

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ДЕМ'ЯНОВ ОЛЕКСІЙ ІВАНОВИЧ

УДК 621.793.74

ДИСЕРТАЦІЯ

**ФІЗИЧНІ ТА МЕТАЛУРГІЙНІ ПРОЦЕСИ ПРИ ПЛАЗМОВО-
ДУГОВОМУ НАПИЛЮВАННІ ПОКРИТТІВ ПЛАВКИМ ДРОТОМ-
АНОДОМ**

Спеціальність 05.03.06 – «Зварювання та споріднені процеси і технології»

Галузь 13 – Механічна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ О.І. Дем'янов

Науковий керівник:

Коржик Володимир Миколайович
доктор технічних наук

Київ – 2021

АНОТАЦІЯ

Дем'янов О.І. Фізико-металургійні процеси при плазмово-дуговому напилюванні покриттів зовнішнім плавким дротом-анодом. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.06 – зварювання та споріднені технології. – Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона Національної академії наук України, м. Київ, 2021.

Дисертація присвячена розробці фізико-математичних моделей процесів тепло- і масопереносу в електродуговій зоні та турбулентному плазмовому струмені при плазмово-дуговому розпиленні металевого дроту-аноду та їх дослідній перевірці. Встановлено, що після формування розплаву на дроті-аноді відбувається зрив металевих крапель діаметром 600...750 мкм та їх подальше дроблення до діаметрів 40...150 мкм в плазмовому струмені. Також проведено вимірювання швидкості і температури частинок вздовж довжини струменя. Запропоновано управління характеристиками плазмового струменя за рахунок його стиснення зовнішнім високошвидкісним повітряним потоком із витратами від 16 до 40 м³/год, який підвищує напруженість електричного поля і забезпечує захист розплавлених крапель металу від окислення. Розроблено рекомендації по вибору оптимізованих технологічних режимів, що дозволяють одержувати металеві покриття товщиною до 5 мм і більше із пониженою поруватістю (1-2%), а також безпороваті покриття із міцністю зчеплення з основою близько 60-70 МПа при коефіцієнті використанні матеріалу до 72% плазмово-дуговим напилюванням дротом-анодом діаметром 1,2-1,6 мм, що плавиться при струмах 160...260 А, із використанням в якості плазмоутворюючого газу із витратами 1,0-1,5 м³/год. Також створено рекомендації по конструюванню обладнання і режимам його функціонування. Доведено високий рівень зносостійкості нанесених покриттів в умовах тертя ковзання. Виконано низку промислових впроваджень на промислових підприємствах України і КНР.

У першому розділі наведено аналіз особливостей плазмо-дугового розпилення рухомих дротів-анодів свідчать про високу ефективність цього процесу. Показано, що в ході низки досліджень визначено температури частинок при плазмовому напиленні струмопровідним дротом, запропоновано конструкції обладнання, досліджено поведінку плазмового струменю, розроблено математичні моделі для моделювання процесу. Також встановлена відсутність комплексних систематичних досліджень плазмового напилення металевими дротами-анодами, недостатнє вивчення таких важливих питань, як температура плазмового потоку з металевими частинками, вплив цього потоку на оброблювану основу, формування напиленого матеріалу на поверхні, недоліки існуючих математичних досліджень. Розглянуто схеми процесів ГТН, проаналізовано їх переваги і недоліки, визначено перспективність застосування схеми плазмо-дугового розпилення рухомого дроту-аноду. На підставі аналізу літератури сформульовано мету і завдання роботи.

Другий розділ присвячено опису розробки методики виконання досліджень, що включає:

- вибір схеми процесу, розробка методики та початкових умов для чисельних та реальних експериментів по дослідженню процесів тепло-, і масопереносу в плазмовому потоці, вибір математичних моделей для теоретичного дослідження плазмових потоків;
- створення інноваційного експериментального комплексу для досліджень мікрометалургійних процесів в двофазному плазмовому струмені при розпиленні дроту-аноду;
- вибір методик дослідження структур та властивостей отриманих покриттів.

Описана конструкція дослідної плазмово-дугової установки, апаратурно-програмні засоби якої дозволяють здійснювати автоматичну реєстрацію та обробку даних параметрів процесу, в тому числі таких, як струм дуги, напруга на дузі, тиск та витрата плазмоутворюючого газу (аргону), тиск та витрата повітря для створення супутнього потоку, частота обертання приводу подачі

дроту, тощо. Вказано моделі і характеристики дослідного обладнання, а також хімічні склади матеріалів, які було застосовано в роботі.

У третьому розділі описано математичне моделювання генерації плазмового струменю і диспергування дроту-аноду, що плавиться. Показано, що запропонована система МГД рівнянь разом зі супутніми співвідношеннями, k - ϵ моделлю турбулентності і граничними умовами повністю визначає теплові та газодинамічні характеристики турбулентного потоку плазми, як на дуговій, так і на інерційній ділянці течії. Течія цівки розплаву з кінця дроту-аноду із достатньою точністю описується за допомогою квазіодномірної системи рівнянь Нав'є-Стокса, записаної з урахуванням сили в'язкого впливу на розплав з боку плазмового потоку. Ці рівняння складають основу уніфікованої математичної моделі, придатної для розрахунку просторових розподілів температури і швидкості дозвукових турбулентних плазмових потоків, які генеруються у нашому випадку плазмотроном з частково відкритою дугою при наявності супутнього газового потоку, який обдуває плазмову дугу.

За допомогою розробленої фізико-математичної моделі та програмного забезпечення для її комп'ютерної реалізації проведено чисельний аналіз характеристик дозвукової турбулентної течії аргонової плазми, що генерується плазмотроном із плавким дротом-анодом при різних режимах його роботи. Також встановлено, що підвищення напруженості електричного поля в межах плазмoформуючого каналу є наслідком того, що за обраних значень радіуса каналу, струму дуги та витрат плазмоутворюючого газу напруженість поля поблизу катода є меншою, ніж в асимптотичній області каналу. В розглянутому діапазоні струмів розрахована вольтамперна характеристика стовпа дуги.

Для перевірки математичного моделювання виконано експериментальне дослідження закономірностей протікання фізико-металургійних процесів при плазмово-дуговому розпилюванні плавкого дроту-аноду. Вивчено особливості плавлення анодної зони дроту, формування та дроблення крапель розплаву, визначено значення швидкості і температури частинок в потоці, їх розподіл за розмірами, вольт-амперні характеристики стовпа дуги в залежності від

технологічних параметрів процесу. Виявлено явище вторинної диспергації розплавлених частинок в потоці. Візуалізовано процес формування розплаву, визначені закономірності зміни температури плазмового потоку уздовж осі струменя.

Виявлено і пояснено аномальний ефект виникнення високошвидкісних сфероподібних яскравих розрядів навкруги поверхні розплавлених часток при плазмо-дуговому напилюванні вольфрамового дроту-аноду. Проведено порівняння розрахункових і вимірних значень розмірів, швидкостей і температур розпилених часток, а також характеристик плазмового струменя, яке показало, що точність математичного моделювання є не гіршою за 5-10%.

В четвертому розділі описано результати дослідження впливу фізико-металургійних особливостей процесу отримання покриттів та їх структуру і властивості. Для вибраних типів матеріалів встановлено особливості форми, мікроструктури і хімічного складу й склад торця дроту-аноду після різкого обриву дуги в процесі плазмо-дугового напилювання, в порівнянні із отриманими покриттями.

Підтверджено, що при збільшенні значень витрати G_2 супутнього захисного повітряного потоку від 0 до 20-40 м³/год ступінь вигорання легуючих елементів (С, Mn) в процесі напилювання із сталей марок 65Г, 70, Св-08 зменшується в середньому на 30-40%. Встановлено, що при значеннях G_2 20-40 м³/год значення вмісту кисню в зоні плавлення в торці дроту-аноду після різкого обриву дуги близькі до показників в напилених покриттях, а для випадку напилювання мідного дроту М2 – цей показник в покритті менший в середньому в 1,5-2 рази.

Встановлено, що напилені покриття мають щільну шарувату структуру, характерну для плазмових покриттів, значення поруватості в основному знаходиться в межах 0,5-2,5%. Встановлена тенденція до пониження цього показника із підвищенням значень витрати супутнього повітряного потоку. Механічні випробування напилених досліджуваних способом шарів показали можливість досягнення достатньо високих показників міцності їх зчеплення з

основою при відриві по нормалі (до 60-70 МПа). Встановлено, що параметр витрати G_2 повітряного потоку, супутнього плазмовому струменю, є одним із основних, який суттєво впливає на цей показник. Встановлена аналогічна тенденція впливу технологічного параметру G_2 на підвищення зносостійкості покриттів в умовах граничного тертя та на стійкості при кавітаційному зношуванні.

В п'ятому розділі надано рекомендації з конструювання обладнання і вибору режимів, а також описано промислове впровадження розроблених технологічних процесів одержання покриттів. Розроблені рекомендації по конструюванні плазмотрону та промислового обладнання для нового покоління обладнання для плазмово-дугового напилювання покриттів зовнішнім плавким дротом-анодом, які були впроваджені в ТОВ Науково-виробничий центр «ПЛАЗЕР» (Україна) при виготовленні зразка серійної установки ППН-1 та напівавтоматичної лінії плазмово-дугового напилювання шийок осей колісних пар рухомого складу вантажного залізничного транспорту.

Розроблено та впроваджено на підприємстві Zibo KNC Petroleum Equipment Co, Ltd, (КНР) технологічний процес плазмово-дугового напилювання мідним дротом-анодом антизадирних покриттів на різьбові з'єднання бурових та нафтовидобувних труб насосно-компресорних труб для захисту від схоплювання важко навантажених різьбових з'єднань «ніпель-муфта». Також на даному підприємстві впроваджено технологічні процеси нанесення мідних покриттів для контактів та проміжного шару для отримання паяних з'єднань на алюмінієвих і сталевих виробках.

Наукова новизна одержаних результатів. В роботі проведено комплекс теоретичних і експериментальних досліджень, спрямованих на забезпечення потрібних якості та функціональних характеристик поверхонь деталей при плазмово-дуговому напиленні металевих покриттів плавким дротом-анодом. Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

- 1) створено новий експериментальний комплекс для досліджень мікрометалургічних процесів, що відбуваються в двофазному плазмовому

- струмені при розпиленні зовнішнього плавкого дроту-аноду, який базується на інтеграції оригінальної тепловізійної системи із інноваційною дослідною плазмово-дуговою установкою та програмним забезпеченням яке здійснює автоматичну обробку інформації від високошвидкісної відеокамери і цифрового спектрометра та системи управління технологічним параметрами;
- 2) в результаті теоретичних та експериментальних досліджень вперше встановлено закономірності розподілу і шляхи управління такими параметрами процесу плазмово-дугового напилювання зовнішнім плавким дротом-анодом, як швидкість і температура плазми, напруженість електричного поля, вольт-амперні характеристики стовпа дуги, концентрація аргону в плазмовому струмені, в залежності від режимів роботи плазмотрона та основних технологічних факторів (витрати плазмоутворюючого газу, сили струму, витрати високошвидкісного супутного повітряного потоку навкруг двофазного запиленого плазмового струменя);
 - 3) в результаті теоретичних та експериментальних досліджень вперше проаналізовано та візуалізовано процеси формування шару розплаву на торці дроту-аноду при плазмово-дуговому розпиленні, зриву металевих крапель діаметром 500...700 мкм та виявлено процеси їх вторинної диспергації до діаметрів 40...150 мкм, а також встановлені закономірності зміни швидкості і температури частинок вздовж довжини плазмового струменя;
 - 4) вперше виявлено аномальний ефект виникнення високошвидкісних (4 км/с) сфероподібних яскравих розрядів розміром до 5 мм навкруг поверхні розплавлених часток при плазмово-дуговому розпилюванні вольфрамового дроту-аноду, який можна пояснити явищем термоемісії електронів навколо краплі вольфраму із підвищеною температурою плавлення (3700 K);
 - 5) встановлена тенденція зменшення степеню вигорання легуючих елементів та пористості напилених покриттів із підвищенням значень витрати кільцевого високошвидкісного супутного повітряного потоку навкруг двофазного запиленого плазмового струменя G_2 від 0 до 20-40 м³/год, при цьому при напилюванні сталєвих дротів марок 65Г, 70, Св-08 степінь вигорання

легуючих елементів (С, Мп) понижується в на 30-40%, пористість до 0,5-2,5%, а при напилюванні дротів із міді М2, ніхрому, нікелю, алюміній-магнієвого сплаву АМг 63 при значеннях G_2 35 м³/год отримані безпористі покриття.

- б) встановлено, що параметр витрати кільцевого повітряного потоку, супутного плазмовому струменю, є одним із основних, який суттєво впливає на показник міцності зчеплення напилених покриттів з основною: ріст значень G_2 від 0 до 20-40 м³/год при незмінних інших технологічних параметрах приводить до росту цього показника на 30-50%.

Практичне значення одержаних результатів. Встановлені в роботі закономірності процесу плазмово-дугового напилювання покриттів плавким дротом-анодом, а також вимоги до умов їх реалізації, дозволили створити рекомендацій з конструювання обладнання, яке забезпечує на поверхні виробів одержання функціональних покриттів потрібних характеристик і якості. Практична цінність роботи міститься в наступному:

- 1) за результатами лабораторних випробувань на зносостійкість і ходових випробувань напилених деталей двигунів внутрішнього згорання, зокрема деталей типу «вал», встановлено придатність розроблених технологічних процесів до промислового впровадження;
- 2) реалізована схема плазмового напилення із використанням в якості аноду струмопровідного дроту забезпечує більш ефективне управління параметрами плазмового струменю, підвищує коефіцієнт корисної дії нагріву матеріалів у плазмі, знижує теплове навантаження на анод;
- 3) за рахунок стиснення і захисту турбулентного струменю аргонової плазми супутнім надзвуковим ламінарним потоком стисненого повітря досягається істотне збільшення його протяжності, звуження, а також захист від окислення крапель рідкого металу, що мінімізує наявність окислів у напилених шарах;
- 4) розпилення металевого дроту-аноду, що подається із швидкістю 7-12 м/хв, струмом 160-260 А дозволяє вести процес плазмово-дугового напилювання із коефіцієнтом використання матеріалу понад 70%, що значно підвищує економічність даного процесу;

- 5) розроблені рекомендації по конструюванні плазмотрону та плазмово-дугового обладнання дозволили виготовити зразок серійної установки та напівавтоматичної лінії плазмово-дугового напилювання шийок осей колісних пар рухомого складу вантажного залізничного транспорту
- 6) отриманню безпористих мідних покриттів із підвищеною міцністю зчеплення з основою дозволило їх використовувати для захисту від схоплювання важко навантажених різьбових з'єднань бурових та нафтовидобувних насосно-компресорних труб, а також для створення контактів і в якості проміжного шару для отримання паяних з'єднань на алюмінієвих і сталевих виробках і деталях.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових виданнях, що включені до міжнародних наукометричних баз даних.

1. Kharlamov M. Yu. Simulation of Motion, Heating, and Breakup of Molten Metal Droplets in the Plasma Jet at Plasma-Arc Spraying / Kharlamov M. Yu., Krivtsun I. V., **Demianov O.I.** // J. Therm. Spray Technol, V.24(4), 2015. – P. 659–670.

Статті у наукових фахових виданнях України.

2. Харламов М.Ю. Об уточнении математической модели электрической дуги в плазмотроне с внешней токоведущей проволокой / Харламов М.Ю., Кривцун И.В., Коржик В.Н., **Демьянов А.И.** Петров С.В. // Автоматическая сварка, №1, 2009. – С. 53-56.

3. Бороненко М.П. Методы контроля температуры и скорости частиц конденсированной фазы в процессе плазменно-дугового напиления / Бороненко М.П., Гуляев И.П., Гуляев П.Ю., Долматов А.В., Иордан В.И., Кривцун И.В., Харламов М.Ю., **Демьянов А.И.** // Фундаментальные исследования, №10 (часть 6), 2013. – С. 1194-1199.

4. Бороненко М.П. Оценка скорости и температуры дисперсной фазы в струях плазменно-дугового напиления / Бороненко М.П., Гуляев И.П., **Демьянов А.И.**, Гуляев П.Ю., Долматов А.В., Иордан В.И., Кривцун И.В.,

Харламов М.Ю. // *Фундаментальные исследования*, №11 (часть 10), 2014. – С. 2135-2140.

5. Boronenko M.P. Estimate of Dispersed Phase Velocity and Temperature in Plasma-Arc Spraying Jets / Boronenko M.P., Gulyaev I.P., Gulyaev P.Y., **Demianov O.I.**, Dolmatov A.I., Iordan V.I., Korzhik V.N., Krivtsun I.V., Kharlamov M.Yu. // *Fundamental Research*. – 2014. - 11(10) - P. 2135-2140.

6. Gulyaev I.P. Experimental Study of the Plasma-Arc Wire Spraying Process / Gulyaev I.P., Gulyaev P.Y., Korzhik V.N., Dolmatov A.V., Iordan V.I., Krivtsun I.V., **Demianov O.I.**, M.Yu. Kharlamov // *Paton Weld. Journal*, V.3-4, 2015. – P. 36-41.

7. Гуляев И.П. Экспериментальное исследование процесса плазменно–дугового проволочного напыления / Гуляев И.П., Гуляев П.Ю., Долматов А.В., **Демьянов А.И.**, Иордан В.И., Кривцун И.В., Харламов М.Ю. // *Автоматическая сварка*, №3-4, 2015. – С. 37-43.

8. Харламов М.Ю. Математическая модель дуговой плазмы, генерируемой плазмотроном с проволокой-анодом / Харламов М.Ю., Кривцун И.В., Коржик В.Н., Петров С.В., **Демьянов А.И.** // *Физические процессы при сварке и обработке материалов. Теоретическое исследование, математическое моделирование, вычислительный эксперимент: Сб. статей и докладов под ред. акад. НАН Украины И.В. Кривцуна*. – Киев: Международная Ассоциация «Сварка», 2018. – С. 398-401.

9. Харламов М.Ю. Влияние рода газа спутного потока на характеристики дуговой плазмы, создаваемой плазмотроном с проволокой-анодом / Харламов М.Ю., Кривцун И.В., Коржик В.Н., Петров С.В., **Демьянов А.И.** // *Физические процессы при сварке и обработке материалов. Теоретическое исследование, математическое моделирование, вычислительный эксперимент: Сб. статей и докладов под ред. акад. НАН Украины И.В. Кривцуна*. — Киев: Международная Ассоциация «Сварка», 2018. – С. 401-408.

10. Харламов М.Ю. Уточненная математическая модель электрической дуги в плазмотроне с внешней токоведущей проволокой / Харламов М.Ю., Кривцун И.В., Коржик В.Н., **Демьянов А.И.**, Петров С.В. // *Физические процессы при*

сварке и обработке материалов. Теоретическое исследование, математическое моделирование, вычислительный эксперимент: Сб. статей и докладов под ред. акад. НАН Украины И.В. Кривцуна. – Киев: Международная Ассоциация «Сварка», 2018. – С. 408-413.

11.Kharlamov M.Yu. Simulation of motion, heating, and breakup of molten metal droplets in the plasma jet at plasma-rcspraying / Kharlamov M.Yu., Krivtsun I.V., Korzhyk V.N., Ryabovolyk Y.V., **Demianov O.I.** // Физические процессы при сварке и обработке материалов. Теоретическое исследование, математическое моделирование, вычислительный эксперимент: Сб. статей и докладов под ред. акад. НАН Украины И.В. Кривцуна. – Киев: Международная Ассоциация «Сварка», 2018. – С. 511-523.

12.Щерецький В.О. Вплив сумісного модифікування скандієм та цирконієм на ливарні властивості алюмінієвих сплавів системи Al–Mg–Cu / Щерецький В.О., Jianglong Yi, Чайка А.А., **Дем'янов О.І.** // Processy lit'â, Tom 141, №3, 2020.

Патенти України на корисну модель.

13.Застосування багатоскладового композиційного матеріалу з металевою матрицею як матеріалу для виготовлення електродів живлення апаратів газотермічного напилення / Щерецький В.О., Затуловський В.А. **Дем'янов А.І.** // Пат. України №61439 UA, МПК6 C22C 1/10, C22C 21/00, C22B 21/00.

Тези конференцій.

14.Коржик В.Н. Нанесение газотермических покрытий на корпусные детали компьютерной техники для обеспечения экологии рабочего места и конфиденциальности информации / Коржик В.Н., Маринский Г.С., Чернец А.В., **Дем'янов А.І.** // Тезисы докладов VII Международной научно-технической конференции «Энерго- и материалосберегающие экологически чистые технологии». – Гродно. Беларусь, 27-28 сентября 2007 г.

15.Кривцун И.В. Математическое моделирование турбулентных пароплазменных потоков / Кривцун И.В., Харламов М.Ю., Коржик В.Н., **Дем'янов А.І.**, С.В.Петров, Г.С.Маринский // Тезисы докладов

Международной конференции «Сварка и родственные технологии в третье тысячелетие». – Киев, 24-26 ноября 2008 г.

16. Коржик В.Н. Нанесение газотермических покрытий на корпусные детали компьютерной техники и приборов для обеспечения конфиденциальности информации и экологии рабочего места / Коржик В.Н., Мурашов А.П., Демьянов А.И., Петров С.В., Харламов М.Ю. // Десятая Промышленная конференция "Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях". - п. Славское, Карпаты, 18-22 февраля 2010 г.

17. Затуловский А.С. Литейная технология получения алюмоматричных износостойких дисперснонаполненных композиционных материалов и покрытий из них / Затуловский А.С., Щерецкий В.А. Демьянов А.И. // Матер. Межд. научно-практ. конференции «Персп. техн., матер и оборудование в литейной индустрии». – Киев, ФТИМС, 2010.

18. Кривцун И.В. Разработка физико-математической модели турбулентных паро-плазменных потоков / Кривцун И.В., Харламов М.Ю., Коржик В.Н., Демьянов А.И., Маринский Г.С. // Десятая Промышленная конференция, "Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях". - п. Славское, Карпаты, 18-22 февраля 2010 г.

19. Харламов М.Ю. Моделирование процессов плазменно-дугового распыления проволочных материалов / Харламов М.Ю., Кривцун И.В., Коржик В.Н., Демьянов А.И. // Седьмая международная конференция «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах» — 2014. — С. 31-33.

20. Jianglong Yi. Применение наноразмерных карбидов для получения сварочных проволок на основе алюминия / Jianglong Yi, Щерецкий В.А., Дем'янов О.І. // Тези VI Наукової конференції «Нанорозмірні системи: будова, властивості, технології» НАНСИС-2019 4-6 грудня 2019, Київ ISBN 978-966-02-9004-4.

21. Коржик В.М. Застосування нанорозмірних компонентів в присаджувальних матеріалах для зварювання алюмінієвих сплавів / Коржик В.М., Jianglong Yi, Щерецький В.О., Дем'янов О.І. // Тези конференції «Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2020» КПІ ім. Ігоря Сікорського.

22. Shcheretskyi V.O. Compatibility of the non-metallic structure modifiers nanoscale particles with common filler alloys of aluminum welding / Shcheretskyi V.O., Demianov O.I., Yi Jianglong // Book of abstracts International research conference "Nanotechnology and Nanomaterials" NANO-2020 Lviv, 6-29 August, 2020. ISBN: 978-966-97587-3-6.

ANNOTATION

Demyanov O. Physico-metallurgical processes in plasma-arc spraying of coatings with external fusible wire-anode. - Manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the candidate of technical sciences on a specialty 05.03.06 - welding and related technologies. – The Paton Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2021.

Scientific bases of the process of plasma-arc sputtering with a moving wire-anode in the form of: a set of physical and mathematical models of heat and mass transfer processes in the electric arc zone and turbulent plasma jet, basic and magnetohydrodynamic (MHD) equations in the turbulent limit approximation; regularities of melting and spraying of moving metal wire-anode; regularities of formation of structure and physical and mechanical properties of coverings depending on conditions of technology and structure of a wire anode. Based on the study of physical and metallurgical features of the process of plasma-arc sputtering of coatings with fusible metal wire-anode, it is proposed to laminarize the plasma jet by compressing it with external high-velocity air flow from 16 to 40 m³/h, which increases the electric field strength. reliable protection of molten metal droplets from oxidation. It is established that the current-voltage characteristic of the arc column during plasma-arc spraying with fusible metal wire-anode is increasing and significantly depends on the consumption of plasma-forming gas, and in the current range $I = 160...260$ A the

growth rate U increases with increasing I . melt on the anode wire is the failure of metal droplets with a diameter of 600...750 μm and their subsequent crushing to diameters of 40...150 μm in the plasma jet. Recommendations for the choice of optimized technological modes are developed, which allow to obtain metal coatings up to 5 mm thick and more with reduced porosity (1-2%) and adhesion strength to the base of about 60-70 MPa at a material utilization factor of up to 72% by plasma-arc wire spraying. - anode with a diameter of 1.2-1.6 mm, melting at currents of 160...260 A, using as plasma-forming gas argon or air-gas mixture with a flow rate of 1.0-1.5 m^3/h . By studying the temperature of formation of liquid metal droplets and the rate of their transfer to the treated surface during plasma-arc spraying of coatings with fusible metal wire-anode, recommendations for the design of equipment and modes of its operation are created. Comparison of the results of calculations performed on the created physical and mathematical models with the results of physical experiments, showed that the accuracy of calculations is not worse than 5-10%. This result is acceptable and indicates the adequacy of the simulation. As a result of wear resistance tests it is confirmed that the technology of plasma-arc spraying with a moving wire-anode and the flow of associated shielding gas provides a high level of wear resistance of the applied coatings under sliding friction, in particular can exceed the wear resistance of the base up to 3-4 times. Industrial implementation (at Zibo KNC Petroleum Equipment Co., Ltd, PRC) of plasma-arc spraying with metal wire-anode in technologies of repair, restoration and increase of resource of threaded sections of pump-compressor pipes and contact surfaces of steel power supplies is performed. It is established that the coatings applied according to the developed technologies ensure the tightness of threaded joints, prevent the ingress of aggressive corrosive environment, increase the number of cycles "screwing - unscrewing" during lowering and lifting operations up to 50 cycles.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	17
Вступ.....	18
Розділ 1. Аналіз сучасного стану і тенденцій розвитку процесів плазмо- дугового напилювання покриттів.....	26
1.1. Плазмові технології в умовах розвитку сучасного виробництва.....	26
1.2. Основні вимоги, що пред'являються до плазмо-дугових процесів.....	36
1.3. Класифікація плазмо-дугових процесів.....	37
1.4. Класифікація конструкцій дугових плазмотронів.....	44
1.5. Особливості та перспективи технології плазмо-дугового нанесення покриттів плавким дротом-анодом.....	59
1.6. Мета роботи та завдання дослідження.....	62
1.7. Висновки по розділу 1.....	64
Розділ 2. Матеріали, обладнання і методи досліджень.....	65
2.1. Лабораторний стенд і допоміжне технологічне обладнання для проведення досліджень.....	65
2.2. Вибір матеріалів для досліджень та їх характеристики	70
2.3. Методи та діагностичне обладнання вимірювання швидкості і температури дисперсних частинок при плазмо-дуговому напиленні металічних дротів.....	71
2.4. Методи дослідження властивостей матеріалів покриттів.....	81
2.5. Висновки по розділу 2.....	84
Розділ 3. Моделювання і дослідження фізичних процесів при плазмо- дуговому розпилюванню плавкого дроту-аноду.....	85
3.1. Схема процесу і постановка задачі газодинаміки та теплопереносу в умовах плазмо-дугового нагріву дроту-аноду.....	86
3.2. Фізико-математичне моделювання плазмового струменя без диспергованих часток.....	88

3.3. Фізико-математичне моделювання плазмового струменя з диспергованими частками.....	95
3.4. Експериментальні дослідження нагріву, плавлення та розпилення рухомого дроту-аноду із компактних та порошкових дротів.....	98
3.5. Порівняння експериментально отриманих результатів із розрахунковими.....	107
3.6. Аналіз особливостей процесу нанесення металевих покриттів плазмо-дуговим розпилюванням плавкого дроту-аноду.....	114
3.7. Висновки по розділу 3.....	118
Розділ 4. Дослідження фізико-металургійних особливостей створення металевих покриттів плазмо-дуговим напилюванням плавким дротом-анодом.....	121
4.1. Дослідження мікроструктури та фазового складу металевих покриттів, одержаних плазмо-дуговим розпилюванням плавкого дроту-аноду.....	121
4.2. Дослідження фізико-механічних властивостей металевих покриттів, одержаних плазмо-дуговим розпилюванням плавкого дроту-аноду.....	134
4.3. Висновки по розділу 4.....	140
Розділ 5. Створення рекомендацій з конструювання обладнання і вибору режимів, впровадження технологічних процесів одержання металевих покриттів.....	141
5.1. Створення рекомендацій з конструювання обладнання для плазмо-дугового розпилювання плавкого дроту-аноду.....	141
5.2. Створення рекомендацій з вибору технологічних режимів одержання металевих покриттів.....	150
5.3. Розробка і впровадження технологічних процесів плазмо-дугового напилювання покриттів.....	156
5.4. Висновки по розділу 5.....	160
Загальні висновки.....	162
Список літератури.....	165

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

G_1 – витрати плазмоутворюючого газу (аргону), л/хв.

G_2 – витрати супутнього кільцевого потоку повітря, яке подається через кільцевий канал радіусом $R_1 \dots R_2$ осісиметричним потоком під кутом α до осі симетрії плазмотрона, л/хв.

I – струм розпилення дроту-аноду діаметром , А

U – напруга на дузі, що розпилює дріт-анод, В

$V_{др}$ – швидкість подачі дроту-аноду, м/хв.

V – швидкість напилання, м/хв.

T – середня температура плазми, К.

w_z – швидкість розпилених дисперсних частинок, які сунуться вздовж осі Z до поверхні, що напилують, м/с.

R – радіус плазмового струменя, мм.

L_d – довжина струменя, мм.

ρ_w, u_w – щільність $[\text{г/м}^3]$ і кінематична в'язкість $[\text{Па}\cdot\text{с}]$ матеріалу дроту при температурі плавлення.

E – складова напруженості електричного поля, В/м.

H – складова напруженості магнітного поля, А/м.

p – тиск газового потоку, Па.

σ – питома електропровідність плазми, См/м.

$\sigma_{b.s.}$ – показник міцності їх зчеплення з основою при відриві по нормалі, МПа.

КВМ – коефіцієнт використання матеріалу, %.

Вступ.

Актуальність теми. На сучасному етапі розвитку науки і техніки часто-густо виникає потреба в нанесенні функціональних покриттів із заданими властивостями без небезпеки виникнення залишкових деформацій або напружень. Прикладами можуть бути: потреба у відновленні габаритних деталей типу вісь або вал, із достатньо незначною (0,1...0,5 мм на діаметр) виробкою посадочних місць, підвищення ресурсу роботи пар тертя за рахунок збільшення зносостійкості їх складових, зменшення витрат палива за рахунок покращення коефіцієнту тертя ковзання певних деталей двигунів внутрішнього згорання тощо.

Зазвичай в таких випадках застосовують технології газотермічного нанесення покриттів і в першу чергу – плазмове напилення. В традиційних технологіях плазмового напилення в якості напилюваного матеріалу використовують в основному порошки. Недоліком порошкового напилювання є труднощі в забезпеченню гарантованого нагріву в плазмовому струмені усіх часток порошку до температур плавлення, наявність непроплавлених часток в покриттях, складності в управлінні їх якістю. Цю проблему, як і низку інших, вирішує застосування при плазмово-дуговому напиленні плавкого дроту-аноду. В роботах Биковського О.Г., Борисова Ю.С., Лаптевої Г.М., Зеленіна В.И., Кавуненко П.М. виконано дослідження фракційного складу частинок при розпиленні струмоведучого дроту при плазмово-дуговому напилюванні, характеру змочування основи рідким розплавом, в залежності від стану поверхні, термічну взаємодію напилених частинок при співударянні, тощо, Однак а них відсутній системний аналіз мікрометалургійних процесів при плазмово-дуговому розпилюванні плавкого дроту-аноду із різних типів напилюваних матеріалів,, протікання процесів тепло- і масопереносу вивчення особливостей впливу основних технологічних параметрів процесу на структуру та властивості отриманих покриттів. Крім того, відсутнє сучасне обладнання для реалізації даного процесу, що стримує його широке застосування.

Необхідність вирішення зазначених проблем є актуальною науково-технічною задачею.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України в рамках Державних науково-технічних програм (№ ДР 0105U001947 2004-2006 рр.) «Розробка наукових основ процесу плазмово-дугового нагріву із рухомим анодом для обробки матеріалів та надання їм наперед заданих властивостей», (№ ДР 0107U002286 2007-2011 рр.) «Дослідження взаємодії теплових, масообмінних, електромагнітних і магнітогідродинамічних явищ в системі «електродний дріт-крапля-стовп дуги» з метою прогнозування закономірностей процесів і переносу крапель електродного матеріалу та його властивостей при зварюванні плавким електродом», (№ ДР 0114U003557 2014-2015рр.) «Методи контролю температури та швидкості часток конденсованої фази в процесі плазмово-дугового напилювання», (№ ДР 0115U006700 2015рр.) «Розробка конструкції плазмотрону для гібридного плазмового зварювання плавким електродом з осьовою подачею електродного дроту», (№ ДР 0113U000352 2011-2015рр.) «Розробка процесу високопродуктивного надзвукового плазмово-дугового напилювання металокерамічних (керметних) покриттів, в тому числі з наноструктурними складовими, із підвищеними функціональними властивостями», (№ ДР 0120U103885 2019-2020) «Спільні дослідження фізико-металургійної взаємодії нанорозмірних порошків з розплавами при отриманні зварювальних алюмінієвих дротів»

Мета і задачі дослідження. Мета роботи – розробка та промислове впровадження технологій і обладнання нанесення покриттів широкого призначення із підвищеними показниками щільності та зчеплення з основою шляхом застосування процесів плазмово-дугового розпилювання компактного металевого дроту-аноду із різних типів сталей і сплавів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **завдання**:

1. Виконати аналіз сучасного стану і тенденцій розвитку технологій плазмово-дугового напилювання покриттів, провести вибір технологічної схеми

досліджуваного процесу, початкових умов для проведення теоретичних та експериментальних досліджень

2. Розробити методики чисельних та фізичних експериментів по дослідженню процесів тепло- і масопереносу в плазмовому потоці, виконати комплекс теоретичних та експериментальних досліджень закономірності зміни вольт-амперних характеристик та особливостей протікання мікрометалургійних процесів при плазмово-дуговому напилюванні зовнішнім плавким дротом-анодом.
3. Дослідити фізико-металургійні особливості при плавленні та розпиленні дроту-анода, в тому числі утворення і диспергування плівки розплаву на торці дроту-анода при плазмово-дуговому розпиленні.
4. Вивчити закономірності впливу основних технологічних параметрів процесу плазмово-дугового напилювання на фізико-металургійні умови формування структури і властивостей покриттів
5. Розробити та впровадити рекомендації з конструювання обладнання для плазмово-дугового напилювання при виготовленні зразка серійної установки та напівавтоматичної лінії плазмово-дугового напилювання шийок осей колісних пар рухомого складу вантажного залізничного транспорту.
6. Розробити рекомендації з вибору оптимальних технологічних режимів одержання покриттів широкого призначення, впровадити технології для підвищення ресурсу бурових та нафтовидобувних різьбових ділянок насосо-компресорних труб і контактних поверхонь сталевих струмопідводи.

Об'єкт дослідження – технологія плазмово-дугового напилювання покриттів зовнішнім плавким дротом-анодом.

Предмет дослідження – мікрометалургійні процеси в двофазному плазмовому струмені при плазмово-дуговому напилювання металевих покриттів.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених завдань і отримання основних результатів дисертаційної роботи було застосовано такі сучасні методи дослідження, як математичне моделювання, а також аналітичні та чисельні методи дослідження фізичних явищ, які супроводжують фізико-металургійні

процеси плазмово-дугового напилювання покриттів плавким дротом-анодом; оптичні, термографічні та спектральні методи дослідження плавлення дроту-аноду і поведінки двофазного плазмово-порошкового струменю; оптичне і механічне вимірювання геометричних параметрів напилених шарів; металографічні дослідження отриманих структур за допомогою оптичної та електронної мікроскопії, а також рентгенофазового аналізу; мікродюрometrічний аналіз; трибологічні дослідження властивостей напилених покриттів методом вимірювання зносостійкості в умовах тертя з обмеженою долею мастила; дослідження міцності зчеплення нанесених покриттів з основою (адгезії). У випадках вимірювання зносостійкості, адгезії і мікротвердості для підвищення достовірності одержувані показники усереднювати за кількома (від 3 до 10) зразкам.

Наукова новизна одержаних результатів. В роботі проведено комплекс теоретичних і експериментальних досліджень, спрямованих на забезпечення потрібних якості та функціональних характеристик поверхонь деталей при плазмово-дуговому напиленні металевих покриттів плавким дротом-анодом. Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

- 1) створено новий експериментальний комплекс для досліджень мікрометалургічних процесів, що відбуваються в двофазному плазмовому струмені при розпиленні зовнішнього плавкого дроту-аноду, який базується на інтеграції оригінальної тепловізійної системи із інноваційною дослідною плазмово-дуговою установкою та програмним забезпеченням яке здійснює автоматичну обробку інформації від високошвидкісної відеокамери і цифрового спектрометра та системи управління технологічним параметрами;
- 2) в результаті теоретичних та експериментальних досліджень вперше встановлено закономірності розподілу і шляхи управління такими параметрами процесу плазмово-дугового напилювання зовнішнім плавким дротом-анодом, як швидкість і температура плазми, напруженість електричного поля, вольт-амперні характеристики стовпа дуги, концентрація аргону в плазмовому струмені, в залежності від режимів роботи плазмотрона

та основних технологічних факторів (витрати плазмоутворюючого газу, сили струму, витрати високошвидкісного супутного повітряного потоку навкруг двофазного запиленого плазмового струменя);

- 3) в результаті теоретичних та експериментальних досліджень вперше проаналізовано та візуалізовано процеси формування шару розплаву на торці дроту-аноду при плазово-дуговому розпиленні, зриву металевих крапель діаметром 500...700 мкм та виявлено процеси їх вторинної диспергації до діаметрів 40...150 мкм, а також встановлені закономірності зміни швидкості і температури частинок вздовж довжини плазмового струменя;
- 4) вперше виявлено аномальний ефект виникнення високошвидкісних (4 км/с) сфероподібних яскравих розрядів розміром до 5 мм навкруг поверхні розплавлених часток при плазово-дуговому розпилюванні вольфрамового дроту-аноду, який можна пояснити явищем термемісії електронів навколо краплі вольфраму із підвищеною температурою плавлення (3700 K);
- 5) встановлена тенденція зменшення степеню вигорання легуючих елементів та пористості напилених покриттів із підвищенням значень витрати кільцевого високошвидкісного супутного повітряного потоку навкруг двофазного запиленого плазмового струменя G_2 від 0 до 20-40 м³/год, при цьому при напилюванні сталєних дротів марок 65Г, 70, Св-08 степінь вигорання легуючих елементів (С, Мп) понижується в на 30-40%, пористість до 0,5-2,5%, а при напилюванні дротів із міді М2, ніхрому, нікелю, алюміній-магнієвого сплаву АМг 63 при значеннях G_2 35 м³/год отримані безпористі покриття.
- 6) встановлено, що параметр витрати кільцевого повітряного потоку, супутного плазовому струменю, є одним із основних, який суттєво впливає на показник міцності зчеплення напилених покриттів з основою: ріст значень G_2 від 0 до 20-40 м³/год при незмінних інших технологічних параметрах приводить до росту цього показника на 30-50%.

Практичне значення одержаних результатів. Встановлені в роботі закономірності процесу плазово-дугового напилювання покриттів плавким дротом-анодом, а також вимоги до умов їх реалізації, дозволили створити

рекомендацій з конструювання обладнання, яке забезпечує на поверхні виробів одержання функціональних покриттів потрібних характеристик і якості. Практична цінність роботи міститься в наступному:

- 1) за результатами лабораторних випробувань на зносостійкість і ходових випробувань напилених деталей двигунів внутрішнього згорання, зокрема деталей типу «вал», встановлено придатність розроблених технологічних процесів до промислового впровадження;
- 2) реалізована схема плазмового напилення із використанням в якості аноду струмопровідного дроту забезпечує більш ефективне управління параметрами плазмового струменю, підвищує коефіцієнт корисної дії нагріву матеріалів у плазмі, знижує теплове навантаження на анод;
- 3) за рахунок стиснення і захисту турбулентного струменю аргонової плазми супутнім надзвуковим ламінарним потоком стисненого повітря досягається істотне збільшення його протяжності, звуження, а також захист від окислення крапель рідкого металу, що мінімізує наявність окислів у напилених шарах;
- 4) розпилення металевого дроту-аноду, що подається із швидкістю 5-7 м/хв, струмом 160-200 А дозволяє вести процес плазмово-дугового напилювання із коефіцієнтом використання матеріалу понад 70%, що значно підвищує економічність даного процесу;
- 5) розроблені рекомендації по конструюванні плазмотрону та плазмово-дугового обладнання дозволили виготовити зразок серійної установки та напівавтоматичної лінії плазмово-дугового напилювання шийок осей колісних пар рухомого складу вантажного залізничного транспорту
- 6) отриманню безпористих мідних покриттів із підвищеною міцністю зчеплення з основою дозволило їх використовувати для захисту від захоплювання важко навантажених різьбових з'єднань бурових та нафтовидобувних насосно-компресорних труб, а також для створення контактів і в якості проміжного шару для отримання паяних з'єднань на алюмінієвих і сталевих виробах і деталях.

Особистий внесок здобувача. В дисертаційній роботі особисто автором: проаналізовано та вивчено наукову літературу з теми дисертації; проведено фізичне та комп'ютерне моделювання, взята участь в проведенні технологічних і металографічних досліджень, проведено механічні випробування напилених покриттів (на відрив, на тертя, на корозію, на електромагнітні властивості).

Дисертаційна робота виконана у відділі електротермічних процесів обробки матеріалів Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України під керівництвом докт. техн. наук, ст.н.с., завідувача відділом електротермічних процесів обробки матеріалів ІЕЗ ім. Є.О.Патона НАН України Коржика В. М. Робота є результатом самостійних досліджень дисертанта.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційної роботи пройшли апробацію на наступних національних і міжнародних семінарах, конференціях і форумах, та презентувались у збірках наукових праць:

- міжнародна науково-технічна конференція «Nanotechnology and Nanomaterials», Lviv, 6-29 August, 2020;
- міжнародна науково-технічна конференція «Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2020», КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, 2020;
- VI наукова конференція «Нанорозмірні системи: будова, властивості, технології» НАНСИС-2019, Київ, 4-6 грудня 2019;
- сьома міжнародна конференція «Математичне моделювання і інформаційні технології в зварюванні і споріднених процесах», Одеса, 2014;
- десята промислова конференція "Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях", п. Славське, Карпати, 18-22 лютого 2010;
- міжнародна науково-практична конференція «Персп. техн., матер. и оборудование в литейной индустрии», ФТІМС, Київ, 2010;
- міжнародна конференція «Сварка и родственные технологии в третье тысячелетие», Київ, 24-26 листопада 2008;

- VII міжнародна науково-технічна конференція «Энерго- и материалосберегающие экологически чистые технологии», Гродно, Білорусь, 27-28 вересня 2007.

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 23 наукових праць, у тому числі 13 статей у наукових фахових виданнях (з них 1 стаття у виданні іноземної держави), 1 патент, 9 тез доповідей у збірках матеріалів конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація викладена на 174 сторінках, складається із вступу, шести основних розділів, основних висновків, додатку та списку використаних джерел зі 140 найменувань. Робота містить 87 рисунків, 22 таблиці.

Розділ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТРАНУ І ТЕНДЕНЦІЙ РОЗВИТКУ ПРОЦЕСІВ ПЛАЗМОВО-ДУГОВОГО НАПИЛЮВАННЯ ПОКРИТТІВ.

1.1. Плазмові технології в умовах розвитку сучасного виробництва.

Уявлення про застосування плазмових процесів як засобу інтенсифікації промислових процесів не є вичерпними. В значній мірі застосування плазмових процесів є наслідком якісних змін у технологічних процесах в металургії, хімічній промисловості, машинобудуванні, енергетиці тощо [1]. Загальний прогрес техніки викликає підвищені вимоги до металевих матеріалів. Необхідність забезпечення таких властивостей як тугоплавкість, жароміцність, пластичність, високі емісійні характеристики, надпровідність, вимагає від металургійного виробництва одержання металів високої чистоти і створення нових сплавів [2]. Сукупність необхідних властивостей досягається створенням багатокомпонентних сплавів, псевдосплавів, композиційних матеріалів, застосуванням речовин особливої форми, в тому числі ультрадисперсних і сфероїдизованих порошків, матеріалів з монокристалічною і багат шаровою структурою тощо [3].

Створення нових матеріалів вимагає, з одного боку, ускладнення технологічного процесу зі збільшенням числа переділів, з іншого боку – залучення нових фізичних методів [4]. Ускладнення технології і збільшення числа переділів диктується і необхідністю переробки відходів, що містять коштовні елементи або шкідливі для навколишнього середовища домішки.

Підвищення вимог до матеріалів викликає відповідні підвищені вимоги до металургійних агрегатів, які повинні забезпечувати одержання температур, здатних розплавити, а в деяких випадках і випарувати будь-яку речовину [5].

Можливості низькотемпературної плазми є засобом, що дозволяє забезпечити одержання матеріалів з поліпшеними і особливими властивостями, інтенсифікувати та іноді спростити технологічний процес металургійного виробництва, зберегти високі техніко-економічні показники [6]. Насамперед, практично можливе при плазмовому нагріванні зняття обмежень по верхній межі

температури, припустимої в металургійному агрегаті, дозволяє істотно розширити можливості цього основного фактору, що інтенсифікує металургійні процеси. При переведенні речовин у газоподібний стан знімаються й обмеження, що накладаються агрегатним станом, внаслідок чого час хімічних процесів може обчислюватися мікросекундами [7].

В широкому значенні до плазмових відносяться всі електротермічні процеси, засновані на використанні електричної дуги. Це такі процеси, як електротермічне виробництво феросплавів і якісних сталей, електротермічні процеси мідно-нікелевого виробництва, зварювання і нанесення покриттів, різання тощо. Серед всієї широкої гами плазмових процесів нас цікавить плазмодугове розпилювання дроту-аноду, яке відноситься до способів газотермічного напилення (ГТН) покриттів [8].

Плазмове напилення – це один із процесів ГТН, який використовує джерело тепла з високою енергією для плавлення та прискорення дрібних частинок на підготовлену поверхню [9]. При ударі ці розплавлені частинки («краплі») миттєво охолоджуються і застигають шляхом передачі тепла на підстилаючу основу і, отже, шляхом накопичення утворюють покриття, що складається з ламелей. Процеси термічного розпилення використовуються протягом багатьох років для нанесення шаруватих покриттів для різних цілей, таких як зносостійкість, термозахист, біосумісність та біоактивність. Основні методи термічного напилення включають полум'яне напилення, плазмове напилення, високошвидкісне газополум'яне киснево-гасове напилення (HVOF), вакуумне плазмове напилення, дугову металізацію та детонаційне напилення. Серед них розпорошення полум'ям, розпилення HVOF та розпилення плазмою часто досліджували для виготовлення біоактивних біокерамічних покриттів на металевих підкладках [10]. На сьогодні численні дослідницькі групи та компанії використовують техніку плазмового напилення для нанесення покриттів на такі біоматеріали, як сплави Ti і Co-Cr, завдяки відтворюваній та економічно ефективній техніці [11].

Виникнення процесу плазмо-дугового розпилювання дроту-аноду пов'язано із розвитком процесів зварювання і споріднених технологій. Так, відомий процес зварювання неплавким електродом (TIG зварювання) з часом було модернізовано шляхом стиснення дуги і створення процесу плазмового зварювання із дугою прямої дії (неплавкий електрод – катод, деталь – анод) (рис.1.1) [12]. Для повноцінного промислового використання цих процесів потрібною була подача присаджувального дроту. Але для плазмового зварювання переважно використовували електрично нейтральний дріт.

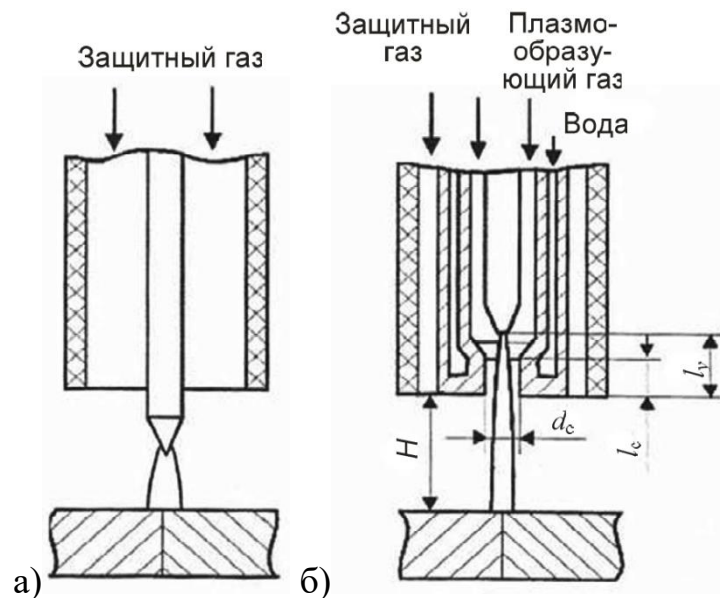


Рисунок 1.1 – Схеми процесів TIG (а) і плазмового (б) зварювання [12].

