

- Єршов А. В. д-р. техн. наук, професор, професор кафедри фізики Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: ershov@zpu.edu.ua
- Зеленіна О. А. Лаборант кафедри фізики Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: e: hellen_shi@mail.ru

МЕТОД ДУГОВОЇ АКТИВАЦІЇ ОСНОВИ ПРИ ЗБІЛЬШЕННІ ДИСТАНЦІЇ ПЛАЗМОВОГО НАПИЛЕННЯ

Мета роботи полягає у підвищенні працездатності плазмового покриття шляхом розробки методу іонно-дугової активації основи при використанні активуючого електрода, що призводить до збільшення міцності зчеплення покриття внаслідок розпилення поверхневих оксидів основи.

Методи дослідження. Експериментальний та розрахунковий, механічні випробування, оптична мікроскопія. Розробка методу іонно-дугової активації основи деталі при збільшенні дистанції нанесення покриття полягає у використанні активуючого електрода, який розташовано біля поверхні основи для створення додаткової активуючої дуги. Визначено вплив активуючої дуги на міцність зчеплення покриття. Виконано оцінку густини струму активуючої дуги для розпилення поверхневих оксидів основи.

Отримані результати. Знайдено метод дугової активації поверхні основи при збільшенні дистанції нанесення покриття. Показано, що використання активуючої дуги зворотної полярності, яка горить між додатковим електродом та основою призводить до іонного бомбардування поверхні, розпилення поверхневих оксидів та створення мікрократерів на поверхні основи. Внаслідок цього міцність зчеплення підвищується удвічі у порівнянні з міцністю зчеплення, отриманою без використання іонно-дугової активації основи. Проведено розрахунки швидкості катодного розпилення поверхневих оксидів основи та визначено мінімальну густину струму активації основи, що призводить до повного розпилення шару оксидів заданої товщини.

Наукова новизна. Визначено, що незважаючи на швидке окислення основи в атмосферних умовах, використання методу іонно-дугового очищення поверхні під час нанесення покриття призводить до значного підвищення міцності зчеплення покриття з основою.

Практична цінність. Отримані результати підвищення міцності зчеплення збільшують працездатність, гарантований ресурс роботи плазмового покриття на деталях машин та механізмів.

Ключові слова: плазмове покриття, катодне розпилення, міцність зчеплення, іонно-дугова активація, поверхневі оксиди, дистанція нанесення покриття.

Вступ

Існує проблема підвищення міцності зчеплення та когезійної міцності плазмових покриттів. Одним з шляхів вирішення цієї проблеми є застосування методів активації основи під час нанесення покриття. У роботі [1] активацію та нанесення газотермічного покриття, виконують одночасно з іонно-дуговою активацією поверхні та розпилюванням поверхневих оксидів при атмосферному тиску за допомогою додаткового дугового розряду зворотної полярності струмом 25–30 А. Але довжина активуючої дуги, яка горить між дротом-анодом плазмотрона та поверхнею підкладки і дорівнює дистанції напилення складає лише 15–20 мм, що недостатньо з умов оптимізації процесу.

Аналіз досліджень та публікацій

Недоліком вказаного методу є обмеження дистанції напилення. При обробці поверхонь складних великогабаритних деталей, таких як колінчасті вали та інші, необхідна дистанція напилення збільшується і може складати 200 мм, що перевищує її значення при активації дугою, яка горить між дротом-анодом плазмотрона та поверхнею основи. Довжина активуючої дуги обмежується внаслідок зростання

напруження при одночасному зменшенні електропровідності плазми по довжині плазмового струменя.

Існує і інший метод нанесення плазмових покриттів, [2–5], який використовує термічну активацію оброблюваної поверхні електричним струмом виносної дуги, поєднаної з плазмовим струменем. Виносна активуюча дуга потужністю 1–8,5 кВт з пульсуючим струмом та частотою імпульсів 25–100 Гц горить між виносним катодом та поверхнею основи.

Недоліком цього методу на наш погляд є недостатньо повне використання можливості електричної дуги для активації основи. Використовується тільки термічна активація поверхні, оскільки виносний електрод є катодом, а основа – анодом. Однак на наш погляд більш важливим процесом ніж термічна активація поверхні є очищення основи від оксидів та адгезійних плівок, наявність яких суттєво знижує міцність зчеплення. Відомо, що найбільш ефективно очищення поверхні від оксидів та адгезійних плівок під дією іонного бомбардування та катодного розпилювання поверхні відбувається у тому разі, коли ця поверхня є катодом, а не анодом [6, 7]. Окрім того, при використанні основи у якості анода тепловий струм на її поверхні

буде у 2–3 рази вищим ніж на катоді. Тому цей метод нанесення покриття може привести до перегріву поверхні деталей, ймовірності термічної деформації виробу та деструктивних змін у підкладці.

