

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ЛАПТЄВА ГАННА МИКОЛАЇВНА

УДК 621.793.74

**УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ НАНЕСЕННЯ ПЛАЗМОВИХ
ПОКРИТТІВ ПРИ ВИКОРИСТАННІ СТРУМОВЕДУЧИХ ДРОТІВ
ЗА РАХУНОК ОПТИМІЗАЦІЇ ФРАКЦІЙНОГО СКЛАДУ ТА
РОЗТІКАННЯ МЕТАЛЕВИХ ЧАСТИНОК**

Спеціальність 05.03.06 – «Зварювання та споріднені процеси і технології»

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2017

Дисертація є рукописом

Роботу виконано на кафедрі «Обладнання та технології зварювального виробництва» Запорізького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України, м. Запоріжжя.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Биковський Олег Григорович,
«Запорізький національний технічний університет», професор кафедри обладнання та технології зварювального виробництва

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор,
Макаренко Наталія Олексіївна,
Донбаська державна машинобудівна академія,
завідувач кафедри обладнання і технологій зварювального виробництва

доктор технічних наук, професор,
Копилов Вячеслав Іванович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», професор кафедри інженерії поверхні

Захист відбудеться «19» лютого 2018 р. о 15.00 годині на засіданні спеціалізованої ради Д26.002.15 Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: м. Київ-56, проспект Перемоги, 37, корп. 19, ауд. 435.

З дисертацією можна ознайомитися у науково-технічній бібліотеці ім. Г.І. Денисенка НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, проспект Перемоги, 37.

Автореферат розісланий «17» січня 2018 р.

Вчений секретар
спеціалізованої ради Д26.002.015



Р.М. Рижов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Нанесення покриттів плазмовим розпиленням є одним із розповсюджених процесів отримання поверхонь із спеціальними властивостями: зносостійкістю при нормальних і високих температурах, корозійною стійкістю, електропровідністю і т. д. Властивості плазмових покриттів визначаються фізико-хімічними процесами, які відбуваються між основою 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.

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

Більшість досліджень присвячено аналітичним розрахункам температури тугоплавких порошкових частинок, які досягають або дещо перевищують температуру плавлення матеріалу, проте експериментальних даних, що підтверджують ці положення, немає. Тому в умовах, коли кількість експериментальних даних по нагріванню частинок в плазмовому потоці істотно обмежена, а розрахункові методи не можуть бути достатньо надійними через відсутність даних про вплив різних чинників на інтенсивність взаємодії часток з потоком плазми, проведення досліджень у цьому напрямку і далі видається актуальним і необхідним.

Багато авторів відзначають важливість ролі топографії поверхні, підготовленої до напилування, у механізмі формування газотермічного покриття (ГТП). Як правило, отримання максимальної міцності зчеплення пов'язане з певними параметрами мікрорельєфу для певних поєднань напилуваного матеріалу, технологічних режимів напилування і матеріалу основи. Однак вплив цих факторів в достатній мірі ще не оцінено.

Незважаючи на велику кількість публікацій за даною тематикою, деякі важливі питання, такі як температура плазмового потоку з металевими частинками, тиск його на основу, змочування і розтікання напилуваного матеріалу по поверхні, висвітлені недостатньо і не мають однозначного трактування.

У деяких випадках крім достатньої міцності зчеплення покриття з основою потрібне забезпечення необхідних спеціальних властивостей поверхні – корозійної стійкості, зносостійкості, електропровідності і т. д.

Таким чином, дослідження впливу вищезазначених факторів при використанні струмоведучих дротів на формування ГТП та вплив їх зміни на якість напилуваного шару є актуальною науково-технічною задачею.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалась в ЗНТУ на кафедрі ОТЗВ відповідно до тематичного плану кафедри з НДР та виконання НДР ЗНТУ в рамках тем: 02712 «Підвищення надійності та зносостійкості матеріалів і деталей машин та обладнання» (№0115U004669), 02715 «Забезпечення надійності та зносостійкості матеріалів і деталей, що експлуатуються в екстремальних умовах» (№0115U004671).

Мета роботи і задачі дослідження. Мета роботи полягає у виявленні закономірностей впливу характеристик процесу плазмового напилення з використанням струмоведучих дротів на формування покриття, вдосконаленні існуючої технології для підвищення технологічних, міцнісних та спеціальних властивостей напиленого шару. Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити наступні задачі:

- провести дослідження міцності зчеплення та характеру руйнування напиленого шару з основою з урахуванням явищ адгезії та когезії;
- провести вимірювання температури та будови частинок розпилюваних матеріалів у вигляді струмоведучих дротів та порошкоподібних матеріалів з урахуванням одночасного впливу плазмового потоку;
- провести дослідження впливу величини тиску плазмових струменів на формування покриття та його міцність;
- проаналізувати характер розтікання крапель рідкого сплаву в залежності від мікрорельєфу основи;
- провести дослідження спеціальних властивостей напилених покриттів (корозійну стійкість, електропровідність);
- скорегувати існуючу технологію і техніку напилення для покращення працездатності покриттів, отриманих з використанням струмоведучого дроту.

Об'єкт дослідження – плазмове напилення та процеси, які відбуваються в плазмових струменях.

Предмет дослідження – закономірності формування напиленого шару та його властивостей в залежності від енергетичних і технологічних параметрів процесу.

Методи дослідження. Для розв'язання поставлених задач і отримання основних результатів дисертаційної роботи використовувались теоретичні та експериментальні методи дослідження. Експериментальні дослідження з визначення температури та тиску плазмово-металевого струменя проводилися у промислових умовах методом калориметрирування та з використанням електронних ваг. Визначення характеру взаємодії рідкого розплаву з поверхнею основи проводилося в лабораторних умовах на оригінальній установці для визначення поверхневих явищ методом лежачої краплі. Вимірювання контактної опору з'єднання напиленого шару з мідною шиною проводилося на лабораторному стенді для визначення електричних явищ.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Вперше розроблена комп'ютерна програма для швидкого та точного підрахунку частки адгезійного та когезійного руйнування методом січних ліній по фрактограмам зламів у випадку напилення матеріалів, що мають різне кольорове забарвлення у порівнянні з основою (наприклад міді на алюміній, бронзи на сталь).

2. Вперше експериментально доведено, що температура плазмового струменя, запиленого металевими частинками, на підльоті до основи для міді, наплавного дроту Нп65Г, бронзи БрКМц3-1 становить 2640 °С, 3000 °С, 3160 °С відповідно, що веде до їх випаровування на 20-25%. В той же час для

алюмінію та дроту ПП-100Х15М2Г2Р ці величини більші – 7520 °С та 5140 °С відповідно внаслідок протікання екзотермічних реакцій і прирощення ентальпії, що веде до їх часткового вигорання.