Розвиток плазмових процесів неухильно призвів до розвитку такої широко розповсюдженої технології, як плазмове різання [13]. Зазвичай, це було застосування повітряної плазми прямої дії, обтиснутої завихреним газовим (повітряним) потоком (рис.1.2,а). Проте, у разі необхідності різання переривчастих структур, наприклад, решіток, виникали проблеми з періодичним обриванням дуги прямої дії і необхідністю її підпалу. Германська фірма Kjellberg запропонувала вирішення такої проблеми за рахунок застосування технології HotWire із витратним дротовим анодом (рис.1.2,б) [14].

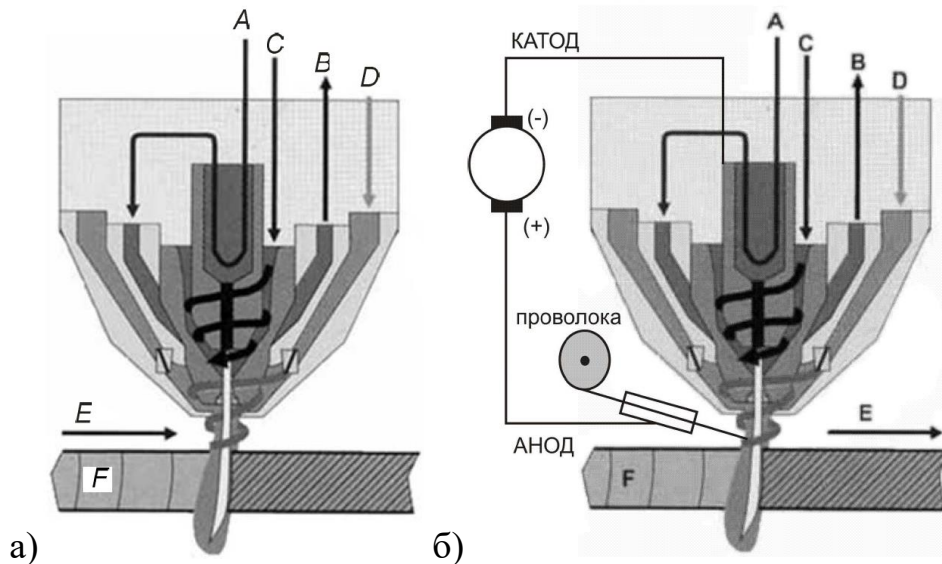


Рисунок 1.2 – Схема плазмо-дугового різання стиснутою плазмою неперервних (а) і переривчастих структур HotWire із витратним дрововим анодом (б) (фірма Kjellberg, Німеччина) [13, 14]: *A* – система охолодження (вхід); *B* – система охолодження (вихід); *C* – контур основного потоку плазмоутворюючого газу; *D* – контур вторинного (формуючого) потоку газу; *E* – напрям різання; *F* – метал, що різуть.

На той час вже досить широко застосовувалися технології порошкового ГТН [15]. Для розпилення порошкових матеріалів в плазмовому пальнику (також званому «плазмовим пістолетом») створюється струмінь плазми, який надалі використовується як високотемпературне джерело їх нагріву [16]. Як схематично показано на рис.1.3 [17], плазмовий факел складається з конусоподібного торійованого вольфрамового катода та циліндричного мідного анода. Газу, що формують плазму, протікають через кільцевий простір між двома електродами і дугою, ініціюються високочастотним розрядом. Потік газу, який протікає між двома електродами, розтягує дугу, так, що переходячи від одного електрода до іншого дуга виходить із сопла пальника у вигляді плазмового полум'я. Такі газу, як Ar, He, H_2 і N_2 , в основному використовуються як плазмоутворюючі. Температура в плазмовому полум'ї зазвичай становить 10 000–15 000°C. Тому, в принципі, майже будь-який метал або кераміка, включаючи тугоплавкі метали або оксиди, може бути розплавлений і осаджений для утворення покриття

методом плазмового напилення. Цей метод знайшов своє застосування для нанесення захисних, термостійких, зносо- і корозійностійких покриттів, зокрема, на великогабаритні деталі [18].

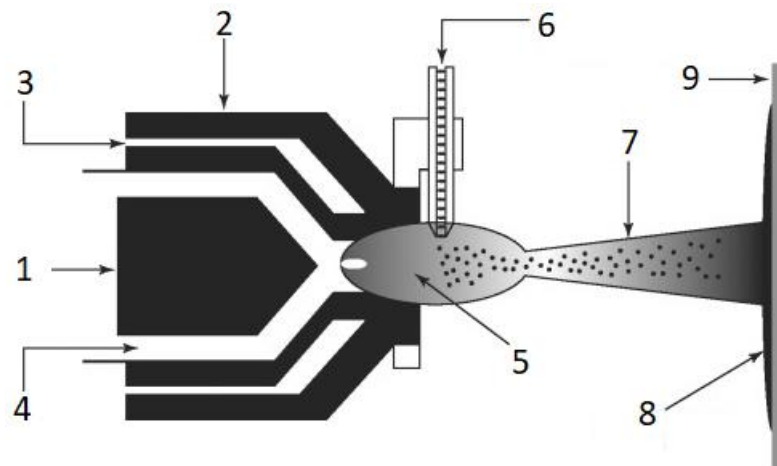


Рисунок 1.3 – Принципова схема техніки плазмового напилення для формування покриттів [17]: 1 – катод плазмотрона; 2 – анод плазмотрона; 3 – водяне охолодження; 4 – плазмоутворюючий газ; 5 – плазмова дуга; 6 – подача порошку; 7 – плазмовий струмінь; 8 – напилене покриття; 9 – металева підкладка (основа).

Схеми плазмового напилення, які застосовують на сьогоднішній день, є досить близькими одна до одної. На рис.1.4 показана одна зі схем типового плазмового пістолета-розпилювача, а також основні етапи процесу осадження покриттів [19]. Основною операцією є введення порошків вихідної сировини з витратами G в потік плазми, утвореної під дією струму I в газовому середовищі C (рис.1.4,б). Формується плазмовий струмінь температури $T_{уд0}$ з питомою ентальпією $H_{уд0}$, що має швидкість v_0 . При розповсюдженні вздовж координати x температура $T_s(x)$ і швидкість $v_s(x)$ струменю і частинок ($T_ч(x)$ і $v_ч(x)$) в ньому змінюються. Розплавлені або напіврозплавлені плазмовим струменем порошки спрямовуються на підкладку з наступним сплюсненням, швидким затвердінням та охолодженням. В результаті ці розплавлені частинки створюють бризки, що перекриваються і покривають таким чином основу з утворенням покриття пористістю Π і силою зчеплення з основою $\sigma_{сц}$. Нанесення покриттів можна

виконувати на повітрі, низькому тиску або у вакуумі. При необхідності створення пористих структур напиляють покриття із наявністю значної кількості пор (Π). Співвідношення частки нанесеного порошку до загальної його кількості характеризується коефіцієнтом використання матеріалу (КВМ).

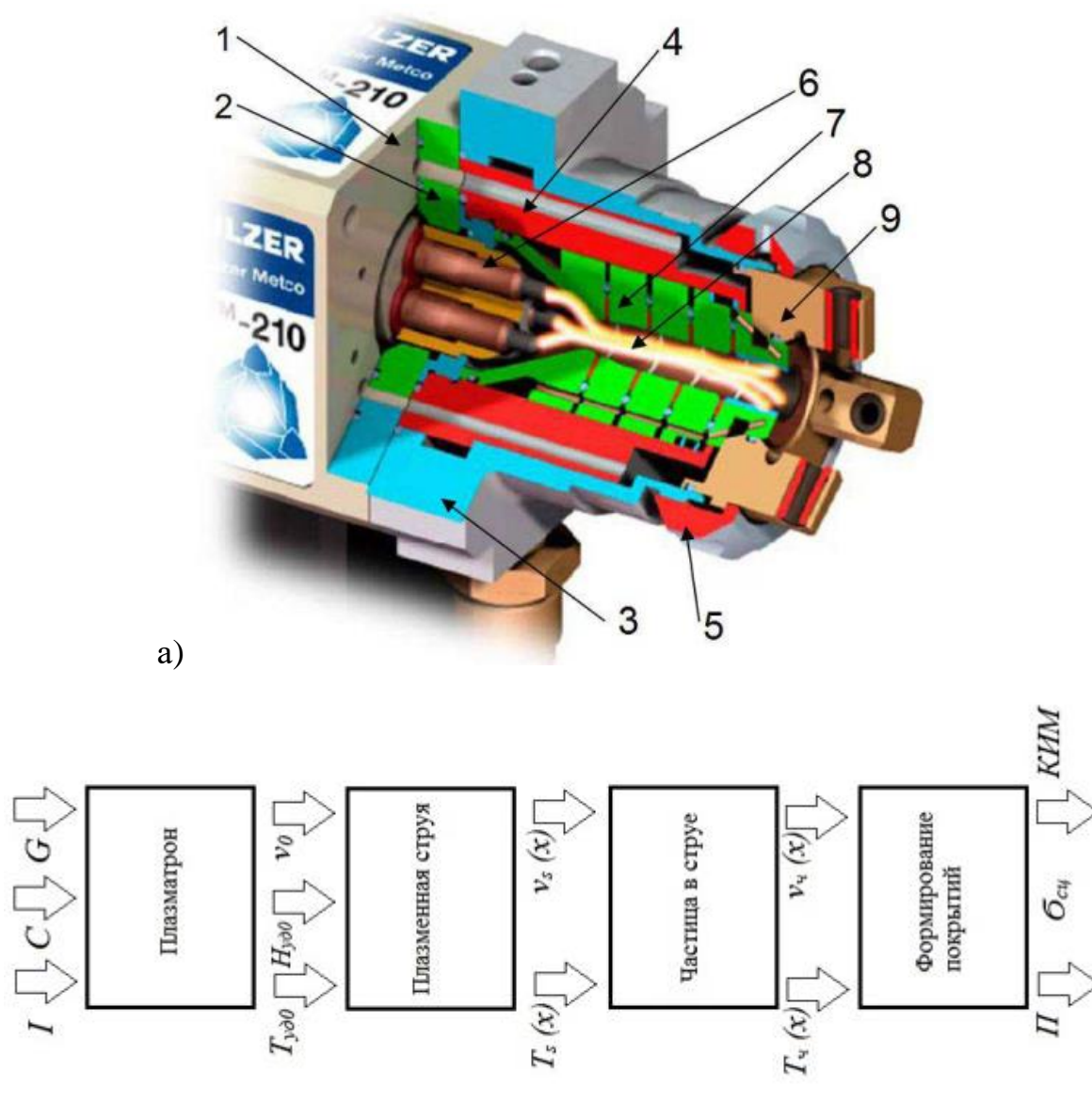


Рис.1.4. Схематична ілюстрація плазмового напилення [19]: а) – пістолет для плазмового розпилення; б) – процес осадження; 1 – задня частина корпусу; 2 – анодний стек; 3 – передня частина корпусу; 4 – ізолятор; 5 – накидна гайка; 6 – три катоди в керамічному блоці; 7 – елемент анодного стека; 8 – канал плазми; 9 – насадка з трьома порошковими дюзами.

Загальноновизнано, що у зв'язку із певною простотою процесу плазмове розпилення є досить економічним. Проте, для подальшого зниження вартості доцільно досить коштовні порошки замінити більш дешевою сировиною. Більш за все для цього підходять металеві дроти. Дослідження, проведені в цьому напрямку, показали низку проблем, що виникають при застосуванні дротових присаджувальних матеріалів (рис.1.5) [20]. До них відносяться: втрати енергії на тепловідведення у дріт, складність забезпечення точного потрапляння розпилюваного кінця дроту в плазмову дугу, складність у забезпеченні процесу дротами малого (менше 0,6 мм) діаметра, значне підвищення потужності плазмової дуги із підвищенням діаметра застосованого дроту.

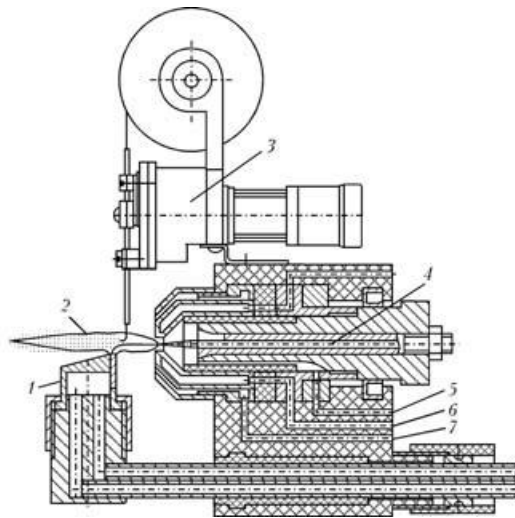


Рисунок 1.5 – Схема плазмотрона для мікроплазмового напилення дротовими матеріалами [20]: 1 — анод; 2 — плазмовий струмінь; 3 — механізм подачі дроту; 4 — катод; 5–7 — канал подачі, відповідно, плазмоутворюючого газу, води і захисного газу.

Для усунення вказаних недоліків пропонується застосування плазмодугового розпилення дротів-анодів [21]. Такий процес є дещо подібним плазмовому різанню з витратним дротовим анодом (рис.1.2). Значною перевагою процесу є повне розплавлення присаджувального (точніш, вже електродного) дроту прийнятної для зварювальних процесів діаметра ($\varnothing 1,2-1,6$ мм). При цьому дріт розпилюється анодною плямою плазмової дуги. Утворені частинки, нагріті до температури плавлення, захоплюються плазмовим струменем і з

високою швидкістю транспортуються до матеріалу основи (рис.1.6). Завдяки дуже високій температурі кожна частинка неминуче зазнає фазових переходів, вона має змогу повністю пластифікуватися, що дозволяє утворювати щільне покриття із підвищеними адгезивними властивостями на матеріалі підкладки.

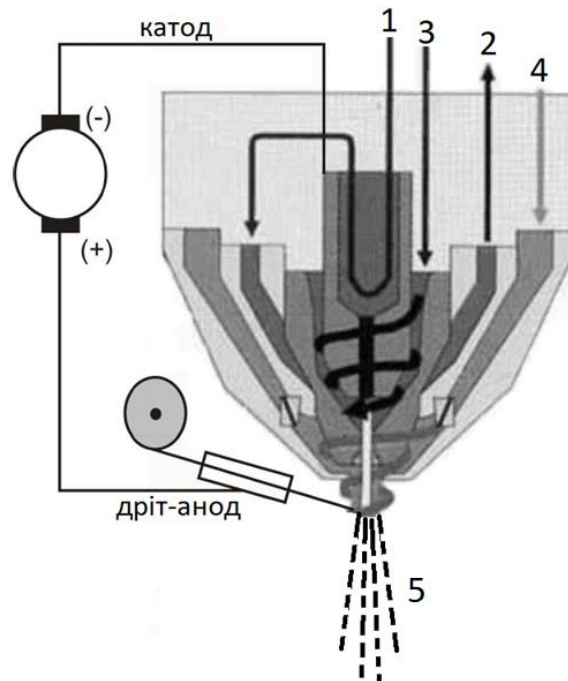


Рисунок 1.6 – Схема плазмо-дугового напилювання покриттів плавким дротом-анодом [21]: 1 – система охолодження (вхід); 2 – система охолодження (вихід); 3 – контур основного потоку плазмоутворюючого газу; 4 – контур вторинного (формуючого) потоку газу; 5 – двофазний струмінь плазми і розпиленого дроту.

Окрім показаного на рис.1.6 процесу плазмо-дугового напилювання покриттів плавким дротом-анодом існує інший процес – плазмо-дугова металізація або розпилення електричною дугою (рис.1.7) [22]. Цей процес більш традиційний і розповсюдженіший, ніж розпилювання дроту-аноду. Плазмо-дугову металізацію можна застосовувати лише з вихідними матеріалами у формі дроту. Два металеві дроти однакового складу подаються з контрольованою швидкістю в дуговий пістолет і електрично заряджаються з позитивною та негативною полярністю. У місці, де два дроти стикаються, створюється електрична дуга, яка розплавляє дроти. Потік стисненого повітря прискорює

розплавлені частинки до поверхні деталі і утворює покриття. Проте електродугове розпилення має низку таких недоліків, як надто широкий газопорошковий струмінь, низька швидкість цього струменя, швидке зниження температури розпилених крапель металу тощо.

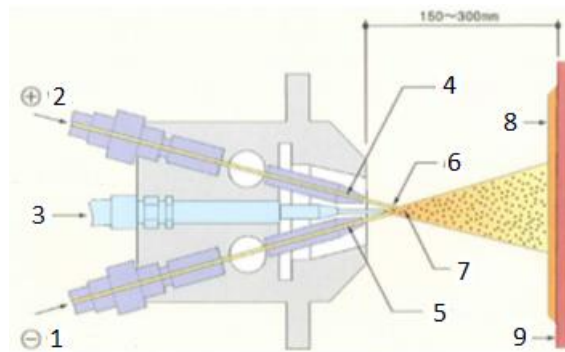


Рисунок 1.7 – Схема електродугового розпилення [22]: 1 – дрiт-катод; 2 – дрiт-анод; 3 – стиснене повітря; 4,5 – сопла; 6 – дуга; 7 – розплавлені краплі; 8 – покриття; 9 – основа.

Доречно розглянути ще один процес нанесення покриттів – плазмову детонацію [23-25]. Таке напилення проводять за допомогою спеціальної установки (гармати) з використанням енергії, що виділяється при миттєвому згорянні вибухової суміші. На рис.1.8 показана схема типової установки ДНП-5М (рис.1.8,а), переобладнаної на живлення пропан-бутановою сумішшю і повітрям замість відповідно ацетилену і азоту (рис.1.8,б). Вона складається зі ствола 5, що представляє собою трубу із водяним охолодженням. Вибухова камера 3 служить для прийому компонентів вибухової суміші і порошкового матеріалу. Суміш подається з балонів через змішувальну камеру 4. Порошок транспортується газом (азотом або повітрям) з живильника 1. Процес детонаційного напилення протікає в такий спосіб. До робочої (вибухової) камери 3 установки надходить точно виміряна кількість вибухової суміші («ацетилен + кисень» або «пропан-бутан + кисень») і зважених часток порошкового матеріалу. За допомогою запального пристрою 2 вона запалюється. З робочої (вибухової) камери полум'я поширюється по стовбуру зі швидкістю $(2-4) \cdot 10^3$ м/с. Продукти детонації захоплюють за собою частки порошку, які, крім кінетичної, отримують

також теплову енергію. Швидкість винесення порошку – $(0,6-1,2) \cdot 10^3$ м/с. Залежно від співвідношення компонентів суміші можна змінювати температуру (до 4000°K) і швидкість продуктів детонації. Найбільша швидкість досягається при вмісті в ацетиленокислородній суміші 50% кисню, а найбільше тепловиділення – при 71% (за обсягом) кисню. Вдаряючись об поверхню зношеної деталі, частинки порошку утворюють щільний шар покриття.

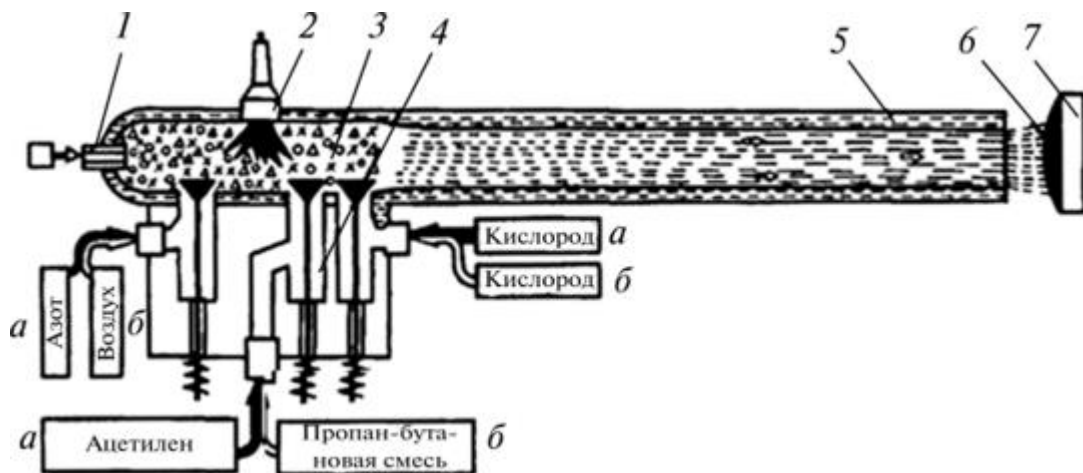


Рисунок 1.8 – Схема плазово-детонаційної установки [23]: а – базова; б – оновлена; 7 – порошковий живильник; 2 – запальний пристрій; 3 і 4 – вибухова і змішувальна камери; 5 – водоохолоджуваний ствол; б – напілювані покриття; 7 – основа.

Основними недоліками даного процесу є необхідність проводити його у замкненій камері, об'єм якої є досить обмеженим з технічних причин, а також значні габарити основного пристрою для напілення (гармати). Використання камери призводить до додаткового збільшення вартості обладнання із одночасним обмеженням гнучкості процесу нанесення покриттів. Використання достатньо габаритного пристрою для напілення замість компактного плазмотрона вносить додаткові обмеження процесу. Все це робить використання плазмо-дугового напілювання покриттів плавким дротом-анодом значно більш привабливим з технологічних позицій, ніж плазово-детонаційний процес.

1.2 Основні вимоги, що пред'являються до плазмо-дугових процесів

Плазмо-дугові процеси одержують все більш широке застосування в різних галузях промисловості. До них, як і до інших технологічних процесів, пред'являються певні вимоги, спрямовані на підвищення ефективності виробництва, поліпшення якості продукції, що випускається, автоматизацію технологічних процесів, підвищення їхньої екологічної безпеки [26].

Підвищення ефективності виробництва передбачає досягнення максимального коефіцієнта корисної дії, високої продуктивності технологічного процесу, зниження витрат вихідних матеріалів і максимально повне використання сировини, підвищення тривалості експлуатації устаткування [27]. Поліпшення якості продукції, що випускається, досягається за рахунок створення оптимального технологічного процесу, забезпечення однорідності параметрів технологічної зони, підвищення стабільності й надійності роботи основного і допоміжного устаткування [28].

При застосуванні процесів плазмового напилення можуть виникати наступні проблеми [29]:

- відшарування нанесеного шару;
- розтріскування отриманого покриття;
- поява на поверхні крупних крапель матеріалу покриття;
- наявність нещільностей (пористість) покриття (порядку 2-15%);
- різновісність покриття (завищення і заниження відносно номіналу);
- недостатня надійність застосованого обладнання, яка призводить до коливання технологічних параметрів в процесі напилення і, як наслідок, виникненню вищевказаних дефектів.

Тому основними вимогами, які пред'являються до плазмо-дугових процесів, є усунення вказаних проблем інедоліків. В роботі [30] запропоновано наступні методи обробки поверхонь для їхньої підготовки до нанесення покриттів, спрямовані на підвищення міцності зчеплення покриття з основою, покращення якості та усунення частки з вищезазначених проблем:

- обкатування роликом під струмом;
- очистка поверхонь від окалини і усунення слабо зчеплених з основною або з попередніми шарами часток металевими щітками в процесі напилення;
- струминно-абразивна і ультразвукова обробка.

Проте зазначені заходи усувають лише частку проблем. Необхідним є доопрацювання інших, утому числі: різнотовщинність покриттів, наявність нещільностей (пористість) покриття, низький коефіцієнт використання енергії.

1.3 Класифікація плазмо-дугових процесів

Одна з перших класифікацій плазмо-дугових процесів була запропонована Е. Кречмаром (рис.1.8) [15]. Таку класифікацію можна вважати прийнятною для нашого випадку, але в загальному сенсі вона не відбиває усе розмаїття плазмових процесів, що існують у сучасній науці та техніки.



Рисунок 1.8 – Класифікація газотермічних способів нанесення покриттів [15].

З тих пір було зроблено кілька спроб класифікації процесів плазмової обробки. Наприклад, плазмо-дугові процеси можна розділити на три основних типи залежно від використання плазми [31]: 1) як джерела теплової енергії (у тому числі променевої); 2) як джерела заряджених часток (електронів, іонів, радикалів і т.п.) і 3) як джерела механічної енергії.

До першого типу звичайно відносять з'єднання матеріалів (зварювання, пайка [32]), обробку поверхні матеріалів і виробів (наплавлення [33], напилення [34], формування, різання [35], стругання [36], полірування [37], насичення

поверхневого шару металу, наприклад азотування [38], обробка каменю, буріння гірських порід і т.д.), поліпшення фізико-хімічних властивостей матеріалів (переплав [39], зонна плавка [40], вирощування монокристалів [41], плазмово-дугове рафінування металів [42]), одержання якісних матеріалів (плавка, отримання сферичних і ультрадисперсних порошоків [43]) і процеси, пов'язані з використанням плазми як джерела потужного випромінювання [44].

Другий тип включає плазмохімічні процеси з використанням рівноважної і не рівноважної плазми [45], такі, як одержання ацетилену, окислів азоту, плазмовий електроліз, плазмохімічне одержання ультрадисперсних порошоків, наприклад, нітридів, оксидів, відновлення металів з руд.

До третього типу відносять процеси, які використовують рушійну силу електричного розряду, що звичайно створюється плазмовими прискорювачами, рушіями [46]. Вони використовуються для імітації аеродинамічних полів навколо ракет, що входять в атмосферу планет, а також як двигуни в космічному просторі разом з легкими сонячними і ядерними джерелами [47].

Однак у ряді випадків технологічні процеси ведуть із використанням не тільки теплової або хімічної енергії плазми. Тому їх краще характеризувати по впливу плазмового потоку на оброблюваний матеріал (твердий, рідкий, дисперсний і газоподібний). Відповідно до термінології, крім дисперсного і газоподібного необхідно також розглядати твердий або рідкий компактний матеріал. Наприклад, до технологічних процесів із впливом плазмового потоку на твердий і рідкий компактний матеріал відносяться процеси з'єднання і обробки металів, в тому числі й модифікування поверхні (азотування, силіціювання тощо) [48], обробка діелектричних матеріалів, буріння гірських порід (рис.1.9) [49]. Крім того, дана група включає переробку матеріалів, наприклад, плазмову плавку, плазмо-дуговий переплав металів, вирощування металевих і неметалевих монокристалів, зонну плавку, переробку руд і концентратів.

Розглянемо більш детально основні плазмові процеси, з вказаних на схемі рис.1.9.

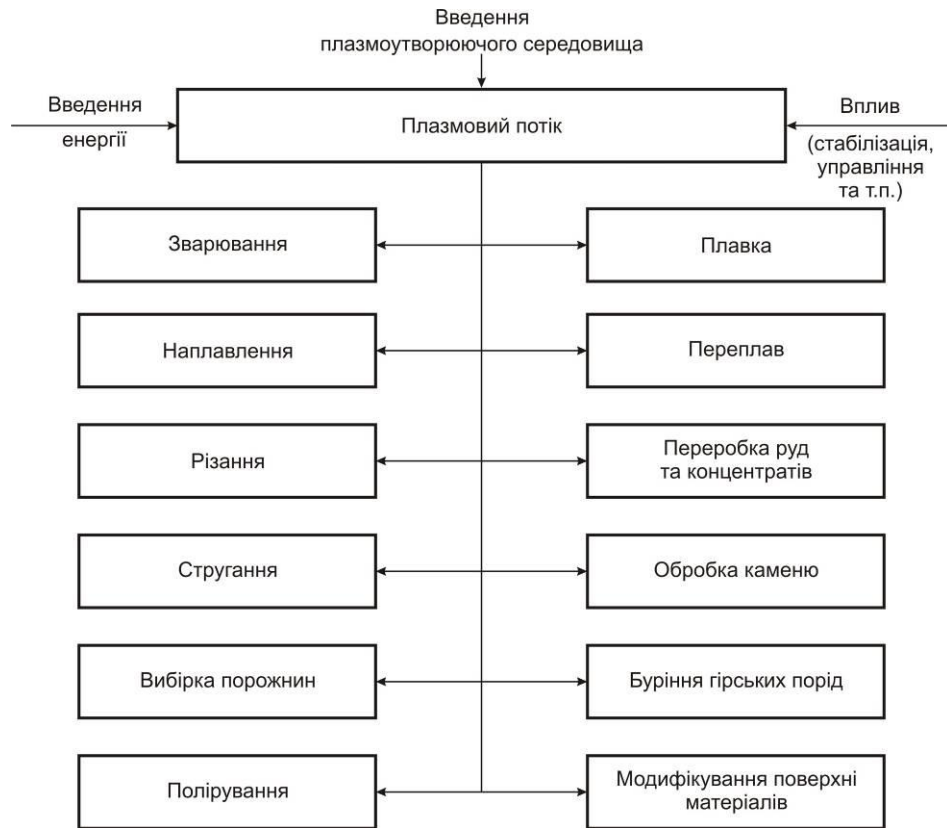


Рисунок 1.9 – Класифікація способів ведення технологічних процесів під впливом плазмового потоку на твердий і рідкий компактний матеріал [49].

Плазмове зварювання. В цьому випадку нагрівання матеріалів відбувається стисненою дугою, що має більші переваги перед зварюванням вільною дугою, а саме: поліпшується якість звареного шва за рахунок більш глибокого проплавлення при відносно невеликій його ширині, підвищується швидкість зварювання і зменшується зона термічного впливу [50]. Останнім часом крім плазмового зварювання набуває широкого поширення мікроплазмове та імпульсне зварювання. Мікроплазмове зварювання на струмах від 0,1 до 30 А в порівнянні з аргано-дуговим зварюванням характеризується більшою стабільністю, значно меншою зміною теплової потужності, що вводиться, при зміні відстані між плазмовим пальником і деталлю і відсутністю забруднення зварювальної ванни вольфрамовим електродом [51].

Імпульсне плазмове зварювання дозволяє одержати кращу якість зварених швів (більш вузькі шви з меншою зоною термічного впливу) і виключити короблення металу, особливо при товщині менш 0,2 мм [52]. Більші перспективи має зварювання імпульсами струму різної полярності.

Плазмове наплавлення. Даний процес характеризує сплавлення присаджувального матеріалу з основним і має багато загального з плазмовим зварюванням [53]. Присаджувальний матеріал у вигляді дроту, прутка або порошку подається на поверхню основного матеріалу в холодному або гарячому стані і плавиться там стисненою дугою, причому, основний матеріал також оплавляється. При плазмовому наплавленні утворюються жаростійкі, зносостійкі та інші захисні покриття.

Плазмове різання, стругання, вибірка порожнин, полірування, оплавлення поверхні, обробка каменю, буріння гірських порід. У всіх цих технологічних процесах здійснюється плавлення і видалення матеріалу за рахунок випаровування, подрібнення і видування із зони обробки газодинамічними і електромагнітними силами. Обробку металів звичайно ведуть винесеною дугою, наприклад при плазмовому різанні [54] дугу занурюють у товщу металу (рис.1.10, *a*), а при струганні та вибірці порожнин — на необхідну глибину, що досягається вибором необхідних режимів обробки, а також розташуванням і швидкості руху плазмотрона відносно оброблюваної поверхні (рис. 1.2, *б*). У цей час широкий розвиток одержало повітряно-плазмове різання.

Плазмова обробка неметалевих матеріалів здійснюється в основному за допомогою плазмового струменя. Такі технологічні процеси менш ефективні, тому що введення енергії в плазмовому струмені відсутнє. Для інтенсифікації процесів використовують подачу в розрядну камеру плазмотрона вуглеводного палива [55]. Останнім часом застосовують плазмове-механічну обробку металів, коли перед різцем встановлюється плазмотрон [54]. При цьому способі продуктивність обробки збільшується в 6-8 разів, а витрата дорогих різців скорочується в 5-6 разів, причому якість обробки зберігається.

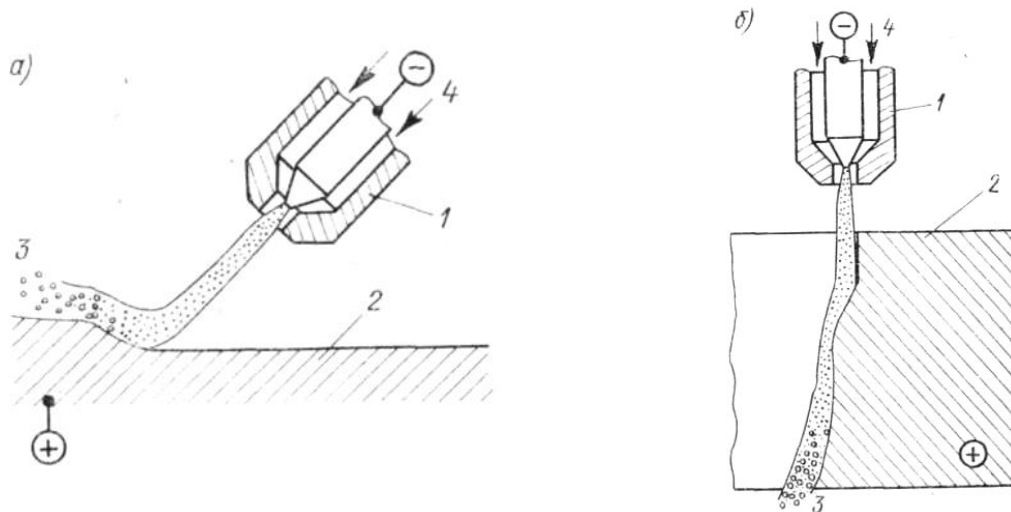


Рисунок 1.10 – Схеми процесів плазмового стругання (а) і різання (б):

1 – плазмотрон; 2 – оброблюваний виріб; 3 – матеріал, що видаляється;
4 – напрямок подачі плазмоутворюючого газу [54].

Плазмо-дугова плавка. Даний спосіб характеризується значно більшою стабільністю, простотою і гнучкістю технологічного процесу, можливістю використання різних середовищ і вихідних матеріалів, мінімальними втратами легуючих компонентів і легкістю керування процесом кристалізації металу [56]. Широкий розвиток одержали плавка матеріалів у печах з керамічним тиглем в основному для одержання сталей і сплавів на нікелевій основі, переплав металів у водоохолоджувальних кристалізаторах для одержання сталі та високореакційних матеріалів, переплав матеріалів в обертових печах для одержання діелектричних порошків.

Плазмова плавка металів у печах з керамічним тиглем [57]. Метал, одержаний у таких печах, має в 1,5 рази менший вміст кисню і оксидних неметалічних включень. Зменшується вміст силікатів і нітридів, підвищується пластичність швидкорізальних сталей і забезпечується стабільний вміст вуглецю в нержавіючих сталях.

Плазмово-дуговий переплав металів у водоохолоджувальних кристалізаторах (рис.1.11) має кілька різновидів, наприклад, переплав у

вертикальних кристалізаторах і плавка на поду або переплав у горизонтальних кристалізаторах [57].

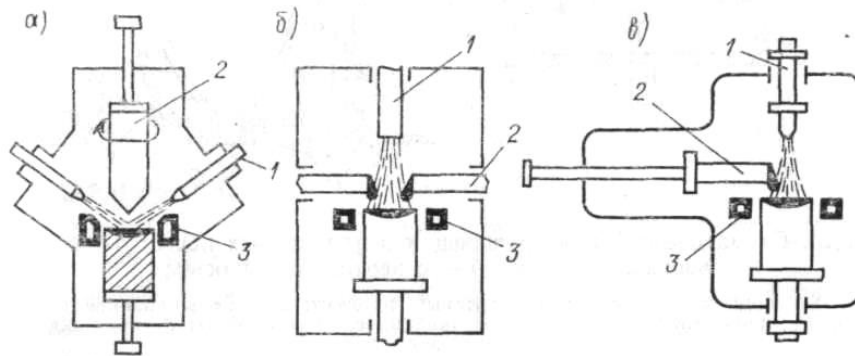


Рисунок 1.11 – Процеси плазмо-дугового переплаву металів в охолоджуваному кристалізаторі [57]: *а)* – схема ІЕЗ ім. Є. О. Патона; *б)* – схема ІМЕТ ім. А.А. Байкова; *в)* – схема фірми «Улвак»; 1 – плазмотрон; 2 – стрижень-електрод, що витрачається; 3 – кристалізатор.

Плазмова плавка не електропровідних матеріалів одержала розвиток у зв'язку з появою відцентрових плазмових печей (рис. 1.12) [58]. Оброблюваний матеріал, що подається в піч, під дією відцентрової сили відкидається до стінок тигля, де відбувається остаточне його плавлення і частковий або повний випар. Розплав витікає через отвір, розташований проти введення матеріалу, а матеріал, що випаровується, конденсується у вигляді порошку і збирається у фільтрі. Плавка діелектричних матеріалів у таких печах характеризується високим ККД.

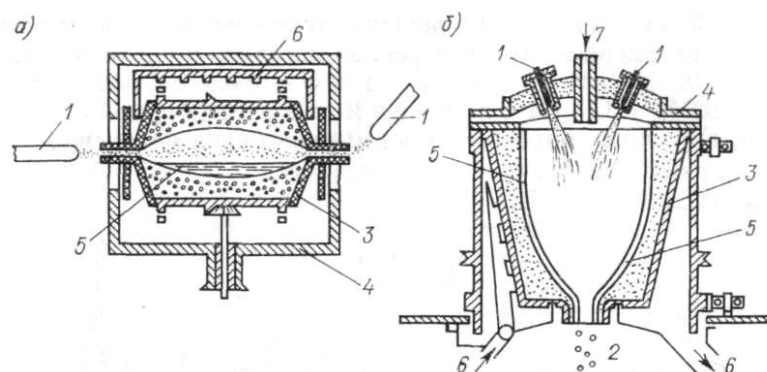


Рисунок 1.12 – Схематичний вид обертових плазмових печей [58]: *а)* – з горизонтальною віссю; *б)* – з вертикальною віссю: 1 – електроди плазмотрона; 2 – готовий продукт; 3 – обертовий корпус печі; 4 – зовнішній

корпус печі; 5 – рідкий шар матеріалу; 6 – охолодження; 7 – введення вихідного матеріалу.

Переробка руд і концентратів [59]. У деяких випадках даний процес проводиться без попереднього введення вихідного матеріалу в плазмовий потік. Для цього широко використовується так зване карботермічне розкладання в дузі високої інтенсивності з анодом, що витрачається. У цьому випадку один з електродів дугового пристрою виготовляється із суміші вихідного матеріалу з вуглецем. При впливі електричної дуги відбувається інтенсивне відновлення оксидів і утворення плазми з оксиду вуглецю і парів металів, які далі конденсуються і виводяться з реакції.

Таким чином, було розглянуто основні з процесів згідно класифікації рис.1.9. Ще одна класифікація розподіляє технологічні плазмові процеси за введенням матеріалу в плазмовий потік (рис.1.13) [60, 61].



Рисунок 1.13 – Класифікація способів ведення технологічних процесів при введенні вихідного матеріалу у плазмовий потік [60, 61].

До цих процесів відносяться обробка газоподібних, рідких, дисперсних та інших матеріалів. Найбільш широко розповсюджена обробка дисперсних матеріалів. Дані технологічні процеси можна розділити на три групи за способом виводу готового продукту: процеси з осадженням, коли йде утворення твердих покриттів або виробів; з охолодженням, коли виведений матеріал проходить стадію природного охолодження; із загартуванням готового матеріалу при проведенні оборотних хімічних реакцій у плазмі.

Ще одна класифікація, яка відображає методи нанесення покриттів, наведена на рис.1.14 [62].

Згідно цієї класифікації процес, що досліджується в даній роботі, відноситься до напилення, газодинамічного, газотермічного, плазмового. В якості одного з прототипів досліджуваного процесу є електродугова металізація, процес якої було розроблено в 1918 році. Можливою є ще одна класифікація нанесення покриттів (рис.1.15), згідно якої досліджуваний процес можна віднести одразу до двох методів – термічних і термомеханічних [63].

1.4 Класифікація конструкцій дугових плазмотронів.

Для реалізації технологій плазмо-дугового напилення були запропоновані численні технологічні й конструктивні схеми дугових плазмотронів. В загальному вигляді, існуючі сьогодні дугові плазмотрони класифікуються за такими основними показниками як: вид дуги (прямої й непрямої дії), системи охолодження, спосіб стабілізації дуги, вид електродів, плазмо утворююче середовище, рід струму [64, 65].

Центральною ланкою плазмових установок різного призначення є плазмовий пальник або плазмотрон, що забезпечує збудження і стабілізацію горіння плазмового струменя або стисненої дуги. Плазмотрони відрізняються технологічними можливостями і насиченістю технічними рішеннями. Конструктивні особливості плазмотронів у значній мірі визначаються представленими нижче факторами (рис. 1.16) [66].

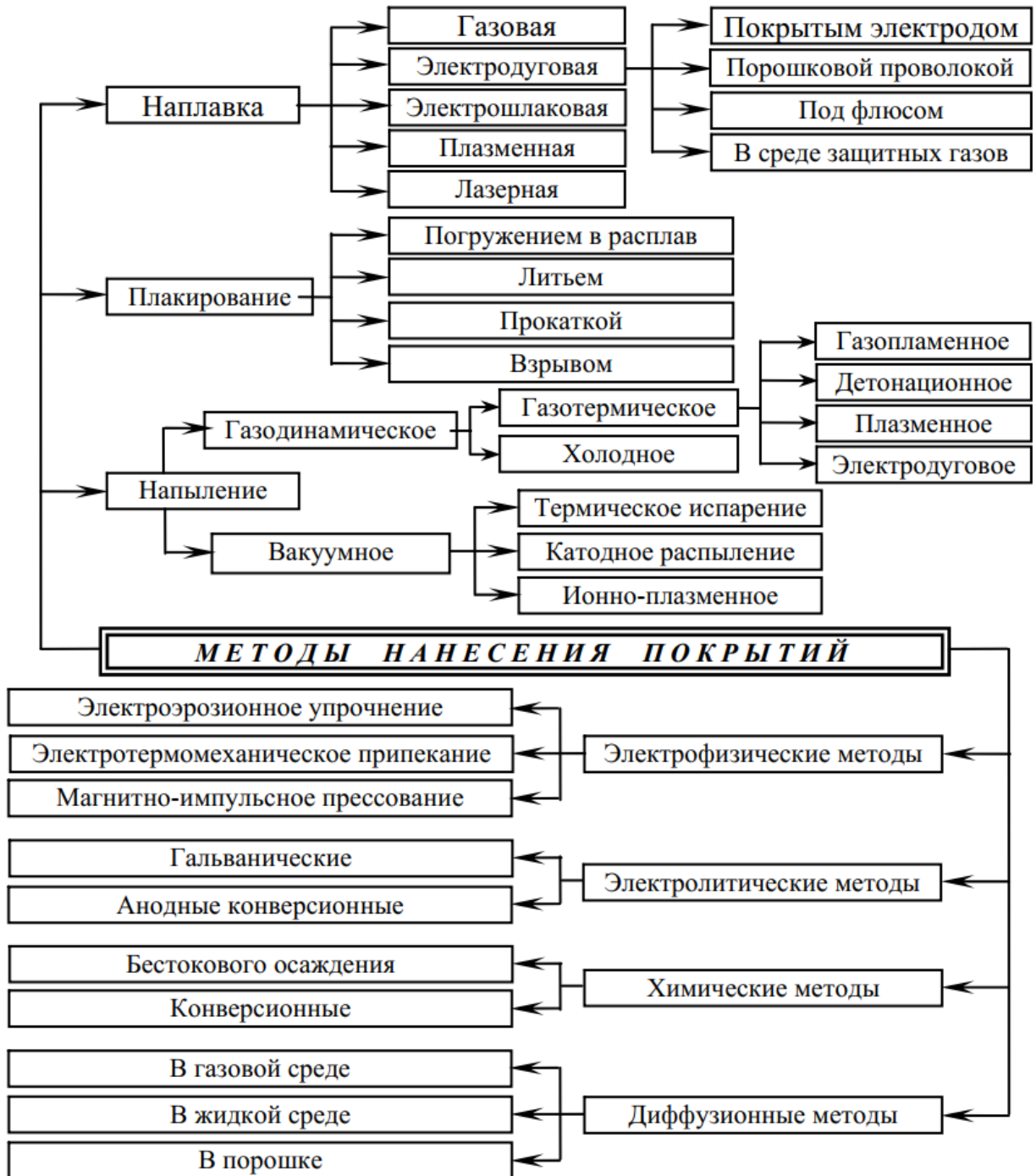


Рисунок 1.14 – Класифікація методів нанесення покриттів [62].



Рисунок 1.15 – Класифікація методів нанесення покриттів [63].

Основними елементами дугових плазмотронів є електродотримач з електродом, камера для плазмоутворення, плазмоутворююче сопло, що формує стиснену дугу або плазмовий струмінь, ізолятор, що розділяє електродний вузол від плазмоутворюючого сопла, допоміжні системи, що забезпечують подачу плазмоутворюючого, фокусуючого і захисного газів, а також охолоджувальної рідини [67]. При розробці плазмотронів повинні враховуватися не тільки наведені на рис.1.16 фактори, але й цілий ряд інших, таких як потужність (або максимальний струм), надійність, термін служби окремих елементів, способи струмопідводу, способи порушення стисненої дуги, відтворюваність і керованість параметрами стисненої дуги або плазмового струменя тощо.



Рисунок 1.16 – Фактори, що впливають на вибір конструкції плазмотронів [66].

У зв'язку з тим, що для кожного технологічного процесу застосована одна цілком певна конструкція плазмотрону, що дає високий техніко-економічний ефект, число вимог, що пред'являються до плазмотронів, росте пропорційно кількості розроблених технологічних процесів. Можна виділити основні вимоги, властиві найбільш широко розповсюдженим плазмотронам [68]:

- потужність і широкий діапазон регулювання параметрів;
- стабільність параметрів плазмового потоку;
- висока енергетична ефективність;
- більша тривалість безперервної роботи;
- надійність конструкції;
- простота обслуговування та експлуатації;
- можливість використання будь-яких плазмоутворюючих середовищ;
- легкість введення вихідних матеріалів у плазмовий потік;
- мінімальні габарити і маса, що забезпечують можливість доступу до важкодоступних місць виробу в різних просторових положеннях;
- універсальність, легкість перелагоджування;

- економічність виготовлення, мінімальна матеріалоемність, економія дорогих матеріалів;
- можливість відновлення плазмотронів при відпрацюванні ними ресурсу або аварійному виході з ладу в умовах підприємств споживачів і ряд інших.

Створення плазмотронів, що відповідають цим вимогам, забезпечує високу техніко-економічну ефективність плазменно-дугові процесів [69].

Конструкції електродугових генераторів низькотемпературної плазми (плазмотрони) можна класифікувати за конструктивними ознаками (рис.1.17) [70]. Плазмотрони постійного струму з внутрішнім розташуванням дуги використовують для отримання струменя низькотемпературної плазми, тому їх називають струменевими (рис.1.17,а-ж). Якщо одним з електродів є оброблюваний матеріал і електроди просторово відокремлені один від одного, а частина дуги знаходиться поза розрядного каналу (рис.1.17,з), це плазмотрони з винесеною дугою.

Католи в плазмотронах з вольфрамовими торійованими (з добавками оксиду торію) або лантанованими (з добавками оксиду лантану) електродами при роботі необхідно обдувати захисним газом (рис.1.17,а,г,д). Холодні католи виконують у вигляді водоохолоджуваного мідного стакану (рис.1.17,б) або мідної втулки (рис.1.17,в). Плазмотрони з дугою, що обдувається поздовжньо (рис.1.17,а-д,ж), називаються лінійними, за принципом подачі газу поділяються на однокамерні – з введенням плазмоутворюючого газу через одну газову камеру (рис.1.17,а,б), двокамерні (рис.1.17,в) і з міжелектродними вставками (рис.1.17,г,д). В плазмотронах зі стаканоподібним катодом (рис.1.17,б) магнітне поле соленоїда дозволяє переміщати пляму дуги по поверхні електрода і запобігає прив'язки дуги до його торця. Довжина дуги в однокамерних і двокамерних плазмотронах з циліндричним каналом вихідного електрода (рис.1.17,а,в) самоустановлюється, що залежить від витрати газу і параметрів розряду. Якщо вихідний електрод має різке розширення (рис.1.17,б), створюються умови для шунтування дуги за уступом в широкому діапазоні зміни параметрів.