Мета роботи полягає у підвищенні міцності плазмового покриття шляхом розробки метода іонно-дугової активації основи при використанні активуючого електрода, що призводить до розпилення поверхневих оксидів при збільшенні міцності зчеплення.

Активація основи при великій дистанції напилення досягається тим, що її виконують за допомогою струму виносної дуги зворотної полярності, яка горить між основою та виносним анодом, рис. 1, який знаходиться на відстані 15–30 мм від основи.

Виносна дуга зворотної полярності служитиме способом активації і очищення поверхні металу від оксидів, що необхідно для підвищення міцності зчеплення без значного підвищення температури основи. Сила струму виносної дуги для очищення і активації основи знаходиться у інтервалі 30–100 А. Для масивних деталей, при підвищенні сили струму виносної дуги, буде зростати міцність зчеплення внаслідок часткового приварювання частинок покриття до підкладки.

Схему установки для газотермічного напилення з використанням іонної активації поверхні виносною дугою зворотної полярності зображено на рис. 1.

Установка складається з плазмотрона 1, дроту – анода 2, що розпилюється, металізаційного струменя 3, анода виносної дуги 4, джерела живлення активуючого анода 5, шару покриття 6 на поверхні підкладки 7.

Метод активації основи

За допомогою електричної дуги, що горить у плазмовому струмені всередині плазмотрона 1, рис. 1, під тиском 0,4 МПа відбувається розпилювання дроту-аноду 2 і створюється металізаційний струмінь 3, який переносить розпилений метал на поверхню підкладки 7 і створює шар покриття 6. З металізаційним струменем 3 поєднують анод виносної дуги 4, яка горить у металізаційному струмені 3 між

анодом виносної дуги 4 та поверхнею основи 7, під дією напруги джерела живлення активуючого анода 5.

Для очищення поверхні основи від оксидів між ізольованим активуючим анодом виносної дуги 4 та поверхнею підкладки 7 підключається джерело живлення активуючого анода 5, яке під час нанесення шару покриття 6, створює виносну дугу довжиною 10–30 мм. При цьому відбувається іонне бомбардування поверхні основи 7 та утворення мікрократерів внаслідок процесів вибухової емісії. При дистанції напилення 250 мм струм виносної дуги складає А 50, що не призводило до перегріву поверхні підкладки.

Міцному з'єднанню металевих частинок з основою в атмосферних умовах перешкоджає утворення плівки оксидів на підкладці. Для зменшення тривалості взаємодії кисню з металом слід робити очищення поверхні одночасно з процесом нанесення покриття. Доцільно використовувати явище катодного розпилення оксидів на підкладці за допомогою додаткової дуги зворотної полярності, що горить між розпилюється дротом і підкладкою.

Практично важливим є дослідження можливості підвищення міцності зчеплення покриття при використанні катодного розпилення оксидів в процесі нанесення плазмового покриття на підкладку. При розпилюванні токоведучого дроту створюється потік металізаційних частинок, які утворюють струмопровідний канал між дротом і основою. Джерело з зовнішнім напругою ~ 30 В підключають негативним полюсом до основи і позитивним до анода виносної дуги 4. При довжині виносної дуги 15–20 мм в ланцюзі джерела проходив струм ~ 30 А, який приводив до іонного розпорощення оксидів на основі. Енергія іонів, що падають на основу з урахуванням їх рекомбінації запишеться:

$$\varepsilon_i = e(U_k + E_i) + \frac{3}{2}kT, \quad (1)$$

де e – заряд електрона; k – постійна Больцмана; U_k і E_i – катод падіння і потенціал іонізації парів металу; T – температура іонів в плазмі.

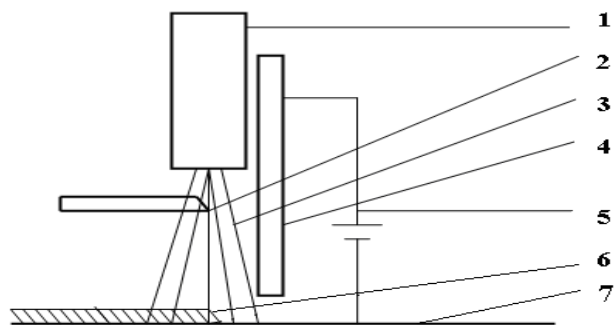


Рис. 1. Спосіб газотермічного нанесення покриття

Розпилення оксидів на основі здійснюється іонами з енергією більше порогової, яка становить приблизно $(5 \div 20)$ еВ [9], що менше ніж енергія іонів падаючих на основу, яка відповідно до (1) складається з кінетичної енергії – $e U_k$, отриманої в зоні катодного падіння потенціалу, потенційної енергії рекомбінації з електроном – $e E_i$ і теплової енергії хаотичного руху – $3/2 kT$. При розглянутих умовах енергія іонів ~ 25 еВ. З огляду на те, що при енергії іонів близькою до граничної, коефіцієнт розпилення оксидної плівки $S \approx 1$, [9]. При заданій щільності іонного струму j , швидкість розпилення плівки визначиться зі співвідношення:

$$S \cdot j_i = e \cdot n \cdot \frac{d\delta}{dt}, \quad (2)$$

де e – заряд електрона; S – коефіцієнт розпилення;
 n – концентрація атомів у плівці оксидів;
 δ – товщина плівки оксидів.

Дослідження мікрошліфів покриття показують, що товщина оксидного шару між покриттям і підкладкою становить, приблизно $\delta = 0,5 \cdot 10^{-5}$ м. Наявність оксидного шару обмежує адгезійну міцність покриття на рівні 25 МПа. Для видалення оксидів підбирався режим розпилення по щільності іонного струму при заданій тривалості процесу розпилення, яка визначалася швидкістю переміщення основи щодо плазмотрона $V = 0,2$ м/с і діаметром плазмового струменя в зоні контакту з основою $d = 10^{-2}$ м.

$$\tau = \frac{d}{2V} = 2,5 \cdot 10^{-2}, \text{с.} \quad (3)$$

Вважалося, що час розпилення оксидів відповідає переміщенню основи на половину діаметра плазмового струменя і становить: $2,5 \cdot 10^{-2}$, с. Щільність іонного струму, необхідна для розпилення шару оксидів товщиною $0,5 \cdot 10^{-5}$ м визначиться за формулою (2) при щільності атомів в шарі $n = 1028 \text{ м}^{-3}$ і коефіцієнті розпилення $S = 1$, складе:

$$j_i = e \cdot n \cdot \delta / \tau = 32 \cdot 10^4, \text{ А/м}^2. \quad (4)$$

Крім катодного розпилення іонне бомбардування створює на основі мікроратери діаметром 2–3 мкм, рис. 2, які збільшують дефектність структури і поверхневу енергію, що сприяє підвищенню міцності зчеплення.

Для отримання і випробування покриттів напилувались зразки з ст. 5 дротом марки Нп-65Г діаметром 1,4 мм. Загальна товщина напиланого шару становила 4 мм. Випробування покриття товщиною 4 мм на відрив штифта діаметром 4 мм. показали, що міцність зчеплення зросла з 25 МПа до 52 МПа. При цьому не потрібна попередня дробеструйна активація основи [10]. Детальний аналіз зразків після штифтової проби свідчив про розрив самого покриття, що можливо коли міцність зчеплення досягає, або перевищує когезійну міцність покриття.

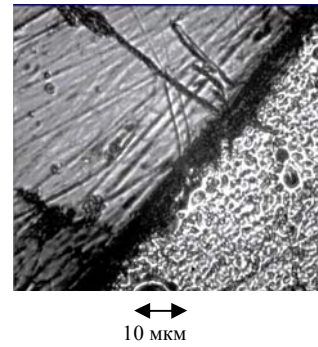


Рис. 2. Границя обробки поверхні металу при іонно-дуговогої активації при щільності струму $30 \cdot 10^4 \text{ А/м}^2$, швидкості переміщення дуги 0,2 м / с

Причиною підвищення міцності зчеплення на наш погляд є зменшення товщини шару оксидів між покриттям та підкладкою, який при відсутності дугової активації відокремлює шар покриття від основи. Підтвердженням зміцнення перехідною зоною покриття – основа є фотознімки зони контакту мікрошліфів рис. 3. і вимірювання мікротвердості напилених зразків. Фотознімки мікрошліфів зони контакту, отриманих без застосування і з застосуванням іонного розпилення оксидів показані на рис. 3 [7]. Товщина оксидної зони на рис. 3а) становить, приблизно $0,5 \cdot 10^{-5}$ м. Ця величина і була використана в розрахунку необхідної щільності струму для розпилення поверхневих оксидів (4).

