оброблюваної поверхні і міцність зчеплення плазмового покриття з основою.

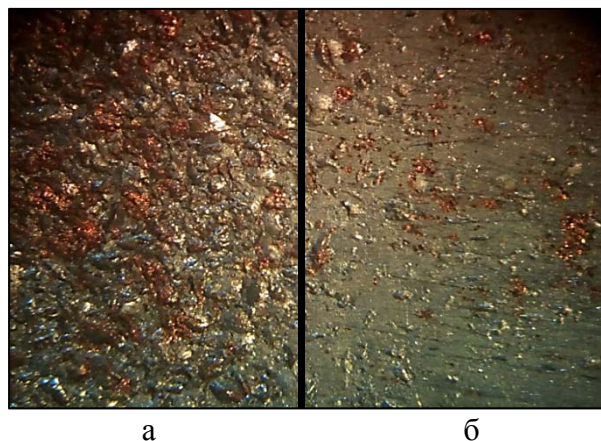


Рис. 2. Характер розтікання при плазмовому напиленні міді на алюміній в залежності від стану поверхні

Отримані дані дають можливість побудувати графічну залежність висоти мікронерівностей від часу дробоструминної обробки поверхні зразків. На графіку чітко бачимо ділянку максимальних значень висоти мікрорельєфу поверхні, отриманих у часовому інтервалі 4...8 с. При менших значеннях 0...4 с висота мікрорельєфу різко зростає, не досягаючи свого максимуму, в інтервалі 8...12 с відбувається деяке зниження висоти мікрорельєфу і його стабілізація на певному рівні (рис. 3).

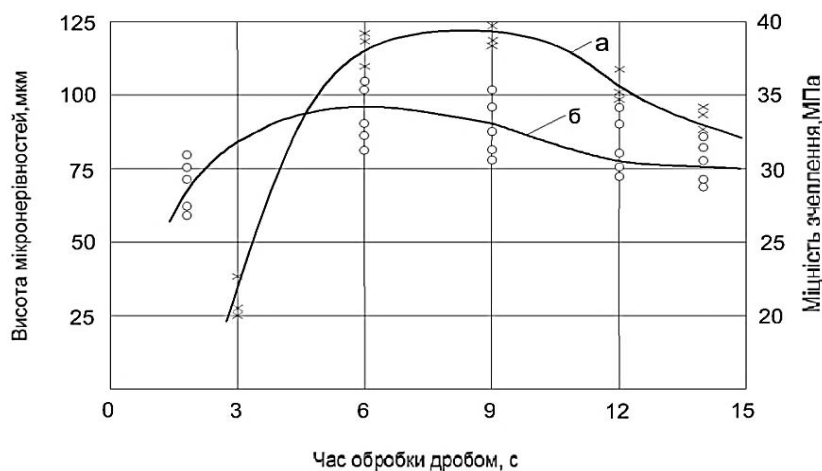


Рис. 3. Залежність міцності зчеплення з основою (а) та мікрорельєфу (б) від часу дробоструминної обробки при напиленні бронзи БрКМц3-1 на сталь Ст3

Отримані дані добре узгоджуються з проведеними раніше дослідженнями міцності зчеплення плазмового покриття напилюваного струмоведучим дротом із бронзи БрКМц 3-1 на поверхню сталі Ст.3. Максимальна міцність зчеплення плазмового покриття з основою отримана в період 4...8 с, коли на зразку створюється оптимальний мікрорельєф, відсутні сліди зминання і шаржування поверхні.

Проведене дослідження фракційного складу частинок при плазмовому розпиленні дроту, виявлено що найбільшу міцність зчеплення з основою мають частинки розміром 0,1...0,4 мм. Згідно цього було побудовано залежність оптимального співвідношення розмірів крапель та мікрорельєфу, що забезпечує найбільшу міцність покриття, нанесеного струмоведучим дротом.

Задля удосконалення технології необхідно забезпечувати шорсткість поверхні у межах 80...90 мкм у поєднанні з розмірами напилюваних частинок 0,1...0,4 мм (рис. 4).