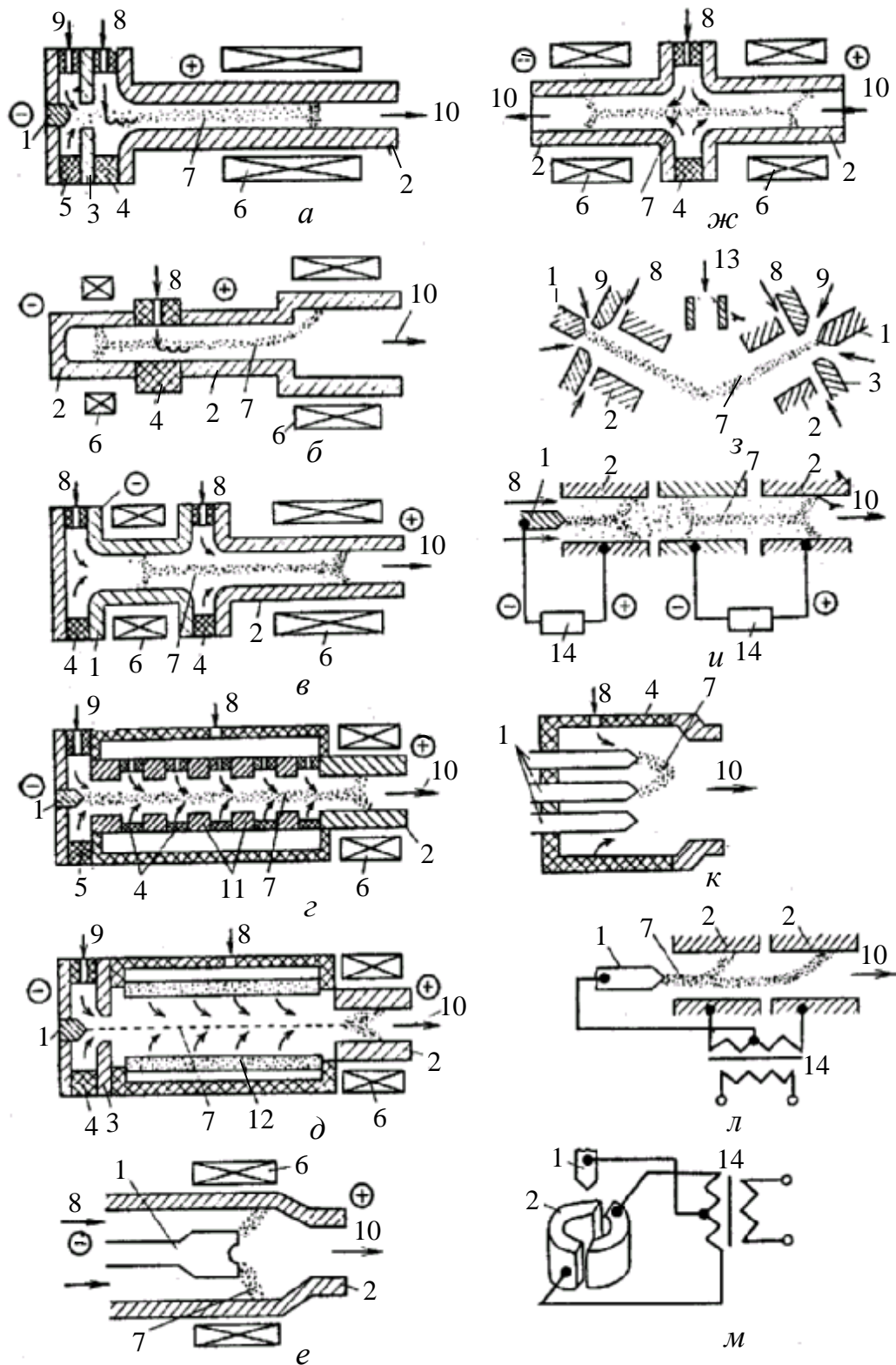


Рисунок 1.17 – Класифікація плазмотронів за конструктивними ознаками [70].

Плазмотрони з електроізолюваними міжелектродними вставками (МеВ) мають досить велику фіксовану довжину дуги. Вдув газу в розрядний канал може здійснюватися дискретно (рис.1.17,г) або через пористу МеВ (рис.1.17,д). Плазмотрони з МеВ мають досить високий ККД і дозволяють порівняно просто підвищувати потужність збільшенням числа МеВ. До лінійних генераторів можна віднести і електродугові нагрівачі двостороннього закінчення (рис.1.17,ж). Плазмові генератори з дугою, що поперечно обдувається, найчастіше реалізують в вигляді коаксіальних плазмотронів (рис.1.17,е) або плазмотронів з винесеною дугою (рис.1.17,з). Збільшення потужності плазмохімічної установки може бути досягнуто створенням плазмотронів з декількома дугами в розрядному каналі, що живляться від різних джерел (рис.1.17,и). Найбільше застосування в промисловості знайшли плазмотрони зі стрижневими електродами (рис.1.17,к), виконаними з тугоплавкого матеріалу (найчастіше з графіту). Існує конструкція дугового генератора з електродами, розподіленими по довжині дугового каналу (рис.1.17,л), в якому загальна точка трансформатора підключена до стержневого електроду, а фазові клеми – до трубчастих електродів. Плазмотрони з розрізним електродом (рис.1.17,м) за схемою електроживлення аналогічні описаним вище, але мають більшу стійкість. Якщо до елементів 1 і 3 генератора рис.1.17,з підключити джерело змінного струму, одержимо плазмотрон комбінованого типу.

Різні варіанти схем плазмотронів найзручніше представити у вигляді класифікації, наведеної на рис.1.18 [71].

По способу введення енергії в плазмовий потік плазмотрони підрозділяються на електродугові [72], безелектродно-індукційні [73], оптичні та ін. [74]. У даному огляді ми зупинимося на дугових плазмотронах, які одержали найбільше поширення у промисловому виробництві [75]. Існуючі плазмотрони можна розділити на групи [76]. Це плазмотрони на постійному і змінному струмі, високочастотні і надвисокочастотні плазмотрони, а також комбіновані.

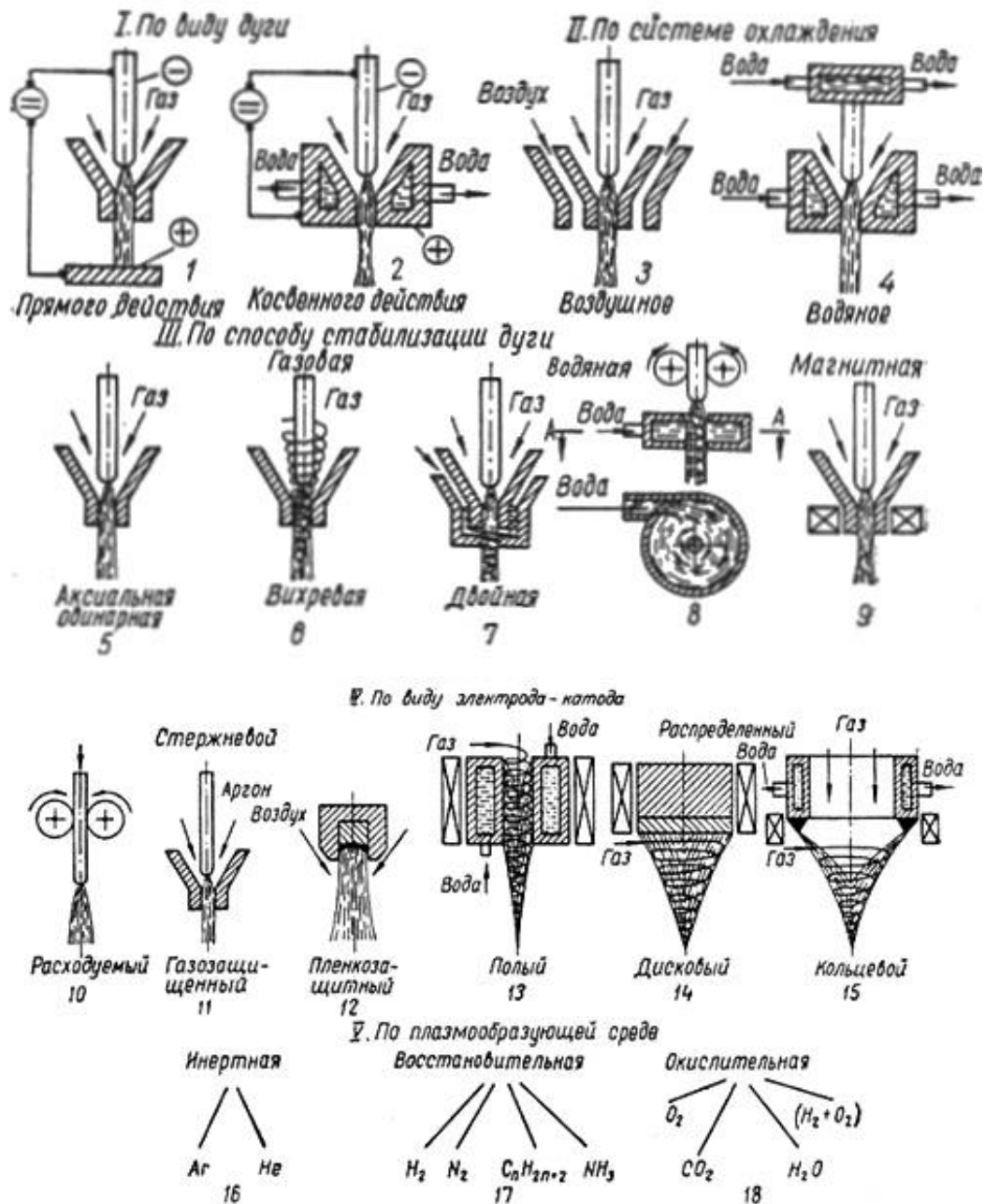


Рисунок 1.18 – Класифікація плазмотронів [71].

Незважаючи на все різноманіття схем плазмотронів, що використовуються, вони можуть бути класифіковані за наведеними нижче показниками (рис.1.18). У першу чергу всі плазмотрони діляться на дві групи по виду дуги: прямої дії та непрямої дії. По розташуванню розряду в каналі плазмотрона існують дві основні схеми побудови – аксіальна і коаксіальна. По системі охолодження електрода і плазмоутворюючого сопла плазмотрони діляться на два основних типи: з повітряним і з водяним охолодженням. Можуть бути плазмотрони зі

змішаною системою охолодження теплонагружених вузлів. Теплоємність води набагато вище теплоємності повітря та інших газів, тому, найбільш ефективною і розповсюдженою є водяна система охолодження плазмотронів, що забезпечує високу потужність і високий ступінь стиснення дуги.

Плазмотрони можна класифікувати по способу стабілізації стисненої дуги [77]. Система стабілізації стисненої дуги забезпечує стиснення стовпа дуги і сувору фіксацію його по осі сопла плазмотрона і є одним з найважливіших елементів плазмотрона. Існує три види стабілізації стисненої дуги: газова, водяна і магнітна. Найбільш простою і розповсюдженою є газова стабілізація, при якій зовнішній, холодний шар робочого (плазмоутворюючого) газу, омиваючи стовп дуги, прохолоджує і стискає його. При цьому, залежно від способу подачі газу, газова стабілізація може бути аксіальною або вихровою. Найбільше обтиснення дуги досягається при вихровій стабілізації, тому цей спосіб частіше використовується в плазмотронах для різання і напилення. При аксіальній стабілізації забезпечується ламінарний характер витікання струменя із плазмоутворюючого сопла, що є важливим для ряду процесів. У ряді випадків застосовують подвійну стабілізацію дуги. При водяної стабілізації можна досягти найбільш високого ступеня стиснення і температури стовпа дуги (50 - 70 тис. К). Однак присутність парів води поблизу катодної області приводить до інтенсивного згоряння електродів з будь-яких матеріалів, тому у плазмотронах з водяною стабілізацією використовуються витратні (частіше графітові) електроди, що автоматично переміщуються в міру згоряння. Магнітна стабілізація, при якій створюване поздовжнє магнітне поле стискає стовп дуги, менш ефективна, ніж водяна і газова. Крім того наявність соленоїда ускладнює конструкцію плазмотрона і збільшує його габарити. Перевага магнітної стабілізації полягає в можливості регулювання ступеня стиснення дуги незалежно від витрат робочого газу. На практиці накладення поздовжнього магнітного поля застосовується для обертання анодної плями по внутрішніх стінках сопла при роботі в режимі непрямої дуги з метою підвищення стійкості останнього.

По виду електрода катода плазмотрони постійного струму можна розділити на дві групи [78]: плазмотрони зі стрижневим і плазмотрони з розподіленим катодом. У плазмотронах зі стрижневим катодом катодна пляма фіксується на торці електрода, а в плазмотронах з розподіленим катодом – інтенсивно переміщається за допомогою газовихрового або магнітного обертання по розвинутій поверхні електрода. Стрижневі катоди можуть бути трьох видів: витратні, газозахисні та плівко захисні. Витратний, найчастіше графітовий, електрод, незважаючи на високу температуру плавлення, має підвищені витрати через сублимацію поблизу температури плавлення. Газозахисний вольфрамовий електрод - найпоширеніший з усіх видів електродів. Вольфрам має високу міцність і досить високі електро- і теплопровідність. При роботі в інертному середовищі (аргон, гелій) при навантаженні $j = 15 - 20 \text{ А/мм}^2$, вольфрам практично не витрачається. Плівкозахисні катоди мають високу стійкість в активних середовищах (повітря, вуглекислий газ, технічний азот). Вони являють собою стрижень із цирконію або гафнію, запресований у мідній обоймі. Висока термостійкість таких катодів обумовлена утворенням стійкої тугоплавкої плівки із оксидів і нітридів, що захищає чистий метал від випару. Активна вставка витрачається в основному при включенні дуги, внаслідок руйнування плівки від термоудару. При використанні цирконієвого електроду допускається більша, ніж для вольфраму щільність струму, що досягає $80 - 100 \text{ А/мм}^2$. При роботі плазмотрона з окисним плазмоутворюючим середовищем на більших струмах (1000 А і більше), використовуються різноманітні види розподілених катодів, найпоширенішими з яких є порожній, дисковий і кільцевий. Недоліками розподілених катодів є складність їхньої конструкції, труднощі рівномірного переміщення катодної плями по всій поверхні електрода, низька стабільність горіння дуги, зростання напруги прикатодної області дуги та пов'язане із цим збільшення втрат потужності в електроді.

За плазмоутворюючим середовищем плазмотрони діляться на три групи [79]: інертна, відновлювальна та окисна.

По роду струму плазмотрони відрізняються більшим різноманіттям. Переважна більшість плазмотронів працює на постійному струмі прямої полярності [80]. Це пояснюється тим, що на аноді дуги виділяється більша кількість тепла, ніж на катоді. Теплова потужність, що виділяється в електроді плазмотрона, на відміну від електрода зварювальної дуги, що плавиться, є не тільки марною, але й шкідливою. Гранично припустиме струмове навантаження на лантанований вольфрамовий електрод на змінному струмі приблизно у два рази, а на зворотній полярності при використанні постійного струму, у десять разів нижче, ніж на прямій полярності. Тому плазмотрони постійного струму прямої полярності мають найбільш високий коефіцієнт використання корисної потужності. При роботі плазмотрона на змінному струмі проходження струму через нуль може викликати загасання дуги, тому напруга холостого ходу джерела живлення змінним струмом не менше, ніж удвічі перевищує робочу напругу дуги. Плазмотрони змінного струму рекомендується застосовувати для зварювання алюмінієвих сплавів, тому що в періоди зворотної полярності за рахунок дії ефекту катодного розпилення руйнується тугоплавка окисна плівка, що перешкоджає процесу сплавлення металу. Існує декілька схем плазмотронів змінного струму. Стабільність горіння дуги забезпечується при трьохфазній схемі живлення плазмотрона, однак електроди і сопло перебувають у порівняно важких умовах роботи і значно ускладнюється конструкція плазмотрона. У ряді випадків живлення плазмотронів виконують комбінованим для підвищення стабільності горіння дуги змінного струму. Поряд з дуговими плазмотронами, що працюють на струмі промислової частоти, розроблені високочастотні та надвисокочастотні плазмотрони.

Основними вузлами плазмотронів є електродний, сопловий, ізолятор, системи водо- і газопостачання [81].

Катоди [82]. Основною характеристикою матеріалу катоду є емісійні властивості, які визначаються роботою виходу електронів. Чим менше робота виходу, тим краще вирішуються завдання стабілізації дуги і охолодження катода. Для роботи в інертних газах найкращим матеріалом катодів є вольфрам,

легований окислами лантану та ітрію (марки ВЛ і СВИ). Конструктивно катоди з вольфраму виконуються двома способами: у вигляді прутка, що фіксується цанговим затискачем, закріпленим в електродному вузлі плазмотрона (рис.1.19) і у вигляді мідної державки із забитим у неї стрижнем вольфраму, встановленим в електродному вузлі. Остання конструкція менш зручна, але забезпечує більш високі щільності струму (рис.1.19). Катодна вставка може закріплюватися в цільному корпусі та змінних мідних наконечниках, що з'єднуються з корпусом електродотримача конусною посадкою або різьбленням. Конструкції 3,4,5 характерні для катодів з активною вставкою (цирконій, гафній), призначених для роботи в кисневмісних середовищах. Вставка з'єднується з кінцевиком різними способами: пайкою, дифузійним зварюванням, запресовуванням, спільним холодним штампуванням активної вставки з мідним тримачем та т. ін.

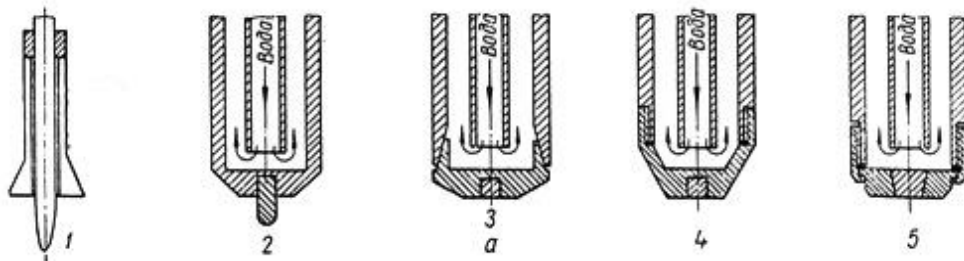


Рисунок 1.19 – Принципові схеми катодів для плазмово-дугових процесів [82].

Аноди [83]. При роботі плазмотрона на постійному струмі зворотної полярності теплове навантаження на анод різко зростає. Досвід показує, що для забезпечення адекватної стійкості, перетин вольфрамового електрода на зворотній полярності повинен бути в 9 разів більший, ніж при прямій полярності. Необхідно розосередити заряд по поверхні анода для зниження щільності теплового потоку в анод. Експерименти, проведені з вольфрамовими електродами різної конструкції (рис.1.20) показали, що при робочому струмі 150 А и струмі збудження 50 А, вони руйнувалися за час, менший 23 хв., а при струмі 200 А – за 2-3 хв. Це пояснюється недостатньою теплопровідністю вольфраму [84].

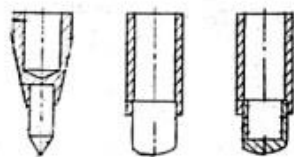


Рисунок 1.20 -

Принципові схеми вольфрамових анодів для плазмо-дугових процесів [84].

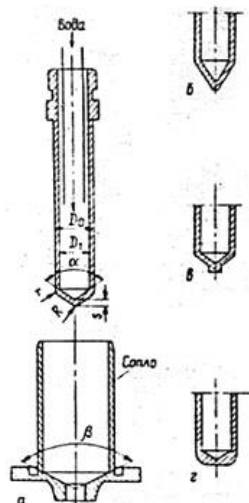


Рисунок 1.21 -

Принципові схеми мідних анодів для плазмо-дугових процесів [85].

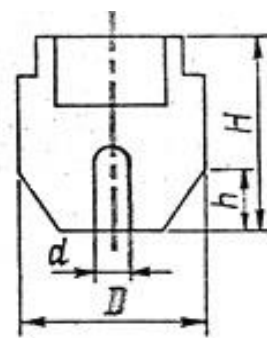


Рисунок 1.22 -

Принципова схема мідного анода з вольфрамовою вставкою [86].

Експерименти, проведені з мідними анодами (теплопровідність міді в 3 рази вище, ніж вольфраму) різної конструкції (рис.1.21,а,б,в,г), показали, що конструкції (а) і (б) при робочому струмі 200 А та струмі збудження 50 А швидко руйнувалися. При використанні електрода в) активна пляма розташовувалася на кромці електрода, що призводило до аварійної роботи плазмотрона (подвійній дузі). Електрод конструкції 5 г при струмі 200 А мав ресурс 300 хв. при 60 збудженнях дуги. Вважається, що ріст ресурсів анодів пов'язаний зі збільшенням розмірів електродів і поліпшенням їхнього охолодження [85]. Пропонується анодний вузол, що складається з водоохолоджуваного мідного тримача і активної вольфрамової вставки (рис.1.22). Висока стійкість анода забезпечується якісним з'єднанням міді з вольфрамом і ефективним водяним охолодженням. Найкращі результати досягалися при осаді розплавленої міді на вольфрамову вставку. Стійкість таких анодів досягає 100-300 годин при робочому струмі до 300 А при 100 - 500 включеннях [86].

Плазмоутворюючі сопла сприймають більші теплові навантаження і тому вимагають ретельного конструктивного оформлення [87]. Досвід експлуатації

показав, що найкращим матеріалом для виготовлення сопел є мідь високої чистоти (марки М0, М1), що має високу теплопровідність та порівняно невисоку вартість. Армування стінок сопла теплостійкими матеріалами призводить до зменшення строку його служби через зменшення теплопровідності [88]. Сопла мало амперних і ручних плазмових пальників можуть бути виконані з природним або газовим охолодженням (рис.1.23,1,2). У більшості випадків застосовується водяне охолодження сопел, при цьому ділянку сопла, що контактує з плазмовим стовпом, виконують змінною (рис.1.23 ,3, 4, 5) [89].

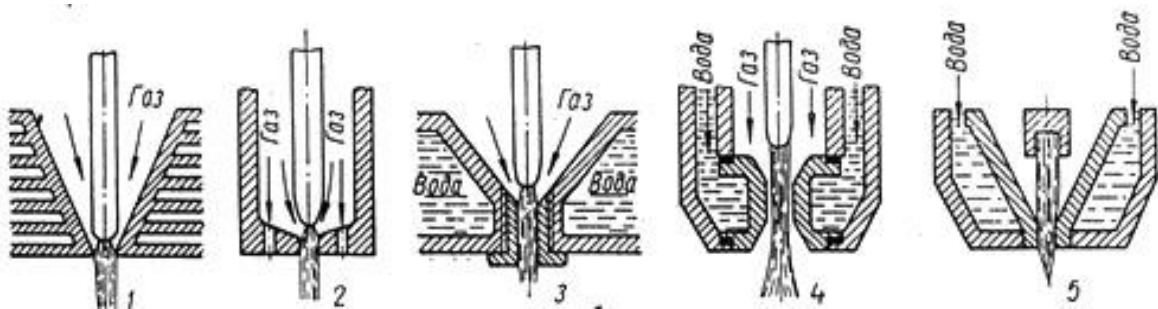


Рисунок 1.23 – Основні конструкції плазмотворюючих сопел [89].

Вузол завихрення робочого газу визначає якість стабілізації стовпа стисненої дуги [90]. Конструктивні варіанти вузлів завихрення можна розділити на групи, представлені на рис.1.24 [91]. Функції завихрювача може виконувати корпус плазмотрона (рис.1.24,1,2), керамічна шайба, розміщена на вході в сопло (рис.1.24,3), саме сопло (рис.1.24,4). При цьому можна значно скоротити довжину каналу сопла, замінивши більшу частину його кільцями стабілізуючого газу, що обертається навколо стовпа дуги (дуже складне і трудомістке у виготовленні) [92]. Завихрювачем може бути й сам електрод плазмотрона, на зовнішній поверхні якого виконується гвинтова нарізка (рис.1.24,5).

Ізолятори. Плазмотворююче сопло і електродний вузол повинні бути ізольовані один від одного ізоляцією, яка не проводить електричний струм. Однією з умов стабільного горіння дуги є точне центрування електрода і плазмотворюючого сопла. Функції механічного зв'язку електродного вузла і плазмотворюючого сопла плазмотрона, їх точної співвісності та електричної ізоляції виконує ізолятор [93].

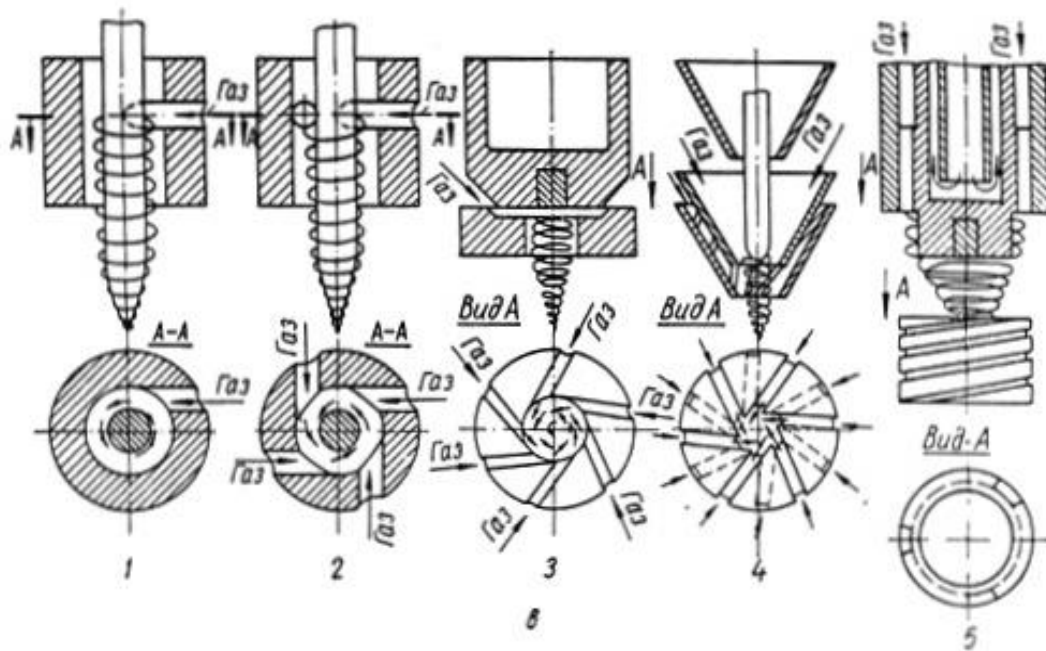


Рисунок 1.24 – Основні конструкції завихрювачів плазмотронів [91].

Системи газопостачання і охолодження плазмотронів. Ці системи багато в чому визначають технологічні можливості і габарити плазмотронів [94]. Канали для подачі плазмоутворюючого, захисного і стабілізуючого газів можуть виконуватися у тілі основних елементів плазмотрона, утворюватися при сполученні цих елементів при наявності різних проточок на їхній поверхні, а також створюватися за рахунок сполучення додаткових проміжних деталей. Системи охолодження електрода і плазмоутворюючого сопла плазмотронів діляться на два основних типи: системи з повітряним і з водяним охолодженням. Можуть бути плазмотрони зі змішаною системою охолодження теплонавантажених вузлів. Частіше використовуються плазмотрони з водяною автономною системою охолодження електрода і плазмоутворюючого сопла.

1.5 Особливості та перспективи технології плазмо-дугового нанесення покриттів дротом-анодом.

Сучасна промисловість потребує інноваційних технічних рішень для створення нових можливостей виробництва. Зокрема, такі рішення з'являються в галузі плазмової техніки. Так, в роботі [95] запропоновано підвищення продуктивності плазмового напилення за рахунок використання дугового плазмотрона з вольтододатком на плазмовий струмінь (додатковою напругою між соплом плазмотрона і оброблюваною деталлю). В роботі [21] підвищення продуктивності і якості нанесення покриттів запропоновано досягти плазмо-дуговим розпилюванням рухомого дроту-анода.

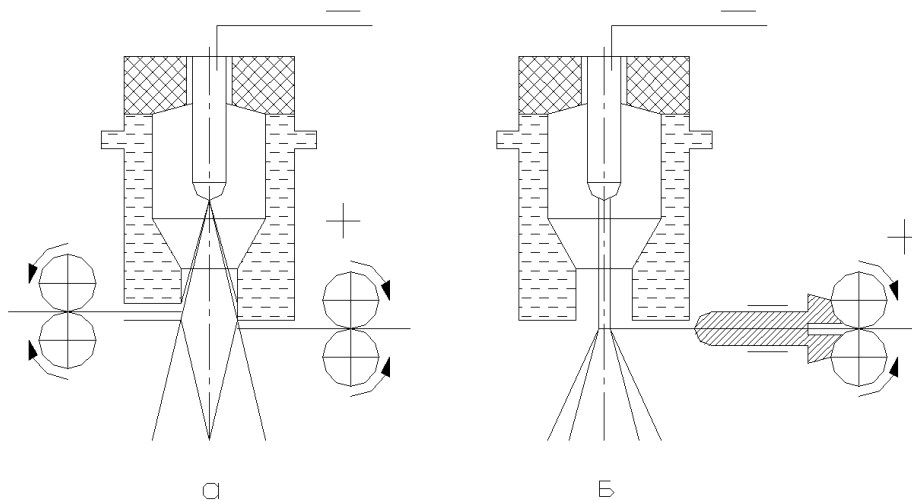


Рисунок 1.25 – Схеми плазмових розпилювачів: а) – пруткового; б) – дротового ("дріт-анод") [96].

Розробка процесів плазмо-дугового розпилювання відбувається в останні десятиріччя [96]. Наприклад, було створено пристрій для термічного розпилення дроту-анода дугою, що передається від плазмотрону, і спосіб отримання плазмового струменя з розширеною дугою та нанесення щільного металевого покриття на підкладку [97]. Також продовжувалися роботи в напрямку розпилювання двох дротів дугою, що горить між ними [98].

Сучасні тенденції розвитку плазмових розпилювачів проявляються, в першу чергу, у збільшенні ефективності процесу (рис.1.25). Так, розроблено

установки потужністю до 160...200 кВт, які працюють на повітрі, аміаку, пропані, водні, у динамічному вакуумі, у воді [99]. Застосування спеціальних сопел дозволило одержати надзвукове витікання струменя двофазного потоку, що, у свою чергу, забезпечило одержання щільного покриття [100].

Збільшення ресурсу плазмових розпилювачів гальмувалося через низьку ерозійну стійкість мідного сопла в зоні анодної плями. З метою збільшення стійкості сопла постійно проводилися роботи з його модифікації. Однак повністю вирішити проблему стійкості анода не вдалося. Як можливе вирішення проблеми підвищення стійкості електродів, а також підвищення ефективності процесу напилення і поліпшення якості покриттів, представляється застосування схеми плазмового напилення з рухомим анодом [101].

Виконаний аналіз свідчить, що загальними недоліками розглянутих процесів є відносно низька ефективність нагріву матеріалів у плазмових струменях (низький коефіцієнт корисної дії), підвищені теплові навантаження на анод і, пов'язаний з цим, низький ресурс роботи, недостатня продуктивність процесу і керованість параметрами плазмового струменю, нагрівом та хімічним складом оброблюваного матеріалу.

Вирішення зазначених вище проблем може бути досягненим при використанні схеми плазмового напилення із застосуванням плазмотронів з відкритим рухомим анодом (рис.1.25). Ця схема має можливості забезпечення більш ефективного управління параметрами плазмового струменю, підвищенні коефіцієнта корисної дії (ККД) нагріву матеріалів у плазмі, пониженні теплового навантаження на анод тощо. Плазмо-дугове розпилення має ту перевагу, що на відміну від багатьох інших процесів воно може розпилювати матеріали з дуже високою температурою плавлення, такі як тугоплавкі метали, такі як вольфрам та кераміка, такі як цирконій. Отримані таким способом покриття, як правило, набагато щільніші, міцніші та чистіші, ніж інші отримані в процесах термічного розпилення, за винятком HVOF та процесів детонації. Плазмо-дугове розпилювання дротів-анодів забезпечує найширший спектр покриттів для

широкого спектру застосувань, що робить цей процес найбільш універсальним [102].

Попередніми дослідниками було встановлено, що для формування якісного покриття необхідно володіти детальною інформацією про процеси нагріву розпилення дроту та взаємодій в двофазних струменях [103]. Такі дослідження заклали підґрунтя для розуміння, фізичного та математичного опису процесу напилення. Так, фракційний склад розпилених частинок для напилювання можна регулювати зміною температури плазмового струменя, діаметром дроту, а також в певних межах витратою газу і діаметром сопла [104]. В роботі [105] запропоновано просту формула розрахунку розміру розпилених частинок від основних параметрів процесу:

$$d = \frac{3.35d_c^2}{V(1 + 0,0036T)} \sqrt{d_n \sigma / \rho}$$

де d – діаметр частинки, м; d_c – діаметр сопла, м; d_n – діаметр дроту, м; a – коефіцієнт поверхневого натягу матеріалу електрода при заданій температурі в місці прикладання сили, Дж/м²; V – швидкість витікання газу, м/с; ρ – щільність середовища, кг/м³.

За допомогою такої формули, а також інших досліджень впливу складу газового середовища на теплофізичні властивості стовпа дуги, анодної і катодної областей дуги, хімічний склад, температуру дуги, мають свій гідродинамічного вплив на дугу (наприклад, [5, 7, 54, 64, 99, 106-108]) можна здійснити попереднє визначення режимів плазмо-дугового розпилення дротів-анодів.

Попередні результати практичного використання плазмо-дугового розпилення рухомих дротів-анодів підтвердили високу ефективність цього процесу [109]. На жаль, систематичних досліджень зазначеної схеми плазмового напилення не проводилося [110], не дивлячись на те, що окремі питання були досліджені (наприклад, визначення температури частинок при плазмовому напиленні струмопровідним дротом в роботі [111]). Також, незважаючи на наявність певних досліджень в цьому напрямку, низка таких важливих питань, як температура плазмового потоку з металевими частинками, тиск на основу,

змочування і розтікання напиленого матеріалу по поверхні, висвітлені недостатньо [112]. Існуючі зараз математичні дослідження даного процесу або торкаються його непрямо (наприклад, [113]-115), або недосить повні (як от [116-117]), або потребують дослідної перевірки (наприклад, [118-123]).

1.6 Мета роботи та завдання дослідження.

З метою широкого запровадження вказаного процесу в промисловому виробництві представляється доцільним проведення комплексних досліджень процесу плазмо-дугової обробки із використанням відкритого рухомого аноду. В даному випадку в якості аноду використовується дріт, який нагрівається та розплавляється в плазмовому струмені для одержання дисперсних матеріалів та нанесення покриттів [124].

Такі роботи дозволять дослідити особливості формування плазмового струменя в плазмо-дугових процесах при використанні рухомого аноду, визначити основні закономірності нагріву, плавлення та диспергування різноманітних матеріалів в плазмових струменях в залежності від їх аеродинаміки і особливостей енерговкладання. Отримані в процесі виконання досліджень результати дозволять розробити обладнання та технологічні процеси переробки та диспергації багатокomпонентних матеріалів, ремонту та відновлення зношених поверхонь відповідальних габаритних деталей залізничного та автомобільного транспорту, енергоустановок, обладнання хімічної, переробної промисловості та машинобудування.

У зв'язку з цим, метою роботи доцільно обрати наступне: виконання комплексу теоретичних та експериментальних досліджень закономірностей протікання процесів тепло- і масопереносу, аналіз мікрOMETалургійних процесів при плазмово-дуговому розпилюванні плавкого дроту-аноду із різних типів напилюваних матеріалів, вивчення особливостей впливу основних технологічних параметрів процесу на структуру та властивості отриманих покриттів, а також створення на цій базі рекомендацій по конструюванню

обладнання і розробки та впровадженню практичних технологій нанесення покриттів широкого призначення.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Виконати аналіз сучасного стану і тенденцій розвитку технологій плазмово-дугового напилювання покриттів, провести вибір технологічної схеми досліджуваного процесу, початкових умов для проведення теоретичних та експериментальних досліджень
2. Розробити методики чисельних та фізичних експериментів по дослідженню процесів тепло- і масопереносу в плазмовому потоці, виконати комплекс теоретичних та експериментальних досліджень закономірності зміни вольт-амперних характеристик та особливостей протікання мікрометалургійних процесів при плазмово-дуговому напилюванні зовнішнім плавким дротом-анодом.
3. Дослідити фізико-металургійні особливості при плавленні та розпиленні дроту-анода, в тому числі утворення і диспергування плівки розплаву на торці дроту-анода при плазмово-дуговому розпиленні.
4. Вивчити закономірності впливу основних технологічних параметрів процесу плазмово-дугового напилювання на фізико-металургійні умови формування структури і властивостей покриттів
5. Розробити та впровадити рекомендації з конструювання обладнання для плазмово-дугового напилювання при виготовленні зразка серійної установки та напівавтоматичної лінії плазмово-дугового напилювання шийок осей колісних пар рухомого складу вантажного залізничного транспорту.
6. Розробити рекомендації з вибору оптимальних технологічних режимів одержання покриттів широкого призначення, впровадити технології для підвищення ресурсу бурових та нафтовидобувних різьбових ділянок насосо-компресорних труб і контактних поверхонь сталевих струмопідводи.

Об'єктом такого дослідження доцільно обрати технологію плазмово-дугового напилювання покриттів зовнішнім плавким дротом-анодом, а предметом дослідження – мікрометалургійні процеси в двофазному плазмовому струмені

при плазмо-дуговому напилювання металевих покриттів.

1.7 Висновки по розділу 1.

1. Проведені в останні десятиріччя дослідження особливостей плазмо-дугового розпилення рухомих дротів-анодів свідчать про високу ефективність цього процесу. В ході таких досліджень визначено температури частинок при плазмовому напиленні струмопровідним дротом, запропоновано конструкції обладнання, досліджено поведінку плазмового струменю, розроблено математичні моделі для моделювання процесу.
2. Встановлена відсутність комплексних систематичних досліджень плазмового напилення металевими дротами-анодами, недостатнє вивчення таких важливих питань, як температура плазмового потоку з металевими частинками, вплив цього потоку на оброблювану основу, формування напиленого матеріалу на поверхні. Існуючі зараз математичні дослідження даного процесу або торкаються його непрямо, або недосить повні, або потребують дослідної перевірки.
3. Розглянуто схеми процесів ГТН, проаналізовано їх переваги і недоліки, визначено перспективність застосування схеми плазмо-дугового розпилення рухомого дроту-аноду.
4. Розглянуто різні підходи до класифікації плазмового обладнання і типи конструкцій його окремих вузлів для подальшого вибору оптимальних складових обладнання процесу плазмо-дугового розпилення рухомого дроту-аноду.

Розділ 2. МАТЕРІАЛИ, ОБЛАДНАННЯ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ.

Для досягнення поставлених у даній роботі завдань необхідно провести теоретичні і експериментальні дослідження за методикою, що включає:

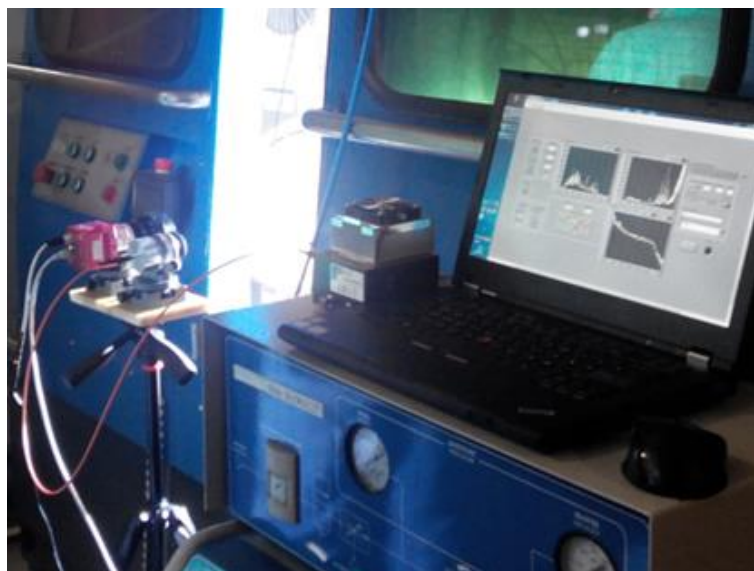
- вибір схеми процесу, розробка методів та початкових умов для чисельних та реальних експериментів по дослідженню процесів тепло-, і масопереносу в плазмовому потоці, вибір математичних моделей для теоретичного дослідження плазмових потоків;
- створення інноваційного експериментального комплексу для досліджень мікрометалургійних процесів в двофазному плазмовому струмені при розпиленні дроту-анода;
- вибір методів дослідження структур та властивостей отриманих покриттів.

2.1. Лабораторний стенд і допоміжне технологічне обладнання для проведення досліджень.

Для проведення експериментальних досліджень фізико-металургійних процесів при плазмо-дуговому напилюванні покриттів зовнішнім плавким дротом-анодом була розроблена та виготовлена нова дослідна плазмо-дугова установка. Оригінальна дослідна установка є модифікацією установки УН-126, що була основною складовою цілісного експериментального комплексу для досліджень мікрометалургійних процесів, який також включає тепловізійну та оригінальну відеооптичну системи фіксації процесу напилення [125-128].

Установка призначена для нанесення металевих захисних покриттів на зовнішні циліндричні поверхні деталей і вузлів. Зовнішній вигляд установки представлений на рисунку 2.1. Основні технічні характеристики дослідної плазменно-дугової установки, установки, що входить в експериментального комплексу для досліджень мікрометалургійних процесів наведено в таблиці 2.1. Напилення матеріалу відбувається методом плазмо-дугового розпилення струмопровідного дроту (рухомий-анод). До корпусу катодного вузла підключається плазмоутворюючий газ аргон і повітря для охолодження і формування плазмового струменя.

а



б



Рисунок 2.1 – Дослідний стенд дослідження процесу плазмового-дугового напилення токопровідного дротового аноду: а) – загальний вигляд дослідного стенду; б) – зовнішній вигляд пульта керування установкою з PLC контролером.

Конструкція плазмотрона (рис.2.2) в дослідній установці передбачає горіння плазмової дуги між вольфрамовим катодом, що обдувається потоком аргону (не більше 2 куб. м на годину) і плавким струмопровідним дротом, що подається за зрізом подвійного сопла плазмотрона. Додатково плазмотрон має ряд поздовжніх каналів, отворів і кільцевий зазору між соплами плазмотрона для

подачі повітря з підвищеною витратою (близько 50 куб. м на годину) і формування надзвукового газового або повітряного супутнього потоку, що обтискають аргоновий плазмовий струмінь з потоком розплавлених частинок.

Таблиця 2.1. Основні технічні характеристики установки.

п/н	Найменування параметра	Величина
1	Потужність плазмотрона, кВт, не більше	30
2	Напруга живильної мережі трифазного змінного струму частотою 50 Гц, В	380 ⁺¹⁹ ₋₃₈
3	Напруга холостого ходу, В	160
4	Діапазон регулювання робочого струму, А	100 -250
5	Діапазон регулювання робочої напруги, В	30 – 80
	Найбільша тривалість включення, ПВ%	100
6	Витрата повітря (або іншого газу) при тиску 0,6 МПа, нм / год	50
7	Витрата аргону при давленні 0,1 МПа, нм / годину	2
8	Швидкість подачі дроту, м / хв	5–15
9	Охолодження плазмотрона	повітряне (газове)

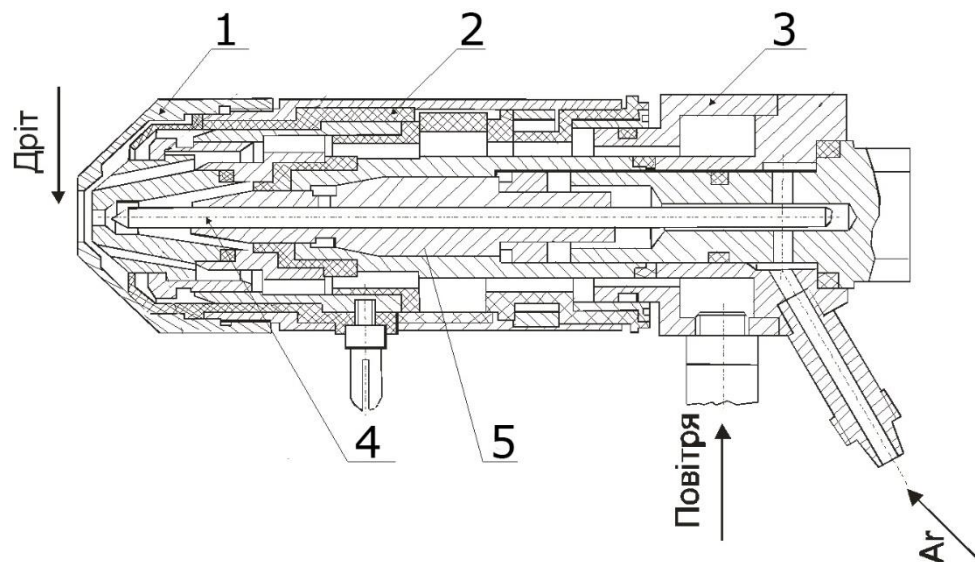


Рисунок 2.2 – Схема плазмотрона для плазмо-дугового напилення із рухомим дротом-анодом: 1 – кришка; 2 – ізоляційний корпус; 3 – корпус; 4 – катод; 5 – затискач.

В даному випадку анодом служить струмопровідний дріт, який подають через струмопровідний штуцер ізольовано нижче сопла плазмотрона (рис. 2.2-2.3).

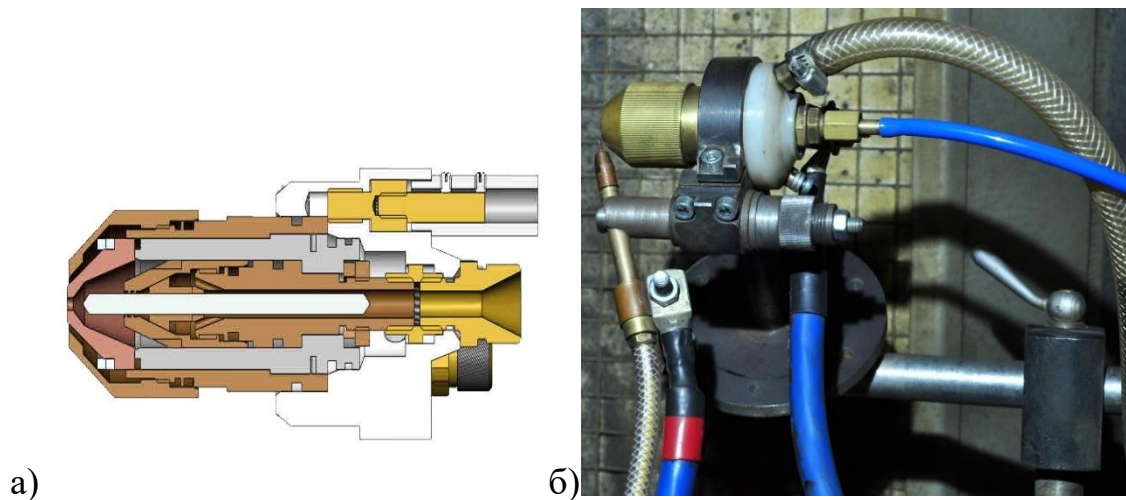


Рисунок 2.3 – Загальний вигляд плазмотрону для формування плазмового струменя на основі принципу «рухомого аноду»: а) – 3D модель; б) – дослідний зразок.

Ефективність генерування плазми визначається тепловим коефіцієнтом корисної дії плазмотрона і залежить від енергообміну із елементами конструкції плазмотрона. Конструктивні параметри плазмотрона і співвідношення витрат аргону і повітря підібрані таким чином, що високошвидкісний потік аргонної плазми з матеріалом розпилення не змішуються з надзвуковим газовим або повітряним потоками стиснення. При цьому газовий або повітряний потік виконує функцію стиснення аргонного струменя, що забезпечує рівномірність нагріву розплавлених частинок матеріалу, що напилюється, запобігає їх охолодженню в процесі напилення, а також сприяє ламінаризації плазмового струменя, підвищенню його швидкості. Підвищення швидкості плазмового струменя дозволяє уникнути підмішування в нього повітря навколишнього середовища, що істотно зменшення окислення матеріалу напилення.