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

3. Розроблено експериментально-теоретичну модель, завдяки якій встановлено, що при нагріванні дроту в плазмовому струмені основна частина теплового потоку надходить на поверхню розплавленого металу, оскільки при умовах, що розглядаються, площа зони попереднього підігріву поверхні до температури плавлення відносно невелика та складає приблизно 5 % від площі розплаву. Показано, що окрім нагріву дроту в твердому стані, значна частина теплового потоку витрачається й на нагрів плівки металу. Щільність теплового потоку на поверхні розплаву пропорційна підвищенню ентальпії металу та синусу кута між площиною розплаву та віссю дроту.

4. Встановлено, що при напиленні струмоведучими дротами алюмінія, міді, бронзи і вуглецевих сталей формування покриттів на 85 - 90% відбувається частинками розміром 0,4 - 0,1 мм, що забезпечуються струмом 160 - 170 А, витратою плазмоутворюючого газу аргону 28 - 30 л/хв, транспортуючого газу – повітря 15 - 17 м³/год при максимальній продуктивності процесу 0,95 – 1,0 г/сек. Дрібнодисперсні частинки знижують міцнісні властивості покриття на 25 - 30% і потребують видалення шляхом механічної пошарової обробки.

5. Встановлено, що взаємодія струменя з шорсткою поверхнею супроводжується його розтіканням по ній, збільшенням капілярного тиску рідини, що рухається, при якому радіус кривизни звужуючогося меніска зменшується, що веде до зменшення крайового кута змочування шорсткої поверхні у порівнянні із гладкою (наприклад, для бронзи БрКМц 3-1 крайовий кут змочування на шорсткій основі менше крайового кута змочування на гладкій основі на 39%, для алюмінію А0 – на 6%, для сплаву 100Х15М2Г2Р – на 8%) і відповідно до збільшення адгезії та когезії, внаслідок чого покриття формується в результаті сплавлення, хімічної взаємодії, механічного зчеплення та просочення.

Практичне значення отриманих результатів. На основі проведених досліджень з впливу товщини та ступеня шорсткості напиленого шару розроблено та впроваджено технологію напилення алюмінієвих контактних шин та струмопідводів міддю, напилення бронзи та порошкового дроту ПП-100Х15М2Г2Р на сталь.

Особистий внесок здобувача. Особистий внесок здобувача у дисертаційній роботі полягає у формулюванні мети і задач дослідження; створенні нових і вдосконаленні існуючих методик визначення міцності зчеплення; узагальненні результатів експериментальних досліджень. Внесок автора був визначальним у проведенні експериментальних досліджень з визначення міцності зчеплення та контактного опору з'єднання напиленого шару з мідною шиною, виконаних самостійно та із співробітниками Запорізького національ-

ного технічного університету та НВП «Плазматех». Здобувачу також належать загальні висновки та положення, які виносяться на захист:

- закономірності характеру руйнування напиленого шару з основою;
- закономірності формування покриття та його робочих характеристик в залежності від температури та будови частинок розпилюваних матеріалів;
- закономірності формування покриття в залежності від величини тиску плазмового струменя на основу;
- схема формування покриття та характер розтікання крапель рідкого сплаву в залежності від стану поверхні основи;
- матеріали промислового впровадження та використання отриманих результатів.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати роботи доповідалися й обговорювалися: на 2 Міжнародній науково-технічній конференції «Сварочное производство в машиностроении: перспективы развития», (Краматорск, 2010), Научно-технической конференции «Современные проблемы металлургии, технологии сварки и наплавки сталей и цветных металлов» Ин-та электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины (Киев, 2012), Міжнародній конференції «Сварка и родственные технологии – настоящее и будущее» Ин-та электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины (Киев, 2013), 8 Міжнародній конференції молодих учених та спеціалістів «Зварювання та споріднені технології» Ин-та электросварювання ім. Є.О. Патона НАН України (Киев, 2015), 13 Міжнародній науково-практичній конференції «Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки от нано- до макроуровня», (Санкт-Петербург, Росія, 2011), 16 Міжнародній науково-практичній конференції «Технологии упрочнения, нанесения покрытий и ремонта: теория и практика», (Санкт-Петербург, Росія, 2014).

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 21 наукову працю, у тому числі 12 статей у наукових фахових виданнях (з них 9 статей у виданнях іноземних держав, 3 статті у фахових виданнях України, 1 з яких включене до міжнародних науко-метричних баз), 4 статті в інших виданнях, а також тези доповідей у збірниках матеріалів 4 міжнародних конференцій.

Структура і обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел і додатків. Робота викладена на 179 сторінках машинописного тексту, містить 50 рисунків, 18 таблиць, список використаних джерел із 105 найменувань на 12 сторінках та 10 додатків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ

У вступі обґрунтовано актуальність теми, подано загальну характеристику роботи, сформульована її мета, основні завдання та наукова новизна досліджень. Представлена практична цінність отриманих результатів, представлено інформацію про особистий внесок здобувача та апробацію роботи.

У першому розділі був проведений аналіз сучасного стану висвітлення енергетичних і технологічних характеристик процесу плазмового напилення,

який показав, що незважаючи на велику кількість публікацій, деякі важливі питання, такі як температура плазмового потоку з металевими частинками, тиск його на основу, змочування і розтікання напиленого матеріалу по поверхні, висвітлені недостатньо і не мають однозначного трактування.

Відмічається, що незважаючи на те, що існує велика кількість визначення міцності зчеплення покриттів (більше 40), всі вони або не дають якісних показників, або надто є надто складними.

Показано, що в умовах, коли кількість експериментальних даних по нагріванню частинок в плазмовому потоці істотно обмежена, а розрахункові методи не можуть бути достатньо надійними через відсутність даних про вплив різних чинників на інтенсивність взаємодії часток з потоком плазми, проведення досліджень у цьому напрямку і далі видається актуальним і необхідним.

З аналізу численних публікацій виявлено, що при безсумнівній користості створення шорсткості на металевій поверхні перед напиленням залишається невідомою її роль в розтіканні напилюваного перегрітого розплаву, хоча про важливість змочування в процесі напилення згадується в багатьох роботах.

Відмічається, що у деяких випадках крім достатньої міцності зчеплення покриття з основою потрібне забезпечення необхідних спеціальних властивостей поверхні – корозійної стійкості, зносостійкості, електропровідності і т.д.

На підставі викладеного були сформульовані мета і завдання роботи.

Другий розділ присвячений розробці методик вибору діаметра штифта для випробувань на міцність зчеплення покриття з основою, визначення часток адгезійного та когезійного руйнування, дослідження енергетичних характеристик процесу плазмового напилення, дослідження характеру змочування основи рідким розплавом в залежності від стану поверхні.