Рис. 4. Оптимальне співвідношення розмірів крапель та мікрорельєфу, що забезпечує найбільшу міцність покриття, нанесеного струмоведучим дротом

Представлена схема формування покриття, яка виглядає наступним чином: на торці дроту формується крапля, котра зривається і витягується в мікрострумені різної довжини та діаметру під дією потоку, який може контактувати з поверхнею у трьох варіантах: з верхньою шорсткістю, з її боковою поверхнею та із заглибленням, при чому в кожному випадку відбувається підплавлення вершин шорсткості поверхні [14].

Показано, що частка адгезійного і когезійного руйнування не залежить ні від діаметра штифта, ні від товщини напиленого шару, а визначається лише ступенем однорідності металу основи і напилюваного матеріалу.

У випадку спільної основи границя розподілу представляє собою тонку лінію. Нижче границі з'єднання є окремі темні ділянки, вочевидь нерозплавлені повністю шихти, про що свідчить різке падіння мікротвердості. В цьому випадку руйнування носить адгезійно-когезійний характер, приблизно 50/50.

У випадку напилення матеріалом іншої основи у порівнянні з основою деталі границя з'єднання характеризується чітким інтерметалідним прошарком різної товщини зі стрибком величини мікротвердості. В цьому випадку слабким місцем є границя розподілу основа-напилений шар, так що руйнування носить адгезійний характер.

## ВИСНОВКИ

Встановлено діапазон параметрів режиму напилення, при дотриманні якого формування покриття відбувається частинками, розмір яких забезпечує високу якість та працездатність напиленого шару. Частинки розміром менше 0,1 мм і пилоподібні фракції мають низьку когезійну здатність, а їх пошарове видалення швидкообертаючоюся сталевною щіткою дозволяє підвищити міцність покриття на 25–30 %.

При плазмовому напиленні струмоведучими дротами температура плазмового струменя і частинок металу перевищує температуру кипіння цих металів, тому деяка кількість металу переноситься в пароподібному стані.

Для міді, бронзи, високовуглецевої і нержавіючої сталі частка випаруваного металу становить відповідно 0,7 %, 1,3 %, 2 % і 0,2 %, в той час як для алюмінію і порошкового дроту цей показник значно вищий – 36 % і 15 % відповідно. Останнє обумовлено додатковим тепловкладенням в гетерогенний плазмовий струмінь екзотермічної реакції від згорання алюмінію і графіту у складі порошкового дроту.

Визначені частки витрати ентальпії на нагрівання частинок при напиленні порошкоподібних матеріалів ПЦПК63Н30, ПКХТН30 та ПРЛ63 становлять відповідно 30 %, 22 % і 64 %.

Величина напірного тиску плазми з металевими порошкоподібними частками в середньому в 2 рази перевищує тиск чистого плазмового струменя. В свою чергу тиск струменю зі струмоведучим мідним дротом на порядок вище, ніж при використанні порошкоподібних матеріалів. При нанесенні покриттів порошкоподібними матеріалами напилений шар має

не заповнені металом ділянки і окремі пори, в той час як шар нанесений розпиленням струмомоведучого дроту не має несущальностей, що пояснюється більшою величиною напірного тиску під дією якого рідкий метал затікає в усі мікронерівності шорсткої поверхні.

Встановлено оптимальне співвідношення розмірів крапель (0,1...0,4 мм) та мікрорельєфу (80...90 мкм), що забезпечує найбільшу міцність покриття, нанесеного струмомоведучим дротом. Шорстка поверхня основи краще змочується розплавами в порівнянні з гладкою внаслідок збільшення капілярного тиску рідини, що рухається, при якому радіус кривизни звужуючогося меніска зменшується.

Частка адгезійного та когезійного руйнування визначається лише ступенем однорідності металу основи і напилюваного матеріалу. У разі спільної основи границя розподілу представляє тонку лінію, на якій чітко видно оплавлені вершини початкової шорсткості. В цьому випадку руйнування носить адгезійно-когезійний характер, приблизно 50/50. Якщо ж напилення проводиться матеріалом іншого складу в порівнянні з основою, то границя з'єднання характеризується чітким інтерметалідним прошарком різної товщини зі стрибком величини мікротвердості. В цьому випадку слабким місцем виявляється границя розподілу основа-напилений шар, так що руйнування носить адгезійний характер, тому потребується нанесення проміжкового шару.