Важливим результатом модифікації запропонованої конструкції плазмотрона також є те, що надзвуковий газовий або повітряний потік одночасно виконує функцію охолодження плазмотрона, тобто останній не потребує

водяного охолодження, це істотно підвищує технологічність установки і здешевлює собівартість плазмо-дугового напилення. За рахунок наведених вище конструкційних модифікацій плазмотрона в оригінальній установці забезпечуються наступні суттєві переваги:

- процес напилення ведеться в аргоновому струмені при невеликих витратах аргону, плавлення матеріалу дротів відбувається в захисній атмосфері аргону;
- довжина початкової частини плазмового струменя збільшується за рахунок зниження розсіювання потужності у прикордонному шарі при виході у відкриту атмосферу та нерівномірних релаксаційних процесів у скачках ущільнення;
- профілі температур та швидкостей у струмені стають більш ущільненими;
- дроблення крапель розплавленого матеріалу і прискорення дисперсних частинок здійснюється в високошвидкісному потоці аргонної плазми;
- за допомогою надзвукового газового або повітряного потоку обтиснення, що протікає по периферії до потоку аргонної плазми, забезпечується стиснення і прискорення плазмового струменя, захист від перемішування аргонного плазмового струменя з повітряною атмосферою, а отже і захист частинок матеріалу напилення від окислення.

Оптимізацію режимів плазмо-дугового напилювання з рухомим дротом-анодом здійснювали із застосуванням методів математичного планування експерименту [129]. При цьому застосовували симплекс-метод, який дозволяє із кожним з проведених експериментів рухатися в сторону покращення результатів. Було визначено незалежних 4 параметри (струм розпилення I , витрати плазмоутворюючого G_1 і супутнього G_2 газів, дистанцію напилення L). При фіксації трьох з них варіювали один в бік покращення якості покриття, що наносили. Під якістю покриття розуміли рівномірність осадження і міцність зчеплення не гірше за 20 МПа. Начальні налаштування чотирьох незалежних параметрів обрали згідно з літературними даними (наприклад, [112]).

При використанні в якості параметру оптимізації коефіцієнта використання матеріалу (КВМ) необхідні зважування проводили на аналітичних вагах типу АДВ-200. Шляхом тарування дозуючих пристроїв встановлено, що погрішність виміру не перевищує 2,5%.

2.2. Вибір матеріалів для досліджень та їх характеристики.

В якості основи, що напилювали, використовували сталі (табл.2.2), мідь М2 (табл.2.5) і алюмінієвий сплав АМг 63 (табл.2.6). В якості матеріалів для напилення застосовували компактні металеві дроти діаметром 1,2...1,6 мм, хімічні склади яких приведені в табл. 2.3 – 2.6.

Таблиця 2.2 – Хімічний склад вуглецевих сталей, використаних в якості основного металу.

Марка, ГОСТ	Масова частка елементів в, %							
	C	Mn	Mg	P	S	Cr	Ni	Al
Ст 20 ГОСТ 1550-88	0,17- 0,24	0,35- 0,65	0,17- 0,37	-	-	0,25	-	-
Ст 65Г ГОСТ14959-79	0,62- 0,7	0,17- 0,37	0,9- 1,2	0,17- 0,37	0,035	0,035	0,25	0,25
Ст 70 ТУ 1-5317-95	0,67- 0,75	0,4- 0,7	0,45	0,03	0,03	0,10	0,10	0,15

Таблиця 2.3 – Хімічний склад нержавіючого дроту 18Х15Н3М.

Марка, ТУ	Масова частка елементів в, %							
	C	Mn	Cr	Ni	Si	Cu	Mo	W
ТУ 14-1-3297- 82	0,15- 0,21	до 0,6	14,5- 16,5	2,5-3	до 0,6	до 0,25	0,3- 0,8	до 0,5

Таблиця 2.4 – Хімічний склад ніхромового дроту Х20Н80.

Марка	Масова частка елементів, %									
	Ni	Si	Mn	P	S	C	Fe	Cr	Ti	Al
Дріт Х20Н80 ГОСТ 10994-74	Осн	0,015	0,30	≤ 0,02	≤ 0,02	≤ 0,0 3	≤1,0	20,0 – 23,0	≤ 0,02	≤ 0,02

Таблиця 2.5 – Хімічний склад міді М2.

Масова частка елементів, %									
Fe	Ni	S	Cu	As	Pb	O	Sb	Bi	Sn
до 0.05	до 0.2	до 0.01	мін. 99.7	до 0.01	до 0.01	до 0.07	до 0.005	до 0.002	до 0.05

Таблиця 2.6 – Хімічний склад алюмінієвого сплаву АМг 63.

Марка	Масова частка елементів, %			
	АМг 63 ГОСТ 7871-75	Магній	Марганець	Цирконій
	6,3	0,65	0,25	Ост.

2.3. Методи та діагностичне обладнання вимірювання швидкості і температури дисперсних частинок при плазмо-дуговому напиленні металічних дротів.

Всі сучасні системи вимірювання температури і швидкості частинок в газотермічних потоках (DPV, Accuraspray (Tecnar, Канада), Spectraviz (Stratronics, США), SprayWatch (Oseir, Финляндія)) ґрунтуються на реалізації методів двухкольорової пірометрії і час-пролітного методу незалежно від форми реалізації та обладнання [125-128]. Також для вимірювання швидкості високошвидкісного руху частинок застосовують методи PIV (Particle Image Velocimetry) [130] і ЛДА (лазерно-доплеровської анемометрії) [131], камери на основі високочутливих ПЗС- і КМОП-матриць, які дозволяють реєструвати просторовий розподіл часток, з одночасним вимірюванням їх швидкості і температури.

Для досягнення мети та рішення завдань даної роботи використовували вимірювальний комплекс, що дозволив візуалізувати процес формування і дроблення рідких крапель в умовах плазмо-дугового дротяного напилювання і одночасно виміряти швидкісні і температурні характеристики частинки конденсованої фази, завдяки оснащення такої системи каналом реєстрації спектра оптичного випромінювання гетерофазного потоку Використана в роботі комбінація методів та обладнання для візуалізації процесу плазмо-дугового напилювання дозволили підвищити точність температурних вимірювань, тим самим поліпшивши надійність і достовірність одержаних даних по візуалізації процесу.

В якості обладнання для діагностичного комплексу дослідження процесів плазмово-дугового напилювання використовували установку плазмово-дугового

напилювання покриттів PLAZER 30-PL-W з струмопровідним дротом. Дана установка призначена для нанесення зносостійких, корозійностійких і спеціальних покриттів, відновлення зношених деталей машин шляхом напилення електропровідних матеріалів, виготовлених у вигляді порошкових і компактних дротів діаметром 1,2-2,0 мм. Загальний вигляд і схема експериментального комплексу представлені на рисунку 2.4, а режим плазмо-дугового напилювання – в табл.2.7.

Таблиця 2.7 – Режим плазмо-дугового напилювання.

Струм дуги [А]	Напруга дуги [В]	Витрата аргону [л/хв]	Витрата повітря [л/хв]	Швидкість подачі дроту [м/хв]	Діаметр дроту [мм]	Міжелектродна відстань [мм]
220	65...70	28	330	14,7	1,6	9

Для дослідження динамічних і теплових характеристик частинок конденсованої фази при плазмо-дуговому розпилюванні компактних металевих дротів в експериментальний комплекс були інтегровані: камера HD1-1312-1082-G2 (Photon-Focus, Швейцарія), цифровий спектрометр LR1-T (ASEQ Instruments, Канада). Для обробки даних використовувалася середа MATLAB, що є потужним засобом обробки багатовимірних сигналів на основі технології паралельних обчислень. Монохромна цифрова камера HD1-1312-1082-G2 побудована на основі КМОП-матриці розміром 1312x1082 фотоелементів з діапазоном спектральної чутливості 400-1000 нм. Сигнал її сенсора представлений 12-розрядних цифровим кодом, а інтерфейс дозволяє в режимі реального часу передавати повноформатні дані в комп'ютер на швидкості 55 кадрів в секунду. Тривалість експозиції кадру варіювалося в межах 10 μ s - 10 мс. Драйвер камери підтримує стандартний інтерфейс середовища MATLAB і дає можливість використовувати її як джерело при конвеєрній обробці даних. Для проведення тепловізійних досліджень в оптичний канал камери HD1-1312-1082-G2 було додано смуговий світлофільтр SL-575-50 з центральною довжиною

хвилі 575 нм і шириною смуги 50 нм (FWHM), а також виконана корекція неоднорідності сигналу її сенсора і калібрування на автоматизованому стенді.

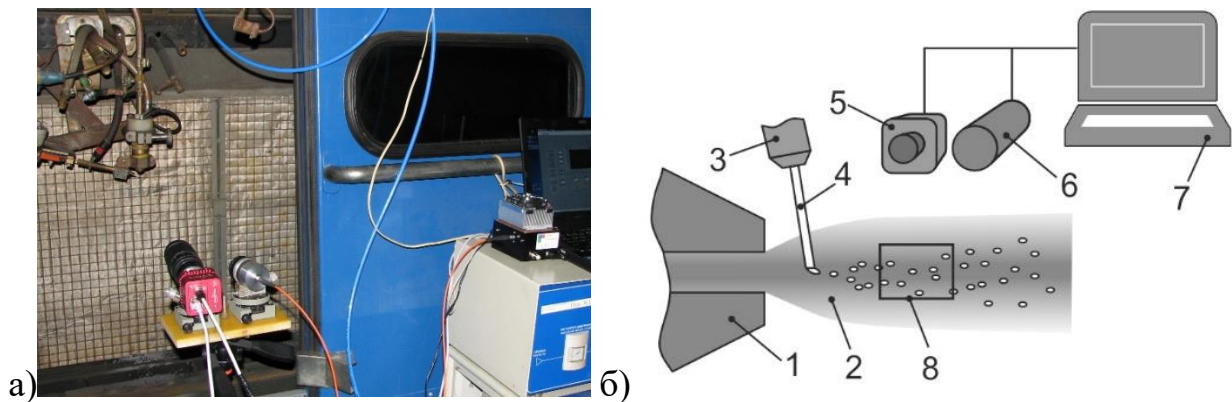


Рисунок 2.4 – Вигляд (а) і структура (б) діагностичного комплексу в складі лабораторного стенду для дослідження процесів плазмо-дугового напилювання: 1 – плазмотрон, 2 – плазмовий струмінь, 3 – мундштук, 4 – дріт, 5 – камера, 6 – фотоспектрометр, 7 – комп'ютер, 8 – вимірювальний об'єм.

Цифровий спектрометр LR1-T виконаний за схемою Черні-Тернера і має лінійний ПЗС датчик з 3648 фотоелементами розміру 8x200 мкм, термоелектричний охолоджувач до температури -35°C і забезпечує вимірювання в спектральному діапазоні 200...1100 нм. Цифрові дані спектрометра представлені 16-розрядним цифровим кодом, які передаються в комп'ютер по інтерфейсу USB 2.0. Приймальний об'єктив сфокусував зображення струменю на торець оптоволокна діаметром 200 мкм, по якому випромінювання потрапляло на вхідну щілину приладу. Час експозиції спектрометра варіювалося в межах 10...100 мс. З метою інтеграції спектрометра в середу MATLAB розроблений М-клас об'єктів aSpectr, який представляє його у вигляді віртуального приладу з набором властивостей і методів. Вимірювання температури спектральним методом проводилося за безперервною (теплової) компоненті спектру, вільної від лінійного і смугастого випромінювання атомів і молекул, в діапазоні 550-600 нм. Для цього попередньо була виконана корекція неоднорідності сигналу

датчика за допомогою автоматизованого стенда і методики, описаних в роботі [125].

Камера і прийомний об'єктив спектрометра фіксувалися на платформі, так що їх взаємне розташування залишалось незмінним (рис.2.4), а струмінь перебував в фокусній площині обох оптичних систем. Область візування камери охоплювала ділянку струменя (вимірювальний об'єм), розміри якого варіювалися від 29x24 мм² до 68x56 мм². Область візування спектрометра представляло коло діаметром 10 мм, розташовано в центрі кадру камери. У початковій області зйомки – поблизу місця прив'язки електричної дуги до дроту, що розпилюється, здійснювалася реєстрація її плавлення, зриву і дроблення крапель розплавленого металу в плазмовому потоці. Через сильне випромінювання плазми в цій області температурні вимірювання не проводилися. Далі платформа з камерою і об'єктивом спектрометра порушувалася уздовж струменю наплення, забезпечуючи перекриття послідовних областей вимірювання температури і швидкості частинок.

Дослідний лабораторний стенд крім оригінального вузла розпилення з плазмотроном модифікованої конструкції та діагностичного комплексу включає комплекс оригінальних апаратурно-програмних засобів, які дозволяють здійснювати автоматичну реєстрацію та обробку даних параметрів процесу, в тому числі таких, як струм та напругу дуги, тиск та витрату плазмоутворюючого газу (аргону), тиск та витрата повітря для створення супутнього потоку обтиснення, частоту обертання приводу подачі дроту, тощо.

Спеціально розроблене оригінальне програмне забезпечення (ПЗ) для системи контролю і керування органами дослідного стенду включає в себе функції керування, настройки та індикації. Модуль програмованого контролера забезпечує інтеграцію в існуючу силову схему незалежної системи збору та обробки інформації таких схем (рис.2.5): газоподготовки повітря (газу) і аргону, запуску плазмотрона, управління двигуном подачі дроту.

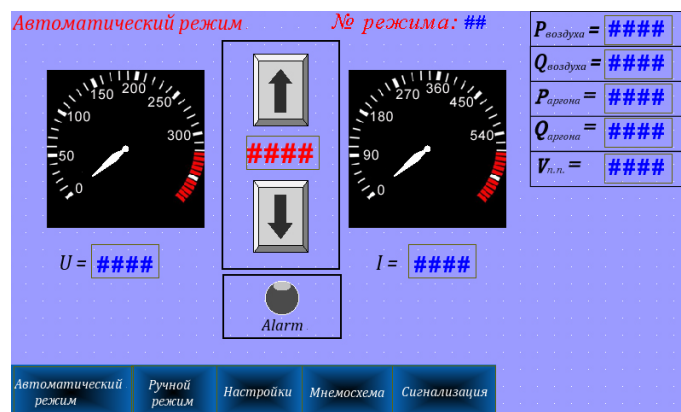
Також система управління містить інформацію про наступні показники:

- аналогові сигнали 4 - 20 мА з системи керування;

- струм і напругу на дузі;
- тиск і витрати плазмоутворюючого газу (аргону);
- тиск і витрати повітря (газу);
- аналогові сигнали 0 - 10 В з приводу механізму подачі дроту;
- частота обертання приводу подачі дроту.
- дискретний сигнал «Готовність» плазмової установки.

Керування процесом наплення здійснюється за допомогою сенсорної панелі (touch-панелі оператора), що входить до складу системи керування. Всі виміряні і розрахункові значення відображаються на екрані сенсорної панелі і зберігаються в архіві результатів вимірювань. Програмне забезпечення для системи керування використовує принцип багатовіконного меню. Для цього використовується touch-панель оператора. З кожного вікна можна переходити на інше за допомогою командного рядка. Завдання всіх необхідних параметрів проводиться з відповідного вікна меню. В автоматичному режимі передбачено оперативна зміна робочого струму і швидкості подачі дроту. В налаштуваннях передбачено завдання необхідних технологічних параметрів (струм, швидкість подачі дроту).

а)



б)



в)

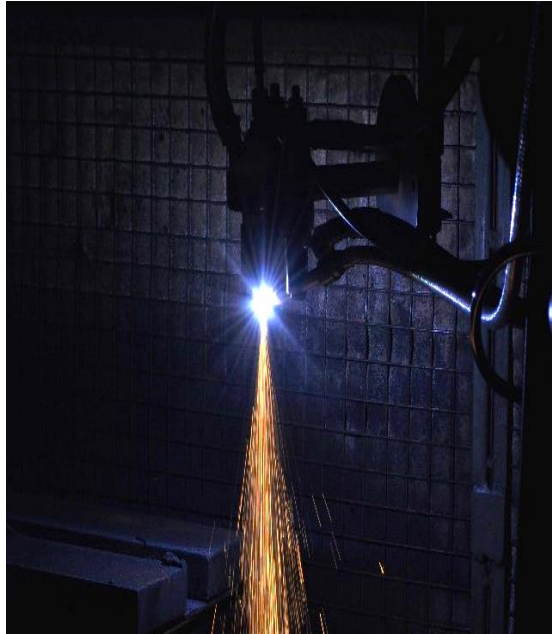


Рисунок 2.5 – Організація контролю та керування процесом плазмо-дугового напилення дротового аноду дослідного стенду: а) – вікно меню системи керування процесом; б) – вікно індексації та контролю; в) – процес напилення струмопровідного дроту.

У процесі плазмо-дугового розпилення дроту-аноду частинки розміром 10-100 мкм нагріваються до температур 1000-3500 К, залишаючись при цьому в конденсованій фазі – зазвичай у вигляді рідких крапель сферичної форми, а їх тепловий спектр можна зареєструвати в діапазоні від 300 до 1000 нм.

Для вимірювання швидкості потік розпилених часток поміщається в фокальну площину оптичної системи, а зображення частинок проектується на матричний фотоприймач камери, який працює за принципом накопичення заряду протягом часу експозиції тривалістю τ . Величина τ вибирається так, щоб частка встигала пройти прямолінійний шлях, довжина якого в 20-30 разів більше її діаметра. При цьому камера реєструє не саму частку, а траєкторію її руху – трек. Зображенням сферичної нерухомої частинки буде коло діаметра D , а трек рухомої частки повинен виглядати як округлений прямокутник. При цьому довжина переміщення кругового зображення сферичної частинки L буде дорівнювати

$$L = Z - D, \quad (2.1)$$

де Z – максимальний (протяжний) розмір округленого прямокутника (довжина треку), а швидкість руху частинки

$$v = \mu \cdot L / \tau, \quad (2.2)$$

де μ – масштабний коефіцієнт системи оптичного контролю.

У середовищі MATLAB методика вимірювання швидкості по тепловізійним даним реалізована наступним чином. Для кожного кадру відеопотоку будується маска і здійснюється морфологічний аналіз, в ході якого перевіряється зв'язність областей бінарного зображення і виконується його поділ на об'єкти, відповідні окремим найімовірнішим трекам. Ймовірні треки, які стосуються границь кадру, видаляються з зображення. Кожен виділений об'єкт піддається аналізу, спрямованого на визначення видимого діаметра частинки, довжини треку, координат його центру, орієнтації, рівня сигналу.

Щоб виключити об'єкти, відповідні «склеюванням» треків, здійснюється фільтрація по довжині, діаметру і відношенню максимального до середнього

рівнів сигналу. Об'єкти, що не задовольняють параметрам фільтра, видаляються з зображення, а інші вважаються ідентифікованими треками (рис. 2.6).

За параметрами ідентифікованих треків визначається швидкість частинок і її статистика. Потім виконується оцінка математичного очікування з рівнем значущості 0,05. Треки, параметри яких потрапляють в довірчий інтервал, вважаються достовірними. Решта відкидаються, як ймовірні помилки методики.

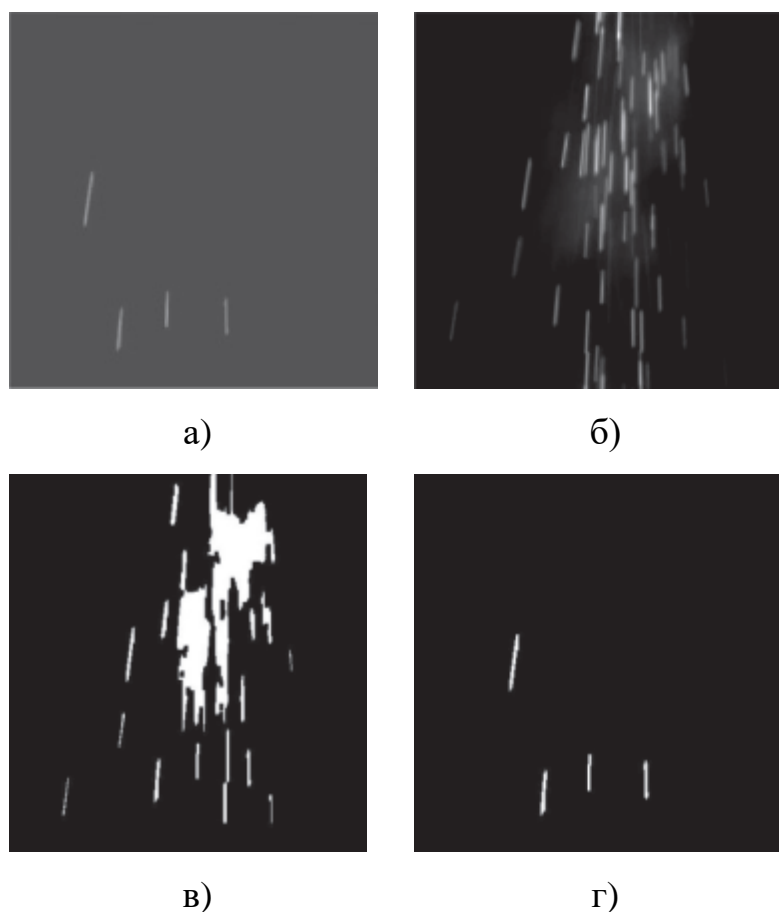


Рисунок 2.6 – Етапи обробки кадрів відеопотоку: а) – вихідне зображення; б) – бінарна маска; в) – маска з ймовірним и треками; г) – оброблене зображення з ідентифікованими треками.

Для знаходження температурного розподілу часток використовувався оригінальний підхід, суть якого полягає в реєстрації за допомогою фотоспектрометра сумарного випромінювання ансамблю частинок, які пролетіли вимірювальний об'єм за час експозиції приладу, з подальшим

відновленням температурного розподілу частинок математичним способом [125-128].

З урахуванням діапазону вимірюваних температур 1000-5000 К і «ефективної» довжини хвилі світлофільтру $\lambda_f = 575$ нм (світлофільтр SL-575-50) можна використовувати наближення Віна для опису спектральної щільності потоку випромінювання частинок.

На рис.2.7 зображені спектри випромінювання струменю напилення, зареєстрованих на відстанях від зрізу сопла $z = 10-130$ мм. У процесі вимірювання параметри оптоелектронного тракту фіксовані, а сигнал фотоелемента пропорційний енергії випромінювання частинок за час експозиції τ і залежить тільки від температури об'єкта, що візуються:

$$F(T) = K \cdot \varepsilon(T) \cdot \exp\left(-\frac{C'}{T}\right), \quad (2.3)$$

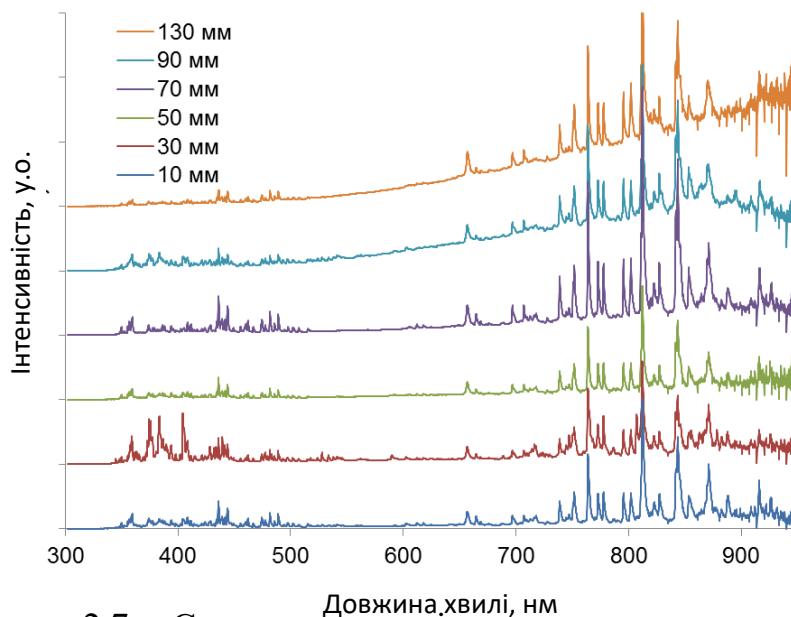


Рисунок 2.7 – Спектри випромінювання плазмового струменю напилення на різних відстанях від зрізу сопла.

де K - константа, що включає коефіцієнт оптоелектронного перетворення, $C' = (h \cdot c) / (k \cdot \lambda_f)$; c – швидкість світла; h , k - постійна Планка і Больцмана

відповідно; $\varepsilon(T) = \varepsilon(\lambda_\phi, T)$ – спектральна випромінювальна здатність матеріалу частинок на ефективній довжині хвилі λ_ϕ .

У процесі калібрування за зразковою температурної лампі ТРП-1100-2350 на основі (3) кожному значенню сигналу фотоелемента F можна зіставити температуру яскравості T_b і зберегти дані у вигляді таблиці:

$$(F_1, F_2, \dots, F_{255}) \Leftrightarrow (T_{b1}, T_{b2}, \dots, T_{b255}). \quad (2.4)$$

Позначимо F^H - сигнал, реєстрований за час експозиції τ фотоелементом датчика за умови непорушності частинки, а S^H - площа її зображення. Якщо за час спостереження температура частинки залишається постійною, то енергія теплового випромінювання, випущеного нею за рівні проміжки часу, буде однаковою. Припустимо, що фотоелементами, які пов'язані з внутрішньою областю треку площею S^{TP} , зареєстрований однорідний рівень сигналу. Тоді повинне виконуватися наступне співвідношення:

$$F^H \cdot S^H = F^{TP} \cdot S^{TP}. \quad (2.5)$$

Площа модельного зображення нерухомої частинки і її треку, відповідно, рівні:

$$S^H = \frac{\pi \cdot D^2}{4}; \quad S^{TP} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} + L \cdot D. \quad (2.6)$$

Введемо позначення температури яскравості T^{TP} , яка співвідноситься з рівнем сигналу F^{TP} по (3) і (4). Тоді на основі (3), (5), (6) температуру частинки можна визначити як:

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T^{TP}} + \frac{1}{C'} \left(\ln \varepsilon(T) - \ln \varepsilon \left(1 + \frac{4}{\pi} \cdot \frac{L}{D} \right) \right). \quad (2.7)$$

Формула (2.7) дозволяє встановити температуру рухомих об'єктів, а температурне калібрування тепловізійного сенсора здійснювати на нерухомому еталоні.

У процесі контролю за рівнем сигналу ідентифікованих треків і таблиці (4) визначається температура T^{TP} . Далі за допомогою параметрів треків L , D і формули (7) обчислюється термодинамічна температура частинок наплення за умови, що відома спектральна випромінювальна здатність матеріалу. В іншому

випадку визначається їх температура яскравості (при визначенні яскравості температури $\varepsilon = 1$). Далі, як і у випадку зі швидкістю, оцінюється довірчий інтервал для рівня значущості 0,05 і проводиться статистична фільтрація.

2.4. Методи дослідження властивостей матеріалів покриттів.

У даній роботі для виміру твердості використовували методи мікротвердості $H\mu$ і Вікерса HV [132], які відрізняються різними прикладеними навантаженнями. Вимір твердості покриттів проводили на приладі ПМТ-3 з урахуванням рекомендацій сформульованих в інструкції [133]. Вимір мікротвердості на оптичному мікроскопі POLIVAR із приставкою DORAMET-1000, при навантаженні 20-200 г. Для підрахунку середнього значення мікротвердості для кожного типу покриття були зроблені 10 вимірів, після яких здійснювали підрахунок середнього значення.

У випадку реєстрації значень твердості при безперервному нагріві в інтервалі температур 300...1200 К використовували термін «гаряча мікротвердість». Експерименти проводили у вакуумі при навантаженні 2,34 Н.

Для оцінки міцності зчеплення покриттів $\sigma_{сц}$ із основою використовували величину руйнівного напруження в композиції «покриття - основа» при нормальному відриві, визначену за методикою «конусного штифта» (рис.2.8) [134].

Тріботехнічні випробування покриттів проводили в умовах з обмеженим змащенням і без змащення по схемах «диск із покриттям - колодка (чавун СЧ-20, сталь 40Х, мідноазбестовий сплав, сталь 45)», «циліндр (чавун СЧНМД) - кільце (покриття)», «площина (Ст20 - після цементації, бронза, СЧ-20) - покриття»; «диск - площина» (методика Амслера), а також при зворотньо-поступальному русі з амплітудою 61 мм, $V = 0,023$ м/с, $P = 11$ МПа.

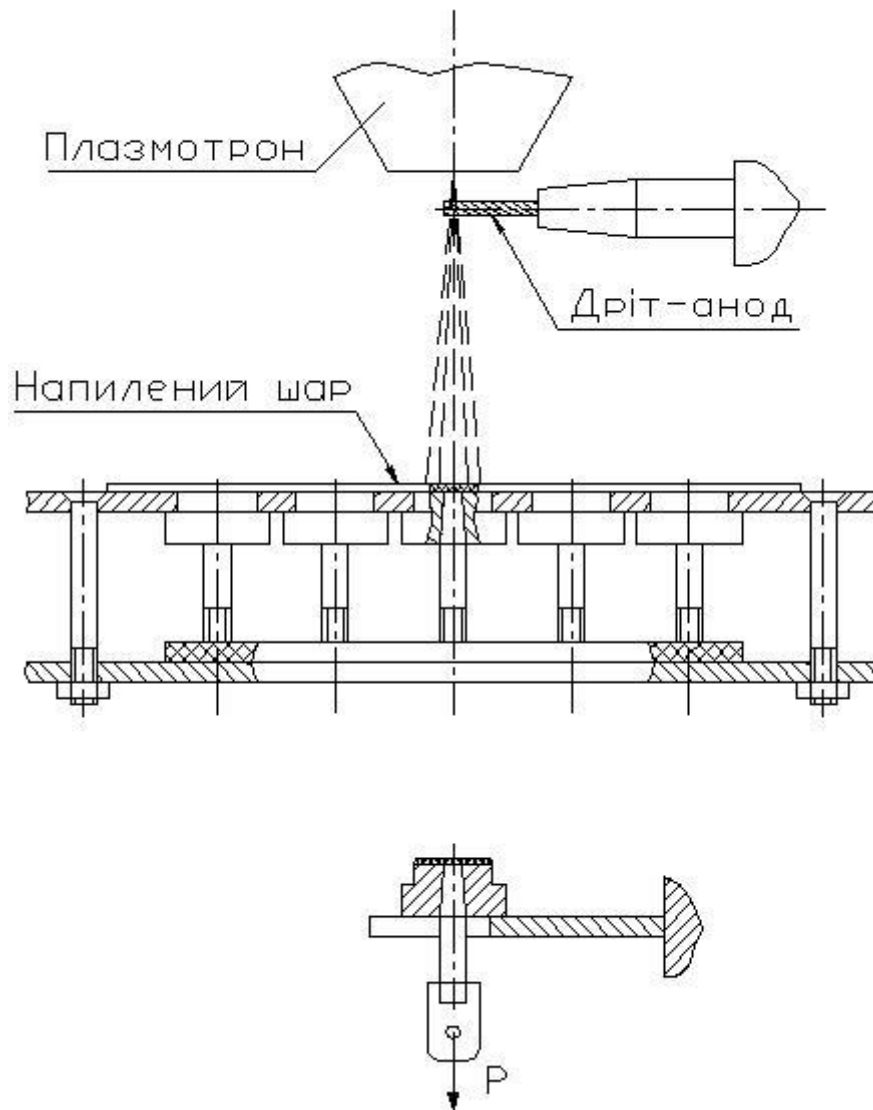


Рисунок 2.8 – Схема пристрою для визначення плазмових покриттів міцності зчеплення з основою.

Результати експериментів по дослідженню параметрів процесу нанесення покриттів і їхніх властивостей обробляли за допомогою методів математичної статистики. Погрішності вимірів оцінювали довірчим інтервалом діапазону значень досліджуваного параметра з імовірністю того, що істинність значення даної величини перебуває в названому довірчому інтервалі. Результати досліджень аналізували методом малого відбору на підставі 8 - 12 дослідів при довірчій імовірності 0,95 після виключення грубих помилок за допомогою критеріїв Стюдента і оцінки однорідності дисперсії за критеріями Кохрена і Бартлета [135].

Рентгеноструктурні дослідження проводили на дифрактометрах Дрон-2.0 і Дрон-3.0 в Fe_{α} , $Co_{K\alpha}$, $Cu_{K\alpha}$ - випромінюванні [136].

Металографічні дослідження покриттів здійснювали на оптичних мікроскопах МІМ-7, МІМ-8, Neophot-23 при збільшенні до $\times 1000$. Склад речовин для травлення і режими травлення полірованих зразків вибирали відповідно до рекомендацій [137].

Мікрорентгеноспектральний аналіз виконували на устаткуванні “Калибакс SX-50» з діаметром зонда 1 мкм, а також на рентгенівському мікроаналізаторі “Superprobe” при збільшенні до $\times 3600$. Спектральний аналіз покриттів проводили на квантометрах «Спектровак 1000» і ДФС-36. Також структурні й рентгенівські мікрозондові дослідження проводилися з використанням електронного мікроскопа CamScan-4 і вузла електронно-зондового аналізатора проб INCA. Рентгенівська зйомка не травлених зразків була виконана у відбитих електронах. У режимі цієї рентгенівської зйомки, світла (знебарвлена) фаза відповідає хімічним сполукам, які ґрунтуються на елементах з більшим атомним числом, а в темній фазі - елементам з малим атомним числом.

Вміст кисню в покриттях визначали на приладах RO-316 і TN-114 фірми ЛЕКО (США) методом відновлювального плавлення навішення проби в графітовому тиглі в потоці газу-носія шляхом реєстрації поглинання інфрачервоного випромінювання аналізованим газом.

Щільність покриттів визначали методом гідростатичного зважування згідно ГОСТ 18898-73, а пористість - металографічним способом на приладі ОМНИМЕТ (Англія) на ділянках мікрошліфів розміром 120×150 мкм. Визначення пор та неметалічних включень виконували шляхом застосування режиму темного поля та просочення шліфа барвником із флуоресцентними добавками. Щільність покриттів визначали із застосуванням програмно-апаратного комплексу для аналізу мікроструктури порошкових матеріалів, із застосуванням програмного комплексу «АМІС».

2.5. Висновки по розділу 2

1. Для досягнення мети і рішення завдань роботи використовували класичні та сучасні методи та методики з застосуванням сучасного аналітичного обладнання, та статистичну обробку даних що забезпечило високий рівень їх достовірності. Використання в складі дослідного стенду оригінального діагностичного комплексу дослідження процесу формування і дроблення рідких крапель в умовах плазмо-дугового напилювання дозволило візуалізувати сам процес з одночасною фіксацією швидкісних та температурних характеристик окремих частинок. Знаходження температурного розподілу частинок виконувалось за оригінальною методикою, шляхом реєстрації сумарного випромінювання ансамблю частинок за час експозиції фотоспектрометра, з подальшим відновленням температурного розподілу частинок шляхом математично-аналітичної обробки даних.
2. Створений дослідний лабораторний стенд з оригінальним вузлом розпилення плазмотроном модифікованої конструкції, діагностичним комплексом та комплексом оригінальних апаратурно-програмних засобів, що здійснюють автоматичну реєстрацію та обробку даних всіх основних параметрів процесу напилення дроту аноду.
3. Використані сучасний лабораторний стенд дослідний стенд та комбінація методів та обладнання для візуалізації процесу плазмо-дугового напилювання відносно основних параметрів роботи плазмотрону, дозволили підвищити точність температурних вимірювань, тим самим поліпшивши надійність і достовірність одержаних даних відносно аналогічних досліджень інших дослідників.

Розділ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ФІЗИЧНИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ ПЛАЗМО-ДУГОВОМУ РОЗПИЛЮВАННЮ ПЛАВКОГО ДРОТУ-АНОДУ

Для вирішення завдань та досягнення мети роботи необхідно було виконати математичне моделювання і експериментальні дослідження нагріву, плавлення та розпилення рухомого дроту-аноду. Математичне моделювання являло собою прогнозування результатів плазово-дугового розпилення дротів-анодів сталевих, виконане в певних діапазонах варіювання параметрів режимів. Надалі розрахункові результати перевірювалися експериментально.

В процесі експериментів використовували компактні дроти діаметром 1,2-1,6 мм із низьколегованих та нержавіючих сталей, алюмінію, міді, нікелю, ніхрому. Для виконання досліджень використовували вдосконалений плазмотрон із рухомим дротом-анодом на основі установки УН-126 (плазмоутворюючий газ – аргон). В даній конструкції по периферії плазмотрона через канали подавався кільцевий супутній повітряний потік, який охолоджує сопло та обтискає високотемпературний струмінь, що приводить до більш рівномірного розподілу температурних полів по радіусу плазового струменя. Враховуючи той факт, що окислення таких активних елементів, як алюміній та мідь у процесі плавлення, негативно впливає на процес розпилення супутній повітряний потік мав коаксіальне направлення плазовому струменю, у результаті чого конусоподібна форма плазового струменя змінювалась на циліндричну. Така форма струменю свідчить про вирівнювання тиску в зонах обох потоків. Такий технологічний прийом нівелює підмішування в плазму газів повітря до якого обрані матеріали дротових анодів є чутливими.

Процес плавлення та розпилення частинок витратного дроту-аноду фіксувався обладнанням діагностичного комплексу, що входив в автоматизований дослідний лабораторний стенд опис якого міститься в розділі 2 роботи.

3.1. Схема процесу і постановка задач газодинаміки та теплопереносу в умовах плазмо-дугового нагріву дроту-аноду.

Для визначення особливостей поведінки двофазного плазмового струменю і прогнозування технологічних режимів плазмо-дугового наплення плавким дротом-анодом раціонально використовувати попереднє фізико-математичного моделювання з врахуванням взаємодії електричної дуги, плазмового струменя та потоків газу, що його обдувають.

Схема процесу плазмо-дугового наплення представлена на рис. 3.1 Дуга постійного струму горить між тугоплавким водоохолоджуваним катодом і дротом, що проводить струм, розташованим за зрізом сопла плазмотрону. Робочий (плазмоутворюючий) газ, що надходить через сопло, нагрівається електричною дугою і стікає з сопла у вигляді плазмового струменя. Відкрита ділянка розряду (поза плазмoформуючим каналом) обдувається потоком захисного газу, який подається в загальному випадку під кутом до осі плазмового струменя, тиск у зовнішньому середовищі атмосферний.

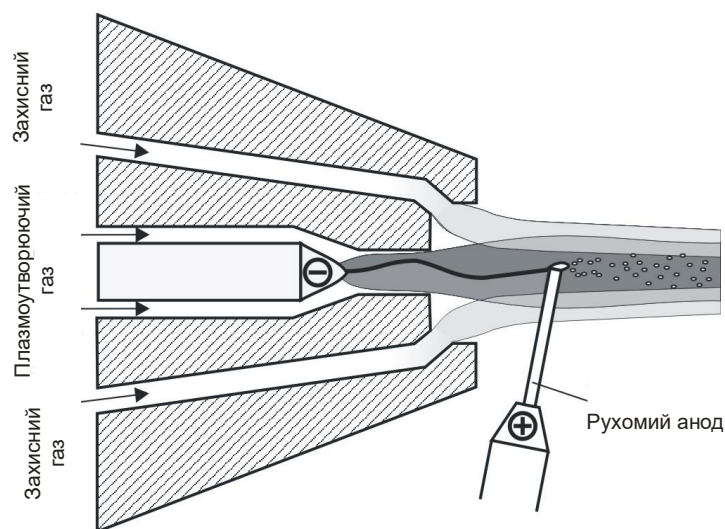


Рисунок 3.1 – Схема процесу плазмо-дугового наплення.

При побудові фізико-математичної моделі даного розряду вважали, що тугоплавкий катод утворює разом зі стінкою каналу кільцеве електродне сопло радіусу R_c (рис. 3.2), через яке подається плазмоутворюючий газ з витратою G_1 і

протікає весь струм дуги I . За початок розрахункової ділянки приймали площину $z = 0$, вважаючи, що вона знаходиться на деякій відстані від робочого торця катоду. Що дозволило на першому етапі виключити з розгляду прикатодні процеси, та вважати потік дугової плазми в цій площині осісиметричним і одновимірним у напрямку осі OZ , тим самим, коректно задати вхідні граничні умови. Вважається, що захисний газ з витратою G_2 подається через кільцевий канал $R_1 \dots R_2$ осісиметричним потоком під кутом α до осі симетрії системи. Анодний дріт розташований на відстані Z_2 від початку розрахункової області. Припускається, що в області анодної прив'язки струм дуги плавно зменшується і далі (при $z > Z_2$) відбувається без струмовий інерційний рух газу.

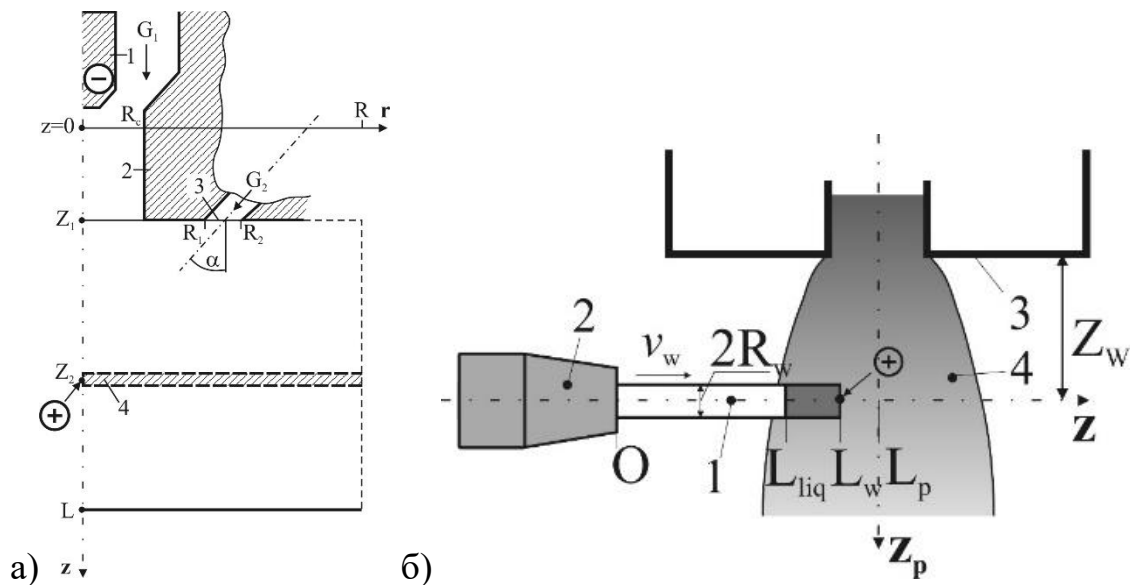


Рисунок 3.2 – Схеми розрахункової області: а) – генерація плазми (без дроту), 1 – катод; 2 – сопло плазмотрона, 3 – канал подачі газу, що обдуває, 4 – дріт-анод; б) – оплавлення дроту, 1 – дріт, 2 – мундштук, 3 – сопло плазмотрона, 4 – плазмовий струмінь.

Враховуючи, що в плазмотронах даного типу здійснюється прокачування великих кількостей плазмоутворюючого газу, в них, як правило, реалізується турбулентний режим течії плазми. Цьому також сприяє введення в відкриту область дуги потоку захисного газу і його взаємодія з основним плазмовим

струменем. У цьому випадку параметри плазмового потоку змінюються випадковим чином у часі навкруг своїх середніх значень, причому істотний вплив на характер турбулентності можуть справляти такі фактори, як власне магнітне поле розряду, а також джоулеві тепловиділення.

При теоретичному аналізі процесів нагрівання та руху газу при плазмово-дуговому розпиленні дроту-аноду розрахункову ділянку можна умовно розділити на три області (рис. 3.2):

1 – область течії дугової плазми всередині сопла плазмотрону ($0 \leq z < Z_1$);

2 – область зовнішньої течії дугової плазми і її взаємодії з потоком захисного газу ($Z_1 \leq z \leq Z_2$);

3 – область інерційного руху без струмової плазми ($z > Z_2$).

3.2. Фізико-математичне моделювання плазмового струменя без диспергованих часток.

Для математичного опису процесів, які протікають при формуванні і витіканні плазмового струменя з сопла плазмотрону, приймали такі припущення:

- плазмова система, що розглядається, має циліндричну симетрію, а процеси, які відбуваються, вважаються стаціонарними;

- захисний газ подається осесиметричним потоком через кільцевий канал;

- течія захисного газу в каналі вважається ламінарною і описується модельними залежностями;

- плазма знаходиться в стані локальної термодинамічної рівноваги, власне випромінювання плазми – об'ємне;

- основним механізмом нагрівання плазми є джоулеві тепловиділення (роботою сил тиску і в'язкою дисипацією можна знехтувати), а перенесення енергії в стовпі відбувається за рахунок теплопровідності та конвекції (природна конвекція в рахунок не приймається);

- течія плазми в'язка, дозвукова, режим течії турбулентний;

- зовнішні магнітні поля відсутні.

При побудові фізико-математичної моделі вважали, що тугоплавкий катод утворює разом зі стінкою каналу кільцеве електродне сопло радіусу R_c (рис.3.2),

через яке подається плазмоутворюючий газ з витратою $G_1 = 2\pi \int_0^{R_c} \rho u r dr$ і протікає

весь струм дуги $I = 2\pi E \int_0^{R_\sigma(z)} \sigma r dr$. За початок розрахункової ділянки прийняли

площину $z = 0$, яка знаходиться на певній відстані від робочого торця катоду. Це дозволяє вважати потік дугової плазми в цій площині осісиметричним і одновимірним у напрямку осі OZ . Захисний газ з витратою G_2 подається через кільцевий канал $R_1 \dots R_2$ осісиметричним потоком під кутом α до осі симетрії системи. Анодний дріт розташований на відстані Z_2 від початку розрахункової області. Припускається, що в області анодної прив'язки струм дуги плавно зменшується і далі (при $z > Z_2$) відбувається безструмовий інерційний рух газу.

Система магнітогідродинамічних (МГД) рівнянь у наближенні турбулентного граничного шару для середніх по часу значень температури і швидкості плазми [125-128]:

$$\frac{\partial}{\partial z}(\rho u) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v) = 0; \quad (3.1)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial z} + \bar{v} \frac{\partial u}{\partial r} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \bar{\eta} \frac{\partial u}{\partial r} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(p + \mu_0 \frac{H^2}{2} \right); \quad (3.2)$$

$$\rho C_p \left(u \frac{\partial T}{\partial z} + v \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \bar{\chi} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \sigma E^2 - \psi. \quad (3.3)$$

Тут: T – середня температура плазми; $\bar{v} = (\rho v + \rho' v') / \rho$, де v – середня радіальна швидкість, ρ – середня густина плазми, ρ' і v' – пульсації густини і радіальної швидкості; u – середня аксіальна швидкість плазми; p – тиск, який в межах плазмoформуючого каналу визначається як $p = p_{ext} - \int_z^{Z_1} \frac{dp_c}{dz} dz + \mu_0 E \int_r^{R_c} \sigma H dr$, а на

відкритій ділянці розряду ($z > Z_1$) $p = p_{ext} + \mu_0 E \int_r^{R_c} \sigma H dr$; $C_p(T, p)$ – питома

теплоємність при постійному тиску; σ – питома електропровідність плазми; $\psi(T,p)$ – об’ємна густина потужності власного випромінювання; $\bar{\eta}$ і $\bar{\chi}$ – повні коефіцієнти динамічної в’язкості та теплопровідності плазми, що являють собою суми молекулярної і турбулентної в’язкості і теплопровідності відповідно; E – осьова складова напруженості електричного поля; μ_0 – універсальна магнітна постійна; $H = \frac{1}{r} E \int_0^r \sigma r dr$ – азимутальна складова магнітного поля струму дуги.

Система МГД рівнянь разом зі супутніми співвідношеннями, k - ε моделлю турбулентності і граничними умовами повністю визначає теплові та газодинамічні характеристики турбулентного потоку плазми, як на дуговій, так і на інерційній ділянці течії. Ці рівняння складають основу уніфікованої математичної моделі, придатної для розрахунку просторових розподілів температури і швидкості дозвукових турбулентних плазмових потоків, які генеруються у нашому випадку плазмотроном з частково відкритою дугою при наявності супутнього газового потоку, який обдуває плазмову дугу.

За допомогою розробленої фізико-математичної моделі та програмного забезпечення для її комп’ютерної реалізації був проведений чисельний аналіз характеристик дозвукової турбулентної течії аргонної плазми, що генерується плазмотроном із плавким дротом-анодом при різних режимах його роботи (рис.3.3-3.6). Також встановлено, що підвищення напруженості електричного поля в межах плазмоформуєчого каналу є наслідком того, що за обраних значень радіуса каналу, струму дуги та витрат плазмоутворюючого газу напруженість поля поблизу катода є меншою, ніж в асимптотичній області каналу.

В розглянутому діапазоні струмів розрахункова вольтамперна характеристика стовпа дуги є зростаючою, причому швидкість зростання U зі збільшенням I істотно залежить від витрати плазмоутворюючого газу (рис.3.7). Встановлено розподіли температури і відносної концентрації аргону в плазмовому струмені, що витікає в повітряний простір без обдування і з ним (рис.3.8-3.9).