Випробування на відрив виконували на машині IP-100. Встановлено, що зі збільшенням діаметра штифта з 2 до 6 мм сила відриву змінюється незначно, в той час як міцність зчеплення знижується майже в 9 разів. Подальше збільшення діаметра з 6 до 12 мм навпаки, призводить до значного збільшення сили відриву, але міцніший показник знаходиться приблизно на одному рівні для діаметрів 8 - 12 мм. Тому можна вважати, що для даних умов випробування діаметр штифта може бути вибраний саме в цих межах без загрози спотворення результатів внаслідок дії випадкових факторів, а похибка буде незначною.

У дослідженні з визначення на злам частки адгезії напиленого шару з поверхню основи використовували пару «втулка-штифт». На випробувальну поверхню напилювали на оптимальному режимі порошковий наплавний дріт ПП-100X15M2Г2Р шаром товщиною в 0,8 - 0,9 мм. Визначення частки адгезійного руйнування в зразках проводили на фрактограмах зламів двома методами: вручну і з допомогою комп'ютера.

Першим способом співвідношення рахували вручну методом січних ліній.

Для другого методу була створена комп'ютерна програма в середовищі MatLab, яка автоматично зчитує дані з фотографії і видає результат на монітор.

За допомогою цього методу можна визначити площі ділянок будь-якого металу, що відрізняється за кольором від напилюваної основи.

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 калриметрування розпилюваних матеріалів у вигляді струмоведучих дрітів та порошкоподібних матеріалів з урахуванням одночасного впливу плазмового потоку.

Теплоємність частинок, що потрапили разом з плазмовим потоком в калориметр, визначали за рівнянням:

$$H - H_0 = (m_0 \cdot c_0 + m_e \cdot c_e) \Delta t \quad (1)$$

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

Характер взаємодії крапель рідкого сплаву в залежності від стану поверхні сталевій твердій основи: гладкої після прокатки та після дробоструминної обробки з $R_z = 90$ мкм досліджувався на спеціальній установці для визначення поверхневого натягу методом лежачої краплі (рис. 1). Для визначення поверхневих характеристик вимірювалися розміри краплі при досягненні нею температури $t_{пл} + (50 \dots 70)^\circ \text{C}$.

Визначення контактної опору з'єднання напилюваних зразків з мідною шиною здійснювалося за методом падіння напруги, суть якого полягає в наступному: контактне падіння напруги вимірюється на постійному струмі при номінальному значенні для ділянок шин, що з'єднуються (рис. 2). Дослідження з визначення впливу корозійного середовища на міцність зчеплення проводилися у випробувальній камері згідно ISO 2063.

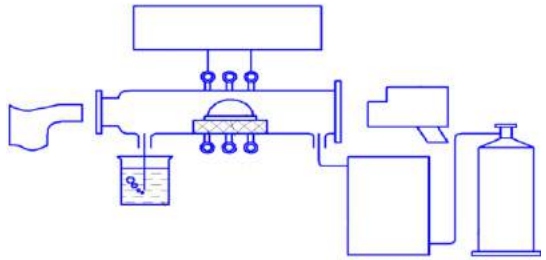


Рис. 1. Схема установки для визначення поверхневого натягу

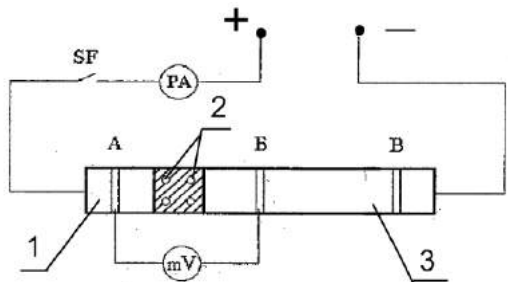


Рис. 2. Принципова схема стенду для вимірювання контактної опору

У третьому розділі наведено результати експериментальних досліджень з визначення температури та фракційного складу розпиленних частинок. Встановлено діапазон параметрів режиму напилення, при якому формування покриття відбувається частинками, розмір яких забезпечує високу якість та працездатність напиленого шару. Також для кожного матеріалу обчислена частка металу, перенесеного в калориметр у вигляді пари:

$$\gamma = \frac{1}{q_{\text{вип}}} \left[\frac{Q_{\kappa}}{m} \cdot 0,85 - C_m (t_{\text{кип}} - t_{\text{кал}}) - q_{\text{пл}} \right] \quad (2)$$

Встановлено, що найбільша доля металу, перенесеного в пароподібному вигляді, якісно відповідає найбільшому значенню теплоємності частинок з плазмовим потоком (таблиця 1).

Таблиця 1

**Результати розрахунку частки матеріалу, що вигорів γ_x
та випарився γ_v в плазмовому струмені**

Розпилюваний матеріал	$t_{\text{потоку}},$ °C	$q_k,$ кДж/(кг град.)	$m_M,$ кг	γ_x	γ_v
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 (графіт)	5140	6,34	0,016	0,085	-

Оскільки очевидно, що форма, розміри і фракційний склад розпилюваних частинок впливатимуть на міцнісні та спеціальні властивості напилених шарів, розпорошені частки виймали з калориметра, просували, просівали крізь сита, кожна фракція зважувалася на аналітичних вагах (рис. 3).

Було встановлено, що зібрані дрібнодисперсні фракції розміром 0,063 мм і менше становлять 86% від загальної кількості відокремленого металу, причому частка пілоподібних частинок становила 47%. При своєму русі в плазмовому струмені такі частинки швидше втрачають швидкість і температуру – параметри, що визначають характеристики міцності покриття. Встановлено, що така пошарова механічна обробка покриття дозволяє підвищити когезійну міцність покриття на 25–30%.

Також було проведено вимірювання температури і будови частинок розпилюваних порошкоподібних матеріалів з урахуванням одночасного впливу плазми з розпиленням матеріалом, а також визначена температура чистого плазмового струменя без порошку (таблиця 2).

Встановлено, що вихідний фракційний склад і фракційний склад розпи-
лених в калориметр порошків практично на 100% складається з частинок роз-
міром 0,068, 0,05 і <0,05 мм.