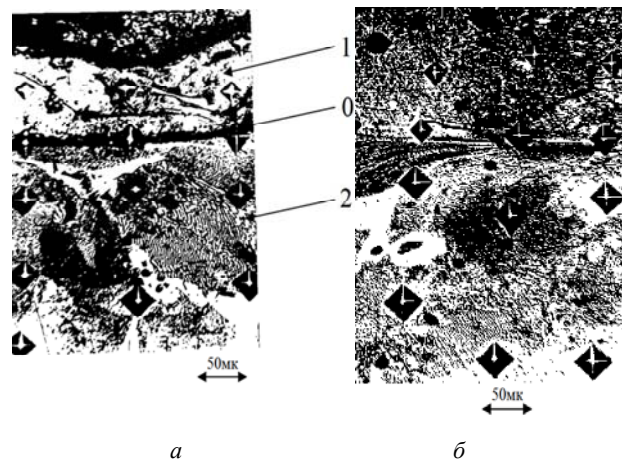


Рис. 3. Мікрошліф контакту покриття-підкладка отримано: а – при дробеструйної активації підкладки і б – при іонної активації підкладки зі сталі Ст-5. Покриття Нп- 65Г

Як видно з порівняння знімків, ширина темної оксидної перехідної зони в стикі між покриттям і основою при використанні іонно дуговогої обробки зменшується більш, ніж на порядок, що забезпечує створення міцного хімічного зв'язку. Вимірювання мікротвердості Н05 перехідної зони покриття – основа, наведене в табл. 1, [7], показують, приблизно, десятикратне зниження мікротвердості в стикі між покриттям і підкладкою при традиційному способі нанесення покриттів з попередньою дробеструйною обробкою.

Таблиця 1 – Розподіл мікротвердості Н0,5, ГПа в перехідній зоні покриття-основа в залежності від методу підготовки поверхні під напылення [7]

Зона вимірювання	Підкладка, сталь Ст 5	Перехідна зона	Покриття дрiт Нп-65Г
Дробоструминна обробка	3,5	0,4	5,6
Іонно-дугова активація	3,2	3,6	6,1

Застосування методу іонно дугового розпилення оксидів дає щільний стик, в якому не виявляється зниження мікротвердості, що свідчить про ефективність запропонованого методу підвищення міцності зчеплення. Присутність ліній температурних деформацій підкладки на рис. 3 свідчить про міцність з'єднання плазмових покриттів з підкладкою.

Висновки

1. Застосування додаткового активуючого електрода дозволяє здійснювати дугову активацію основи під час нанесення плазмового покриття при будь-якій дистанції напылення.

2. Активацію основи дуговим розрядом зворотньої полярності супроводжується катодним розпиленням оксидів та створення мікроратерів діаметром 3–5 мкм на її поверхні.

3. Дугове розпилення поверхневих оксидів призводить до двократного підвищення міцності зчеплення покриття з основою при струмі активуючої дуги 40–50 А.

Список літератури

1. Пат. 37048 Україна, МПК С23С14/38. Спосіб газотермічного нанесення покриття / А. В. Ершов, Н. Н. Сытников, О. Г. Биковський ; заявник і патентовласник Запорізький нац. техн. ун-т.– №u200808642, заявл.01.07.08 ; опубл. 10.11.08.– Бюл. № 21. – 2008. – 3с.

2. Пат. 2155822 Росія, МПК С23С4/12. Спосіб плазменного нанесення покриттів [електр. ресурс]/ А. М. Гонопольский, А. Ф. Пузряков; Патенто-обладатель : ОАО «КОМПАТ» ; заявл. 25.08.1999 ; опубл. 10.09.2000.–Режим доступу: <http://www1.fips.ru>.

3. Исследование влияния активации поверхности основы дуговым разрядом в процессе напыления на адгезионно-когезионные характеристики плазменного покрытия / Н. В. Протасова, И. П. Гришина, В. М. Таран, А. В. Лясникова // Вестник СГТУ. – 2012. – № 2 (66). – Вып. 2. – С. 147–152.

4. Лясникова А. В. Проектирование электроплазменных технологий и автоматизированного оборудования / С. М. Лисовский, В. М. Таран, А. В. Лясникова. – М. : Моск. гос. техн. ун-т им. Н. Э. Баумана, 2005. – 256 с.

5. Технологическое обеспечение качества плазменных покрытий на основе применения комбинированных физико-технических методов активации поверхности / Н. В. Протасова, В. М. Таран, А. В. Лясникова и др. – М. : Спецкнига, 2012. – 350 с.

6. Ершов А. В. Влияние катодного распыления оксидов на адгезионную прочность плазменного покрытия /А. В. Ершов, Н. Н. Сытников, О. Г. Биковский //Вестник двигателестроения. – 2004. – № 3. – С. 28–30.