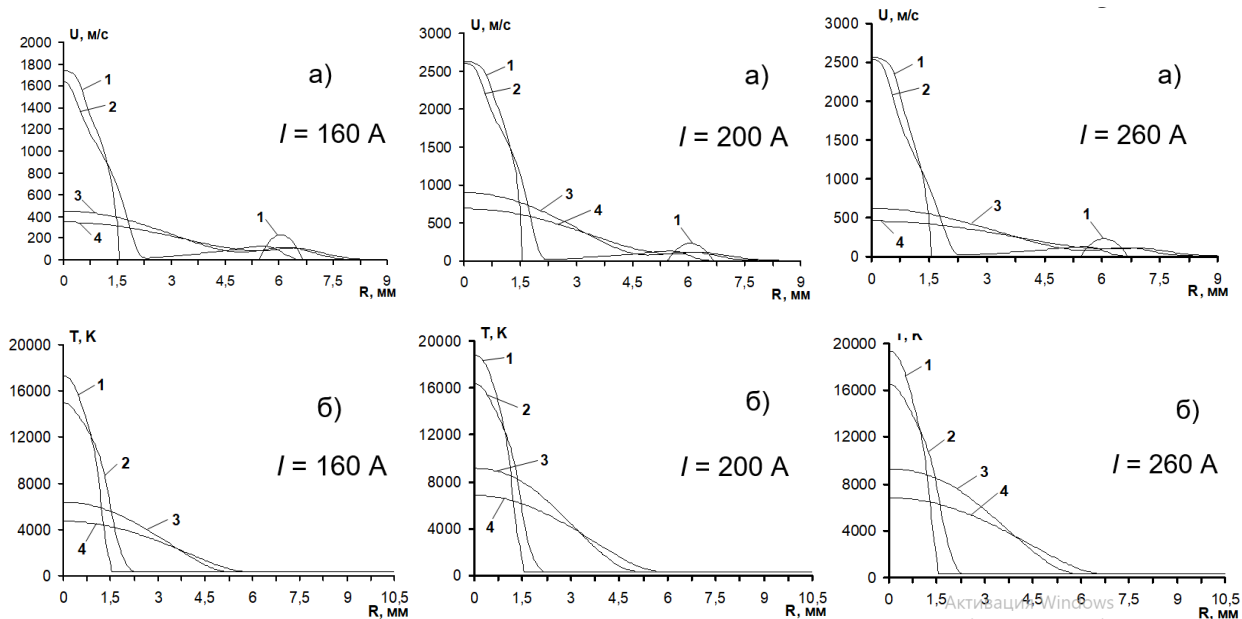


Рисунок 3.3 – Радіальні розподіли швидкості (а) і температури (б) плазми при $G_1 = 1$ м³/год і $G_2 = 20$ м³/год в областях: 1 – зріз сопла ($z=3$ мм); 2 – область дроту-аноду ($z=9,3$ мм); 3 – $z = 150$ мм; 4 – $z = 250$ мм.

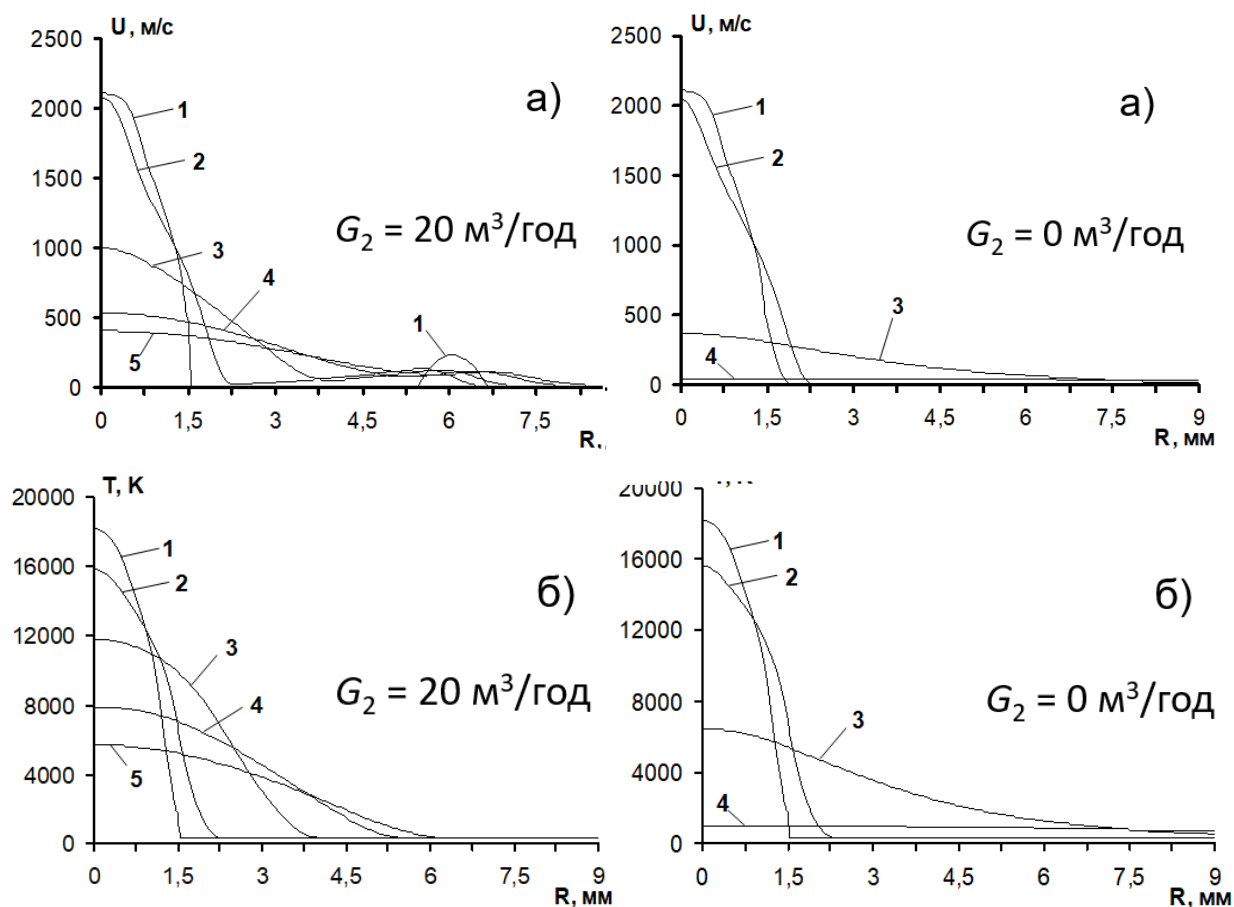


Рисунок 3.4 – Радіальні розподіли швидкості (а) і температури (б) плазми при $I = 200$ А і $G_1 = 1$ м³/год в областях: 1 – зріз сопла ($z=3$ мм); 2 – область дроту-аноду ($z=9,3$ мм); 3 – $z = 150$ мм; 4 – $z = 250$ мм.

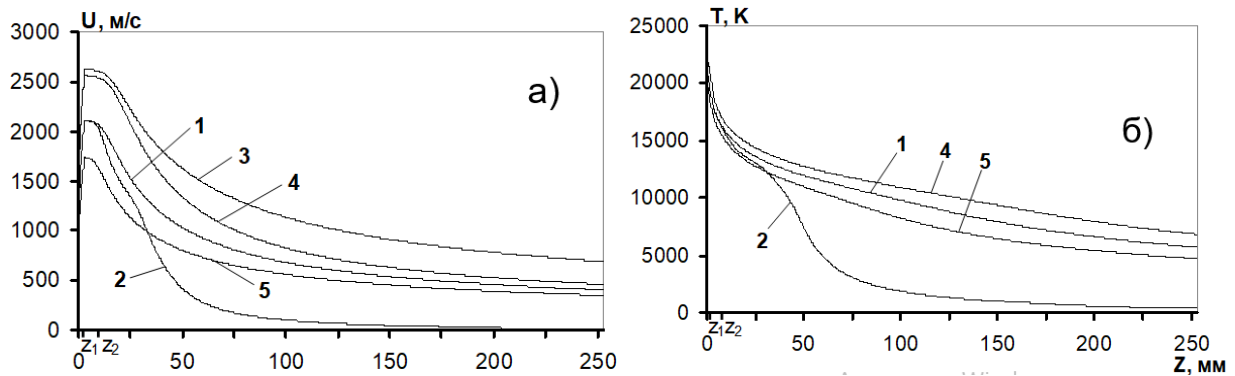


Рисунок 3.5 – Подовжні зміни швидкості (а) і температури (б) плазми на вісі струменя за різних режимів роботи плазмотрона: 1 – $I = 200$ А, $G_1 = 1$ м³/год, $G_2 = 20$ м³/год; 2 – $I = 200$ А, $G_1 = 1$ м³/год, $G_2 = 0$ м³/год; 3 – $I = 200$ А, $G_1 = 1,5$ м³/год, $G_2 = 20$ м³/год; 4 – $I = 260$ А, $G_1 = 1$ м³/год, $G_2 = 20$ м³/год; 5 – $I = 160$ А, $G_1 = 1$ м³/год, $G_2 = 20$ м³/год.

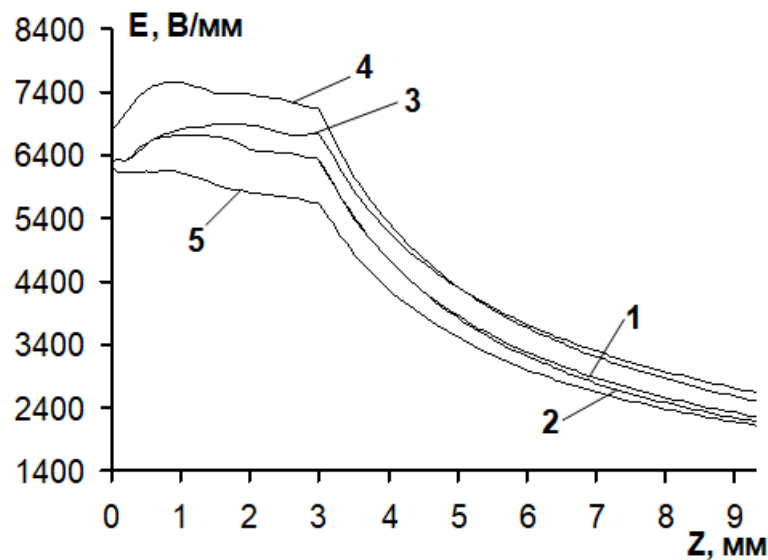


Рисунок 3.6 – Подовжня зміна напруженості електричного поля при різних режимах роботи плазмотрона: 1 - $I = 200$ А, $G_1 = 1$ м³/год, $G_2 = 20$ м³/год; 2 - $I = 200$ А, $G_1 = 1$ м³/год, $G_2 = 0$ м³/год; 3 - $I = 200$ А, $G_1 = 1,5$ м³/год, $G_2 = 20$ м³/год; 4 - $I = 260$ А, $G_1 = 1$ м³/год, $G_2 = 20$ м³/год; 5 - $I = 160$ А, $G_1 = 1$ м³/год, $G_2 = 20$ м³/год.

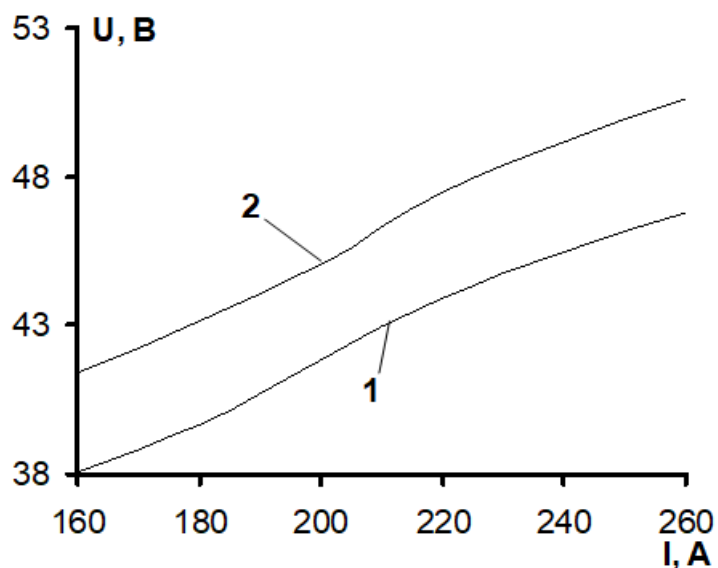


Рисунок 3.7 – Вольт-амперна характеристика стовпа дуги при різних витратах плазмоутворюючого газу: 1 – $G_1 = 1 \text{ м}^3/\text{год}$; 2 – $G_1 = 1,5 \text{ м}^3/\text{год}$.

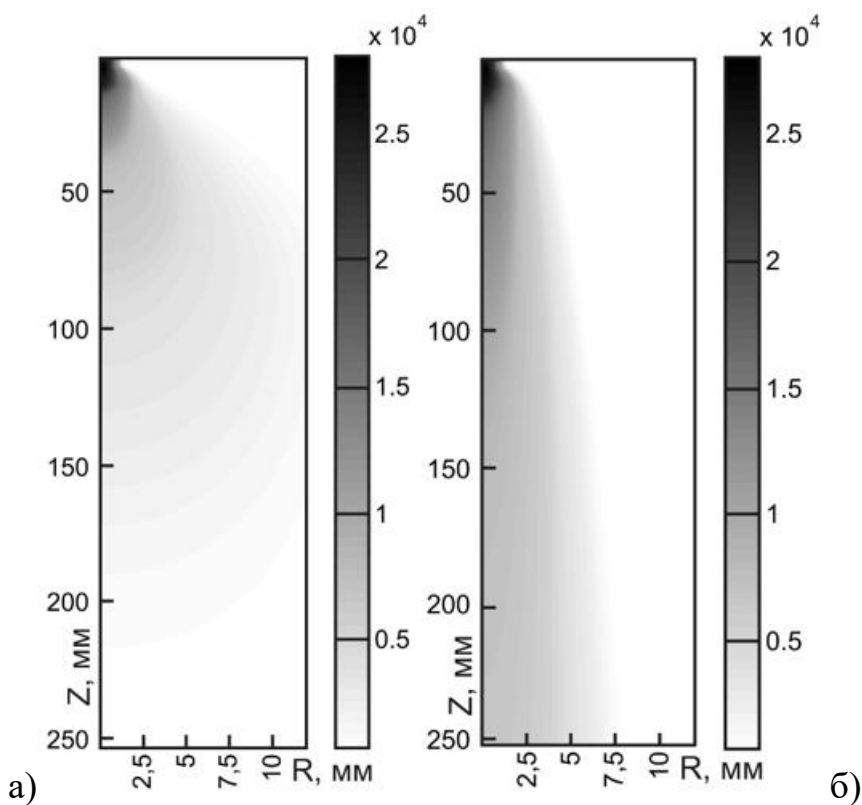


Рисунок 3.8 – Розподіл температури аргонного плазмового струменя, що витікає в повітряний простір: а) – без обдування, б) – з обдуванням.

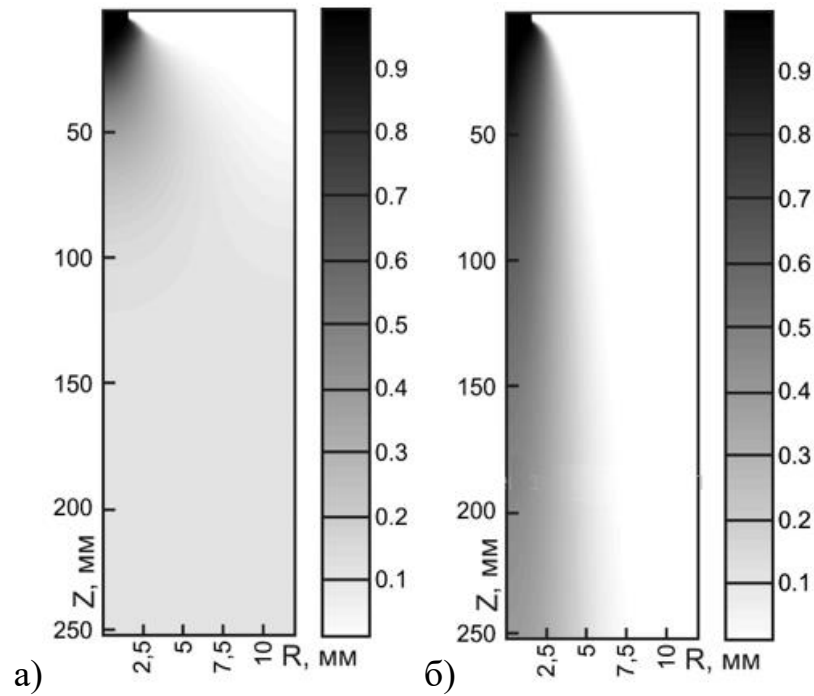


Рисунок 3.9 – Розподіл відносної концентрації аргону в плазмовому струмені, що витікає в повітряний простір: а) – без обдування, б) – з обдуванням.

3.3. Фізико-математичне моделювання плазмового струменя з диспергованими частками.

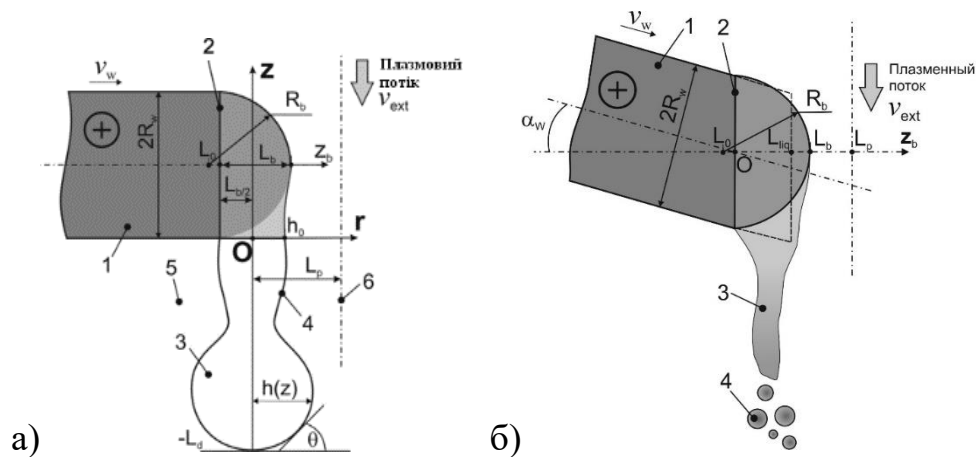


Рисунок 3.10 – Схема формування рідкого прошарку на торці струмопровідного дроту при плазмово-дуговому напиленні покриттів: 1 – струмопровідний дріт; 2 – рідкий прошарок; 3 – цівка розплавленого матеріалу дроту; 4 – напилюванні частки.

Течія цівки розплаву з кінця дроту-аноду із достатньою точністю описується за допомогою квазіодномірної системи рівнянь Нав'є-Стокса, записаної з урахуванням сили в'язкого впливу на розплав з боку плазмового потоку (рис.3.10) [125-128]:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \cdot \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_w} \frac{\partial p}{\partial z} + 3v_w \frac{1}{h^2} \frac{\partial}{\partial z} \left(h^2 \frac{\partial v}{\partial z} \right) - \frac{2 \cdot \tau_p(v)}{h \cdot \rho_w}, \quad -L_d < z < 0, \quad \frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial(vF)}{\partial z} = 0, \quad (3.4)$$

де $v=v(z,t)$ – аксіальна компонента швидкості течії розплаву; $p = 2\sigma K + p_{ext}$ – капілярний тиск; $K = 0,5(K_1 + K_2)$, $K_1 = d\theta/ds$, $K_2 = h^{-1} \sin \theta$, $\frac{dz}{ds} = \sin \theta$, $\frac{dh}{ds} = \cos \theta$; $h=h(z,t)$ – радіус поперечного перерізу струменя; $F(z,t) = \pi h^2(z,t)$ – площа поперечного

перерізу струменя; $\tau_p(v) = \frac{\bar{v}_{ext}^2(\tilde{v}_m)}{\left(\frac{1}{kar} \cdot \ln(Ey^+)\right)^2} \cdot \rho_p = \frac{\bar{v}_{ext}^2(\tilde{v}_m) \cdot \rho_p}{396,71}$ – напруження тертя в плазмі на обтічній поверхні; ρ_w , u_w – щільність і кінематична в'язкість матеріалу дроту при температурі плавлення; L_d – довжина струменя; $\bar{v}_{ext}(\tilde{v}_m) = v_{ext} - \tilde{v}_m$ – швидкість течії незбуреного струменя плазми поблизу торця дроту v_{ext} відносно швидкості течії розплаву \tilde{v}_m , ρ_p – щільність плазми; $kar \approx 0,41$ – постійна Кармана; $E=8,8$ – ступінь шорсткості стінки; $y^+=400$. Поставлена задача була розв'язана чисельно, методом кінцевих різниць. Отримані в результаті наведені на рис.3.11-3.14.

На рис.3.11 показано прогноз подрібнення крупних крапель ($\sim \varnothing 600 \dots 750$ мкм), які відриваються з розплавленого кінця дроту-аноду, на дрібніші ($\sim \varnothing 100 \dots 150$ мкм) при підвищенні їхньої температури з ~ 2200 К до ~ 2400 К при нагріві у плазмовому струменю. На рис.3.12 показано, що при підвищенні швидкості подачі дроту на середній діаметр формованих крапель може дещо зменшуватися або лишатися приблизно на одному рівні, у той час, коли період їх зриву експоненційно зменшується. Подібним чином зменшується товщина утримуваного на торці прошарку рідкого металу дроту-аноду із збільшенням швидкості його подачі (рис.3.13). Розмір часток розпиленого дроту-аноду на дистанції напилювання 150 мм переважно становить 40...150 мкм (рис.3.14).

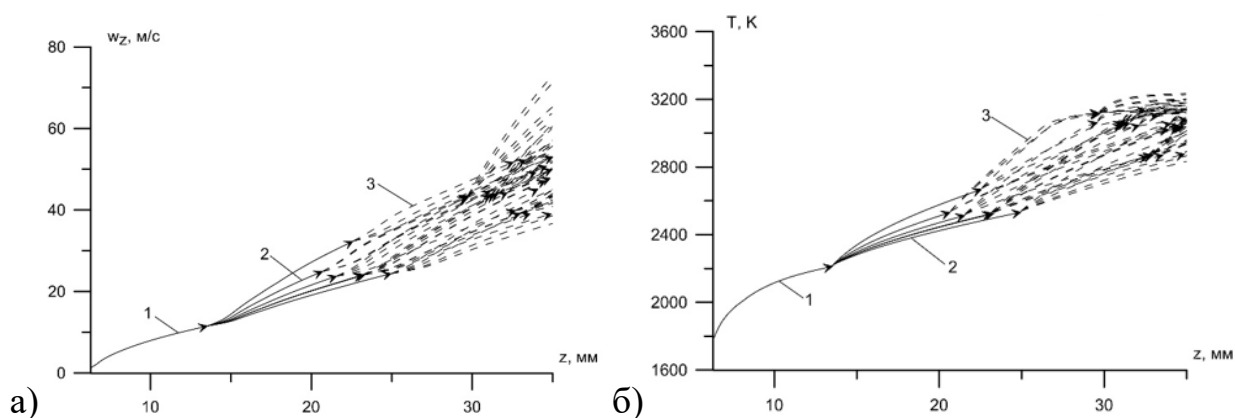


Рисунок 3.11 – Зміна швидкості руху (а) і середньої температури (б) вихідної розплавленої частинки, а також її фрагментів, що утворилися в результаті дроблення, при русі вздовж дистанції напилювання: 1 - вихідна крапля ($w_0 = 1,31$ м/с, $d_0 = 670$ мкм); 2 - фрагменти вихідної краплі; 3 - вторинні фрагменти, утворені при наступних дробленнях.

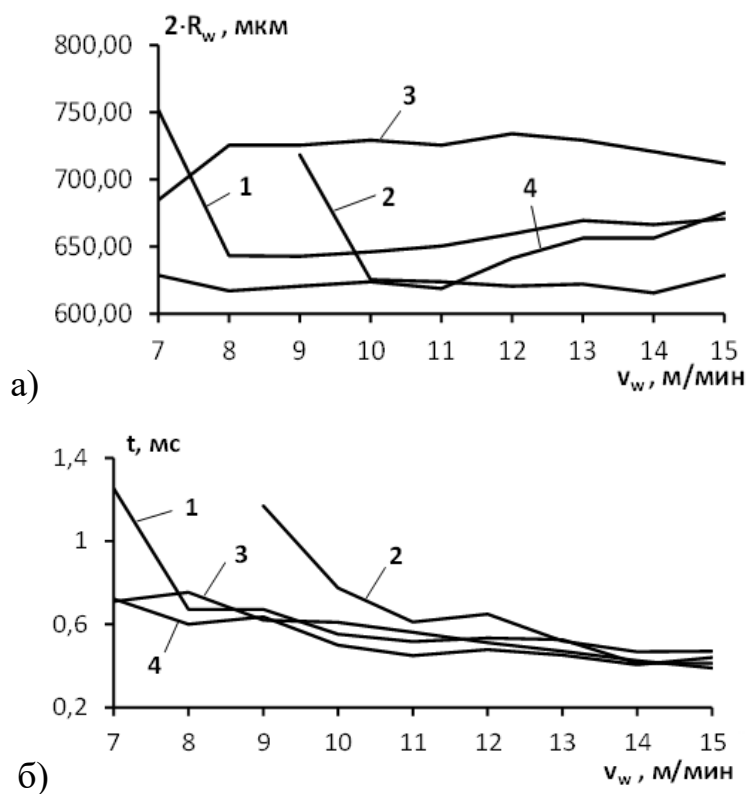


Рисунок 3.12 – Вплив швидкості подачі дроту на середній діаметр (а) і період зриву (б) формованих крапель: 1 – діаметр дроту 1,4, 2 – 1,2, 3 – 1,6 мм, струм дуги 200 А; 4 – діаметр дроту 1,4 мм, струм дуги 240А.

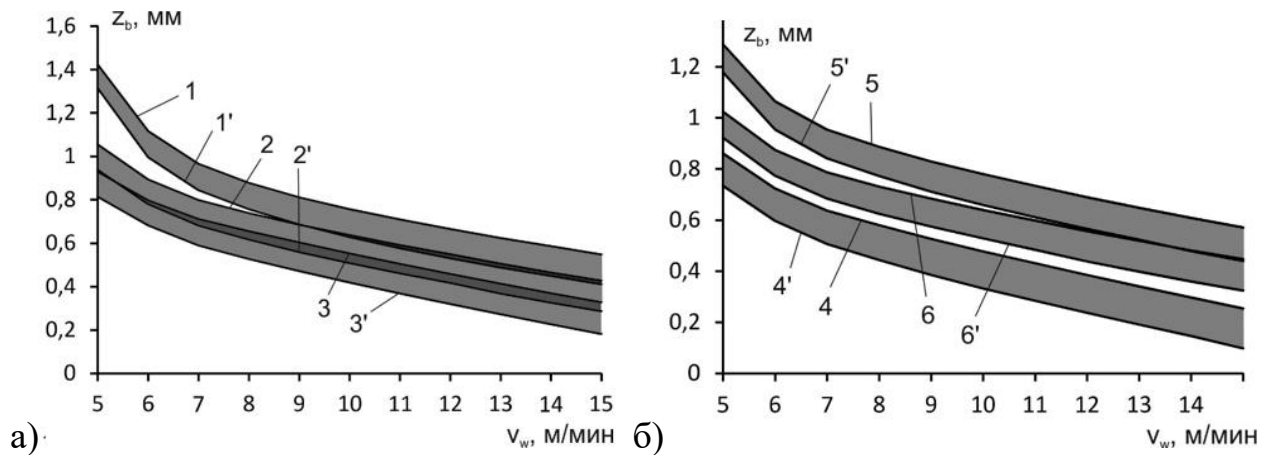


Рисунок 3.13 – Вплив швидкості подачі дроту на положення щодо осі плазмового струменя L_p (1-6) і товщину утримуваного на торці рідкого прошарку $L_p - L_b$ (1'-6') при різних параметрах режиму напильнення: 1, 1'- дріт $\varnothing 1,2$ мм; 2, 2'- $\varnothing 1,4$ мм; 3, 3' - $\varnothing 1,6$ мм; 4, 4'- струм дуги 160 А, 5, 5' - 240 А; 6, 6'- витрати Ar $1,5 \text{ м}^3/\text{год}$.

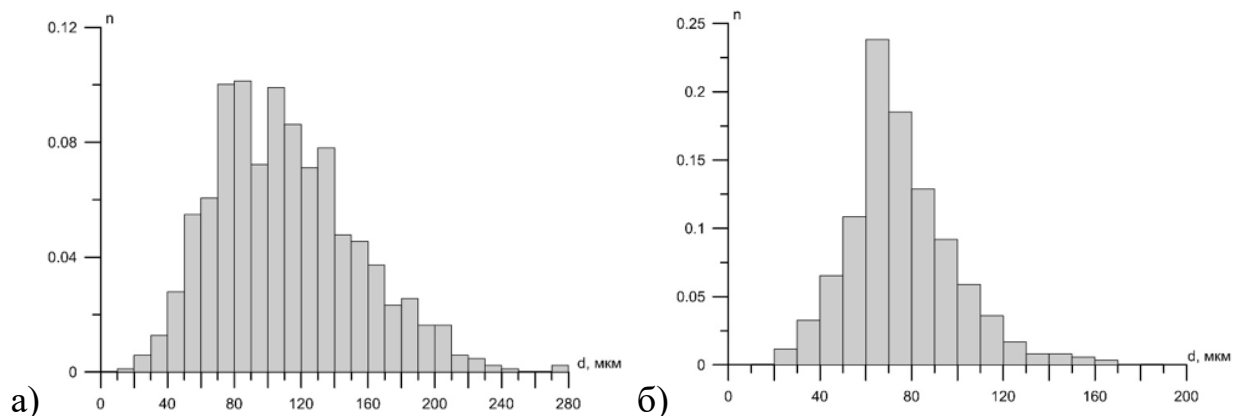


Рисунок 3.14 – Розподіл часток, утворених при дробленні зірваної з кінця розпилюваного дроту краплі, за діаметрами на дистанції напильовання 150 мм: а) - $d_0 = 755 \text{ мкм}$, $w_0 = 0,75 \text{ м/с}$; б) - $d_0 = 670 \text{ мкм}$, $w_0 = 1,31 \text{ м/с}$.

3.4. Експериментальні дослідження нагріву, плавлення та розпилення рухомого дроту-аноду.

Створений оригінальний лабораторний стенд дозволив провести дослідження візуалізації процесу формування розплаву і зриву крапель з кінця дроту, що розпилюється, а також рух і дроблення частинок на початковій стадії формування струменя напильнення (див. рис.2.4).

Початком формуванні краплі розплаву, що переноситься плазмо-газовим струменем і формує покриття, є процес нагріву та плавлення дроту-аноду під впливом виникнення дугового розряду та нагрітого плазмового струменю. Тобто, диспергування дроту-аноду при напиленні – складний комплексний процес, що включає в себе нагрівання і плавлення дроту, утворення на його робочому торці рідкої плівки, захоплення розплавленого матеріалу потоком плазми, який приводить до формування струменевої течії і його розпаду на краплі – дисперсні частинки матеріалу, що напилюється.

Проведені за допомогою створеного дослідного стенду спостереження показали, що при плазмо-дуговому напилюванні можуть існувати три типи течії і розпаду струменя розплавленого металу дроту-аноду: струменева течія металу, формування близьких за розміром крапель, формування крапель розплаву диференційованого розміру.

Одержані картини візуалізації плавлення формування крапель, зафіксували наявність всіх трьох стадій формування крапель при плазмо-дуговому напилюванні. Типову картину формування краплі в тоці плазмового струменю показано на рис.3.15. Одержані картини візуалізації стадій формування крапель при плазмо-дуговому напилюванні збігаються з сучасними уявленнями про процеси плавлення і розпилення крапель металу в середовищі високоенергетичних потоків плазми. Цінність одержаних таких даних представляється в їх застосуванні як для порівняння кількісних результатів моделювання з експериментальними даними, так і якісних, пов'язаних з особливостями протікання фізичних процесів при плазмо-дуговому дротовому напилюванні.

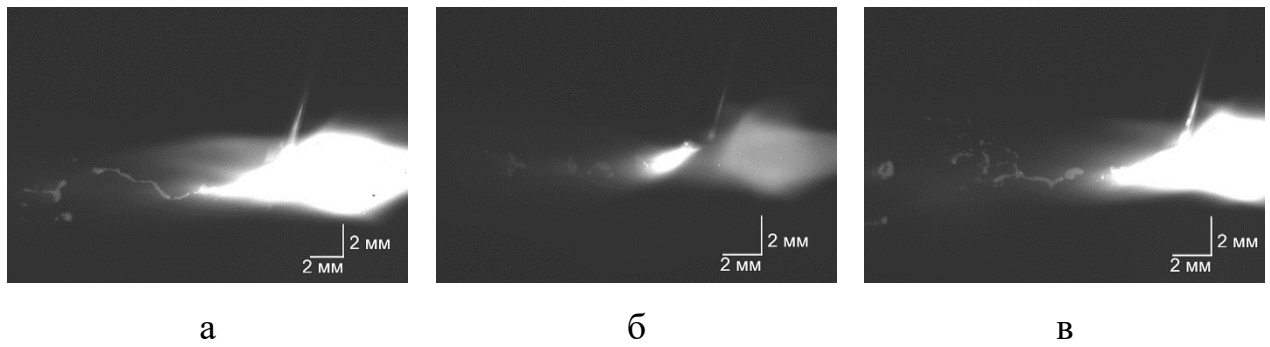


Рисунок 3.15 – Картина візуалізації стадій формування і зриву крапель з кінця струмопровідного дроту: а) – струменева течія металу, б) – формування однорідних крапель, в) – формування крапель різного фракційного розміру.

Аналіз знімків високошвидкісної зйомки показує, що оптимальному режиму наплення компактного сталевого дроту-аноду відповідає такий режим, за якого утворений на кінці напилюваного дроту розплав витягується в струмінь довжиною 3-4 мм (рис.3.15,б), і з якого потім зриваються практично однакові за розміром краплі діаметром 650-700 мкм. При перехідних режимах роботи плазмової установки (включення, настройка струму дуги, витрати газу або швидкості подачі дроту) спостерігається струменева течія розплавленого металу без дроблення її на краплі, як показано на рис.3.15(а), де довжина струменю становить 11-12 мм. В третьому режимі (рис.3.15,в), розпилення відбувається з формуванням крапель, різних фракційних розмірів, цей режим спостерігається при збільшеній швидкості подачі дроту. У цьому випадку відбуваються періодичні наростання і зрив струменів металічного розплаву. Причому зрив великих крапель (~900 мкм і більше) супроводжується формуванням більш дрібних крапель-сателітів (~100 мкм).

Відповідно до наведених в розділі 3 розрахункових даних процесу дроблення розплавлених крапель в плазмовому потоці при плазмо-дуговому напиленні здійснюється множинне дроблення частинок і їхніх фрагментів, що рухаються в плазмовому струмені. Зокрема, з вихідних крапель діаметром 670...755 мкм на дистанції напилення 150 мм в результаті багаторазового подрібнення формується близько 200...300 фрагментів із середнім діаметром

90...110 мкм. Так, можна виділити дві найбільш характерні ділянки дроблення рідких частинок і їх фрагментів при напилюванні. На ділянці поблизу зрізу сопла плазмотрона, який характеризується високими значеннями швидкості та температури плазми і має при розглянутому режимі напилення довжину близько 60 мм, здійснюється найбільш інтенсивне дроблення частинок. На другій ділянці (на відстані більше 60 мм) за рахунок зменшення (в результаті дроблення) розмірів частинок, а також зниження відносної швидкості плазми і частинок в міру віддалення від зрізу сопла плазмотрона, змінюються умови їх обтікання. При цьому, розплавлені частинки відчують плавне наростання сили аеродинамічного опору за рахунок зміни форми частинок, що, після закінчення певного часу, також може призводити до їх руйнування. Дроблення частинок практично припиняється на відстані близько 120 мм від зрізу сопла плазмотрона, оскільки при відповідних умовах обтікання час розвитку процесів деформації і руйнування частинок стає порівнянним або перевищує час досягнення поверхні частинками, що напилюються. Отримані шляхом обчислювального експерименту результати (розділ 3) добре узгоджуються з експериментальними даними, згідно з якими процес активного дроблення крапель відбувається на відстані до 30 мм від кінця дроту (40 мм від зрізу сопла плазмотрона).

Отримані експериментальні результати показують, що практично відразу після зриву з кінця дроту первинні краплі починають інтенсивно дробитися, цей процес проходить в області 50-60 мм від кінця розпилюваного дроту. При цьому, в умовах плазмо-дугового напилення характерні наступні типи дроблення крапель (рис.3.16): на кілька великих крапель, дроблення по типу «парашут» і «парашут» зі струмком. Зокрема, на рис.3.16(а) відображено момент, що передуює дробленню великої краплі на дві більш дрібні частини. На рис.3.16(б) зафіксовано момент розльоту частинок великої краплі при її дробленні по типу «парашут»: формується набір дрібних частинок при руйнуванні краплі.

Експериментальне дослідження розмірів частинок крапель, при розпиленні дротових анодів виконували шляхом їх розпилення в контейнер з водою на дистанції 200 мм від сопла плазмотрона. Отриманий порошок в

подальшому піддавали аналізу на лазерно-дифракційному аналізаторі порошоків LS13 320 (Beckman Coulter, США). На рис.3.17 представлений типовий результат фракційного розподілу розміру частинок одержаний при розпиленні дроту Ст70. Фракційний розподіл включає дуже широкий діапазон розмірів – від 400 нм до 400 мкм, що пояснюється активним дробленням і випаровуванням частинок розплаву на початковому етапі в області формування плазмового струменя.

Переважає кількість частинок має розміри менше 2-3 мкм, але їх масова частка до загальної маси розпиленого матеріалу надзвичайно мала. Основну масу частинок матеріалу, що формують покриття, представляють краплі розплаву розміром 50-400 мкм. Сумарна площа поверхні частинок рівномірно розподілена серед крапель з розмірами від 500 нм до 200 мкм, тобто при дослідженні струменю речовини до загального спектру теплового випромінювання частинок основний внесок роблять частинки дрібних фракцій, що мають найбільш високі температури.

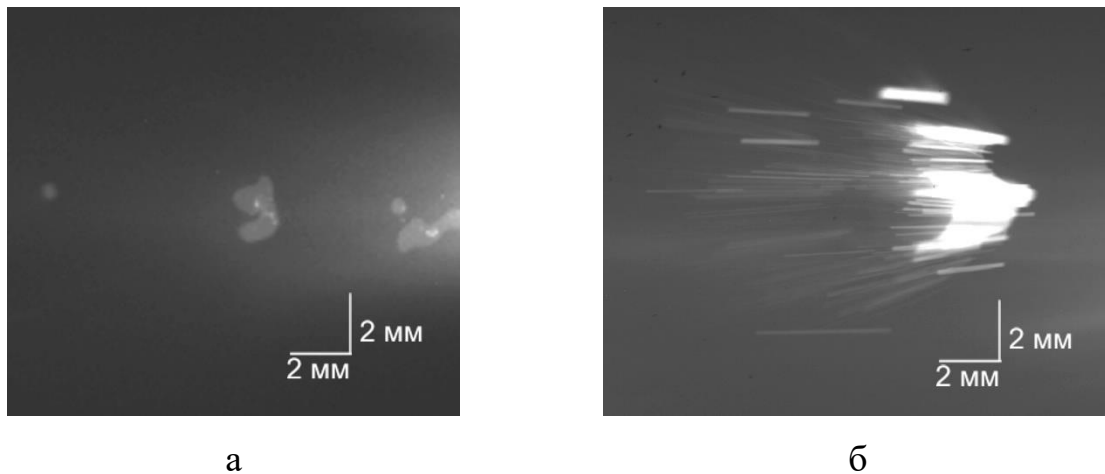


Рисунок 3.16 – Дроблення крапель розплавленого металу в тоці плазми: а) – дроблення на кілька великих крапель, б) – дроблення по типу «парашут».

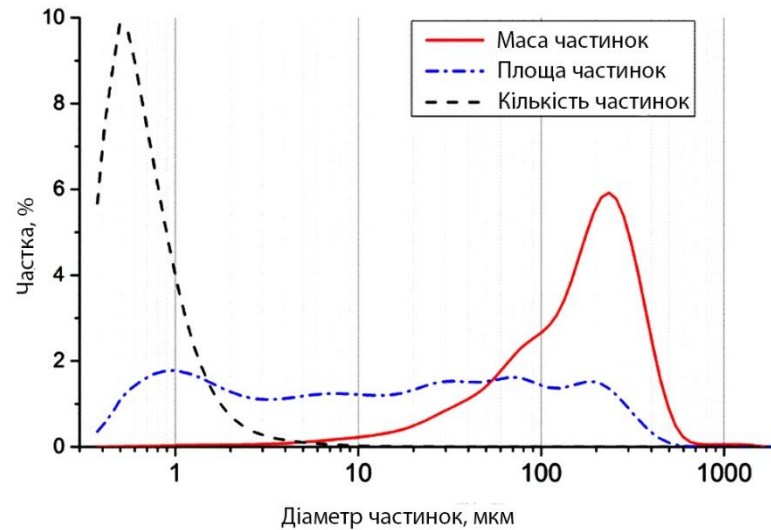


Рисунок 3.17 – Розподіл частинок розплаву за розмірами при розпиленні дроту Ст70.

За результатами вимірювання швидкості і температури індивідуальних частинок були відновлені локальні розподіли даних параметрів за обсягом струменя. Повний обсяг вибірки склав 60 тисяч ідентифікованих об'єктів. Для прикладу на рис.3.18 показані статистичні гістограми розподілу швидкості і температури частинок в перетині струменя 160 мм від зрізу сопла. Пунктирними лініями позначені середні значення величин V_{cp} і T_{cp} , а також межі діапазонів $V_{cp} \pm 2\sigma$ і $T_{cp} \pm 2\sigma$, де σ – стандартне відхилення відповідної величини від середнього.

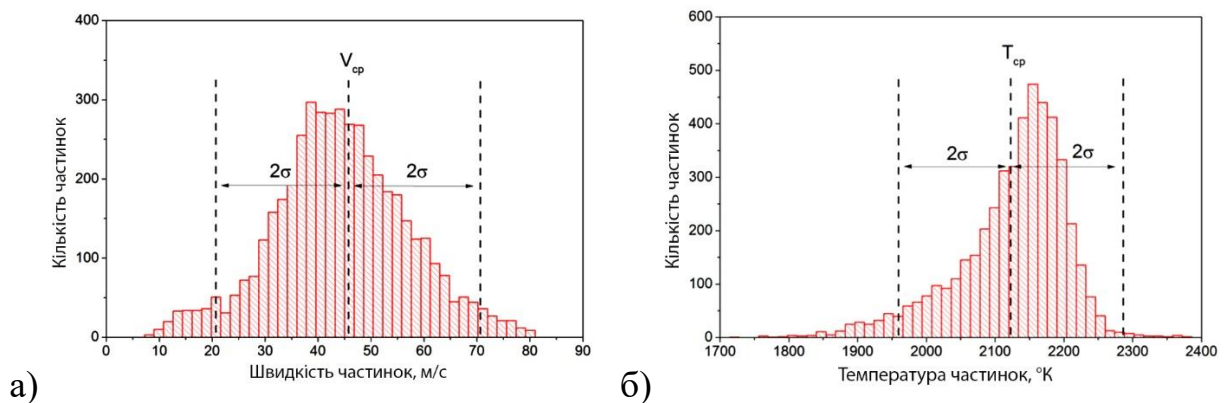


Рисунок 3.18 – Розподіл швидкостей (а) і температур (б) частинок в перетині струменю на відстані 160 мм від зрізу сопла.

На рис. 3.19 показано зміну середньої швидкості частинок V_{cp} при русі вздовж струменя. Можна відзначити, що на дистанціях 100-160 мм від сопла значення V_{cp} виходить на постійний рівень 45-50 м/с. При цьому діапазон швидкостей частинок досить великий: величина 2σ дорівнює 22-25 м/с, що становить половину від середнього значення V_{cp} . Це пов'язано з широким діапазоном розмірів частинок, що формуються в умовах плазмо-дугового дротяного напилювання.

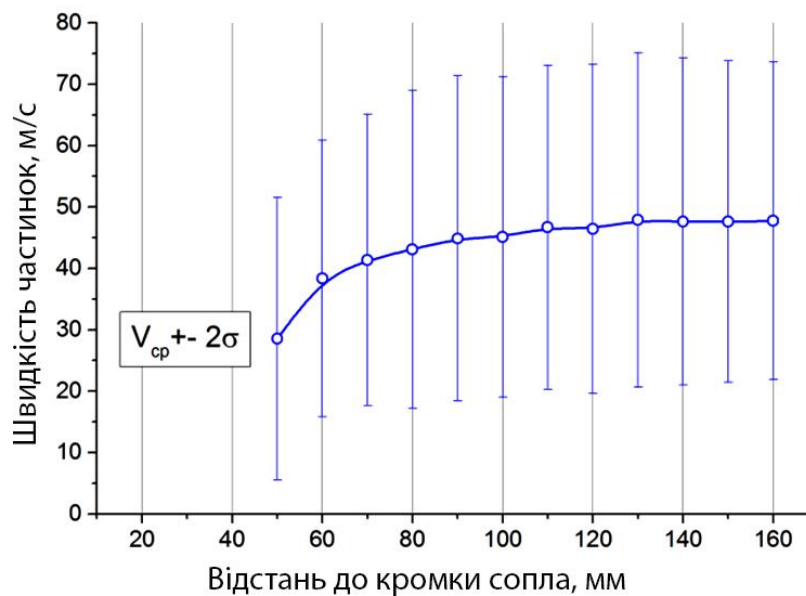


Рисунок 3.19 – Значення середньої швидкості частинок в різних перетинах струменя.

На рис.3.20 наведені результати вимірювання температури частинок в різних перетинах струменя, отримані методом яскравості (камера) і спектральним методом. Як видно, отримані значення температури значно відрізняються між собою, що має таке пояснення. Застосований алгоритм обробки відеокадрів виключає розпізнавання частинок, зображення яких має субпіксельний розмір. При обраної розрізняльної здатності відеосистеми 51,9 мкм/піксель це означає, що ідентифікуються тільки частки крупніше 50 мкм. Таким чином, температури дисперсної фази, виміряні методом яскравості, відповідають саме тим великим часткам, які в основному формують покриття.

Як видно, уздовж довжини струменя середня температура частинок слабо збільшується від 2000 К до 2130 К. Це пов'язано з тим, що на відміну від порошкового наплення, початкова температура крапель відразу перевищує температуру плавлення матеріалу (1700-1800 К).

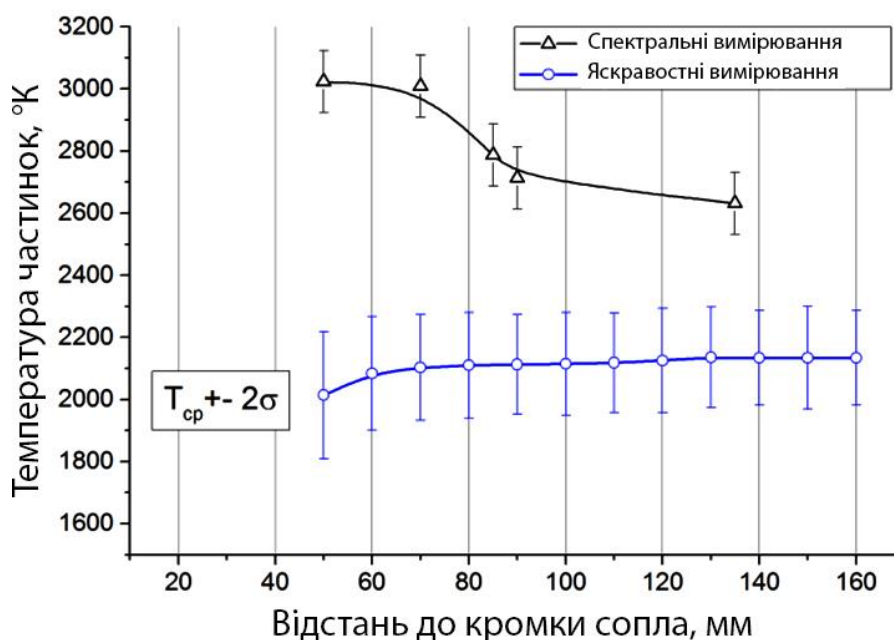


Рисунок 3.20 – Значення середньої температури частинок в різних перетинах струменя.

З іншого боку, за наявності неоднорідного температурного поля в області спостереження спектральний метод завжди дає результат, близький до максимальній температурі в розподілі [138]. Очевидно, що в початковій області струменя максимальну температуру матимуть частинки з найменшим розміром, які швидко нагріваються несучим плазмовим потоком. Характерний час прогріву частинки має порядок $\tau \sim d^2/a$, де d – діаметр частинки, a – температуропровідність частинки, що для сталеві краплі діаметром 1 мкм дає значення близько 1 мкс. Враховуючи, що такі дрібні частинки рухаються зі швидкістю близько $v = 100$ м/с, можна їх вважати «тепловими маркерами», температура яких дорівнює локальній температурі плазмового потоку в області розміром $\delta = \tau \cdot v$, тобто близько 100 мкм. Доречно згадати, що подібний підхід

використовується для вимірювання температури полум'я, в яких формуються ультрадисперсні частинки сажі, що є джерелом теплового випромінювання [139].