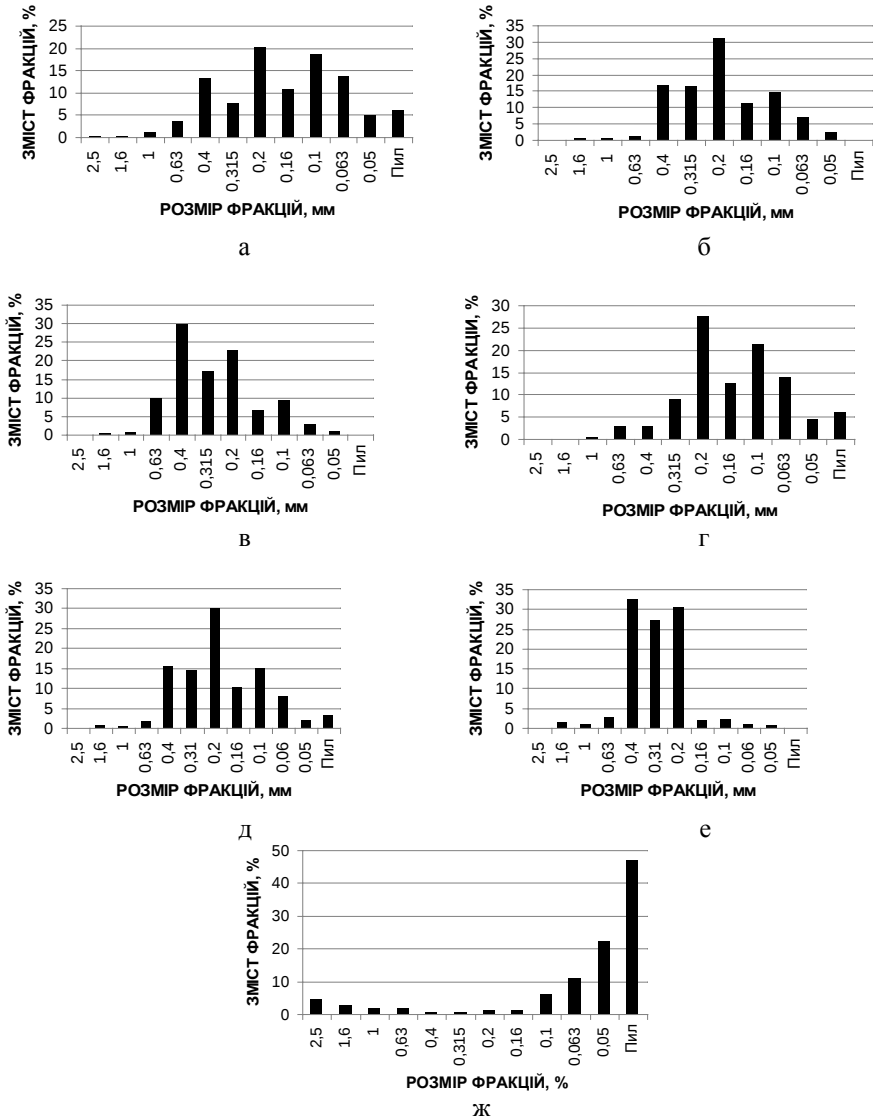


Рис. 3 – Гістограми фракційного складу частинок, розпилених в калориметр дротами: а – СвА5; б – М1; в – БрКМц3-1; г – Нп65Г; д – ПП-100Х15М2Г2Р; е – Св07Х20Н9Г7Т, а також часток, зібраних після пошарової обробки сталевую шіткою поверхні, напиленої дротом ПП-100Х15М2Г2Р – ж

Таблиця 2

Розрахунок теплових характеристик розпилених порошків і газів

Марка порошку, найменування газу	Температура, °C				Q _к , кДж	γ, %
	кипіння речовини	різниця в калориметрі	Плазма з металом	Плазма 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 ₂	–	4,3	–	8535	38,69	–
Ar	–	3,9	–	8640	48,61	–

Також актуальною є задача розробки простої та достовірної методики розрахунку теплового потоку. Встановлено, що площа зони попереднього підігріву поверхні до температури плавлення відносно невелика та складає приблизно 5% від площі розплаву. Показано, що окрім нагріву дроту в твердому стані значна частина теплового потоку витрачається на нагрів плівки металу.

Встановлено, що виміряна 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 (таблиця 3).

Таблиця 3

Розрахунок величини напірного тиску у плямі нагріву поверхні основи

Марка напилюваного матеріалу	Пляма нагріву		Зусилля дії, г		Напірний тиск σ , МПа	
	Діаметр, мм	Площа, мм ²	Плазма з металом	Плазма без металу	Плазма з металом	Плазма без металу
ПЦПК 63Н30	16	201	48	21	0,0023	0,0011
ПКХТН 30	19	283	51	21	0,0018	0,0007
ПРЛ 63	22,5	379	20	12	0,0005	0,0003
Мідь М1	12	113	240	–	0,0212	–

У четвертому розділі були проведені дослідження характеру змочування основи рідким розплавом в залежності від стану поверхні: гладкої після прокатки та після дробоструминної обробки з $R_z = 90$ мкм. Вивчення характеру змочування і розтікання проводили на роздрукованих знімках розміром 25x18 см, де чітко фіксувалися в часі різні стадії процесу (початок плавлення, розтікання рідкої фази, кінетика розтікання і т. п.)

Аналізуючи дані таблиці 4, можна сказати, що у всіх випадках досліджуваних сплавів краще розтікаються на шорсткій (розвинутій) поверхні, ніж на гладкій поверхні твердого тіла. Це можна пов'язати з тим, що поверхня, підда-

на дробоструминній обробці, активується в результаті процесів екструзії і інтрузії металу під дією механічної деформації.

Таблиця 4

Характеристики змочування для досліджуваних матеріалів основи

Матеріал	θ , град	$\sigma_{p-\gamma}$, МДж/м ²	A_a , МДж/м ²	A_k , МДж/м ²	$K_p \cdot (-1)$, МДж/м ²	$K_{ш}$
Бронза	28	501	942	1002	60	1,28
БрКМц 3-1	46	533	922	1046	144	
Алюміній	96	865	775	1730	955	0,51
А0	102	821	650	1642	992	
Сплав	29	387	726	774	48	1,02
100X15M2Г2Р	32	368	680	736	56	
Сплав	24	686	1310	1372	62	1,01
07X20H9Г7Т	26	615	1169	1230	61	

Примітка: У чисельнику наведені значення для основи з шорсткою поверхнею, в знаменнику – з гладкою поверхнею.

Проведені дослідження впливу часу дробоструминної обробки на морфологію оброблюваної поверхні і міцність зчеплення плазмового покриття з основою та побудовано графічну залежність (рис. 4). На графіку чітко видно діянку 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.