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. *Нанесение покрытий плазмой* / [В. В. Кудинов, П. Ю. Пекиев, В. Е. Белащенко и др.]. – М.: Наука, 1990. – 408 с.
2. *Пащенко В. М. Технологія газотермічного та вакуумно-конденсаційного нанесення покриттів: Навчальний посібник* / В. М. Пащенко, В. Д. Кузнєцов. – Київ, НТУУ «КПІ», 2010. – 270 с.
3. *Корсунов К. А. Моделирование нагрева частиц порошкового материала в плазменной струе* / К. А. Корсунов, А. В. Чаленко, Р. Н. Бражко // *Вісник СевНТУ: зб. наук. пр. Серія: Машиноприладобудування та транспорт.* – Вып 118/2011. Севастополь. – 2011. – С. 53–56.
4. *Харламов Ю. А. Влияние скорости и температуры частиц на динамику и теплофизику их взаимодействия с поверхностью детали при газотермическом нанесении покрытий* / Ю. А. Харламов // *Теоретич. и эксп. проблемы взаимодействия частиц с поверхностью: Сб. / Ин-т сверхтвердых материалов.* – К., 1988. – С. 25–33.
5. *Андрейцев А. Ю. Аналіз нагріву частинок в плазмовому струмені* / А. Ю. Андрейцев, І. В. Смирнов, А. В. Чорний // *Тези доповідей V-Міжнародної науково-практичної конференції. Сер. «Техніка, технологія», 24, 25 березня 2011 р.* – Київ, 2011. – С. 340–342.
6. *Математическое моделирование нагрева порошкового композиционного материала в плазменной струе* / В. А. Барвинок, В. И. Богданович, И. А. Докукина и др. // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук.* – 2001. – № 2. – С. 197–203.
7. *Копилов В. І. Адгезійні властивості і міцність зчеплення газотермічних покриттів* / В. І. Копилов, І. В. Смирнов, Д. О. Антоненко // *Наукові вісті НТУУ «КПІ».* – 2010. – № 1. – С. 93–103.
8. *Смирнов И. В. Моделирование физического контакта газотермических покрытий с поверхностью основы* / И. В. Смирнов, А. Ю. Андрейцев, Н. Н. Крюков // *Вестник ХНТУ.* – 2010. – № 3(39). – С. 437–443.
9. *Пат. № 45253 Україна, 7 Н05Н1/100, 1/24, Н05В7/18 В23К10/00. Електродуговий плазматрон* / Г. М. Русев, С. М. Кисельов, В. В. Овсянніков, М. П. Галюк. – № 2001074789; заявл. 10.07.2001; опубл. 15.10.2003, Бюл. № 10.
10. *Влияние параметров режима плазменного напыления токоведущей проволокой на фракционный состав распыляемых частиц* / Г. М. Русев, А. Г. Русев, В. В. Овсянников, О. Г. Быковский, А. Н. Пасько // *Автоматическая сварка.* – 2013. – № 1. – С. 45–47.
11. *Быковский О. Г. Определение температуры частиц при плазменном напылении токоведущей проволоки* / О. Г. Быковский, А. В. Еришов, А. Н. Лаптева, А. Н. Глотка // *Заготовительное производство в машиностроении.* – 2013. – № 5. – С. 12–14.
12. *Быковский О. Г. Материалы и технология плазменного напыления токоведущей проволокой* / О. Г. Быковский, А. Н. Лаптева, Г. М. Русев // *Заготовительные производства в машиностроении.* – 2013. – № 12. – С. 19–22.
13. *Влияние состояния поверхности твердого тела на характеристики смачивания его расплавом* / О. Г. Быковский, В. Е. Самойлов, В. Е. Ольшанецкий, А. Н. Лаптева, и др. // *Новые материалы и технологии в металлургии и машиностроении.* – 2013. – № 2. – С. 55–59.
14. *Быковский О. Г. Механизм образования, строение и микроструктура переходной зоны между напыленным слоем и подложкой* / О. Г. Быковский, А. Н. Лаптева, Н. П. Пасько, Б. А. Власенко // *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні.* – 2016. – №1. – С. 19–23.