На рис.3.20 показано, що температура частинок, виміряна спектральним методом, монотонно знижується при видаленні від зрізу сопла плазмотрона. Її максимальні значення на початковій ділянці не перевищують температуру кипіння сталі (3000-3100 К), так як подальший перегрів матеріалу вимагає великих тепловкладань. Завдяки своїй малій масі, ультрадисперсні частинки виносяться током плазми що поширюється за межі ядра двофазного струменя, де температура плазми знижується. Інтенсивне власне випромінювання плазми не дозволяє провести якісні вимірювання температури дисперсних частинок методом яскравості і спектральним методом в області прив'язки електричної дуги до витратного дроту-аноду. Проте було одержано візуалізацію процесу розпилення зафіксованою анодною плямою, а також окремі частинки розплаву в плазмовому струмені з виразним аеродинамічним слідом за краплею, сформованим її парами. Тобто, встановлено що інтенсивний нагрів частинок (до температури кипіння сталі) відбувається вже на відстанях ~ 8 мм від кромки дроту-аноду (~ 15 мм від зрізу сопла плазмотрона).

Також в процесі дослідження розпилення вольфрамового дроту-аноду виявлено ряд аномальних ефектів, що не описані в літературних джерелах. На рис.3.21(а) представлено зображення ділянки струменя 7-11 см від зрізу сопла (потік рухається зліва направо), що було отримане з використанням світлофільтру 575 нм, час експозиції кадру становив 10 мкс, масштаб 51,9 мкм/піксель. Навколо групи частинок вольфраму формуються сфери випромінювання діаметром до 5 мм. Такі частинки є джерелами високошвидкісних викидів, що спрямовані вздовж руху двофазного потоку. На рис.3.21(а) зафіксовано «звичайні» треки крапель металу, що мають довжину 0,5-1 мм, яка відповідає швидкості руху 50-100 м/сек; а також треки високошвидкісних викидів, які повністю перетинають кадр, що відповідає швидкості більше 4 км/сек. На рис.3.21(б) наведено характеристики окремої випромінюючої частинки і розподіл яскравості її випромінювання вздовж

довжини високошвидкісного викиду. Як видно, яскравість має затухаючий хвильовий характер з довжиною хвилі 5-8 мм. Природа виявлених явищ потребує додаткового вивчення і ймовірно пов'язана з високою температурою плавлення вольфраму, при якій яка може відбуватися значна термемісія електронів відповідно до рівняння Річардсона-Дешмана. В наслідок чого, навколо металеві краплі формуються зони просторового розділення зарядів (електронне хмара), що призводить до виникнення газових розрядів по типу «корона» і «стрімер».

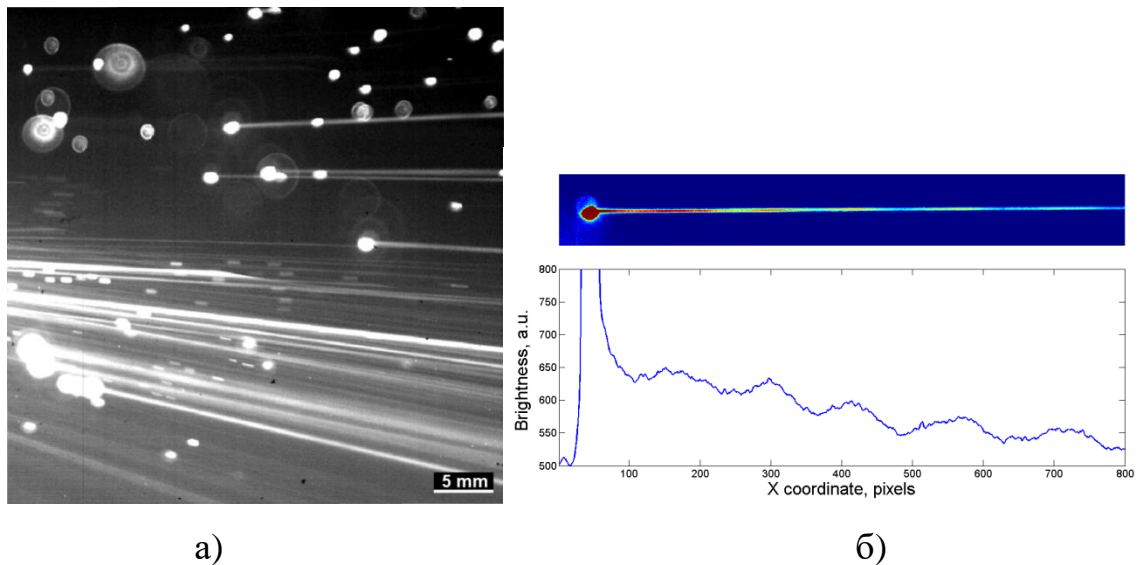


Рисунок 3.21 – Аномальні високошвидкісні розряди на поверхні крапель вольфраму: а) – загальний вигляд струменя, б) – індивідуальна частка і розподіл яскравості вздовж треку.

3.5. Порівняння експериментально отриманих результатів із розрахунковими.

Відповідно до існуючих сучасних уявлень про процеси плазмо-дугового напилювання витратного дроту-аноду, заснованих на фізико-математичних моделях [125-128], при плазмо-дуговому напилюванні можуть існувати описані в п.3.4 три типи течії і розпаду струменя розплавленого металу дроту: струменева течія металу, формування близьких за розміром крапель і формування крапель широкого спектру розмірів. При віддалені частинок-крапель від аноду відбувається їх дроблення. Застосована в розділі 3 модель дозволяє здійснювати

чисельний аналіз процесів руху, нагрівання та дроблення крапель рідкого металу, що зриваються з кінця витратного дроту-аноду при плазмо-дуговому напиленні покриттів.

Вибрані результати розрахункових даних дроблення частинок розплаву та їх фрагментів в тоці плазми наведено на рис.3.22. Зокрема, розрахункові значення кількості частинок в кожному перерізі струменя (рис.3.22,б) уздовж дистанції напилення, а також зміна середнього значення діаметра частинок в полідисперсному тоці напилення (рис.3.22,а), утворених при дробленні краплі, зірваної з кінця дроту-аноду плазмовим струменем. На рис.3.22 наведено дані для трьох різних режимів напилювання, що відрізняються за швидкістю подачі дроту в дугу v_w (тобто змінюються початкові параметрами крапель, що зриваються з торця дроту-аноду). Загалом результати численних досліджень кількісно дещо відрізнялися від результатів експериментів, що можливо пояснити припущеннями і обмеженнями, що були прийняті при створенні описаної в п.3.2 фізико-математичної моделі. Очевидно, що результати порівняння розрахункових і експериментальних даних можуть дещо відрізнятися.

Як видно з аналізу розрахункових даних, при плазмо-дуговому напиленні здійснюється множинне дроблення частинок і їх фрагментів, що рухаються в плазмовому струмені. Зокрема, з вихідних крапель діаметром 670...755 мкм на дистанції напилення 150 мм в результаті багаторазових подрібнень формується близько 200...300 фрагментів із середнім діаметром 90...110 мкм. На підставі результатів розрахунків можна виділити два найбільш характерних ділянки дроблення рідких частинок і їх фрагментів. На першій ділянці (поблизу зрізу сопла плазмотрона), який характеризується високими значеннями швидкості і температури плазми і має при розглянутому режимі напилення довжину близько 60 мм, здійснюється найбільш інтенсивне дроблення частинок (рис.3.22). На другій ділянці (при $z > 60$ мм) за рахунок дроблення частинок, а також зниження відносної швидкості плазми і частинок через їх віддалення від зрізу сопла плазмотрона, змінюються умови їх обтікання. При цьому, розплавлені частинки

піддаються плавному наростанню сил аеродинамічного опору за рахунок зміни форми частинок, що, після закінчення певного часу, також може призводити до їх руйнування. Дроблення частинок практично припиняється на відстані близько 120 мм від зрізу сопла плазмотрона, оскільки в умовах обтікання частинок на цій відстані, час для розвитку процесів деформації і руйнування частинок стає рівним або перевищує часу досягнення частинками поверхні. Як видно з порівняльного аналізу, описані результати, отримані шляхом обчислювального експерименту, узгоджуються з експериментальними даними, згідно з якими, процес активного дроблення крапель відбувається на відстані до 30 мм від кінця дроту (40 мм від зрізу сопла плазмотрона).

Порівнюючи результати розрахункових даних (рис.3.23) з експериментальними (рис. 3.19, 3.20), слід зазначити, що величини останніх є нижчими за оцінки, отриманих шляхом математичного моделювання. І якщо довжина ділянки інтенсивного прискорення частинок, виміряна експериментально (7-11 см), близька до розрахункових даних (6-8 см), то абсолютні значення швидкості частинок відрізняється в 2 і більше разів. Частково це може пояснюватися розрахунковою методикою визначення середньої швидкості частинок, яка обчислюється за швидкостями частинок як середнє арифметичне. В цілому вибрана математична модель динамічної взаємодії часток дисперсної фази з плазмовим потоком є коректною, але підлягає корекції. Зокрема, необхідно коригувати методику розрахунку коефіцієнта аеродинамічного опору C_d для рідких частинок при їх деформації, саму модель деформації, а також модель дроблення на фрагменти.

Що стосується температури розпиленних крапель металу при плазمو-дуговому напилюванні, то розрахункові результати (рис.3.23,б) виявляються досить близькими до експериментальних даних, отриманих шляхом спектральних вимірювань (рис.3.20). Враховуючи, що сумарна площа поверхні частинок рівномірно розподілена серед крапель з розмірами від 500 нм до 200 мкм, в сумарний тепловий спектр випромінювання частинок значний внесок роблять частинки дрібних фракцій, які мають найбільш високу температуру. В

той же час, перегрів частинок вище температури кипіння мало ймовірний, оскільки вимагає великих тепловкладань, що спостерігається на початковій області кривої даних спектральних вимірювань на рис.3.20. Крім того, завдяки своїй малій масі, ультрадисперсні частинки легко підхоплюються плазмовим потоком і при його розширенні виносяться за межі ядра струменя, де температура плазми знижується. Це пояснює зниження температури, вимірюваної спектральним методом, при віддаленні від зрізу сопла, де фіксується падіння температури плазми на периферії потоку, тобто в області знаходження частинок.

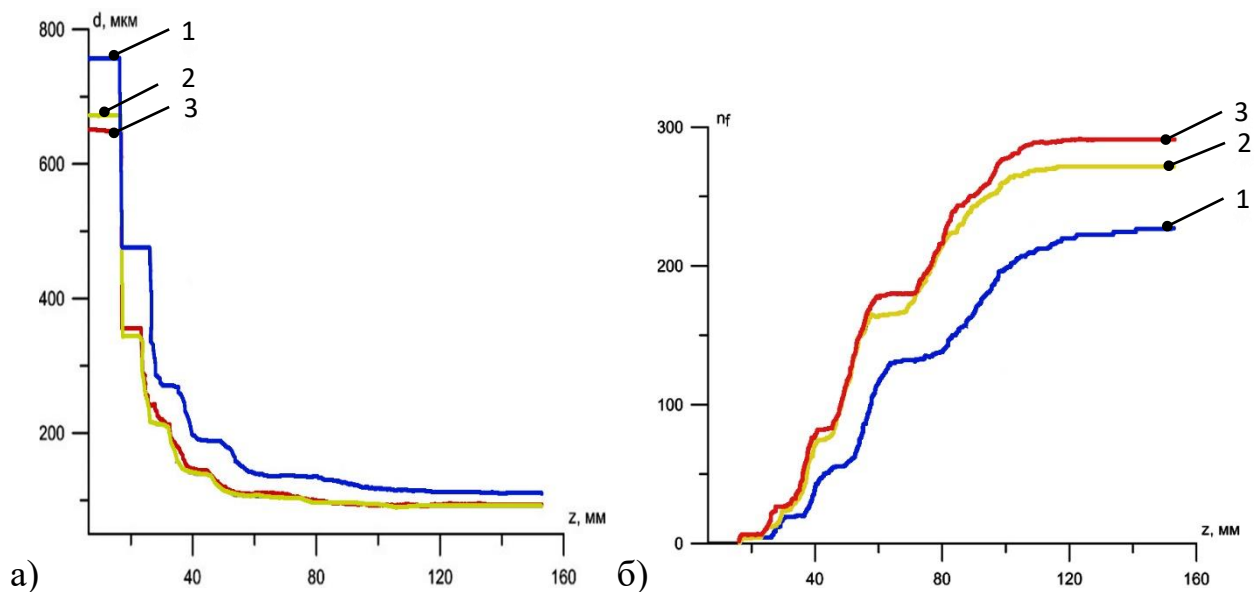


Рисунок 3.22 – Розрахункові дані по зміні середніх значень діаметра (а) і числа частинок (б) в дисперсному потоці, утвореному при дробленні краплі, зірваної з кінця дроту-аноду уздовж дистанції напилання: 1 – $I = 200$ А, $G(\text{Ar})$, $\text{м}^3/\text{год}$, $D_w = 1,4$ мм, $v_w = 7$ м/хв ($d_0=755$ мкм, $w_0=0,75$ м/с); 2 – $v_w = 9$ м/хв ($d_0=670$ мкм, $w_0=1,31$ м/с); 3 – $v_w = 12$ м/хв ($d_0=650$ мкм, $w_0=1,85$ м/с).

Висока інтенсивність випромінювання плазми поблизу анодної плями не дозволяє коректно застосовувати спектральні і яскравісні методи для визначення температури розпиленних краплин металу в даній області течії двофазного потоку. Однак, застосовані методи візуалізації дозволили одержант деякі якісні результати про тепловий стан частинок у цій області на основі покадрового

аналізу відео процесу. Таким чином було зафіксовано випаровування матеріалу з поверхні частинок вже на відстанях ~ 15 мм від зрізу сопла плазмотрона (~ 8 мм від торця дроту-аноду), що свідчить про інтенсивне нагрівання частинок до температури кипіння, отже, і високих значеннях температури плазми в даній області і це збігається з даними одержаними при розрахунках.

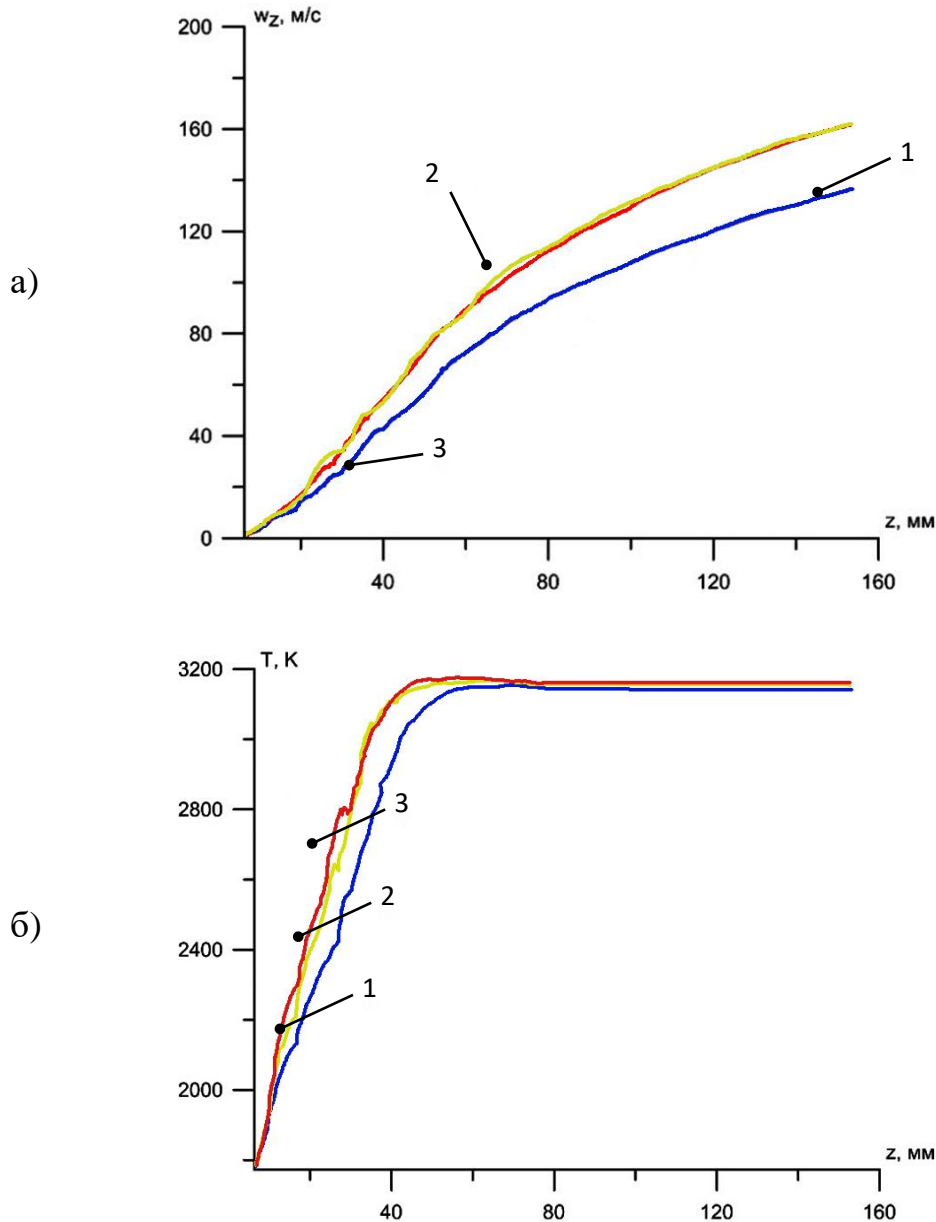


Рисунок 3.23 – Розрахункові дані зміни середніх значень швидкості (а) і середнеоб'ємної температури (б) часток в дисперсному потоці, утвореному дробленням краплі, що зірвалася з торця дроту-аноду: 1 – $I = 200$ А, $G(\text{Ar})$, $\text{м}^3/\text{год}$, $D_w = 1,4$ мм, $v_w = 7$ м/хв ($d_0 = 755$ мкм, $w_0 = 0,75$ м/с); 2 – $v_w = 9$ м/хв ($d_0 = 670$ мкм, $w_0 = 1,31$ м/с); 3 – $v_w = 12$ м/хв ($d_0 = 650$ мкм, $w_0 = 1,85$ м/с).

Крім описаного порівняння розрахунково отриманих результатів із експериментальними, проводилися порівняння даних по гранулометричному складу продуктів плазмо-дугового розпилення сталевго дроту (рис.3.24), порівнювалися вольт-амперні характеристики стовпа дуги при різних витратах плазмоутворюючого G_1 і супутнього G_2 газів (рис.3.25), розподіл температури T по довжині L плазмового струменя (рис.3.26), швидкість і температура частинок у польоті як функція відстані L від сопла при певному струмі дуги (рис.3.27). Порівняння наведених на рис.3.24-3.27 даних фізико-математичного моделювання із результатами фізичних експериментів показали, що точність розрахунків є не гіршою за 5-10%, що можна вважати задовільним результатом.

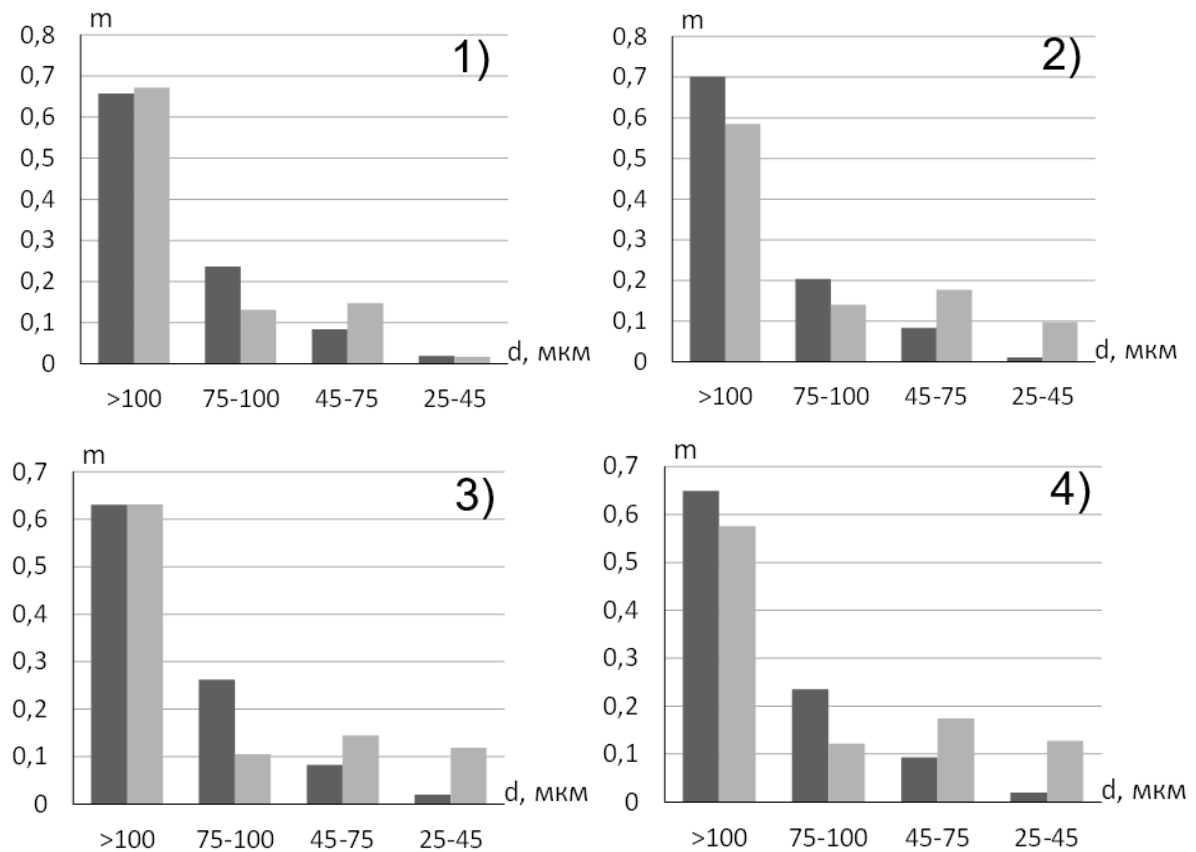


Рисунок 3.24 – Порівняння розрахункових (■) і експериментальних (□) даних по гранулометричному складу продуктів плазмо-дугового розпилення дроту на дистанції напилювання 150 мм: 1 – $I=260$ А, $z_0=10$ мм; 2 – $I=220$ А, $z_0=10$ мм; 3 – $I=300$ А, $z_0=10$ мм; 4 – $I=220$ А, $z_0=12$ мм.

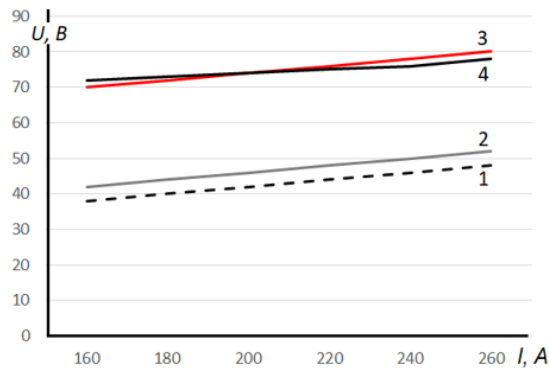


Рисунок 3.25 – Розрахункові (Р) і виміряні (В) вольт-амперні характеристики стовпа дуги при різних витратах плазмоутворюючого G_1 і супутнього G_2 газів: 1 – $G_1 = 1 \text{ м}^3/\text{год}$, Р; 2 – $G_1 = 1,5 \text{ м}^3/\text{год}$, Р; 3 – $G_1 = 1,5 \text{ м}^3/\text{год}$, $G_2 = 20 \text{ м}^3/\text{год}$, Р; 4 – $G_1 = 1,5 \text{ м}^3/\text{год}$, $G_2 = 20 \text{ м}^3/\text{год}$, В.

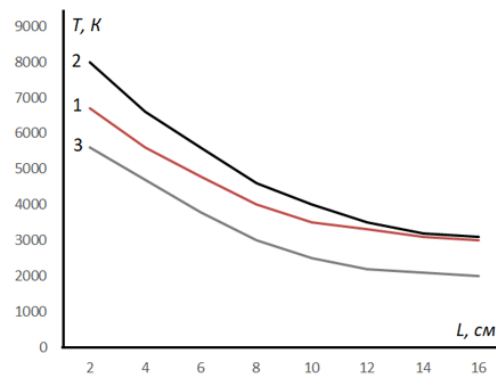


Рисунок 3.26 – Розрахунковий (Р) і виміряні (В) розподіл температури T [K] по довжині L [cm] плазмового струменю при різних витратах G_2 супутнього газу ($I=220 \text{ A}$): 1 – $G_1 = 1,5 \text{ м}^3/\text{год}$, $G_2 = 20 \text{ м}^3/\text{год}$, В; 2 – $G_1 = 1,5 \text{ м}^3/\text{год}$, $G_2 = 20 \text{ м}^3/\text{год}$, Р; 3 – $G_1 = 1,5 \text{ м}^3/\text{год}$, $G_2 = 0 \text{ м}^3/\text{год}$, Р.

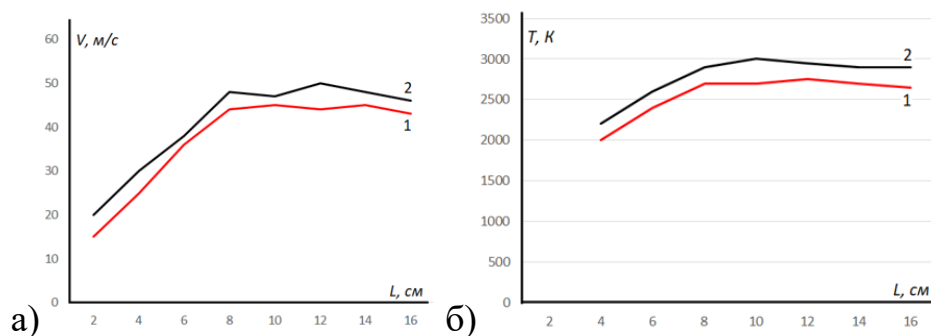


Рисунок 3.27 – Розрахункові (Р) і виміряні (В) параметри частинок у польоті як функція відстані L [cm] від сопла при струмі дуги $I=220 \text{ A}$: а) – середня швидкість V [м/с]; б) – середня температура T [K]; 1 – $G_1 = 1,5 \text{ м}^3/\text{год}$, $G_2 = 20 \text{ м}^3/\text{год}$, В; 2 – $G_1 = 1,5 \text{ м}^3/\text{год}$, $G_2 = 20 \text{ м}^3/\text{год}$, Р.

3.6. Аналіз особливостей процесу нанесення металевих покриттів плазмо-дуговим розпилюванням плавкого дроту-аноду.

Виконані розрахунки, а також експериментальні данні з візуалізації процесу нанесення металевих покриттів плазмо-дуговим розпилюванням плавкого дроту-аноду показують, що, обдув плазмового струменя супутнім потоком холодного газу перешкоджає її розширенню і істотно збільшує її протяжність. Так, турбулентний струмінь аргонової плазми, що витікає в повітряне середовище і досить швидко переміщується з повітрям внаслідок необмеженого розширення, збільшує теплопровідність новоутвореної плазмової суміші, яка охолоджується інтенсивніше, ніж аналогічний струмінь, що витікає в аргонове середовище. Обдув турбулентного струменя аргонової плазми кільцевим ламінарним потоком холодного повітря призводить до формування достатньо вузького та відносно високотемпературного ядра течії, вміст аргону в якому залишається високим на значних відстанях від сопла плазмотрону.

До однієї з ключових особливостей процесу плазмо-дугового напилення плавкого аноду слід віднести те, що в якості матеріалу напилення виступає струмопровідний дріт. Це істотно відрізняє даний процес від інших методів газотермічного напилення з використанням порошкових матеріалів. Нагрів та плавлення плавкого дроту-аноду, при плазмо-дуговому напиленні визначатися сукупністю наступних фізичних процесів:

- конвективно-кондуктивним теплообміном плазмового потоку і навколишнього газу з бічною поверхнею дроту;
- обміном енергією теплового випромінювання між плазмою і поверхнею дроту;
- дією електричної дуги, що вводить тепло через анодну пляму;
- об'ємним джоулевим нагріванням дроту електричним струмом, що по ньому протікає;
- втратами тепла з розплавленим металом, що відноситься плазмовим струменем;

- охолодженням поверхні дроту за рахунок виносу потоком пари енергії випаровування атомів її матеріалу.

Під дією зазначених джерел тепла дріт нагрівається, плавиться і на його торці утворюється шар розплавленого металу. Перебуваючи під динамічним впливом плазмового потоку, насамперед сил в'язкого тертя, частина розплаву зноситься в тонкий струмінь, а частина утримується на кінці дроту, утворюючи рідкий прошарок. При цьому, дріт прийме таке положення щодо осі плазмового струменя, яке буде відповідати стану його теплової рівноваги. Відповідно до газодинамічної теорії [140], в безпосередній близькості від границі розділу двох середовищ «рідкий метал – плазмовий потік» в плазмовому потоці буде утворюватися прикордонний шар. Значення швидкості і температури плазми досить різко змінюються в поперечному напрямку щодо осі плазмового струменя. Тому, від просторового положення торця дроту щодо ядра плазмового потоку істотно залежать умови в'язкої і теплової взаємодії плазми з дротом. Чим ближче до осі струменя, тим більшим виявляється тепловий потік в дріт і тим більше зростають сили в'язкості, що діють на поверхню розплаву, зносячи рідкий метал з кінця дроту вниз за течією потоку. Тому, важливо відзначити, що при режимах напилення, при яких поширення тепла в дроті, внаслідок теплообміну з плазмовим потоком і механізму теплопровідності, здійснюється з меншим ступенем інтенсивності, кінець дроту буде розташовуватися ближче до осі плазмового струменя. Так, при збільшенні швидкості подачі, область нагріву і розплавлення дроту зменшуються, і дріт буде наближатися до осі плазмового струменя до тих пір, поки обсяг розплавленого металу зможе утримуватися на торці дроту.

Така ж ситуація спостерігається і при виборі діаметру дроту-аноду для його розпилення. При збільшенні діаметру дроту збільшується струм дуги, що призводить до зростання швидкості і температури плазми. При цьому, зростають конвективно-кондуктивні і радіаційні потоки в дріт, а також підвищується інтенсивність дії сили в'язкого тертя в плазмі, що діють на рідкий розплав на торці дроту. У результаті, збільшений обсяг розплаву не може утримуватися на

кінці дроту, частина його буде зірвана плазмовим потоком, а кінець дроту займе нове оптимальне положення, ближче до периферійних ділянок плазмового потоку. При підвищенні витрати формуючого газу швидкість потоку зростає, однак температурний профіль виявляється більш стислим до осі струменя. При цьому, плавлення дротового матеріалу буде здійснюватися при розташуванні кінця дроту в ділянках плазмового струменя поблизу його осі, а підвищення інтенсивності в'язкої взаємодії з плазмовим потоком – приводити до зменшення об'єму рідкої прошарку на кінці дроту, а отже і товщини даного прошарку.

При цьому, від швидкості течії розплаву на кінці дроту, залежать характеристики течії струменя розплаву, тобто параметри краплеутворення. У свою чергу, швидкість течії розплаву пов'язана з кількістю матеріалу дроту-аноду, що розплавляється в одиницю часу, а також встановленою товщиною рідкого прошарку, через який і здійснюється течія розплавленого металу.

Результати моделювання динаміки формування крапель розплавленого металу, а також результати проведених експериментальних досліджень, показали, що характеристики течії струменя можуть істотно відрізнятись для різних значень параметрів режиму напилення. Так, для кожного набору значень параметрів режиму процесу напилення існують певні граничні значення швидкості подачі дроту, при яких об'ємна витрата розплавленого металу, що надходить в струмінь, збігається зі швидкістю наростання обсягу краплі. У цьому випадку, відбувається формування практично однакових за розміром крапель, а довжина струменя коливається незначно, відображаючи процес наростання обсягу і обриву краплі. Такий тип розпилення дроту є найкращим з погляду формування однакових за розміром крапель і, відповідно, однорідних покриттів.

При більш високих значеннях швидкості подачі дроту, обсяг розплавленого металу, що надходить до струменя, перевищує швидкість наростання обсягу краплі на кінці струменя, в результаті чого її довжина поступово збільшується. На поверхні струменя починають накопичуватися збурення, зумовлені дією сил поверхневого натягу. Поширення збурень призводить до формування безлічі перетяжок і областей розбухання струменя.

При цьому, як правило, відбувається обрив струменя поблизу робочого кінця дроту, тобто крапля, що утворюється, має досить великий розмір і потрапляючи в потік плазми вона може розпадатися на більш дрібні краплі за рахунок дії газодинамічних сил.

Крім того, в разі вибору некоректних значень параметрів режиму напилення, можливі варіанти, коли розплавлений кінець дроту буде розташовуватися на відстані 0,7...1,0 мм від осі плазмового струменя, тобто поза зоною інтенсивного газодинамічного і теплового впливу з боку плазмового потоку. За таких умов струмінь розплавленого металу починає витягуватися по довжині і спостерігається, фактично, струменеве перенесення металу, без здійснення розпилення.

Потрапляючи в плазмовий потік розплавлені частинки прискорюються, нагріваються і, при досягненні критичних умов, руйнуються з формуванням більш дрібних фрагментів. При цьому, здійснюється множинне (вторинне) дроблення частинок і їх фрагментів, що рухаються в плазмовому струмені. Можна виділити дві найбільш характерних ділянки дроблення рідких частинок і їх фрагментів. На першій ділянці (поблизу зрізу сопла плазмотрона), яка характеризується високими значеннями швидкості і температури плазми і має при розглянутому режимі напилення довжину близько 60 мм, здійснюється найбільш інтенсивне дроблення частинок. На цій ділянці число We (число Вебера – критерій подібності, що визначає ставлення інерції рідини до поверхневому натягу) для частинок істотно перевищує критичне значення числа Вебера We^* , що призводить до їх інтенсивного дроблення. На другій ділянці за рахунок зменшення (в результаті дроблення) розмірів частинок, а також зниження відносної швидкості плазми і частинок при віддаленні від зрізу сопла плазмотрона, змінюються умови їх обтікання. При цьому, розплавлені частинки відчують плавне наростання сили аеродинамічного опору за рахунок зміни форми частинок, що, після закінчення певного часу, також може призводити до їх руйнування.

Досліди показали, що оптимальний діаметр компактного металевого дроту-аноду повинен знаходитися в межах 1,2-1,6 мм. При цьому швидкість його подачі повинна становити 7-12 м/хв.

Таким чином, формування покриттів при плазмо-дуговому напиленні, здійснюється з фрагментів вихідних крапель, що мають розміри, співмірні з розмірами частинок порошку, що використовуються у методах порошкового напилення. При цьому, частинки які формують покриття при плазмо-дуговому напиленні, є повністю розплавленими, що позитивно позначається на структурі та властивості формованих покриттів, зокрема їх щільності.

3.7. Висновки по розділу 3.

1. За відомими моделями одно- і двофазного плазмового струменю проведено математичне моделювання поведінки плазмового струменю і диспергування плавкого дроту-аноду, розраховано теплові та газодинамічні характеристики такої плазми, що дозволяє на основі одержаних даних обрати режими напилення функціональних покриттів з металевих дротів-анодів різного хімічного складу і властивостей.
2. Виконано комплекс теоретичних досліджень процесу плазмо-дугового напилення плавким зовнішнім металевим дротом-анодом із використанням фізико-математичних моделей процесів тепло- і масопереносу в електродуговій зоні та турбулентному плазмовому струмені, базованих та магнітогідродинамічних (МГД) рівняннях у наближенні турбулентного граничного шару, виявлені закономірності плавлення та розпилення дроту-анод, закономірності формування структури та фізико-механічних властивостей покриттів в залежності від умов технології і типу дроту-аноду.
3. Встановлено, що вольтамперна характеристика стовпа дуги при плазмово-дуговому напилюванні плавким металевим дротом-анодом є зростаючою і

істотно залежить від витрати плазмоутворюючого газу, причому в діапазоні струмів $I=160\dots260$ А швидкість зростання U збільшується зі збільшенням I .

4. Визначені закономірності зміни температури плазмового потоку уздовж осі струменя, здійснена візуалізація процесу формування розплаву на торці дроту-аноду. Спрогнозовано явище вторинної диспергації розплавлених частинок в потоці розміром $500\dots700$ мкм при відриві від торця дроту-аноду до розмірів $40\dots150$ мкм при підвищенні швидкості потоку до $150\dots300$ м/с.

5. За допомогою створеного оригінального експериментального автоматизованого стенду для дослідження процесів теплової та динамічної взаємодії рідких частинок з несучим потоком в умовах плазмо-дугового дротового напилювання покриттів було візуалізовано процеси формування розплаву на торці дроту-аноду, зрив крапель металевого розплаву та їх подальше дроблення; виміряно швидкості (від 40 до $150\dots200$ м/с) і температури ($2200\dots2400$ К) частинок вздовж довжини струменя в залежності від параметрів режиму ($I=160\dots260$ А при швидкості 7-12 м/хв подачі дроту $\varnothing 1,4-1,6$ мм).

6. Проведені експериментальні дослідження дозволили отримати експериментальні дані про формування та дроблення крапель розплаву, значення швидкості і температури частинок в потоці, їх розподіл за розмірами. Було встановлено вплив значення струму дуги на режим зриву розплаву з струмоведучою дроту.

7. Аналіз розподілу часток матеріалу за розмірами показав, що вимірювання температури спектральним методом відображають локальну температуру несучого плазмового потоку. Експериментальні дані підтвердили отримані раніше теоретичні уявлення про типи течії і розпаду струменя розплавленого металу дроту, сценаріях дроблення крапель в плазмовому струмені.

8. При експериментальному дослідженні розпилення вольфрамових прутків зафіксовано та описано ефект формування аномальних викидів, швидкість яких перевищує 4 км/с.

9. Проведені дослідження демонструють доцільність ламінаризації аргонного плазмового струменю (витрати $1,0-1,5$ м³/год) за рахунок його стиснення

зовнішнім високошвидкісним повітряним потоком із витратами до 40 м³/год, який сприяє підвищенню напруженості електричного поля, а також забезпечує захист розплавлених крапель металу від окислення.

10. Визначені закономірності зміни температури плазмового потоку уздовж осі струменя, здійснена візуалізація процесу формування розплаву на торці дроту-аноду. Виявлено явище вторинної диспергації розплавлених частинок в потоці розміром 600...750 мкм при відриві від торця дроту-аноду до розмірів 40...150 мкм при підвищенні швидкості потоку до 150...200 м/с.

11. Порівняння результатів розрахунків, виконаних по створеним фізико-математичним моделям, із результатами фізичних експериментів, показали, що у ряду випадків розбіжність розрахункових та експериментальних даних не перевищують 5-10%.

Розділ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИКО-МЕТАЛУРГІЙНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ СТВОРЕННЯ МЕТАЛЕВИХ ПОКРИТТІВ ПЛАЗМО-ДУГОВИМ НАПИЛЮВАННЯМ ПЛАВКИМ ДРОТОМ-АНОДОМ

4.1 Дослідження мікроструктури та фазового складу металевих покриттів, одержаних плазмо-дуговим розпилюванням плавкого дроту-аноду.

Для дослідження особливостей процесів нагріву та плавлення витратного дротового аноду були проведені металографічні дослідження, з залученням світлової оптичної та електронної мікроскопії, торців вказаних дротів-електродів при різкому обриві дуги, а також дослідження продуктів їх розпилення. Це дало можливість вивчити фазові та структурні перетворення, що відбуваються на границі твердої і рідкої фаз дроту аноду де формуються цівки та краплини розплаву. Також проводилися металографічні дослідження напилених шарів металу, а отримані данні співставлялися із результатами досліджень оплавленого торця дроту-аноду і з даними щодо хімічного складу матеріалу дроту. Все це дало можливість оцінити промислову придатність розроблених технологій плазмо-дугового напилення плавкими металевими дротами-анодами.

На рисунку 4.1 наведено вигляд рухомого дроту-аноду після розпилення (рис.4.1,а), та візуалізація процесу випаровування з поверхні крапель, що зірвалися з дроту, що розпилюється. Зона нагріву та відриву розплавлених крапель має скошений вигляд сформований течією розплавленого металу та його відриву з поверхні дроту з плазмовим струменем. Цівка рідкого металу, зриваючись з торця дроту розпадається на краплі та випаровується (рис.4.1,б). Скошений вигляд торця дроту-аноду є характерним для плазмо-дугової технології. Зона плавлення і термічного впливу плазмової дуги на торець дроту-аноду шириною в середньому 0,6-1,2 мм має клинодібну форму, утворену із двох сегментів, які обмежені лініями, близькими до евольвенти, дзеркально оберненої до плазмової дуги (рис.4.1,а). Така форма зумовлена тим, що розплавлений матеріал з поверхні дроту захоплюється плазмовим потоком, утворюючи цівку

рідкого матеріалу дроту, яка пізніше розпадається на краплі – дисперсні частинки матеріалу, що напилюється.

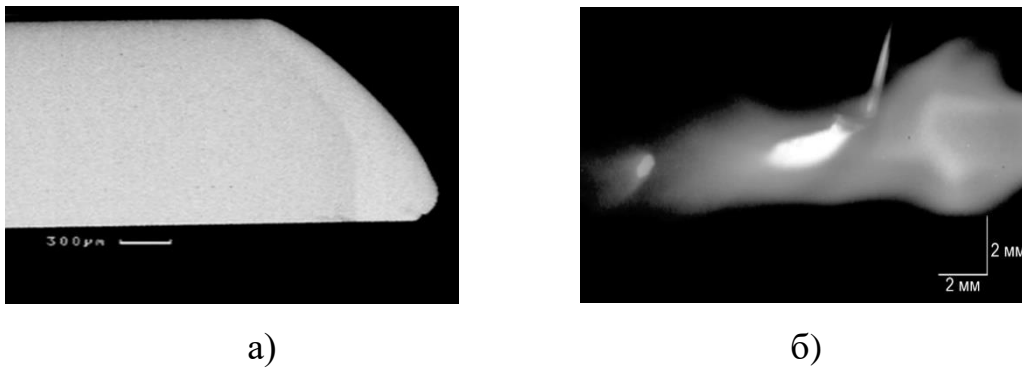


Рисунок 4.1 – Візуалізація процесів нагріву, плавлення та розпилення рухомого дроту аноду: а) – типова макроструктура торця дроту-аноду після різкого обриву дуги в процесі плазово-дугового напилювання; б) – візуалізація процесу випаровування з поверхні крапель, що зірвалися з дроту-аноду.

Мікросондовий порівняльний аналіз граничних шарів торця електроду із Ст70 після різкого обриву дуги із основним матеріалом дроту та шаром нанесеного покриття свідчить про відсутність суттєвих змін в хімічному складі дроту Ст70 в процесі його нагріву-плавлення та після плазового розпилення (табл.4.1-4.2, рис.4.2-4.3). Зафіксовано лише незначне зменшення вмісту марганцю та заліза. Однак, такі зміни знаходяться в межах похибки вимірювань.

Аналогічні результати спостерігаються і при порівняльних дослідженнях дроту-аноду та розпиленого шару із нержавіючої сталі рис.4.4-4.5, табл.4.3-4.4). В даному випадку спостерігається незначне зниження вмісту заліза (в середньому на 0,5-0,8%), що можна пояснити збільшенням відсотку кисню через його окислення.

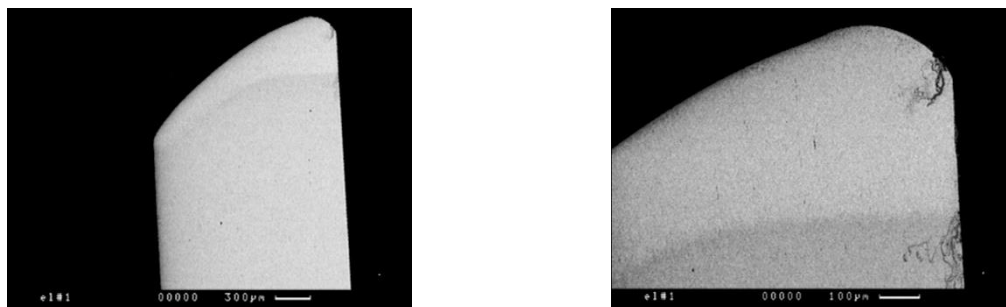


Рисунок 4.2 – Загальний вигляд торця дроту-аноду із Ст70 в електронному мікроскопі, після різкого обриву дуги в процесі плазмо-дугового розпилення.

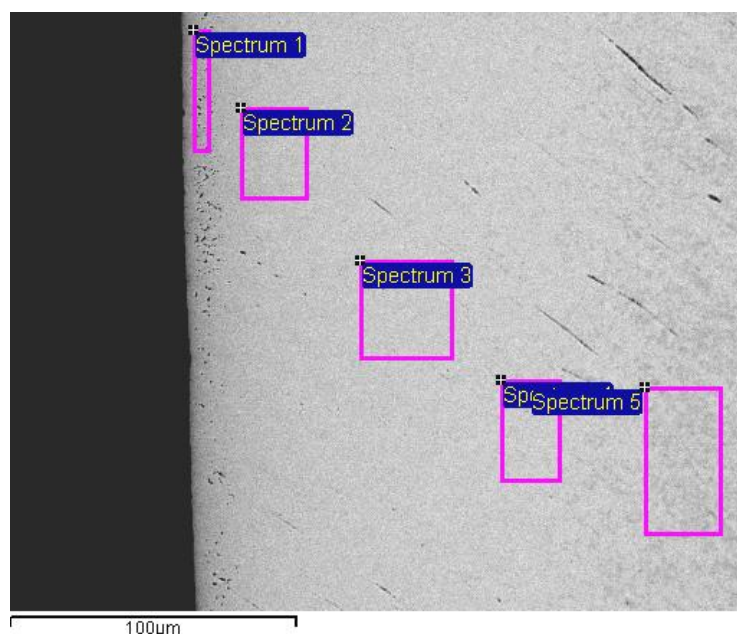


Рисунок 4.3 – Мікроструктура торця дроту-аноду із Ст70 після різкого обриву дуги в процесі плазмо-дугового розпилення: спектр 1 – зона розпилення матеріалу; спектр 2 – перехідна зона; спектри 3, 4, 5 – зона дроту, що не піддається термічному впливу.

Таблиця 4.1 – Вміст легуючих елементів в локальних зонах торця дроту-аноду із Ст70 після різкого обриву дуги в процесі плазмо-дугового розпилення.

Номери локальних зон, рис. 4.3	Масовий вміст легуючих елементів, %	
	Si	Mn
Спектр 1	0,39	0,76
Спектр 2	0,28	0,74
Спектр 3	0,26	0,5
Спектр 4	0,24	0,67
Спектр 5	0,31	0,62

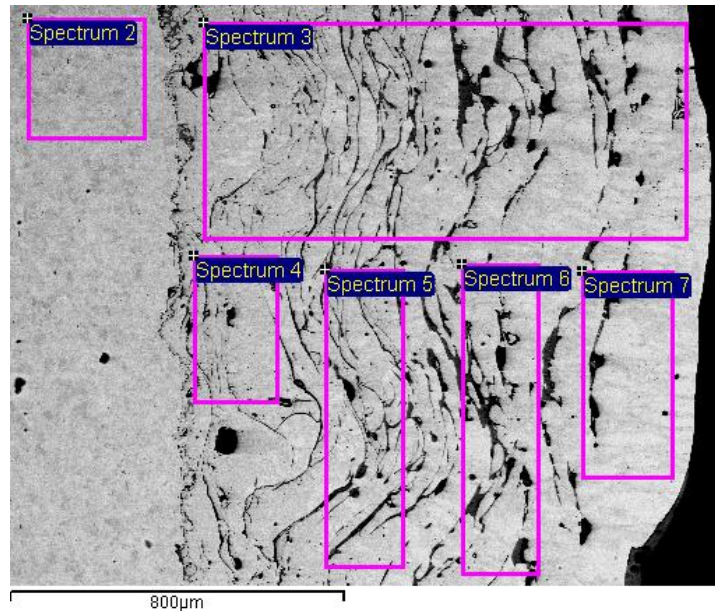


Рисунок 4.4 – Мікроструктура шару матеріалу, одержаного плазмо-дуговим розпиленням дроту-аноду із Ст70 із пошаровим проведенням хімічного аналізу.

Таблиця 4.2 – Вміст легуючих елементів в локальних зонах покриття, отриманих плазмо-дуговим розпиленням дроту-аноду із Ст70.