Отримані дані добре узгоджуються з проведеними раніше дослідженнями міцності зчеплення плазмового покриття напиленого струмоведучим дротом із бронзи БрКМц 3-1 на поверхню сталі Ст3. 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

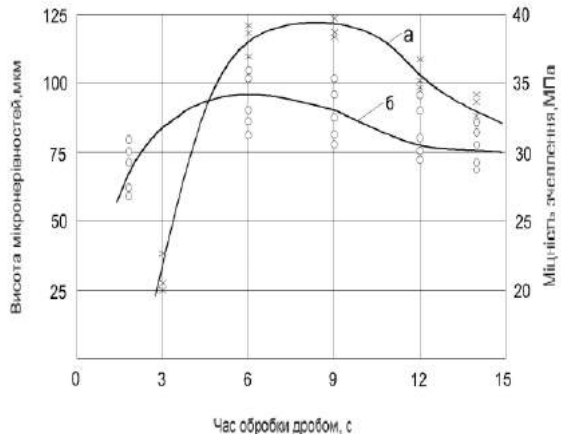


Рис. 4. – Залежність міцності зчеплення з основою (а) та мікрорельєфу (б) від часу дробоструминної обробки при напиленні бронзи БрКМц3-1 на сталь Ст3

складу частинок при плазмовому розпиленні дроту.

Виявлено, що найбільшу міцність зчеплення з основою мають частинки розміром 0,1...0,4 мм. Згідно з цим встановлене оптимальне співвідношення розмірів крапель та мікрорельєфу, що забезпечує найбільшу міцність покриття, нанесеного струмоведучим дротом - оптимізація процесу забезпечується досягненням необхідної шорсткості поверхні у межах 80...90 мкм у поєднанні з розмірами напилюваних частинок 0,1...0,4 мм.

Також досліджено вплив підготовки поверхні та товщини напиленого шару на міцність зчеплення.

Міцність зчеплення нанесеного покриття визначалася методом штифтової проби.

Встановлено, що зі збільшенням товщини напиленого шару від 0,2 до 0,9 мм міцність зчеплення покриття з основою збільшується від 4,7 до 8,0 МПа при $Ra=16,6$ і з 4,4 до 4,8 МПа при $Ra=9,3$ (рис. 5).

Це пояснюється збільшенням фактичної контактної поверхні основи при більшому розмірі дробу та зростанням когезійної міцності напилюваного матеріалу.

Тому для подальших досліджень підготовку поверхні проводили з використанням дробу ДЧК 1,6 мм для надання поверхні шорсткості $Ra=16,6$.

Встановлено, що зі збільшенням товщини напиленого шару контактний опір знижується, особливо на зразках з необробленою поверхнею (рис. 6), хоча після механічної обробки поверхні зниження контактного опору несуттєве.

В свою чергу механічна обробка напиленого шару дозволяє значно знизити величину контактного опору за рахунок збільшення фактичної площі контактуючих поверхонь.

У дослідженні з визначення впливу товщини напиленого плазмового шару в умовах впливу корозійного середовища на міцність зчеплення встановлено, що зі збільшенням товщини напиленого шару від 0,5 до 1,7 мм міцність зчеплення покриття з основою збільшується від 34 до 46 МПа (рис. 7).

При досягненні максимального значення відбувається зниження показника міцності зчеплення внаслідок дії термічних напружень. Згідно протоколу випробувань вплив корозійного середовища (соляного туману) на зразки не суттєвий – ділянки, напилені алюмінієм мають задовільний стан.

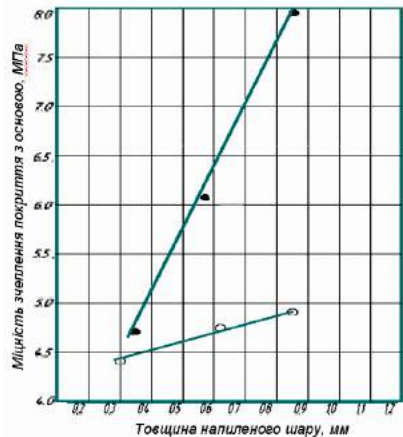


Рис. 5. Залежність міцності зчеплення покриття з основою від товщини напиленого шару та шорсткості поверхні
● - $Ra=16,6$, ○ - $Ra=9,3$.

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 нерозплавившоїся повністю шихти про що свідчить різке падіння мікротвердості. В цьому випадку руйнування носить адгезійно-когезійний характер, приблизно 50/50 (рис. 8).

У випадку напилання матеріалом іншої основи у зрівнянні з основою виробу границя з'єднання характеризується чітким інтерметалічним прошарком різної товщини зі стрибком величини мікротвердості. В цьому випадку слабким місцем є границя розподілу основа-напилений шар, так що руйнування носить адгезійний характер (рис. 9).

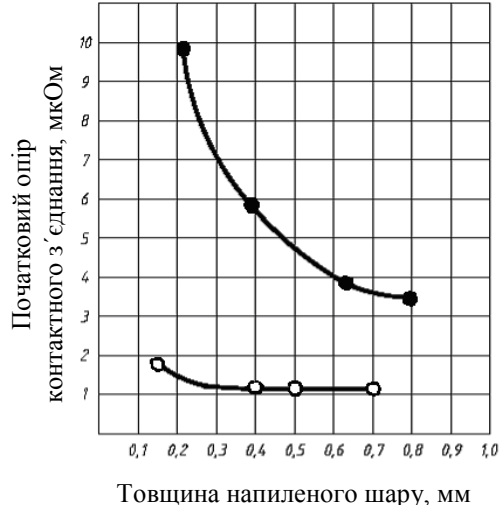


Рис. 6. Залежність початкового опору контактного з'єднання від товщини та ступеню обробки поверхні напиленого шару.

- – до обробки напиленого шару;
- – після обробки напиленого шару

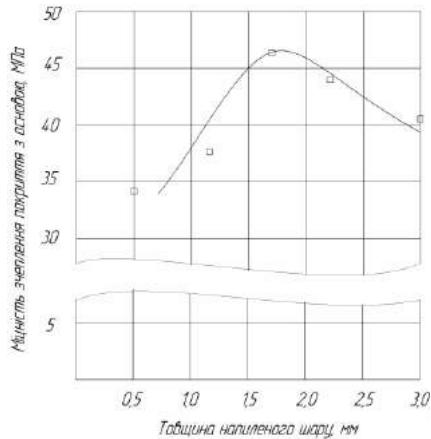


Рис. 7. Залежність міцності зчеплення від товщини напиленого шару в умовах корозійного середовища