7 Ершов А. В. Применение ионной активации подложки для повышения адгезионной прочности плазменных покрытий /А. В. Ершов, Н. Н. Сытников, О. Г. Биковский // Заготовительные производства в машиностроении. – 2005. – № 12. – С. 12–16.

8. Лоскутов С. В. Влияние поверхностных оксидов на механизм сцепления покрытия при плазменном напылении / С. В. Лоскутов, А. В. Ершов, Е. А. Зеленина // Металлофизика та новітні технології. – 2016. – № 6, Т. 38. – С. 839–851.

9. Плешивцев Н. В. Катодное распыление / Плешивцев Н. В. – М. : Атомиздат, 1968. – 343 с.

10. Сытников Н. Н. О возможности напыления покрытий без создания шероховатости на подложке./ Н. Н. Сытников, А. В. Ершов, Н. Н. Пулина // Тез. 4 Всес. конф. Новые конструкционные стали и сплавы и методы их обработки. Запорожье. – 1989. – С. 189–190.

Одержано 19.04.2021

Ершов А. В., Зеленина Е. А. Метод дуговой активации основы при увеличении дистанции плазменного напыления

Цель работы заключается в повышении работоспособности плазменного покрытия путем разработки метода ионно-дуговой активации основы при использовании активизирующего электрода, что приводит к увеличению прочности сцепления покрытия вследствие распыления поверхностных оксидов основы.

Методы исследования. Экспериментальный и расчетный, механические испытания, оптическая микроскопия. Разработка метода ионно-дуговой активации основы детали при увеличении дистанции нанесения покрытия состоит в использовании активизирующего электрода, расположенного у поверхности основы для создания дополнительной активизирующей дуги. Определено влияние активизирующей дуги на прочность сцепления покрытия. Выполнена оценка плотности тока активизирующей дуги для распыления поверхностных оксидов основания.

Полученные результаты. Найден метод дуговой активации поверхности основания при увеличении дистанции нанесения покрытия. Показано, что использование активизирующей дуги обратной полярности, которая горит между дополнительным электродом и основой приводит к ионной бомбардировке поверхности

распыления поверхностных оксидов и создание микрократеров на поверхности основания. В результате прочность сцепления повышается вдвое по сравнению с прочностью сцепления, полученной без использования ионно-дуговой активации основания. Проведены расчеты скорости катодного распыления поверхностных оксидов основы и определена минимальная плотность тока активации основы, приводит к полному распылению слоя оксидов заданной толщины.

Научная новизна. Определено, что несмотря на быстрое окисление основы в атмосферных условиях, использование метода ионно-дуговой очистки поверхности во время нанесения покрытия приводит к значительному повышению прочности сцепления покрытия с основой.

Практическая ценность. Полученные результаты повышения прочности сцепления увеличивают работоспособность, гарантированный ресурс работы плазменного покрытия на деталях машин и механизмов.

Ключевые слова: плазменное покрытие, катодное распыление, прочность сцепления, ионно-дуговая активация, поверхностные оксиды, дистанция нанесения покрытия.

Ershov A., Zelenina E. Method of arc activation of the base at increasing the distance plasma spraying

Purpose. To increase the efficiency of the plasma coating by developing a method of ion-arc activation of the base using an activating electrode, which leads to an increase in the adhesion strength of the coating due to the sputtering of surface oxides of the base.

Research methods. Experimental and computational, mechanical tests, optical microscopy. The development of the method of ion-arc activation of the part base with an increase in the distance of coating deposition consists in application of an activating electrode located at the surface of the base to create an additional activating arc. The influence of the activating arc on bases for creating an additional activating arc. The influence of the activating arc on the adhesion strength of the coating is determined. The estimation of the current density of the activating arc for the sputtering of surface base oxides is carried out.

Results. A method of arc activation of the base surface with an increase in the coating distance is found. It is shown that application of an activating arc of reverse polarity that burns between the additional electrode and the base leads to ion bombardment of the surface by sputtering surface oxides and the creation of microcraters on the base surface. As a result, the bond strength is doubled compared to the bond strength obtained without the use of ion-arc activation of the base. The calculations of the rate of cathodic sputtering of the surface oxides of the base are carried out and the minimum activation current density of the base is determined, which leads to the complete sputtering of a layer of oxides of a given thickness.

Scientific novelty. It has been determined that, despite the rapid oxidation of the base under atmospheric conditions, application of the method of ion-arc cleaning of the surface during coating leads to a significant increase in the adhesion strength of the coating to the base.

Practical value. The obtained results of increasing the adhesion strength rise the efficiency, the guaranteed service life of the plasma coating on the parts of machines and mechanisms.

Key words: plasma coating, cathode sputtering, bond strength, ion-arc activation, surface oxides, coating distance.