Номери локальних зон, рис. 4.4	Масовий вміст елементів, %	
	Si	Mn
Спектр 2	0,12	0,66
Спектр 3	0,24	0,17
Спектр 4	0,28	0,42
Спектр 5	0,38	0,46
Спектр 6	0,44	0,38
Спектр 7	0,27	0,29

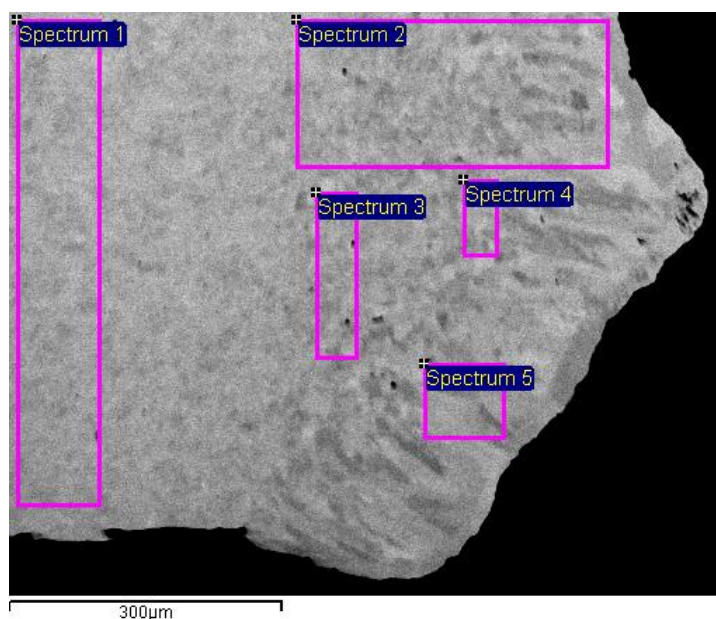


Рисунок 4.5 – Мікроструктура торця дроту-аноду із нержавіючої сталі після різкого обриву дуги в процесі плазмово-дугового розпилення: спектр 1 – зона, що не піддається термічному впливу; 2-4 – перехідна зона; 5- зона розпилення електроду.

Таблиця 4.3 – Вміст легуючих елементів в локальних зонах торця дроту-аноду із нержавіючої сталі після різкого обриву дуги в процесі плазмо-дугового розпилення.

Номери локальних зон, рис. 4.5	Масовий вміст елементів, %				
	Cr	Mn	Ni	Mo	W
Спектр 1	18,49	6,87	15,38	2,83	2,49
Спектр 2	18,7	6,86	15,29	2,48	2,48
Спектр 3	18,82	6,8	15,26	2,95	2,2
Спектр 4	18,84	6,71	16,04	2,53	2,42
Спектр 5	19,06	6,69	15,79	2,75	2,12

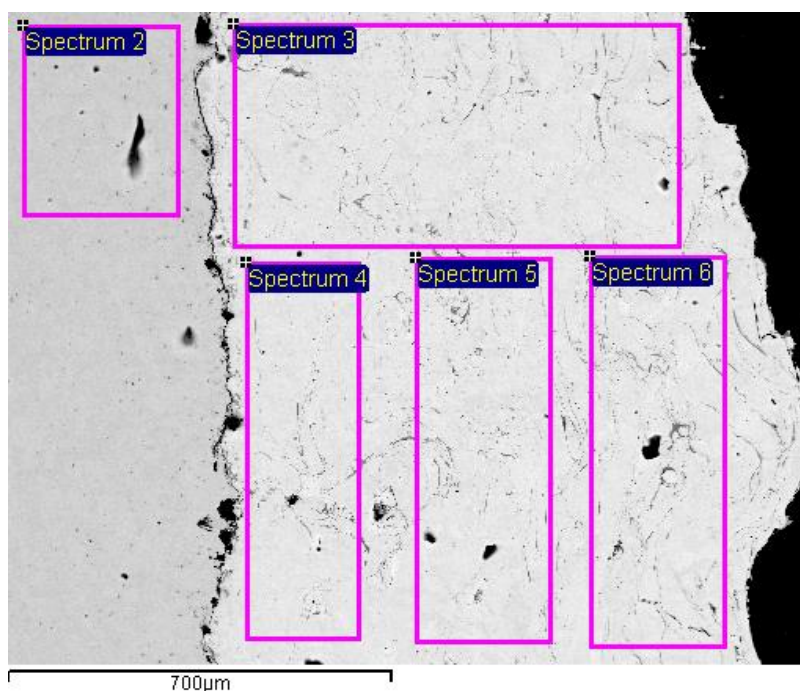


Рисунок 4.6 – Мікроструктура шару матеріалу, одержаного плазмово-дуговим розпиленням рухомого дроту-анода із нержавіючої сталі

Таблиця 4.4 Вміст легуючих елементів в покритті, одержаного плазмово-дуговим розпиленням рухомого дроту-анода із нержавіючої сталі.

Номери локальних зон, рис. 4.6	Масовий вміст елементів, %					
	Si	Cr	Mn	Ni	Mo	W
Спектр 2	0,23		0,67			
Спектр 3		18,45	5,15	15,41	2,8	2,5
Спектр 4		18,19	5,16	15,89	2,87	2,6
Спектр 5		18,38	5,48	15,14	2,97	2,8
Спектр 6		18,29	5,18	14,66	3,04	2,64

За результатами металографічного та мікрозондового аналізу граничних зон торців плавких дротів анодів з вуглецевої та легованої сталі в режимі стабільного напилення матеріалу встановляли, що при плазмово-дуговому напиленні не відбувається значних змін в хімічному складі аноду в зоні його плавлення та

диспергування, що могли би вплинути на процес розпилення, а також на склад покриття, що формується при напиленні.

Виявлена тенденція, що при збільшенні значень витрати G2 супутнього захисного повітряного потоку від 0 до 20-40 м³/год степінь вигорання легуючих елементів (С, Mn) в процесі напилювання із сталєвих дротів марок 65Г, 70, Св-08 зменшується в середньому на 30-40%.

В результаті аналізу мікроструктури та елементного складу приграничних зон торця дроту-аноду алюмінієвого сплаву АМг63 після різкого обриву дуги встановлено, що розплавлена зона (спектр 1, рис.4.7, табл.4.5) характеризується підвищеним вмістом кисню – 2,13 мас.%. В напрямі від оплавленого торця в холодну зону дроту спостерігається тенденція до пониження вмісту кисню. Перехідна зона (спектр 2, рис.4.8, табл.4.6) відрізняється меншим окисненням (1,1 мас.% кисню). В основному металі дроту, де термічний вплив був відсутній, вміст кисню становить на рівні 0,37 – 0,9 мас.% (спектр 4, рис.4.7, табл.4.5). Підвищення окислення зони нагріву і плавлення впливає на кінцевий склад напиленого покриття, де вміст кисню підвищуються порівняно з приграничною зоною торця аноду рис.4.8, табл.4.6.

В процесі плазмо-дугового нагріву дроту-аноду із досліджуваного алюмінієвого сплаву при його швидкості подачі 0,2-0,4 м/хв процес напилювання нестабільний, спостерігаються пульсації потоку матеріалу, який напилюється. Швидкість частинок досягає 95...110 м/с. Аналіз гранулометричного складу частинок, які розпилюються показує, що найбільша їх кількість має розмір 150...200 мкм. Коефіцієнт використання матеріалу становить 0,6...0,63.

При швидкості подачі алюмінієвого дроту 0,4-0,9 м/хв процес переносу розплавленого матеріалу стабільний. Розмір більшої кількості частинок знижується і становить 80...140 мкм, а коефіцієнт використання матеріалу досягає 0,65...0,70.

Зі збільшенням швидкості подачі дроту до 0,8-1,5 м/хв значення коефіцієнта використання матеріалу помітно знижуються і становлять 0,5...0,6.

Показано, що при розпиленні алюмінієвого дроту на швидкості подачі 0,2-0,4 м/хв реалізується механізм переносу великими краплями, а при швидкості подачі 0,4-0,8 м/хв – струминний.

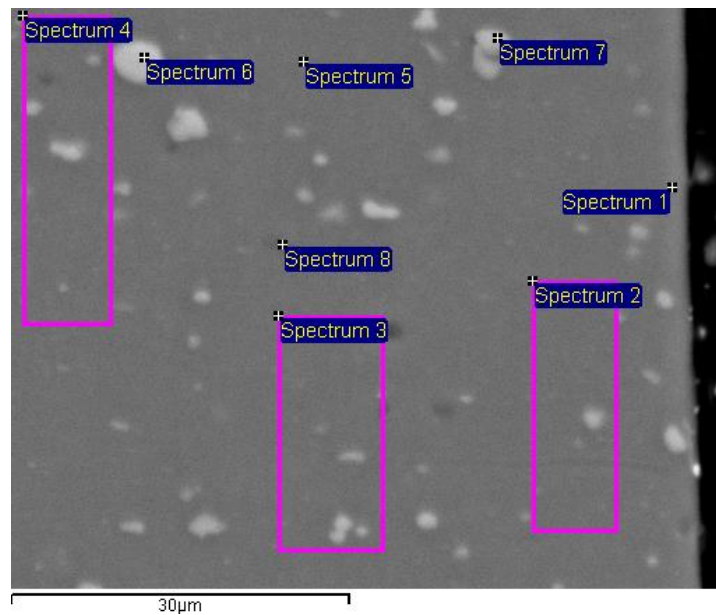


Рисунок 4.7 – Мікроструктура торця дроту-аноду із алюмінієвого сплаву АМг63 після різкого обриву дуги в процесі плазмо-дугового розпилення.

Таблиця 4.5 – Вміст легуючих елементів в локальних зонах торця дроту-аноду із алюмінієвого сплаву АМг63 після різкого обриву дуги в процесі плазмо-дугового розпилення.

Номери локальних зон, рис. 4.7	Масовий вміст елементів, %				
	O	Mg	Al	Mn	Fe
Спектр 1	2,13	6,37	90,79	0,48	-
Спектр 2	1,11	6,41	91,2	0,54	0,42
Спектр 3	0,82	6,64	90,89	0,88	0,21
Спектр 4	-	6,57	91,93	0,98	0,29
Спектр 5	0,9	6,43	92,13	0,54	-
Спектр 6	0,93	1,36	75,39	9,5	12,82
Спектр 7	0,48	4,6	83,52	6,08	5,11
Спектр 8	0,37	20,8	72,18	0,45	-

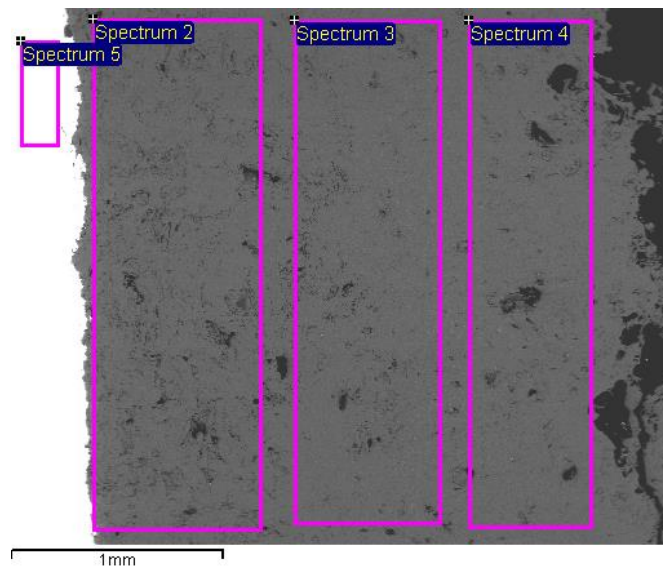


Рисунок 4.8 – Мікроструктура шару матеріалу, одержаного плазмо-дуговим розпиленням дроту-аноду із алюмінієвого сплаву АМГ63.

Таблиця 4.6 – Вміст легуючих елементів в локальних зонах покриття, одержаного плазмо-дуговим розпиленням дроту-аноду із алюмінієвого дроту АМГ63.

Номери локальних зон, рис.4.8	Масовий вміст елементів, %				
	O	Mg	Si	Mn	Fe
Спектр 2	5,6	5,24	0,96	0,68	0,56
Спектр 3	3,44	5,18	0,61	0,66	0,43
Спектр 4	4,4	5,03	0,57	0,66	0,48
Спектр 5	-	-	-	0,81	96,14

Характер диспергування впливає на розмір і швидкість частинок матеріалу, при швидкості подачі дроту 0,42 м/хв більша частина частинок має розміри 72...110 мкм і швидкість їх становить 150-165 м/с.

У випадку пониження тиску повітря, яке охолоджує сопло та обтискає високотемпературний струмінь, різко зростає розмір розпилюваних частинок

алюмінію та міді. Так, наприклад, при швидкості подачі алюмінієвого дроту 0,4-0,9 м/хв у випадку зниження тиску повітря від 7 до 4,5 МПа, розмір більшої кількості частинок становить 150-200 мкм, а коефіцієнт використання матеріалу становить близько 0,6.

Особливістю будови торця мідного дроту-аноду марки М2 після різкого обриву дуги в процесі плазмо-дугового розпилення є наявність евтектики у вигляді дендритів (рис. 4.8). В результаті мікрорентгеноспектрального аналізу (табл.4.7) встановлено, що дендритна структура формується за рахунок утворення оксидів міді. Вміст кисню в зоні утворення дендритів досягаю 8-11 мас.%, в той час як в зоні мінімального термічного впливу мідного дроту-аноду вміст кисню складає 1,2-1,3 мас.% (рис.4.9, табл.4.7).

Необхідно відмітити, що для випадку мідного дроту-електроду, на відміну від електроду із вибраного алюмінієвого сплаву, встановлено, що в процесі плазмо-дугового розпилення хімічний склад матеріалу практично не змінюється. Покриття, одержані плазмо-дуговим розпиленням мідного дроту-аноду марки М2, містять в середньому 1,1-1,2 мас.% кисню, що складає практично таку ж величину, як і для зони мінімального термічного впливу мідного дроту-аноду (рис.4.10, табл.4.8), а в порівнянні із складом кисню в зоні плавлення торця дроту-аноду – цей показник в покриттів менший в середньому в 1,5-2 рази.

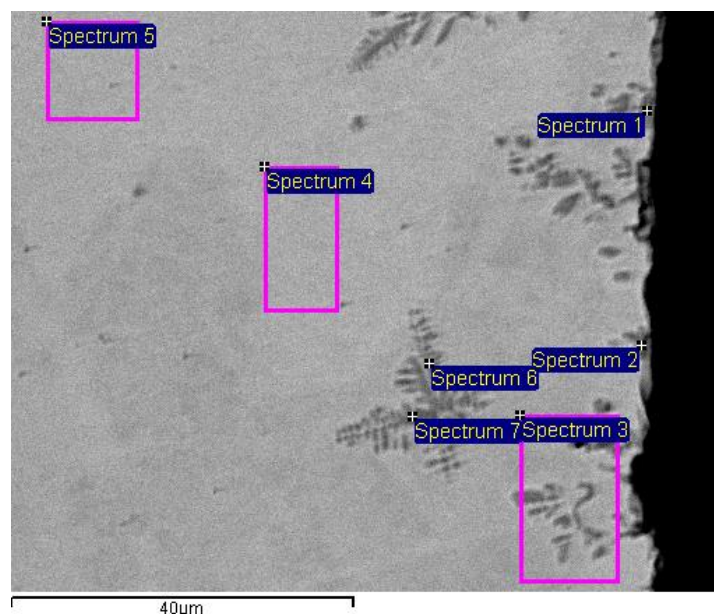


Рисунок 4.9 – Мікроструктура торця мідного дроту-аноду марки М2 після різкого обриву дуги в процесі плазмо-дугового розпилення.

Таблиця 4.7 – Результати хімічного аналізу торця мідного дроту-аноду марки М2 після різкого обриву дуги в процесі плазмо-дугового розпилення.

Номери локальних зон, рис.4.9	Масовий вміст елементів, %		
	О	Cu	Total
Спектр 1	11,04	88,96	100
Спектр 2	11,5	88,5	100
Спектр 3	3,05	96,95	100
Спектр 4	1,28	98,72	100
Спектр 5	1,31	98,69	100
Спектр 6	7,14	92,86	100
Спектр 7	8,75	91,25	100

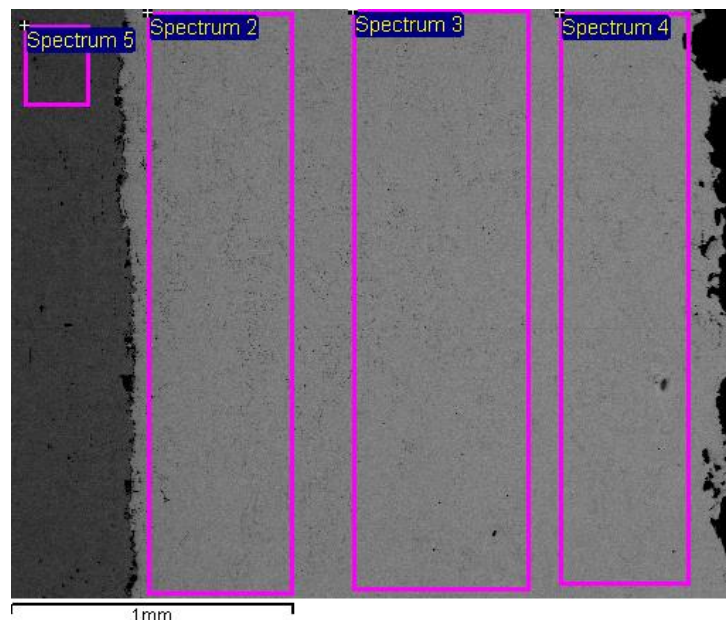


Рисунок 4.10 – Мікроструктура шару матеріалу, одержаного плазмо-дуговим розпиленням мідного дроту-аноду марки М2.

Таблиця 4.8 – Результати хімічного аналізу шару матеріалу, одержаного плазмовим розпиленням мідного дроту-аноду марки М2.

Номери локальних зон, рис.4.10	Масовий вміст елементів, %				
	O	Mn	Fe	Cu	Total
Спектр 2	1,21	-	-	98,79	100
Спектр 3	1,22	-	-	98,79	100
Спектр 4	1,1	-	-	98,90	100
Спектр 5	-	0,57	99,44	-	100

Встановлено, що при збільшенні значень витрати G2 супутнього захисного повітряного потоку від 0 до 20-40 м³/год степінь вигорання легуючих елементів (С, Mn) в процесі напилювання із сталевих дротів марок 65Г, 70, Св-08 зменшується в середньому на 30-40%. При напилюванні дроту із нержавіючої сталі вміст таких легуючих елементів, як Ni, Mo, W в покритті, в порівнянні із їх вмістом напилюваному дроті, залишається практично незмінним. Встановлено, що при значеннях G2 20-40 м³/год значення вмісту кисню в зоні плавлення в торці дроту-аноду після різкого обриву дуги для таких марок дротів із елементами із підвищеною спорідненістю до кисню, як Х20Н80 (Ni-20 мас.% Cr), АМг 63 (Mg 6,3мас.%, Mn-0,65мас. %; Zr0,25 м АМг 63 (Mg-6,3%; Mn-0,65мас.%; Zr-0,25 мас.%, Al-основа) близькі до показників в напилених покриття, а для випадку напилювання мідного дроту М2 – цей показник в покритті менший в середньому в 1,5-2 рази.

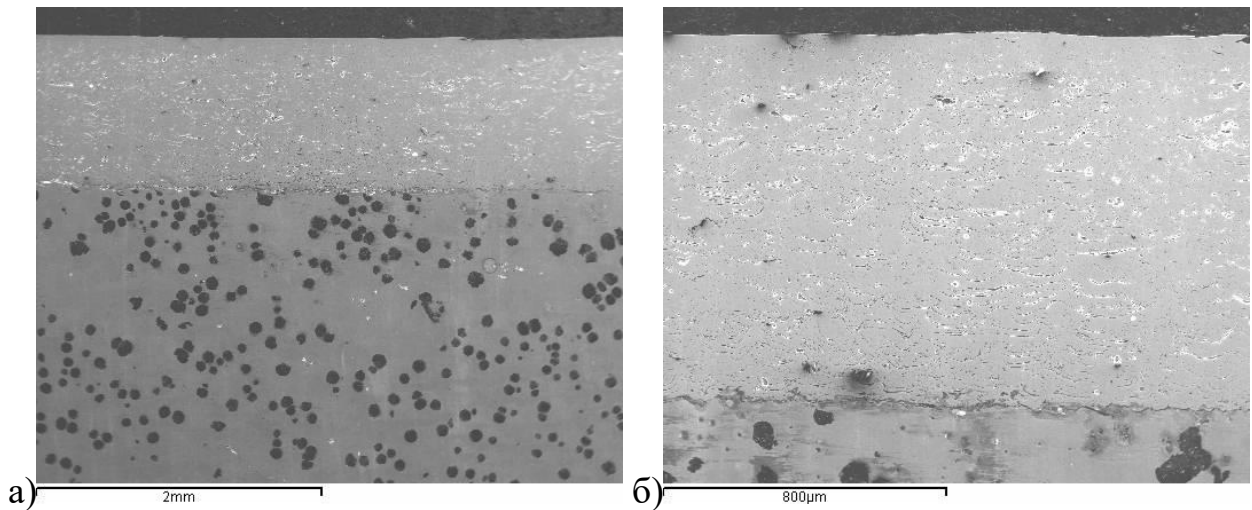
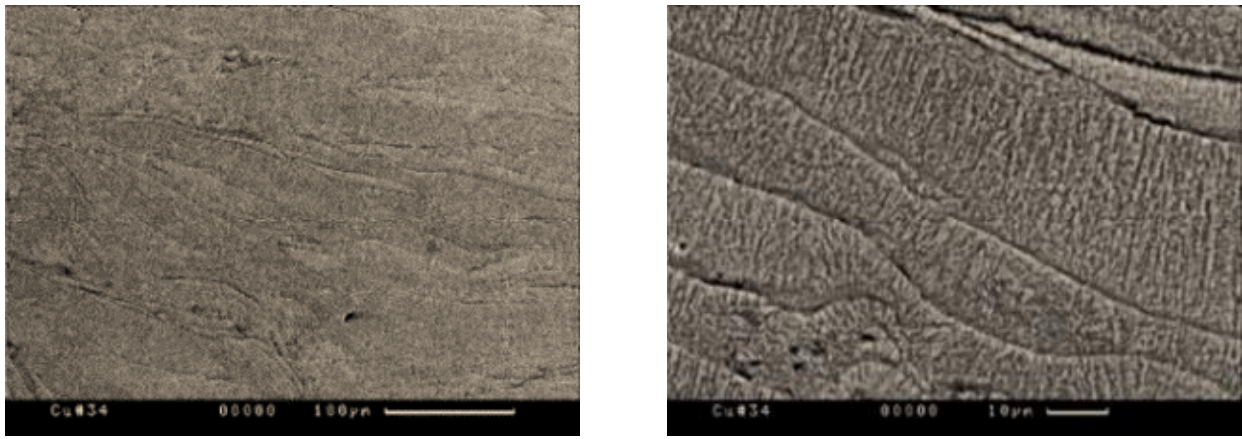


Рисунок 4.11 – Безпористе покриття, отримане плазмо-дуговим напилюванням нікелевого дроту НП1 (основа – високоміцний чавун із шаровим графітом ВЧ 35).

Напилені покриття, отримані плазмо-дуговим розпиленням мідного дроту-аноду марки М2, мають щільну шарувату структуру, характерну для плазмових покриттів, Значення поруватості в основному знаходиться в межах 0,5-2,5%. Встановлена тенденція до пониження цього показника із підвищенням значень витрати супутнього повітряного потоку. При значеннях $G_2 = 20-40 \text{ м}^3/\text{год}$, одночасно із оптимізацією таких параметрів, як сила струму, витрата і тиск плазмоутворюючого газу, дистанція напилювання, тощо, отримано безпоруваті покриття при напилювання дротів із міді М2 (рис.4.10), ніхрому, нікелю (рис.4.11), алюміній-магнієвого сплаву АМг 63. Товщина ламелей в покритті в середньому складає 8-30 мкм, границі між ламелями бездефектні (рис.4.12а,б). Це дотично свідчить про формування металургійного зв'язку між ними і реалізацію сукупності процесів мікрозварювання між раніше затверділими шарами в покритті та напилюваними розплавленими частками.



а)

б)

Рисунок 4.12 – Макро- (а) і мікроструктура (б,в) безпоруватого покриття із мідного дроту марки М2 (б, в – після травлення).

4.2. Дослідження фізико-механічних властивостей металевих покриттів, одержаних плазмо-дуговим розпилюванням плавкого дроту-аноду.

Дослідження граничних зон торців витратних анодів алюміній-магнієвого сплаву АМг63 та міді М2 (дротів діаметром 1,8 мм) показало чутливість більш «хімічно агресивного» алюмінію до вмісту кисню в газовому середовищі його розпилення. Проведені дослідження показали, що розпилення матеріалу електроду із вибраного алюмінієвого сплаву, в процесі плазмо-дугового нагріву, приводить до збільшення долі кисню в сплаві в середньому в 2,5 рази. Що змінює властивості напиленого матеріалу, так пригранична зона торцю аноду з більшим вмістом кисню порівняно до основного матеріалу дроту має мікротвердість у зоні оплавлення – 1055 МПа, тоді як мікротвердість основного металу – 1062 МПа.

МікродюрOMETричний аналіз проводили із застосуванням відповідних приладів, описаних у розділі 2. Результати вимірювання мікротвердості покриттів, нанесених плазмо-дуговим напиленням із різних типів дротів-анодів, наведені в табл.4.9.

Таблиця 4.9 – Результати вимірювання мікротвердості покриттів, нанесених плазмо-дуговим напиленням із різних типів дротів-анодів.

Матеріал електроду	Значення мікротвердості по Віккерсу, МПа				
	Основа із Ст 20	Дифузійна зона	Плазмо-дугове покриття (віддаль в напрямі від основи до вільної поверхні покриття, мкм)		
			50	300	Більше 500
Дріт нержавіючої сталі	1510	1420	3315	3630	3700
Дріт Cu марки М2	1520	2060	1100	1345	1215
Дріт Al-Mg марки св. АМг 63	2205	2220	1015	940	890

Міцність зчеплення напилених досліджуваним плазмо-дуговим способом покриттів з основою визначали за штировою методикою, описаною в розділі 2. Було встановлено, що на величину міцності зчеплення напилених шарів впливають витрати G_2 супутнього кільцевого повітряного потоку, який витікає із кільцевого зазору між соплами плазмотрона. Приклад впливу витрат супутнього потоку повітря G_2 на міцність зчеплення покриттів $B_{b.s.}$, отриманих плазмо-дуговим напилюванням сталю Ст70 і мідного дротів М2 (відрив по нормалі, основа – сталь 45) наведено в табл.5.10 і на рис.4.13. Напилювання при цьому проводили на режимі, зазначеному в табл.4.11.

Таблиця 4.10 – Вплив витрат супутнього потоку повітря G_2 на міцність $B_{b.s.}$ зчеплення покриттів (Ст70, М2) із основою (сталь 45).

G_2 , м ³ /год	$B_{b.s.}$, МПа	
	Ст70	М2
0	35	21
10	39	26
20	59	39
35	70	49
40	72	56

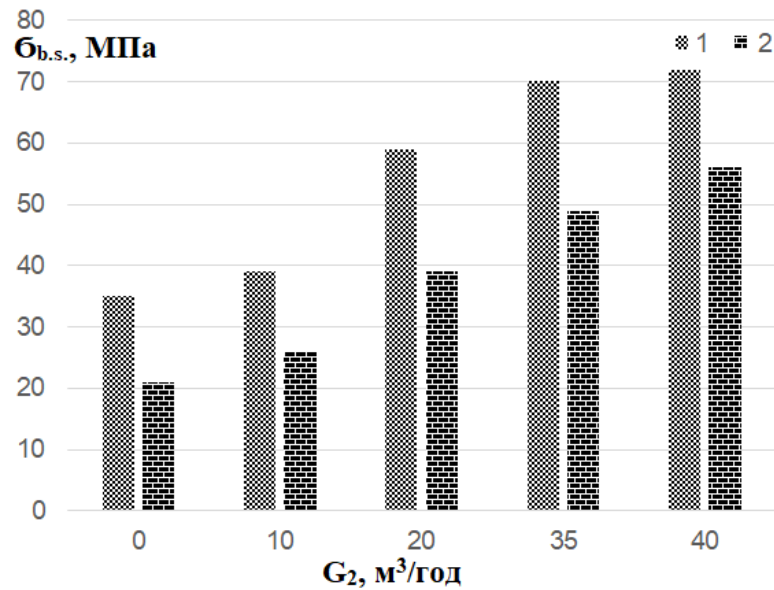


Рисунок 4.13 – Вплив витрат супутнього потоку повітря G_2 на міцність $\sigma_{b.s.}$ зчеплення покриттів із основою (сталь 45): 1 – Ст70; 2 – М2.

Таблиця 4.11 – Параметри режиму плазмо-дугового напилювання дротами-анодами із сталі Ст70 і міді М2.

Тип напилюваного дроту-аноду	Сила струму, I, А	Дистанція напилювання, мм	Витрата плазموутворюючого газу (аргону) G_1 , $m^3/\text{год}$
Ст70	230	160	1,5
М2	200	140	1

На міцність зчеплення напилених покриттів з основою впливає також сила струму I плазмової дуги. При плазмо-дуговому напиленні дроту зі сталі Ст70 із підвищенням сили струму міцність зчеплення покриттів $\sigma_{b.s.}$ (відрив по нормалі, основа – сталь 45) спочатку зростала, а під кінець дещо зменшувалася (табл.4.12, рис.4.14). Напилювання при цьому проводили із наступними параметрами режиму:

- Витрата плазموутворюючого газу (аргону) G_1 - 1,5 $m^3/\text{час}$
- Витрата G_2 супутнього кільцевого повітряного потоку, який витікає із кільцевого зазору між соплами плазмотрона - 40 $m^3/\text{год}$

- Дистанція напилювання

- 160 мм

Таблиця 4.12 – Вплив сили струму I плазмової дуги на міцність $\sigma_{b.s.}$ зчеплення покриттів зі сталі Ст70 з основою (сталь 45).

I, A	$\sigma_{b.s.}, MPa$
160	59
200	69
260	73
300	68

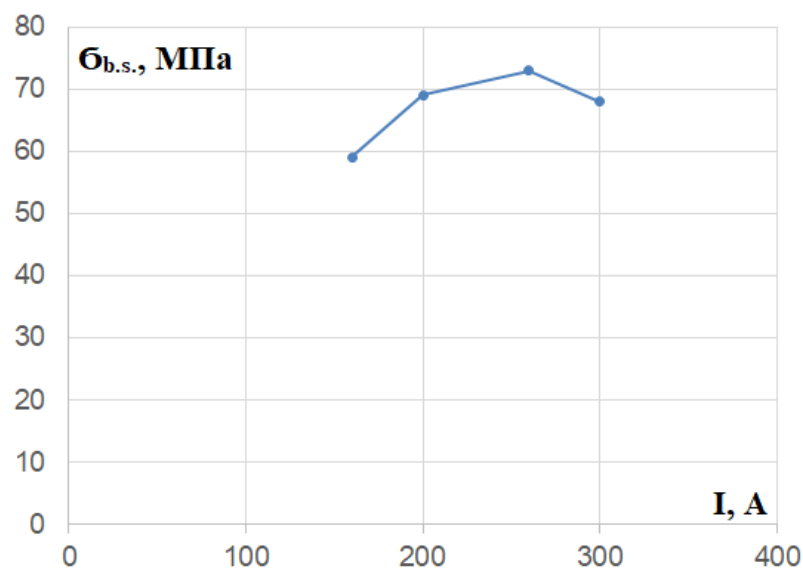


Рисунок 4.14 – Вплив сили струму I плазмової дуги на міцність $\sigma_{b.s.}$ зчеплення покриттів зі сталі Ст70 з основою (сталь 45).

Також було встановлено, що міцність зчеплення покриттів з основою залежить від способу нанесення матеріалу. Так, при порівнянні трьох способів ГТН за умов напилення нержавіючої сталі на аналогічну основу було встановлено, що плазмо-дугове напилення рухомим дротом-анодом є міцнішим на 30-35% за традиційну електродугову металізацію і на 40-45% – за газополум'яне напилення (рис.4.14). При цьому плазмово-дугові покриття нанесені при неоптимальних технологічних параметрах (витрата G_2 супутнього кільцевого повітряного потоку $5 \text{ м}^3/\text{год}$), однак, вони перевищують по цьому показнику електродугові та газополуменеві покриття.

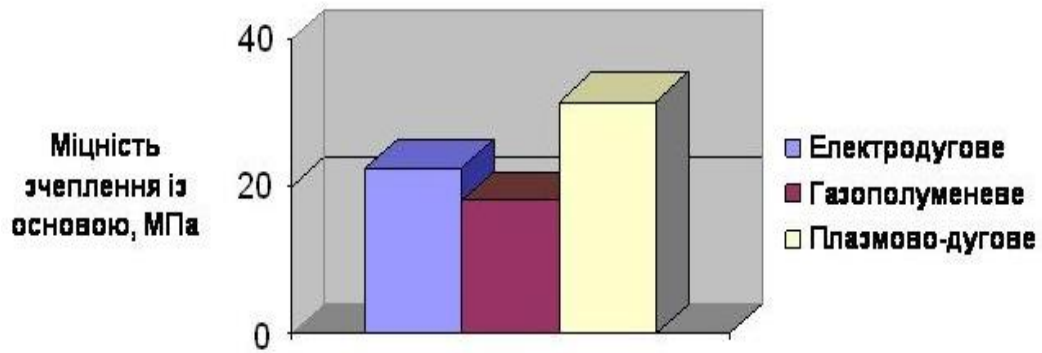


Рисунок 4.15 – Порівняння міцності зчеплення покриттів з нержавіючої сталі, нанесених на аналогічну основу різними способами ГТН.

За допомогою машини тертя 2070 СМТ-1 було проведено триботехнічні випробування покриттів, нанесених плазмово-дуговим розпиленням компактних металевих дротів-анодів. Випробування проводили в умовах з обмеженим змащенням і без змащення по схемах «диск із покриттям - колодка (чавун СЧ-20, сталь 40Х, мідноазбестовий сплав, сталь 45)», «циліндр (чавун СЧНМД) - кільце (покриття)», «площина (Ст20 - після цементації, бронза, СЧ-20) - покриття»; «диск - площина» (методика Амслера), а також при зворотно-поступальному русі з амплітудою 61 мм, $V = 0,023$ м/с, $P = 11$ МПа. Наприклад, за умов виконання тертя з обмеженим змащенням по схемах «диск із покриттям – колодка сталь 40Х» було встановлено, що покриття з дротів зі сталей 65Г і 70 мають стійкість на 60-75% більшу за сталь 20 у стані після цементації (рис.4.16).

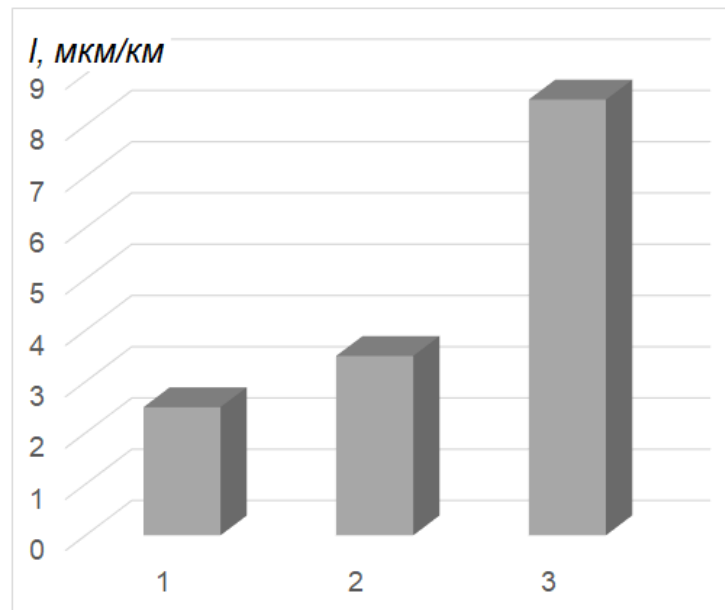


Рисунок 4.16 – Інтенсивність зношування I [мкм/км] плазмо-дугових покриттів, одержаних розпиленням дроту-аноду із сталей 65Г (1) і 70 (2) у порівнянні зі сталлю 20 після цементації (3): контртіло – сталь 40Х; навантаження $P=10$ МПа; швидкість $V=1$ м/с; змащування – масло НС20, 30 крапель/хв; машина тертя 2070 СМТ-1.

Встановлено, що технологічний параметр витрати G_2 супутнього кільцевого повітряного потоку, який витікає із кільцевого зазору між соплами плазмотрона впливає на підвищення зносостійкості покриттів в умовах граничного тертя та на стійкості при кавітаційному зношуванні. Встановлена аналогічна тенденція впливу технологічного параметру G_2 на підвищення зносостійкості покриттів в умовах граничного тертя та на стійкості при кавітаційному зношуванні, що можна пояснити підвищення адгезійної міцності між шарами покриттів по мірі збільшення G_2 . Так, наприклад, виявлено підвищення зносостійкості покриттів в умовах граничного тертя та на стійкості при кавітаційному зношуванні при росту G_2 від 0 до 35-40 м³/год.

4.3. Висновки по розділу 4.

1. Визначено, що повна відсутність нерозплавлених частинок матеріалу в двофазному струмені, дозволяє одержувати покриття з низькою пористістю (до 1,5-2,5%), незважаючи на порівняно низькі значення швидкості частинок.
2. Встановлена тенденція до пониження поруватості напилених покриттів з підвищенням значень витрати супутнього повітряного потоку G_2 і досягнення значень цього параметру в межах 0,5-2,5%, а при $G_2 = 35-40$ м³/год отримано безпоруваті покриття при напилювання дротів із міді М2, ніхрому, нікелю, алюміній-магнієвого сплаву АМг 63.
3. Підтверджено, що при збільшенні значень витрати супутнього захисного повітряного потоку G_2 від 0 до 20-40 м³/год степінь вигорання легуючих елементів (С, Мп) в процесі напилювання із сталевих дротів марок 65Г, 70, Св-08 зменшується в середньому на 30-40%. При цьому вміст кисню в зоні плавлення в торці дроту-аноду після різкого обриву дуги для таких марок дротів із елементами із підвищеною спорідненістю до кисню, як Х20Н80, АМг 63 близькі до показників в напилених покриття, а для випадку напилювання мідного дроту М2 – цей показник в покриттів менший в середньому в 1,5-2 рази.
4. Встановлено, що параметр витрати G_2 повітряного потоку, супутнього плазмовому струменю, суттєво впливає на міцність зчеплення покриттів з основою. Показано, що шляхом оптимізації технологічних параметрів значення даного показника при відриві покриттів по нормалі досягає до 60-70 МПа. Виявлено підвищення зносостійкості покриттів в умовах граничного тертя та на стійкості при кавітаційному зношуванні при росту G_2 від 0 до 35-40 м³/год.

Розділ 5. СТВОРЕННЯ РЕКОМЕНДАЦІЙ З КОНСТРУЮВАННЯ ОБЛАДНАННЯ І ВИБОРУ РЕЖИМІВ, ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ОДЕРЖАННЯ МЕТАЛЕВИХ ПОКРИТТІВ.

5.1. Створення рекомендацій з конструювання обладнання для плазмо- дугового розпилювання плавкого дроту-аноду.

При реалізації процесу плазмо-дугового дротового напилення в аргонівій дузі з інтенсивним супутнім повітряним обдуванням стабілізована електрична дуга горить між вольфрамовим катодом, що обдувається аргоном із невеликими витратами, і плавким струмоведучім дротом, що подається за зрізом подвійного сопла плазмотрона. У зазор між соплами вдувається повітря. Особливості такого процесу:

1. Плавлення і струминна течія матеріалу дротів відбувається в захисній атмосфері аргону.
2. Дроблення розплаву і розгін дисперсних частинок забезпечується надзвуковим потоком повітря, що витікає з кільцевого зазору між соплами плазмотрона.

Така послідовність подій забезпечує мінімальні втрати на випаровування матеріалу дротів, мінімальне його насичення киснем і азотом, отримання оптимального фракційного складу дисперсної фази, досягнення частками напилюваного матеріалу близькозвукової швидкості в момент зустрічі з основою, отримання найбільш високої об'ємної концентрації напилюваних частинок, мінімізацію кута розкриття двофазного потоку, який становить кілька градусів. Ці обставини створюють передумови для отримання композиційних покриттів з порошкових дротів з нульовою пористістю за хімічним складом максимально наближеним до вихідного матеріалу.

Виконані дослідження показали, що для досягнення кращих умов плавлення металевого дроту-аноду діаметром 1,2-1,6 мм його необхідно подавати на відстані 0,4-0,6 мм від осі плазмового струменя із швидкістю порядку 7-12 м/хв при робочих струмах 160-240 А. При цьому витрати плазмоутворюючого газу

(аргону) повинні становити 1,0-1,5 м³/год при тиску близько 0,4 МПа, а потік цього газу доцільно захищати й додатково розганяти зовнішнім кільцевим потоком повітря із витратами від 20 до 40 м³/год при тиску близько 0,3 МПа. Ці данні було покладено в основу розрахунків газодинаміки при створенні промислового плазмотрона для плазмо-дугового розпилення плавкого металевого дроту-аноду.

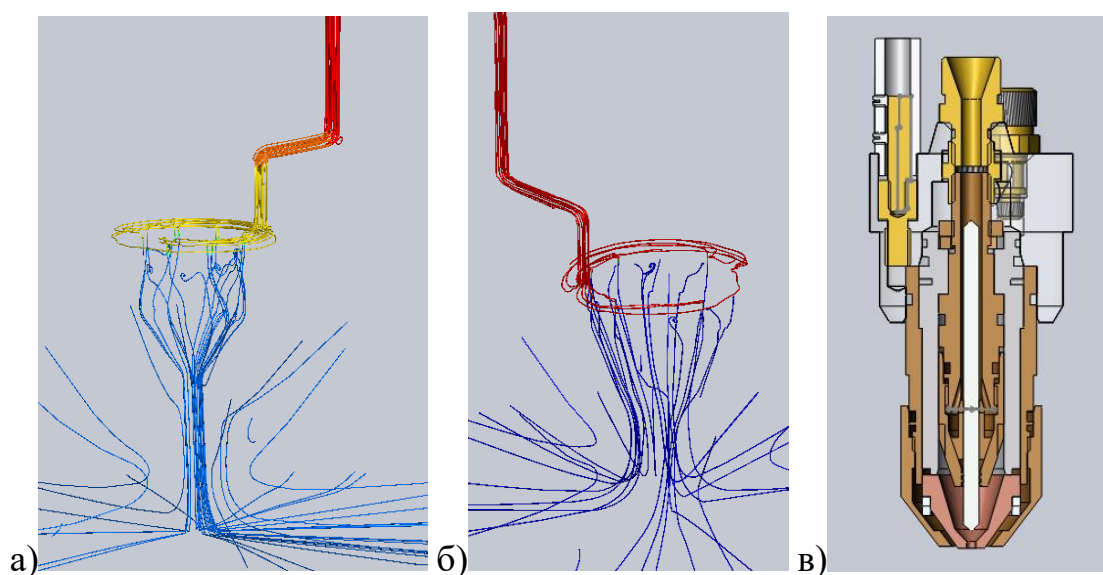


Рисунок 5.1 – Моделювання оптимального протікання аргону по контурах плазмоутворюючого (а) і захисного (б) газів для проектування плазмотрона (в).

Спочатку, за допомогою програмного пакету Solidworks Flow Simulation, проводилися розрахунки газодинаміки потоків плазмоутворюючого і захисного газів, які дозволили спроектувати катодну частину плазмотрона (рис.5.1). Після цього було перевірено вплив введення дроту-аноду на газодинаміку цих газових потоків. Всі ці розрахунки дозволили спроектувати і виготовити модельний зразок плазмотрона, який було випробувано в усьому передбачуваному діапазоні параметрів режимів. З урахуванням особливостей функціонування такого модельного зразка плазмотрона, а також наявного досвіду використання лабораторних зразків, було запропоновано шляхи усунення недоліків конструкції. Зміни конструкції дозволили створити зразок промислового плазмотрона PLAZER 30-PL-W для плазмо-дугового розпилення плавкого

металевого дроту-аноду (рис.5.2), який було покладено в основу створення відповідних комплексів обладнання.

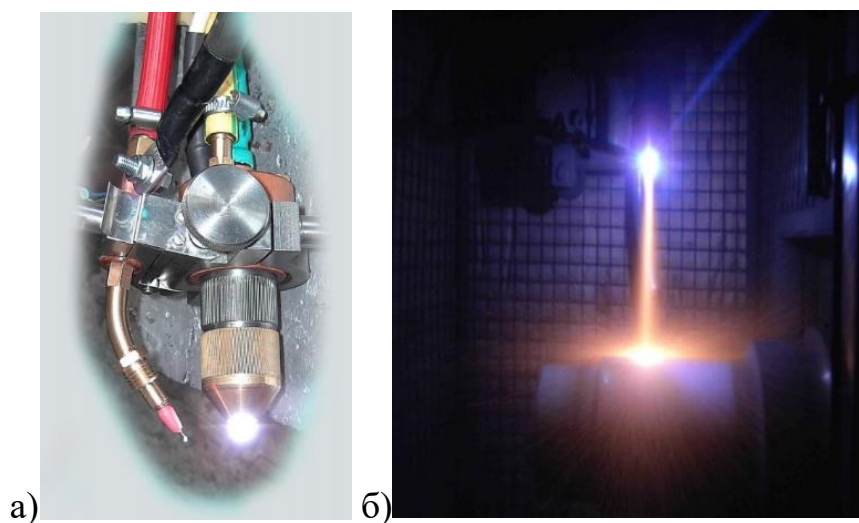


Рисунок 5.2 – Зразок промислового плазмотрона (а) для плазмо-дугового розпилення плавкого металевго дроту-аноду і процес (б) його випробувань.

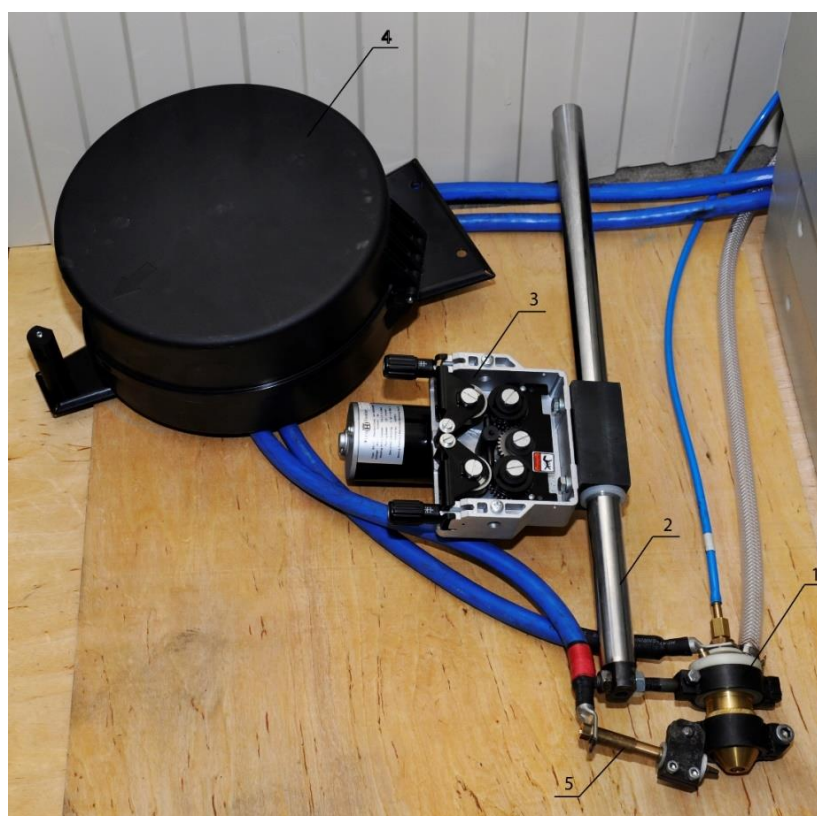


Рисунок 5.3 – Зовнішній вигляд плазмотрона PLAZER 30-PL-W із системою подачі дроту.

Для напилювання на зовнішні поверхні створений плазмотрон (поз.1) було постачено системою подачі дроту (рис.5.3), яка містить спеціальний

чотирироликаний привод (поз.3), котушку з дротом, що напилюється. (поз.4), рукав для подачі дроту (поз.6) і мундштук для підведення напруги до дроту (поз.5), що розміщені на механізмі переміщення блоку плазмотрона за допомогою штанги (поз.2). Відстань від котушки з напилюючим дротом до плазмотрона – до 1,5 м, вона може змінюватися залежно від виконання механізму переміщення блоку плазмотрона.