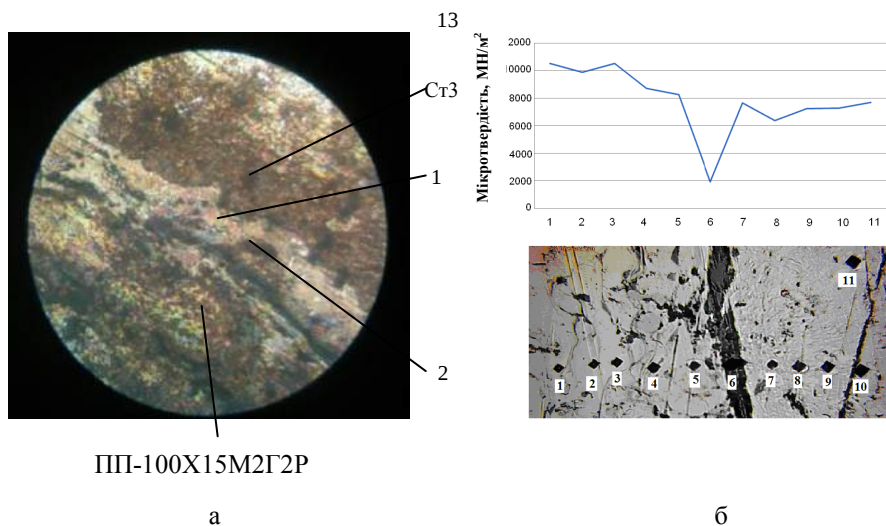


Рис. 8. Структура з'єднання, напиленого порошковим дротом ПП-100X15Н10Г2Р на сталь Ст3 (а, $\times 660$) і зміна мікротвердості в зоні 2 (б, $\times 440$)

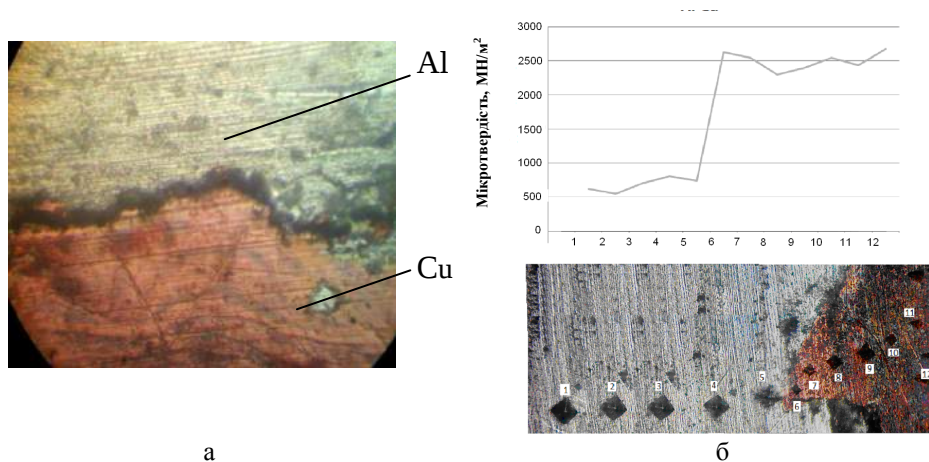


Рис. 9. Структура з'єднання напиленого шару міді на алюміній (а) і зміна мікротвердості на границі розподілу алюміній-мідь (б)

У п'ятому розділі представлено, що на підставі комплексу виконаних досліджень була розроблена технологія підвищення електропровідності алюмінієвих струмопідвідів, яка впроваджена на підприємствах гірничометалургійних комплексів України та інших країн світу.

Показано, що використання технології плазмового напилення дозволяє відновлювати та підвищувати робочі характеристики деталей машин, які експлуатуються при різних умовах, таких як тертя металу по металу з мастилом (шійки гребного валу пасажирського судна, напрямні лопатки газотурбінного двигуна газоперекачувальної станції, ексцентриковий вал радіально-кувальної машини), забезпечення електропровідності (наконечники, перехідники і ін. ел. дет.). Також наведений перелік деталей машин, на удосконалену технологію напилення яких є акти впровадження у виробництво.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Аналіз сучасного стану висвітлення енергетичних і технологічних характеристик процесу плазмового напилення показав, що незважаючи на велику кількість публікацій, деякі важливі питання, такі як температура плазмового потоку з металевими частинками, тиск його на поверхню виробу, змочування та розтікання напиленого матеріалу основі, висвітлені недостатньо і не мають однозначного трактування.

2. Встановлено, що при малих діаметрах штифта (2-6 мм) показник міцності завищений у 7-9 разів, а при подальшому збільшенні діаметра штифта міцність зменшується і стає постійною у межах 8-12 мм, що дозволяє значно зменшити похибку у визначенні міцності. У дослідженнях міцнісних властивостей напилених покриттів показано, що у випадку напилення матеріалів, що мають різне кольорове забарвлення у порівнянні з основою, наприклад міді на алюміній, бронзи на сталь, по фрактограмам зламів методом січних ліній можна визначити частки адгезійного та когезійного руйнування.

3. Встановлено діапазон параметрів режиму напилення, при дотриманні якого формування пориття 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 поширене видалення швидкообертаючоюся сталевією щіткою дозволяє підвищити міцність покриття на 25-30%.

4. 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 згоряння 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%.

5. Встановлено, що площа зони попереднього підігріву поверхні до температури плавлення відносно невелика та складає приблизно 5% від площі ро-

зплаву. Показано, що окрім нагріву дроту в твердому стані значна частина теплового потоку витрачається на нагрів плівки металу.

6. 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 струмоведучого дроту не має несущільностей, що пояснюється більшою величиною напірного тиску під дією якого рідкий метал затікає в усі мікронерівності шорсткої поверхні.

7. Встановлено оптимальне співвідношення розмірів крапель (0,1...0,4 мм) та мікрорельєфу (80...90 мкм), що забезпечує найбільшу міцність покриття, нанесеного струмоведучим 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.

8. Частка адгезійного та когезійного руйнування визначається лише ступенем однорідності металу основи і напилуваного 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 напilenня 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.

9. За результатами аналізу проведених досліджень удосконалена технологія і техніка напilenня була впроваджена у виробництво на підприємствах України та інших країн світу.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Ershov A.V. The Effect of exothermic Processes on Thermodynamic Characteristics during Plasma sputtering of Metal Conductive Wires / A.V. Ershov, O.G. Bykovsky, A.N. Lapteva // *Inorganic Materials: Applied Research*. – 2015. – 6(3). – PP.225-228. Іноземне фахове видання.

2. Ершов А.В. Влияние экзотермических процессов на термодинамические характеристики при плазменном распылении металлических токопроводящих проволок / А.В. Ершов, О.Г. Быковский, А.Н. Лаптева // *Физика и химия обработки материалов*. – 2014. – №1, С.21-24. Іноземне фахове видання.

3. Быковский О.Г. Теплосодержание и строение частиц при плазменном напылении токоведущей проволокой / О.Г. Быковский, А.Н. Лаптева, А.С. Мищенко, Н.П. Пасько, Г.М. Русев // *Сварочное производство - науч.-техн. и производств. журн.* – 2015. – №5(966). – С.21-27. Іноземне фахове видання.

4. Ершов А.В. Оценка теплового потока из плазмы в торец проволоки – анода из алюминия / А.В. Ершов, О.Г. Быковский, А.Н. Лаптева, Е.А. Зеленина // Сварочное производство - научн.-техн. и производств. журн. – 2015. - №10(971). – С.7-11. Иноземне фахове видання.

5. Быковский О.Г. Определение температуры частиц при плазменном напылении токоведущей проволокой / О.Г. Быковский, А.В. Ершов, А.Н. Лаптева, А.Н. Глотка // Заготовительные производства в машиностроении – научно-техн. журн. – 2013. - №5. – С.12-14 Иноземне фахове видання.

6. Быковский О.Г. Материалы и технология плазменного напыления деталей токоведущей проволокой / О.Г. Быковский, А.Н. Лаптева, Г.М. Русев // Заготовительные производства в машиностроении. – научн.-техн. журн. – 2013. - №12. – С.19-21. Иноземне фахове видання.

7. Быковский О.Г. О роли шероховатости поверхности подложки на характеристики ее смачивания при плазменном напылении / О.Г. Быковский, В.Е. Самойлов, А.Н. Лаптева, А.В. Бусов, Д.Я. Воронин // Заготовительные производства в машиностроении. – научн.-техн. журн. – 2014. - №7. – С.7-11. Иноземне фахове видання.

8. Быковский О.Г. О температуре и строении частиц при плазменном напылении порошкообразных материалов / О.Г. Быковский, А.В. Фоменко, А.Н. Лаптева, Н.П. Пасько, А.В. Чечет // Заготовительные производства в машиностроении – научно-техн. журн. – 2014. - №9. – С.21-24. Иноземне фахове видання.

9. Быковский О.Г. Современное состояние технологии сварки цветных металлов и сплавов. 7. Цветные металлы в составе композитных материалов. 8. Разнородные сварные соединения (Обзор) / О.Г. Быковский, А.Н. Пасько (А.Н. Лаптева) // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2011. - №12. – С.32-40. Иноземне фахове видання.

10. Русев Г.М. Влияние параметров напыления токоведущей проволокой на фракционный состав распыляемых частиц / Г.М. Русев, А.Г. Русев, В.В. Овсянников, О.Г. Быковский, А.Н. Пасько (А.Н.Лаптева) // Автоматическая сварка – международный научн.-техн. и производств. журн. –2013. - №1(717). – С.45-47. Фахове видання, включено до наукометричних баз ВІНТІ, РІНЦ.

11. Быковский О.Г. Влияние состояние поверхности твердого тела на характеристики смачивания его расплавом / О.Г.Быковский, В.Е. Самойлов, В.Е. Олышанецкий, А.Н. Лаптева, А.В. Бусов, Д.Я. Воронин // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні – Науковий журнал. – 2013. - №2. – С.55-59. Фахове видання.

12. 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 – Науковий журнал. – 2016. - №1. – С.19-23. Фахове видання.

13. Овсянников В.В. Плазменнодуговое напыление меди на контактные поверхности токоподводов из алюминия / В.В. Овсянников, А.Г. Русев,

Г.М. Русев, О.Г. Быковский, А.Н. Пасько (А.Н. Лаптева) // Сварщик – информационно-техн. журнал. – 2010. – №3(73). – С.14-15.

14. Пасько А.Н. (Лаптева А.Н.) Влияние некоторых факторов на прочность сцепления напыленных плазменных покрытий / А.Н. Пасько (А.Н. Лаптева), Р.Т. Агакишиев, С.В. Беседенко, О.Г. Быковский, В.В. Овсянников, А.Г. Русев, Г.М. Русев // Сварщик – информационно-техн. журнал. – 2011. - №4(80). – С.40-41.

15. Быковский О.Г. Влияние вида материала и технологии распыления на строение плазменной струи и величину ее давления на подложку / О.Г. Быковский, А.Н. Лаптева. А.В. Фоменко, А.В. Четет // Сварщик – информационно-техн. журнал. – 2014. - №3(97). – С.39-41.

16. Лаптева А.Н. Определение доли адгезионного и когезионного разрушения покрытия, напыленного плазмой / А.Н. Лаптева, Ю.С. Дмитренко, Н.П. Пасько, О.Г. Быковский, А.В. Четет, С.Н. Мацюк // Сварщик – производственно-техн. журнал. – 2016. - №1(107). – С.12-13.

17. Пасько А.Н. (Лаптева А.Н.) Напыление меди на поверхность алюминия / А.Н. Пасько (А.Н. Лаптева), О.Г. Быковский // Материалы 2 Международной научно-технической конференции «Сварочное производство в машиностроении: перспективы развития». – Краматорск. – 2010. – С.105-106.

18. Быковский О.Г. Плазменное напыление меди на алюминий / О.Г. Быковский, А.Н. Пасько (А.Н. Лаптева) // Программа и тезисы докладов Научн.-техн. конференции «Современные проблемы металлургии, технологии сварки и наплавки сталей и цветных металлов» Ин-та электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины. – 2012. – С.10.

19. Быковский О.Г. Тепловое состояние и фракционный состав частиц при плазменном напылении токоведущей проволокой / О.Г. Быковский, А.Н. Лаптева // Сб. тезисов стендовых докладов международной конференции «Сварка и родственные технологии – настоящее и будущее» Ин-та электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины. – 2013. – С.167.

20. Быковский О.Г. Изменение шероховатости подложки после нанесения плазменного покрытия / О.Г. Быковский, А.Н. Лаптева // Матеріали 8 Міжнародної конференції молодих учених та спеціалістів «Зварювання та споріднені технології» Ін-та електрозварювання ім. Є.О.Патона НАН України. – 2015 – С.92.

21. Лоскутов С.В. Контактная температура при плазменном напылении металлов на стальную подложку / С.В. Лоскутов, Е.А. Зеленина, А.В. Ершов, О.Г. Быковский, А.Н. Лаптева // Матеріали 8 Міжнародної конференції молодих учених та спеціалістів «Зварювання та споріднені технології» Ін-та електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України. – 2015 – С.111

АНОТАЦІЯ

Лаптева Г.М. - Удосконалення технології нанесення плазмових покриттів при використанні струмоведучих дрітів за рахунок оптимізації фракційного складу та розтікання металевих частинок. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.06 - Зварювання та споріднені процеси і технології. - Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». – МОН України, Київ, 2017.

Дисертаційна робота присвячена дослідженню таких важливих питань, як температура плазмового потоку з металевими частинками, тиск його на основу, змочування і розтікання напиленого матеріалу по поверхні, а також корегуванню існуючої технології напилення на підставі отриманих результатів.

Досліджено міцність зчеплення та характер руйнування напиленого шару з основою. Виміряно температуру та будову частинок розпилюваних матеріалів у вигляді струмоведучих дрітків та порошкоподібних матеріалів з урахуванням одночасного впливу плазмового потоку. Виміряно величину тиску плазмових струменів та його вплив на формування покриття. Досліджено характер розтікання крапель рідкого сплаву в залежності від стану поверхні основи. Проведені дослідження впливу часу дробоструминної обробки на морфологію оброблюваної поверхні і міцність зчеплення плазмового покриття з основою та встановлено графічну залежність. Побудовано залежність оптимального співвідношення розмірів крапель та мікрорельєфу, що забезпечує найбільшу міцність покриття, нанесеного струмоведучим дротом. Встановлено залежність початкового опору контактного з'єднання від товщини та ступеню обробки поверхні напиленого шару. Скореговано існуючу технологію і техніку напилення для покращення працездатності покриттів, отриманих з використанням струмоведучого дроту.

Ключові слова: плазмове напилення, струмоведучий дріт, характер руйнування, міцність зчеплення, калориметризування, мікрорельєф поверхні, змочування поверхні, контактний опір.

АННОТАЦИЯ

Лаптева А.Н. – Усовершенствование технологии нанесения плазменных покрытий при использовании токоведущих проволок за счет оптимизации фракционного состава и растекания металлических частичек. – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.03.06 – Сварка и родственные процессы и технологии – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» - МОН Украины, Киев, 2017.

Диссертация посвящена исследованию таких важных вопросов, как температура плазменного потока с металлическими частичками, его давление на основу, смачивание и растекание напыленного материала по поверхности, а также корректированию существующей технологии напыления на основе полученных результатов.

Исследована прочность сцепления и характер разрушения напыленного слоя с основанием. Установлено, что с увеличением диаметра штифта с 2 до 6 мм сила отрыва меняется незначительно, в то время как прочность сцепления снижается почти в 9 раз. Дальнейшее увеличение диаметра

с 6 до 12 мм наоборот, приводит к значительному увеличению силы отрыва, но прочностной показатель находится примерно на одном уровне для диаметров 8-12 мм. Поэтому можно считать, что для данных условий испытания диаметр штифта может быть выбран именно в этих пределах без угрозы искажения результатов вследствие действия случайных факторов, а погрешность будет незначительной

Измеряна температура и строение частиц распыленных материалов в виде токоведущих проволок и порошкообразных материалов с учетом одновременного воздействия плазменного потока. Установлено, что наибольшая доля металла, перенесенного в парообразном состоянии, качественно соответствует наибольшему значению теплоемкости частиц с плазменным потоком. Было установлено, что собранные мелкодисперсные фракции размером 0,063 мм и менее составляют 86% от общего количества отделившегося металла, причем доля пылевидных частиц составляла 47%. Это лишний раз служит подтверждением того, что значительное количество напыляемого материала переносится в парообразном виде. При своем движении в плазменной струе частицы быстрее теряют скорость и температуру - параметры, определяющие характеристики прочности покрытия. Установлено, что послойная механическая обработка покрытия позволяет повысить когезионную прочность покрытия на 25-30%.

Измеряна величина давления плазменной струи и его влияние на формирование покрытия. Установлено, что измеряемая величина напорного давления плазмы с металлическими порошкоподобными частицами в среднем в 2 раза превышает давление чистой плазменной струи. Холодный газовый поток с теми же параметрами расхода практически не оказывает давления на основу, величина усилия действия не превышает 1 г. В свою очередь давление струи с токоведущей медной проволокой на порядок выше чем при использовании порошкообразных материалов.

Исследован характер растекания капель жидкого сплава в зависимости от состояния поверхности основы: гладкой после прокатки и после дробеструйной обработки. Во всех случаях исследуемые сплавы лучше растекаются на шероховатой (развитой) поверхности, чем на гладкой поверхности твердого тела. Это можно связать с тем, что поверхность подверженная дробеструйной обработке, активируется в результате процессов экструзии и интрузии металла под действием механической деформации.

Установлена графическая зависимость влияния времени дробеструйной обработки на морфологию обрабатываемой поверхности и прочность сцепления плазменного покрытия с основой. Построена зависимость оптимального соотношения размеров капель и микрорельефа, которое обеспечивает наибольшую прочность покрытия, нанесенного токоведущей проволокой.

Установлено, что доля адгезионного и когезионного разрушения не зависит ни от диаметра штифта, ни от толщины напыленного слоя, а определяется лишь степенью однородности металла подложки и напыленного материала. В случае общей основы граница раздела представляет тонкую линию, на которой четко видно оплавленные вершины начальной шероховатости. В этом случае

разрушение носит адгезионно-когезионный характер, примерно 50/50. Если же напыление проводится материалом иного состава по сравнению с подкладкой, то граница соединения характеризуется четкой интерметаллидной прослойкой различной толщины со скачком величины микротвердости. В данном случае слабым местом оказывается граница раздела подкладка-напыленный слой, так что разрушение носит адгезионный характер.

Установлено, что с увеличением толщины напыленного слоя и уменьшением степени шероховатости напыленной поверхности начальное сопротивление контактного соединения уменьшается.

Скорректирована существующая технология и техника напыления для улучшения работоспособности покрытий, полученных с использованием токопроводящей проволоки.

Ключевые слова: плазменное напыление, токопроводящая проволока, характер разрушения, прочность сцепления, калориметрирование, микрорельеф поверхности, смачиваемость поверхности, контактное сопротивление.

ABSTRACT

Lapteva G.M. - Improving the technology of plasma coatings using current-carrying wires by optimizing the fractional composition and spreading metal particles. - A manuscript.

The thesis for the degree of candidate of technical sciences, specialty 05.03.06 - Welding and Related Processes and Technologies. - National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky". – The Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2017.

The thesis is devoted to research important issues such as the temperature of the plasma jet of metal particles, the pressure on its substrate wetting and spreading of the sprayed material on the substrate, and correcting existing technology coating on the basis of the results.

Studied adhesion and fracture sprayed layer of foundation. Measured temperature and particle structure sputtered materials in the form of live wires and powder considering the simultaneous influence of plasma flow. Measured value pressure plasma jets and its influence on the formation of the coating. The nature of the spreading of drops of liquid alloy depending on the substrate surface. The graphic dependence of the influence of shot blasting time on the morphology of the treated surface and the strength of the adhesion of the plasma coating to the substrate are established. The dependence of the optimal ratio of the droplet size and the micro relief is constructed, which ensures the greatest strength of the coating applied by the current-carrying wire. The dependence of initial resistance contact connections on the thickness and extent of surface treatment sprayed layer. Adjusted existing technology and equipment to improve deposition efficiency coatings obtained using live wire.

Keywords: plasma spraying, current wire, fracture, adhesion, calorimetry, microrelief of surface, wetting the surface, contact resistance.