На підставі виконаних розрахунків і досліджень пропонуються наступні базові рекомендації з конструювання обладнання плазмо-дугового розпилення плавкого металевий дроту-аноду:

- 1) Створення або застосування джерела живлення постійного струму із неперервним стабільним функціонуванням в діапазоні струму 160...240 А при напрузі на дугі 70...80 В.
- 2) Формування турбулентного плазмового струменя за допомогою плазмотрону, що діє на основі принципу «рухомого аноду».
- 3) Орієнтація конструкції плазмотрону на заміну плазмоутворюючого газу аргону більш економічною сумішшю повітря із добавками вуглеводнів (метану, пропану тощо) при витратах в діапазоні 1,0-1,5 м³/год.
- 4) Стиснення турбулентного плазмового струменя за допомогою його зовнішнього високошвидкісного обдування стисненим повітрям із витратами 16-20 м³/год.
- 5) Використання систем подачі металевий дроту-аноду із швидкістю в діапазоні 5...10 м/хв.
- 6) Використання цільних металевий дротів-анодів діаметром 0,8...1,6 мм або порошковий діаметром 1,6...2,0 мм.

До загальних рекомендацій при створенні обладнання для високопродуктивного плазмо-дугового напилення також слід віднести рекомендацію застосування модульної структури технологічного комплексу. Така структура забезпечує максимальну технологічну гнучкість та використання стандартних вузлів і комплектуючих, там де це можливо, що значно збільшує конкурентоздатність готового обладнання та спрощує його виготовлення і обслуговування.

Незалежно від рівня автоматизації та номенклатури дротів, що будуть розпилюватися, готовий комплекс повинен складатись з:

- модуля керування та моніторингу параметрів технологічного процесу;
- джерела живлення з жорсткою ВАХ та осциляторним підпалом дуги;
- модуля підготовки та керування робочими газами;
- приладу подачі дроту з можливістю плавного регулювання швидкості подачі;
- плазмотрона з системою позиціонування дроту та струмопідводом до нього.

Для створення обладнання, що буде реалізовувати напилення відповідальних та особливо відповідальних покриттів рекомендовано:

- використання багатоступеневої системи очищення повітря;
- використання газових контролерів на обох магістралях робочих газів;
- використання контактного або безконтактного лінійного енкодера швидкості подавання дроту та реалізації зворотного зв'язку з приладом подавання дроту;
- ведення програмних лічильників ресурсів роботи деталей, що зношуються.

Наведені рекомендації можуть бути покладені в основу розробки промислового комплексу плазмо-дугового розпилення плавкого металевого дроту-аноду, який буде використано для розв'язання певних промислових завдань. Розглянемо одну з таких задач, яка була розв'язана нами із застосуванням створених рекомендацій.

Абсолютна більшість деталей тягово-рухомого складу залізничного транспорту та інших подібних виробів утилізуються не через вироблення втомної міцності, а через геометричного зношування в сполученнях пар тертя. Осі колісних пар, найчастіше, вибраковуються через фреттінг-зношення посадочних місць підшипників і бандажів коліс, при цьому залишається ще не менше 90% ресурсу працездатності осі. Плазмо-дугова технологія дозволяє на таких деталях створювати покриття з високолегованих сплавів, дозволяючи не тільки вирішувати завдання по відновленню геометричних розмірів, а й забезпечувати збільшення їх ресурсу за рахунок застосування покриттів з більш зносостійких матеріалів в зоні зносу, що фактично є модернізацією деталей і вузлів.

З урахуванням розроблених рекомендацій було створено технологічний комплекс (лінія) PLAZER SA-AW 30PL-W призначений для нанесення зносостійких покриттів при виготовленні нових вузлів або відновлення зношених поверхонь осей колісних пар та інших великогабаритних деталей типа «вал» в напівавтоматичному режимі шляхом плазмо-дугового напилення високолегованих дротів. Процес нанесення покриттів, для якого призначений вказаний технологічний комплекс, є частиною процесу реновації осей колісних, до якого також входять попередня підготовка поверхонь під напилення (зокрема, токарне розточування і струменево-абразивна обробка) і фінішна механічна обробка напиленого шару (токарна обробка і кругле шліфування).

Напівавтоматична лінія PLAZER SA-AW 30-PL-W складається з (табл.5.1, рис.5.4.):

- плазмо-дугової установки дротяного напиленням PLAZER 30-PL-W;
- обертача колісних пар;
- камери для напилювання покриттів;
- камери для струменево-абразивної обробки поверхні деталей перед напиленням;
- маніпулятора плазмотрона;
- струменево-абразивного апарату нагнітаючого типу;
- фільтрувальної системи для очищення від пилу (абразиву і залишків напилюваного матеріалу);
- вентиляційної системи з вентиляторами;
- блоку підготовки стисненого повітря для струменево-абразивного апарату і системи охолодження виробу;
- системи управління лінією, поєднаної з пультом управління плазмо-дугової установки і струменево-абразивним апаратом.

Таблиця 5.1. Технічні характеристики технологічного комплексу (лінії)
PLAZER SA-AW 30PL-W.

Параметри	Значення
Розміри деталей для плазмо-дугового напилювання (осей колісних пар), мм, не менш: - довжина осі, мм - діаметр осі, мм - довжина шийки осі, мм - діаметр шийки осі, мм	2220 200 130-200 190-220
Максимальна маса осі, яку напилюють кг, не більш:	400-500
Частота обертання осі при напилюванні, об/хв	6-180
Частота обертання осі при струменево-абразивній обробці, об/хв	6-30
Швидкість переміщення плазмотрона вздовж осі, мм/с	0-30
Швидкість переміщення струменево-абразивного сопла вздовж осі, мм/с	0-10
Тип струму електрообладнання з програмованим контролером Частота струму, Гц Напруга мережі, В Напруга ланцюгів керування, В	перемінний трифазний 50 380 24
Тиск стислого повітря в пневмосистемі (оборотного повітропостачання), кПа не менше не більше	600 800
Товщина шумозахисного шару, мм - полімерне покриття - пінопласт - базальт - скловолокно	0,5 20 58 1,5
Наявність вікна із світлофільтром для візуального спостереження за процесом, шт.	1
Об'єм повітря, який відсмоктується, м ³ /год	5-7
Наявність фільтра очистки від пилу і аерозолів	+
Габаритні розміри камери-напівавтомату з урахуванням зони обслуговування (без надзвукової плазмової установки), мм, не більш: - довжина - ширина - висота	5350 3400 2320
Потужність, що споживає комплекс (без плазмової установки), кВт, не більш	12
Маса комплексу (без плазмової установки), кг, не більш	2200



Рисунок 5.4. – Зовнішній вигляд напівавтоматичної лінії PLAZER SA-AW 30PL-W.

Плазмова установка PLAZER 30-PL-W реалізує процес плазмо-дугового напилення плавким дротом-анодом в аргонівій дузі з інтенсивним супутнім повітряним обдуванням. Тут дуга горить між вольфрамовим катодом, що обдувається аргонем із витратами 1,0-1,5 м³/год і плавким струмопровідним дротом, що подається за зрізом подвійного сопла плазмотрона (табл.5.2, рис.5.5). Плазмова установка включає шафу управління зі спеціалізованим інверторним джерелом живлення, плазмотрон з регульовальним механізмом, механізм подачі дроту, кабель-шланговий пакет, блок підпалювання дуги. В комплект поставки можуть входити витратні матеріали – спеціальний металевий дріт для нанесення зносостійких покриттів і відновлення зношених поверхонь деталей. Шафа управління плазмової установкою PLAZER 30-PL-W включає вимірювальну, пускорегулюючу і сигнальну апаратуру. На лицьовій панелі шафи управління

розміщені: передня панель джерела електроживлення, прилади для вимірювання, контролю та регулювання тиску і витрати робочих газів, управління механізмом подачі дроту, режимами роботи установки, схеми запуску плазмотрона, газоподготовки повітря і аргону, управління двигуном подачі дроту.

Таблиця 5.2. Технічні характеристики плазмової установки PLAZER SA-AW 30PL-W.

Параметри	Значення
Споживання енергії, кВа не більше	30
Напруга мережі живлення трифазного змінного струму частотою 50 Гц, В	380
Напруга холостого ходу, В	160
Діапазон регулювання робочого струму, А	100 – 250
Діапазон регулювання робочої напруги, В	30 – 80
Найбільша тривалість включення, ПВ%	100
Витрата повітря при тиску 0,6 МПа, $\text{м}^3/\text{год}$	50
Витрата аргону при тиску 0,1 МПа, $\text{м}^3/\text{год}$	2
Швидкість подачі дроту, м/хв	5 – 15
Охолодження плазмотрона	повітряне
Ресурс сопла і катода плазмотрона, годин машинного часу, не менше	100
Габаритні розміри, мм: - джерела електроживлення - шафи управління	501 x 478 x 503 605 x 605 x 1600

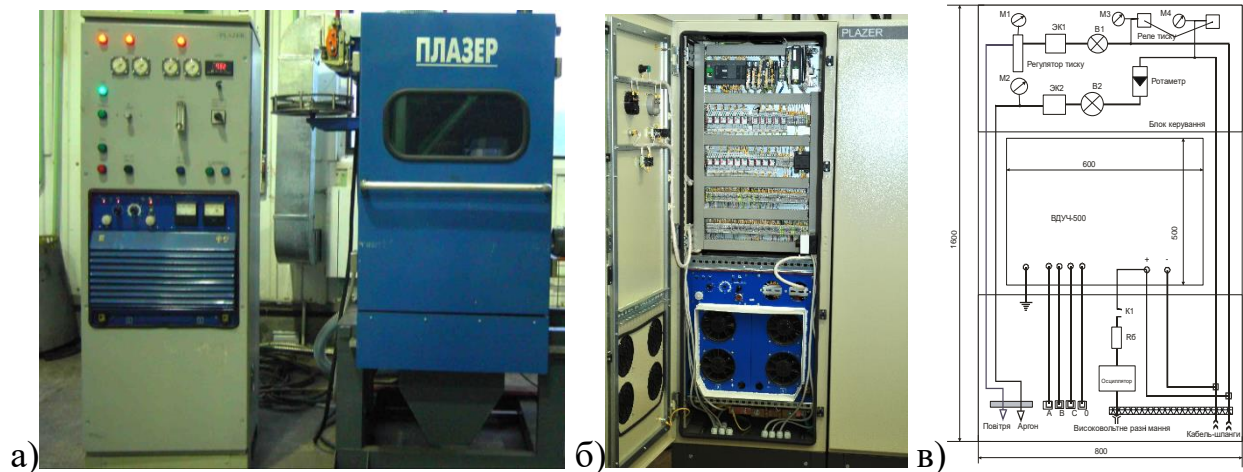


Рисунок 5.5. – Зовнішній вигляд (а) плазмової установки PLAZER SA-AW 30PL-W, шафа управління (б) і її принципова схема (в).

Переваги пропонованої технології відновлення осей колісних пар і різних деталей типу «вал» за допомогою обладнання PLAZER SA-AW 30PL-W наступні:

- процес напилення не знижує втомної міцності та інших характеристик міцності відновлюваної деталі, на відміну від наплавлення (нагрів виробу не більше 150°C);
- відсутність деформації відновленої деталі;
- висока стабільність процесу напилення і властивостей покриттів (ресурс формує плазмову дугу сопла і катода не менше 100 годин машинного часу);
- можливість наносити покриття з різних типів дротів, в т.ч. високолегованих, і, таким чином, регулювати значення твердості, зносостійкості, корозійної стійкості та інші експлуатаційні характеристики поверхні деталей;
- відрізняється простотою в експлуатації, не вимагає висококваліфікованого персоналу.

Напівавтоматична лінія PLAZER SA-AW 30PL-W дозволяє відновлювати осі колісних пар, отримуючи на виході відремонтовані деталі з ресурсом, що перевищує ресурс нової деталі при собівартості процесу нижче 30% від ціни нового виробу.

5.2. Створення рекомендацій з вибору технологічних режимів одержання металевих покриттів.

Ефект від плазмового напилювання досягається за рахунок створення на поверхні виробу якісного захисного покриття, яке багаторазово підвищує експлуатаційні властивості деталі або відновлює первісний розмір.

У цілому якість покриттів є складною комплексною характеристикою, що залежить від безлічі факторів технологічного процесу, і формується послідовно на етапах попередньої обробки поверхні, нанесення покриття й фінішної обробки його поверхні. У значній мірі якість деталей визначається стадією фінішної обробки. Найпоширенішим способом фінішної обробки зносостійких покриттів є шліфування, яке забезпечує можливість високоякісної обробки

покриттів з високим рівнем твердості. Однак у ряді випадків можливості керування процесом шліфування не дозволяють уникнути дефектів (тріщин, сколів і відшарувань), обумовлених рівнем залишкових напружень і структурою покриттів, сформованих на етапах попередньої обробки і напилювання. Тому комплексний розв'язок по забезпеченню якості покриттів, що розглядає етапи формування покриттів, як єдиний процес із позиції теорії технологічної спадковості, дозволяє розширити можливості забезпечення якості покриттів на етапі фінішної обробки шліфуванням, представляється актуальним.

При виборі режимів плазмового напилювання, які визначають енергетичний стан часток, що напилюють (температура й швидкість), доводиться вирішувати суперечливе завдання. Для формування найбільш сприятливого варіанта структури потрібне збільшення температури часток у плазмовому струмені для збереження їх розплавленими до потрапляння на деталь, що напилюють. Однак при цьому в структурі покриття підвищується рівень залишкових напружень, що негативно відбивається на їхній міцності. До того ж збільшення енергії плазми сприяє вигорянню легуючих елементів або згорянню окремих порошкових часток. Таким чином, при реалізації процесу плазмо-дугового напилювання виникає необхідність у визначенні раціональної області режимів.

На стадії фінішного шліфування обрані режими різання повинні забезпечувати розмірну точність і якість поверхні. Необхідно виключити появу дефектів, викликаних надмірним перегрівом у зоні обробки й ростом залишкових напружень.

Економічна ефективність плазмо-дротового напилювання визначається:

- підвищенням надійності й довговічності продукції, що випускається й використовується мінімум у два рази;
- скороченням витрат на виготовлення запасних частин;
- економією металу, що витрачається на виготовлення запасних частин;
- вивільненням працівників, зайнятих на виготовленні запасних частин і відновленні деталей;

- збільшенням випуску продукції на існуючому устаткуванні, внаслідок скорочення простоїв для заміни зношених деталей і аварійних ремонтів устаткування.

Для розробленого технологічного обладнання для реалізації процесів плазмо-дугового напилення металевим дротом-анодом, можуть бути відсутні певні ланки базового алгоритму технологічного процесу ГПН, а саме: в залежності від розміру деталей можна уникнути стадії попереднього підігріву та механічної обробки різанням. Також, враховуючи товщину та якість нанесених покриттів, можлива відсутність фінішної обробки деталі, що суттєво відбивається на кінцевій собівартості.

За основу нами прийнято типовий технологічний процес ГПН для одержання покриттів на поверхні деталей (рис.5.6).

Для одержання ефективного результату нанесення якісних покриттів шляхом плазмо-дугового розпилювання металевого дроту-аноду схему, запропоновану на рис.5.6, необхідно доповнити структурно-логічною схемою технологічного процесу обробки матеріалів та нанесення покриттів (рис.5.7.). Подальшу розробку технологій плазмо-дугового напилення функціональних покриттів плавким металевим дротом-анодом пропонується здійснювати за даною структурно-логічною схемою технологічного процесу обробки матеріалів та нанесення покриттів, базованого на принципі плазмо-дугового нагріву із рухомим анодом.

Відповідно схемам, наведеним на рис.5.6 і 5.7, запропоновано наступні базові рекомендації з вибору режимів процесу плазмо-дугового напилення:

I. Попередня дефектація поверхні, яку відновлюють, механічна (уразі необхідності) і струменево-абразивна підготовка.

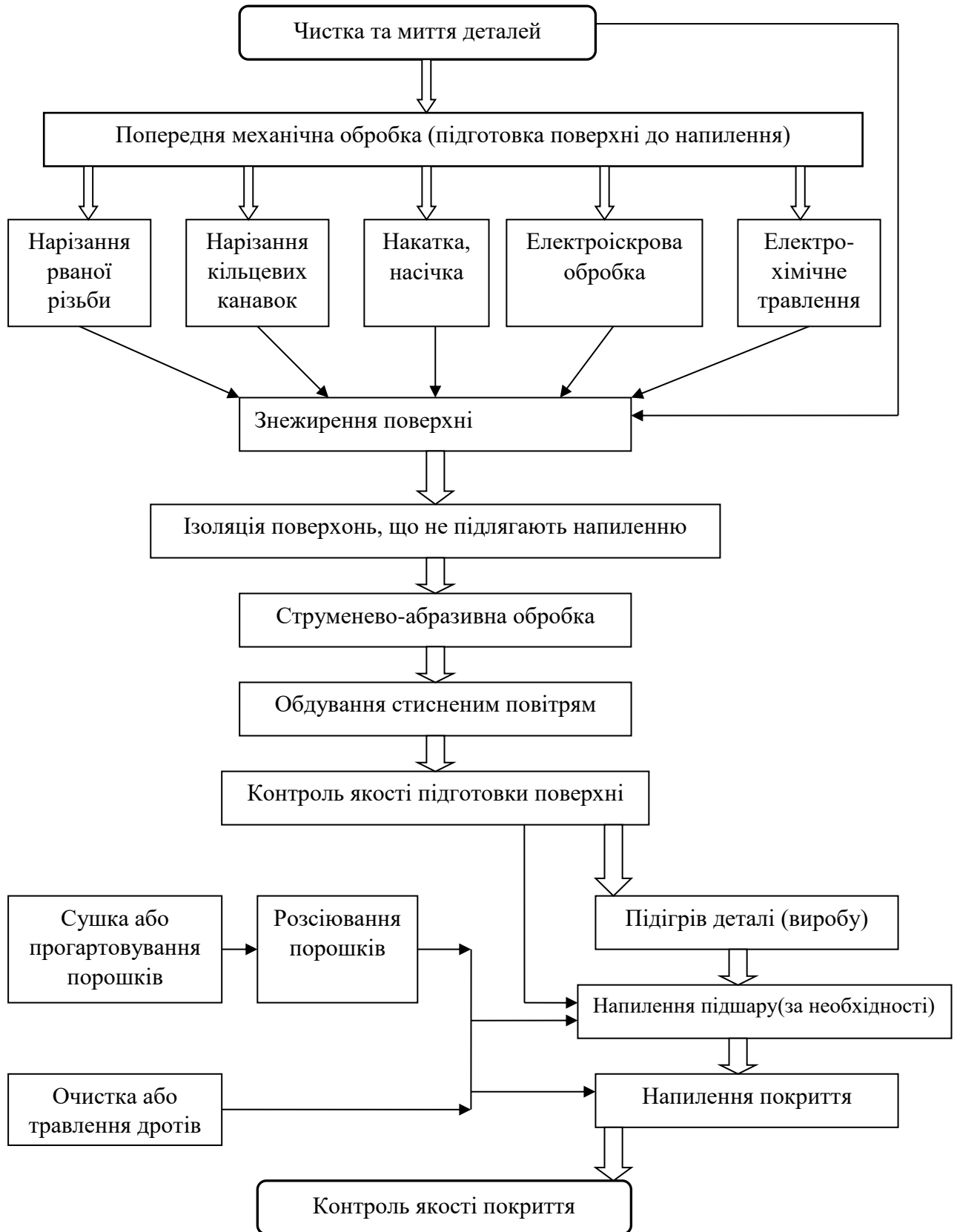


Рисунок 5.6 – Схема технологічного процесу плазмо-дугового нанесення покриттів металевим дротом-анодом на поверхні деталей.

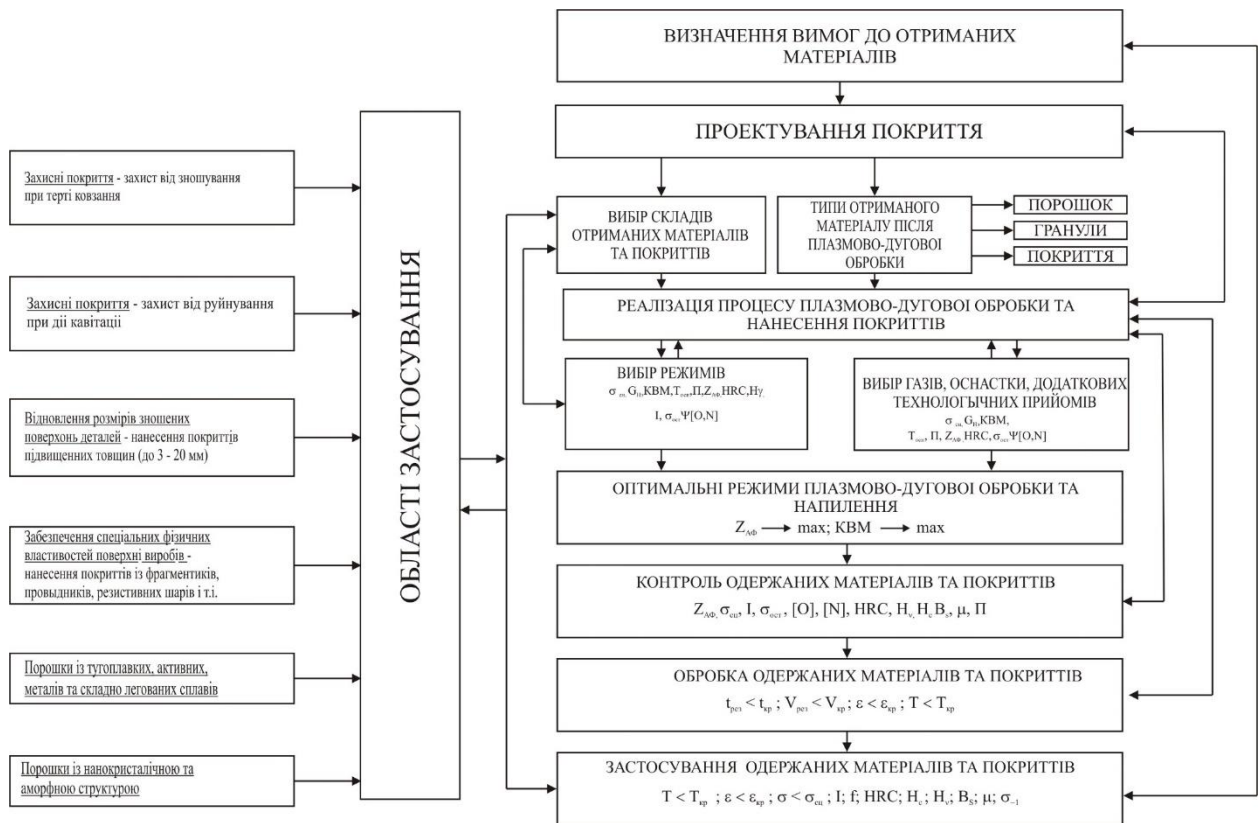


Рисунок 5.7 – Базова структурно-логічна схема технологічного процесу обробки матеріалів та нанесення покриттів для плазмово-дугового розпилення рухомого дроту-аноду.

II. Плазмово-дугове напилення заздалегідь обраним дротом-анодом.

- 1) Розпилення дроту у дрібнокрапельному режимі при струмах дуги, близьких до 200...220 А (160-240 А).
- 2) Регулювання швидкості подачі дроту в межах 5-7 м/хв.
- 3) Витрати плазмоутворюючого газу (аргону або повітряно-метанової суміші) 1,0-1,5 м³/год.
- 4) Витрати захисного газу (повітря) 16-20 м³/год.
- 5) Дистанція напилення 160...200 мм.

III. Фінішна механічна обробка (у разі необхідності).

Для доповнення рекомендацій з вибору режимів процесу плазмово-дугового напилення виконали оптимізацію режимів для досліджуваних складів дротів. Технологічні параметри змінювали в таких інтервалах: робочий струм плазмотрона –

160...300 А; робоча напруга дуги 60...80 В; витрата плазмоутворюючого газу (аргону) 1,0...1,5 м³/год; витрата повітря для створення супутнього потоку, який охолоджує сопло та обтискає високотемпературний струмінь, – 0...20 м³/год; дистанція напилення – 150...250 мм; швидкість подачі дроту-аноду 2...10 м/хв.

В якості критерію оптимізації використовували параметр коефіцієнта використання матеріалу (КВМ), який визначається за формулою:

$$\text{КВМ} = (m_c / m_w) \cdot 100\% ,$$

де m_c – маса напиленого покриття, нанесеного за задану одиницю часу, m_w – маса дроту-аноду, розпиленого за задану одиницю часу.

Для визначення коефіцієнта використання матеріалу, покриття наносили на пластини із конструкційної сталі Ст.20 розміром 100x100x4 мм. Пластини попередньо зважували з точністю до 0,1 г. Час нанесення покриття складав 10 секунд. Перед нанесенням покриття поверхня всіх зразків була піддана струменево-абразивній обробці електрокорундом.

Значення КВМ в процесі оптимізації режимів для вибраних типів матеріалів змінювались в інтервалі 58-72%. Встановлено, що на величину КВМ помітно впливають такі параметри, як тиск та витрата робочих газів, сила струму, дистанція напилення. Найбільш суттєвий вплив на якість покриття та величину КВМ здійснює тиск і витрати повітря, яке використовується для формування супутнього потоку. Від цього параметру залежить перехід від турбулентного до ламінарного режиму витикання плазмового струменю і, відповідно, ступінь взаємодії розпилюваного матеріалу із киснем та азотом.

В результаті виконаних досліджень вибрані оптимальні режими нанесення покриттів із досліджуваних матеріалів, які приведені в табл.5.3. На прикладі покриття із нержавіючої сталі встановлено, що плазмо-дугове напилення при режимах, що відрізняються від параметрів приведених в табл.5.3, не забезпечує необхідної якості покриття. Покриття, нанесені при неоптимальних режимах відрізняються підвищеною дефектністю структури, а саме: пористістю, наявністю великої кількості оксидних прошарків, дефектами на границі між

напиленими частками (ламелями) та на границі між покриттям і основою, а також підвищеною долею сферичних часток.

Таблиця 5.3. Оптимальні режими плазмо-дугового напилення покриттів із досліджуваних матеріалів дроту-аноду, визначені по критерію КВМ.

Матеріал дроту-електроду	Найменування параметрів плазмо-дугової металізації							
	Тиск газів при включенні плазмотрон, МПа		Тиск газів в процесі металізації, МПа		Напруга, В	Струм, А	Електрична потужність, кВА	Дистанція напилення покриттів, мм
	повітря	аргон	повітря	аргон				
Ст.70	0,64	0,52	0,31	0,44	70	220	15,4	104
Нержавіюча сталь	0,64	0,44	0,31	0,38	75	220	16,5	104
Ніхром Х20Н80	0,64	0,44	0,31	0,38	70	220	15,4	104
Мідь М2	0,64	0,44	0,31	0,38	80	180	14,4	104
Алюмінієвий сплав АМг63	0,64	0,44	0,31	0,38	70	200	14,0	104

5.3. Розробка і впровадження технологічних процесів плазмо-дугового напилювання покриттів.

1) **Технологічний процес плазмо-дугового напилення різьбових з'єднань насосно-компресорних труб (НКТ).** Зростання обсягів видобутку нафти призвів до збільшення числа видобувних свердловин і переміщенню нафтовидобутку в арктичні регіони і шельфи північних морів. У цих умовах завдання по розробці і застосуванню ресурсозберігаючих технологій, що дозволяють знизити витрати на утримання та експлуатацію обладнання, в тому числі труб насосно-компресорних труб (НКТ), стають все більш актуальними. Відмова нарізного з'єднання НКТ є одним з джерел цих витрат, і становить

близько 50% всіх експлуатаційних відмов НКТ (рис.5.8). Важконавантажене різьбове з'єднання «ніпель-муфта» найбільш часто пошкоджується через адгезійне схоплювання, що призводить до необхідності передчасно міняти дефектні деталі, тобто зменшується кількість спуско-підйомних операцій (СПО) до закінчення гарантійних термінів експлуатації НКТ. Також значно зростають витрати на ремонт різьблення НКТ, який включає в себе відрізання різьбових кінців, укорочення труби, нарізання нової різьби на НКТ.



Рисунок 5.8 – Пошкодження різьб НКТ без покриття.

Розроблено технологію плазмо-дугового напилення мідних покриттів, яка дозволяє підготувати обсадні труби до збірки, підвищує їх герметичність і збільшує ресурс. Основні параметри технологічного процесу: $I=180$ А, $U=80$ В, $V_{др}=7,5$ м/хв, $V=2$ м/хв, $G_1=1,0$ м³/год, $G_2=20$ м³/год, $L=104$ мм.

У нафтовидобувній галузі промисловості для обробки різьбових з'єднань обсадних труб і муфт перспективним є застосування протизношуваних антифрикційних мідних покриттів. Потрібна технологія нанесення покриттів, яка дозволяє знизити і стабілізувати коефіцієнт тертя при згвинчуванні/розгвинчуванні, запобігти виникненню задирів на різьбі і корозії металу. Розроблена технологія плазмо-дугового напилення покриттів з мідного

струмопровідного дроту апробована для нанесення «антиадірних» і «антисхоплюючихся» покриттів на різьбу НКТ в нафтовидобутку. Нанесення покриттів на різьбу НКТ застосовується як при виробництві нових насосно-компресорних труб, так і при ремонті пошкоджених в процесі експлуатації труб (рис.5.9). Застосування технології збільшує більш ніж в 10 разів експлуатаційний ресурс різьби НКТ, разом із зміцненням різьби НКТ. Сумарний обсяг відходів ремонтної діяльності зменшується в 1,5-2 рази, скорочуються в кілька разів витрати на покупку нових насосно-компресорних труб. Також, на 40-50%, скорочується час збирання-розбирання НКТ на об'єктах, за рахунок антиадірних властивостей покриття.



Рисунок 5.9 – Приклад різьби НКТ із напиленням за розробленою технологією мідним покриттям.

Даний технологічний процес впроваджено на підприємстві Zibo KNC Petroleum Equipment Co, Ltd, (КНР).

2) Технологічний процес плазмо-дугового напилення струмопровідних покриттів контактів. Можливість нанесення покриттів з високою електропровідністю (алюмінієві, мідні) на будь-яку металеву або керамічну основу при високій адгезії забезпечує ефективне застосування покриттів в різних електронних і електротехнічних виробках:

- Нанесення мідних доріжок, смуг, контактних майданчиків на алюмінієві і сталеві вироби і деталі (зокрема, обміднення шин і поверхонь заземлення тощо).
- Нанесення підшарів для пайки. Технологічна простота нанесення покриттів на будь-яку металеву основу (зокрема – чавун і алюміній), а також на скло і кераміку, дає можливість обміднювати ці підкладки, щоб потім, залудити їх будь-якими припоями, створювати паяні з'єднання будь-якого призначення.
- Нанесення електропровідних покриттів на керамічні вироби (монтажні плати, порцелянові ізолятори тощо).

Нами було створено низку технологічних процесів нанесення мідних (дріт з міді М2) покриттів на режимі, який мав параметри, аналогічні обраним для випадку напилення НКТ. Основні відмінності містилися у підготовці деталей під напилення і фінішній обробці. Було створено технології нанесення доріжок і полос (рис.6.10), обміднення наконечників (рис.5.11), нанесення електропровідних покриттів і підшарів під пайку на вироби із кераміки (монтажні плати, ізолятори тощо).

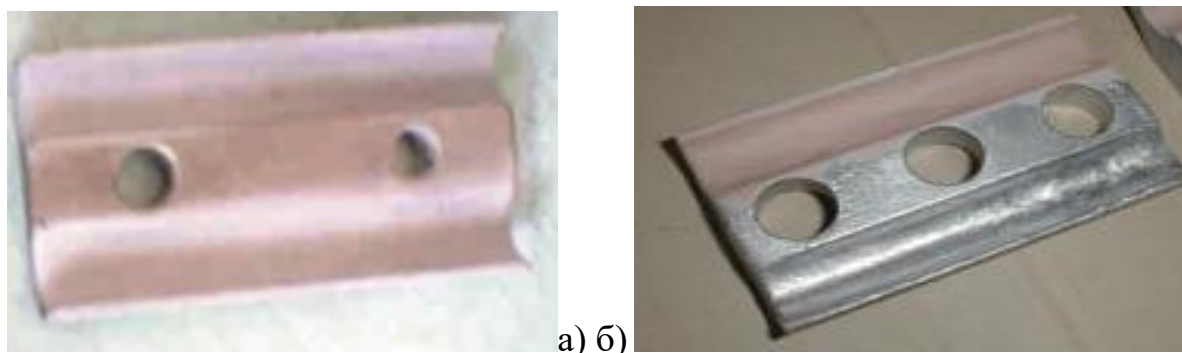


Рисунок 5.10 – Нанесення мідних доріжок і полос на з'єднувальні контактні елементи.



Рисунок 5.11 – Алюмінієві кабельні контакти із мідним контактними поверхням, нанесеним плазмово-дуговим напилюванням мідного дроду-аноду.

Даний технологічний процес впроваджено на підприємстві Zibo KNC Petroleum Equipment Co, Ltd, (КНР).

5.4. Висновки по розділу 5.

1. Для вибраних типів матеріалів визначено оптимальні за критерієм КВМ режими плазмово-дугового напилення (КВМ до 72%). Встановлено, що на величину КВМ впливають такі параметри, як тиск та витрати робочих газів, сила струму, дистанція напилення. Найбільш суттєвий вплив на якість покриття та величину КВМ здійснює тиск і витрати повітря, що використовується для формування супутнього потоку, від якого залежить перехід від турбулентного до ламінарного режиму витикання плазмового струменю і, відповідно, ступінь взаємодії розпилюваного матеріалу із киснем та азотом.

2. Розроблено технологію нанесення мідних покриттів, яка більш ніж в 10 разів збільшує експлуатаційний ресурс різьби НКТ, зменшує в 1,5-2 рази сумарний обсяг відходів ремонту, в кілька разів скорочує витрати на закупівлю нових НКТ, на 40-50% скорочує час збирання-розбирання НКТ при експлуатації на об'єктах за рахунок атізадірних властивостей покриття.

3. Створено технологію плазмо-дугового нанесення покриттів з високою електропровідністю (алюмінієві, мідні) на будь-яку металеву або керамічну основу при високій адгезії, що забезпечує ефективне застосування покриттів в різних електронних і електротехнічних виробках.
4. Розроблена напівавтоматична лінія PLAZER SA-AW 30PL-W дозволяє відновлювати осі колісних пар, отримуючи на виході відремонтовані деталі з ресурсом, що перевищує ресурс нової деталі при собівартості процесу нижче 30% від ціни нового виробу.

Загальні висновки.

1. Виконано комплекс теоретичних досліджень процесу плазмо-дугового напилення плавким зовнішнім металевим дротом-анодом із використанням фізико-математичних моделей процесів тепло- і масопереносу в електродуговій зоні та турбулентному плазмовому струмені, базованих та магнітогідродинамічних (МГД) рівняннях у наближенні турбулентного граничного шару, виявлені закономірності плавлення та розпилення дроту-анод, закономірності формування структури та фізико-механічних властивостей покриттів в залежності від умов технології і типу дроту-аноду.

2. На підставі дослідження фізико-металургійних особливостей процесу плазмо-дугового напилювання покриттів плавким металевим дротом-анодом запропоновано ламіналізувати плазмовий струмінь за рахунок його стиснення зовнішнім високошвидкісним повітряним потоком із витратами до 40 м³/год, який сприяє підвищенню напруженості електричного поля, а також забезпечує захист розплавлених крапель металу від окислення.

3. Встановлено, що вольт-амперна характеристика стовпа дуги при плазмо-дуговому напилюванні плавким металевим дротом-анодом є зростаючою і істотно залежить від витрати плазмоутворюючого газу, причому в діапазоні струмів $I=160\dots 260$ А швидкість зростання U збільшується зі збільшенням I .

4. Визначені закономірності зміни температури плазмового потоку уздовж осі струменя, здійснена візуалізація процесу формування розплаву на торці дроту-аноду. Виявлено явище вторинної диспергації розплавлених частинок в потоці розміром 600...750 мкм при відриві від торця дроту-аноду до розмірів 40...150 мкм при підвищенні швидкості потоку до 150...200 м/с.

5. Порівняння результатів розрахунків, виконаних по створеним фізико-математичним моделям, із результатами фізичних експериментів, підтвердили, що розбіжність розрахункових та експериментальних даних не перевищують 5-10%.

6. Виявлено аномальний ефект виникнення високошвидкісних (4 км/с) сфероподібних яскравих розрядів розміром до 5 мм навкруг поверхні розплавлених часток при плазмо-дуговому розпилюванні вольфрамового дроту-аноду (сфероподібна зона просторового поділу зарядів і додаткової іонізації плазми), який пояснюється явищем значного росту термемісії електронів навколо високотемпературної краплі вольфраму.

7. Підтверджено, що при збільшенні значень витрати супутнього захисного повітряного потоку G_2 від 0 до 20-40 м³/год степінь вигорання легуючих елементів (С, Mn) в процесі напилювання із сталевих дротів марок 65Г, 70, Св-08 зменшується в середньому на 30-40%. При цьому вміст кисню в зоні плавлення в торці дроту-аноду після різкого обриву дуги для таких марок дротів із елементами із підвищеною спорідненістю до кисню, як Х20Н80, АМг 63 близькі до показників в напилених покриття, а для випадку напилювання мідного дроту М2 – цей показник в покритті менший в середньому в 1,5-2 рази.

8. Встановлена тенденція до пониження поруватості напилених покриттів з підвищенням значень витрати супутнього повітряного потоку G_2 і досягнення значень цього параметру в межах 0,5-2,5%, а при $G_2 = 35-40$ м³/год отримано безпоруваті покриття при напилювання дротів із міді М2, ніхрому, нікелю, алюміній-магнієвого сплаву АМг 63.

9. Встановлено, що параметр витрати G_2 повітряного потоку, супутнього плазмовому струменю, суттєво впливає на міцність зчеплення покриттів з основою. Показано, що шляхом оптимізації технологічних параметрів значення даного показника при відриві покриттів по нормалі досягає до 60-70 МПа. Виявлено підвищення зносостійкості покриттів в умовах граничного тертя та на стійкості при кавітаційному зношуванні при росту G_2 від 0 до 35-40 м³/год.

10. Розроблено рекомендації по виборі раціональних технологічних режимів, що дозволяють одержувати металеві покриття товщиною до 5 мм і більше із зниженою поруватістю (1-2%) і міцністю зчеплення з основою до 60-70 МПа при коефіцієнті використанні матеріалу 72% плазмо-дуговим напилюванням плавким дротом-анодом діаметром 1,2-1,6 мм, що подається із

швидкістю 7-12 м/хв при струмах 160...260 А, із використанням в якості плазмоутворюючого газу аргону із витратами 1,0-1,5 м³/год та витратою супутнього повітряного потоку до 35 м³/год.

11. Виконано промислове впровадження отриманих результатів досліджень та розробок в Україні (напівавтоматична лінія плазмо-дугового напилювання шийок осей колісних пар рухомого складу залізничного транспорту) і в КНР (різьбові з'єднання бурових та нафтовидобувних труб і контактні площадки, Zibo KNC Petroleum Equipment Co, Ltd).

Список літератури.

1. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением. Под ред. акад. Б.Е. Патона. – М., «Машиностроение», 1974. – 768 с.
2. Максимович Б.И. Производство металлических порошков для газотермического напыления, наплавки и пайки / Б.И. Максимович, В.П. Гончаренко, В.И. Зеленин и др. // Информ. письмо АН УССР, Ин-т электросварки им. Е.О.Патона, №48. – Киев, 1981, – 4 с.
3. Boulos M. Plasma power can make better powders // Metal Powder Report, Vol.59, iss.5. 2004. – P. 16–21.
4. Пупань Л.И., Кононенко В.И. Перспективные технологии получения и обработки материалов: Учеб. пособие / Л.И. Пупань, В.И. Кононенко. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2008. – 261 с.
5. Сабиров И.Р., Зернин Е.А. Качественное изменение состава плазмы дуги для стабилизации процесса сварки // Технология металлов, №4, 2010. – С. 31-34.
6. Краснов А.Н. Низкотемпературная плазма в металлургии / А.Н. Краснов, С.Ю. Шаривкер, В.Г. Зильберберг // М.: Металлургия, 1970. – 216 с.
7. Бабкин А.С. Исследование влияния состава газовых смесей на температуру плазмы сварочной дуги / А.С. Бабкин, В.А. Голубев, В.Н. Рощупкин, А.Н. Гончаров // Сварочное производство, №7, 2008. – С. 3-9.
8. Газотермические покрытия из порошковых материалов. Справочник / Борисов Ю.С., Харламов Ю.А., Сидоренко С.Л., Ардатовская Е.Н. // Киев: Наукова думка, 1987. – 544 с.
9. Pawlowski L. The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings. - John Wiley & Sons, 2008. – 656 p.
10. Gunputh U., Le H. Composite coatings for implants and tissue engineering scaffolds // Biomedical Composites (Second Edition), Woodhead Publishing Series in Biomaterials, 2017, 616 p. – P. 111-138.
11. Juhasz J.A., Best S.M. Surface modification of biomaterials by calcium phosphate deposition // Methods Analysis and Applications, Woodhead Publishing Series in Biomaterials, Book 2011, 432 p. – P. 143-169.
12. Чередниченко В.С. Плазменные электротехнологические установки / В. С. Чередниченко, А. С. Аньшаков, М. Г. Кузьмин. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – 602 с.
13. Кайдалов А.А. Современные технологии термической и дистанционной резки конструкционных материалов / А.А. Кайдалов. – Киев: Эко-технология, 2007. – 456 с.
14. Krink V. Plasmaschneidtechnologie – Erweiterung wirtschaftlicher Anwendungsgebiete / V. Krink, H. Simler, F. Laurisch // ICCT 2006: Internationale Schneidtechnische Tagung; Vorträge der gleichnamigen Konferenz. [Hannover, 10 und 11 Oktober 2006]. – S. 18–25.

15. Кречмар Э. Напыление металлов, керамики и пластмасс. Пер. с нем. Е.М. Стрельцовой, Д.Н. Маневич; Под ред. М.Е. Морозова, И.А. Немковского. – Москва: Машиностроение, 1966. – 432 с.
16. Heimann R.B. Plasma-Spray Coating: Principles and Applications. – Weinheim ; New York : VCH, 1996. – 354 p.
17. WANG M. Composite coatings for implants and tissue engineering scaffolds // Biomedical Composites, Woodhead Publishing Series in Biomaterials, Book 2010, 648 p. – P. 127-177.
18. Вопнерук А.А. Совершенствование технологии высокоскоростного газопламенного напыления износостойких покрытий со структурой метастабильного аустенита: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.10 – сварка, родств. проц. и технол. / А.А. Вопнерук // Екатеринбург, ФГАОУ ВПО «УрФУ им. Первого Президента России Б.Н.Ельцина», 2011. – 178 с.
19. Yang G.-J., Suo X.-K., Li G.-R. Introduction to Advanced Micro-Nano Coating Materials and Thermal Spray // Advanced Nanomaterials and Coatings by Thermal Spray, Micro and Nano Technologies, Book 2019, 328 p. – P. 1-11.
20. Борисов Ю.С. Особенности процесса микроплазменного напыления с использованием проволоочных материалов / Ю.С. Борисов, А.Н. Кислица, С.Г. Войнарович // Автомат. сварка, №4, 2006. – С. 26-31.
21. Зеленин В.И. Применение плазменно-дуговой металлизации для восстановления колесных пар грузовых вагонов / В.И. Зеленин, П.М. Кавуненко, В.В. Тисенков и др. // Автомат. сварка, №12, 2009. – С. 36-40.
22. Dianyí Y. Application of Thermal Spray Techniques for Combatting High Temperature Corrosion of WTE Superheater Tubes / Yan Dianyí // Columbia University, Department of Earth and Environmental Engineering, 2017. – 63 p.
23. Детонационное напыление покрытий / Зверев А.И., Шаривкер С.Ю., Астахов Е.А. – Ленинград: Судостроение, 1979. – 232 с.
24. Ненешев М.В. Перспективные технологии, свойства и применение детонационных покрытий / М.В. Ненешев, С.Ю. Ганигин, А.Н. Журавлев и др. // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета, №3(27), 2011. – С. 197-202.
25. Бланк Е.Д. Разработка и исследование детонационных покрытий с повышенными эксплуатационными свойствами: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.06 – технол. и маш. сварочного производства / Е.Д. Бланк // Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный политехнический ун-т, 2003. – 133 с.
26. Методика расчета выделений (выбросов) загрязняющих веществ в атмосферу при сварочных работах (по величинам удельных выделений) // С.-Пб.: НИИ Атмосфера, 2000. – 39 с.
27. Кузьмин В.И. Повышение эффективности плазменного напыления порошковых покрытий / В.И. Кузьмин, Е.В. Картаев, С.П. Ващенко и др. // Вестник Югорского Гос. Ун-та, Вып.2(33), 2014 – С. 1-8.
28. Якубович И.О., Орешенко Т.Г. Задачи и перспективы повышения качества покрытий, получаемых методом плазменного напыления // Актуальные проблемы авиации и космонавтики, Т.1, 2016. – С. 344-345.

29. Костиков В.И., Шестерин Ю.А. Плазменные покрытия. – М.: Металлургия, 1978. – 159 с.
30. Лащенко Г.И. Плазменное упрочнение и напыление. – Киев: Екотехнологія, 2003. – 64 с.
31. Патон Б.Е. Плазменные технологии и оборудование в металлургии и литейном производстве / Б.Е. Патон, Г.М. Григоренко, И.В. Шейко и др. // Киев: Наукова думка, 2013. – 465 с.
32. Малаховский В.А. Плазменная сварка: Учебное пособие для сред. ПТУ. М.: Высшая школа, 1987. – 80 с.
33. Гладкий П. В. Плазменная наплавка // П. В. Гладкий, Е. Ф. Переплетчиков, И. А. Рябцев. — К.: «Екотехнологія», 2007. — 292 с.
34. Ružbarský J., Panda A. Plasma and Thermal Spraying. – Springer International Publishing, 2017. – 108 p.
35. Iosub A. Plasma Cutting of Composite Materials / A. Iosub, G. Nagit, F. Negoescu // International Journal of Material Forming, V.1, 2008. – P. 1347-1350.
36. Плазменная строжка. – Электронный ресурс: <https://www.hypertherm.com/ru/learn/applications/gouging/>
37. Куликов И.С. Электролитно-плазменная полировка как возможный элемент ядерных технологий / Куликов И.С., Каменев А.Я., Климова Л.А. и др. // Известия НАН Белоруссии, Серия физико-технических наук, №4, 2011. – С. 54-56.
38. Ляшенко Б.А. Применение ионно-плазменного термоциклического азотирования для повышения прочности технологического оборудования / Ляшенко Б.А., Рутковский А.В., Кумуржи А.Ю. // Науковий вісник Херсонської державної морської академії, №2(9), 2013. – С. 191-196.
39. Ключев М.М. Плазменно-дуговой переплав. – М.: Металлургия, 1980. – 255 с.
40. Досмухамедов Н.К. Установка зонной плавки и ее применение для получения сверхчистых металлов / Досмухамедов Н.К., Жолдасбай Е.Е., Нурлан Г.Б., Курмансеитов М.Б. // Фундаментальные исследования, № 1, 2017. — С. 50-55.
41. Мурашкевич А.Н. Теория и методы выращивания монокристаллов: учеб. пособие для студентов специальности «Химическая технология неорганических веществ, материалов и изделий» / А.Н. Мурашкевич, И.М. Жарский. – Минск : БГТУ, 2010. – 214 с.
42. Ерохин А. А. Закономерности плазменно-дугового легирования и рафинирования металлов. – М.: Наука, 1984. – 185 с.
43. Струков Н.Н. Разработка технологии плазменного распыления прутковых материалов в камере с противопотоком: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.10 – сварка, родств. проц. и технол. / Н.Н. Струков // Пермь, ФГБОУ ВПО «Пермский национально-исследовательский политехнический университет», 2012. – 126 с.

44. Аржанников А. В., Тимофеев И. В. Интенсивное пучково-плазменное взаимодействие как источник субмиллиметрового излучения // Вестник НГУ, серия: Физика, Т.11, №4, 2016. – С. 78-104.
45. Максимов А.И. Плазмохимия неравновесных процессов: учеб. пособие / А.И. Максимов; Иван. гос. хим.-технол. ун-т. – Иваново, 2010. – 114 с.
46. Katsouleas T. Accelerator Physics: Electrons Hang Ten on Laser Wake // Nature, Vol.431, September 30, 2004. – pp. 515-516.
47. Патент RU21200601С1. Плазменный двигатель / И.И. Лаптев // F03Н1/00, 10.10.1998.
48. Погребняк А.Д., Тюрин Ю.Н. Импульсно-плазменная модификация свойств поверхности и нанесение покрытий // Успехи физ. мет., Т.4, 2003. – С. 1–66.
49. Юрьева А.В., Ковальчук А.Н. Введение в плазменные технологии и водородную энергетику: учебное пособие / Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 90 с.
50. Lucas W. Tig and Plasma Welding. – Woodhead Publishing, 1990. – 112 p.
51. Микроплазменная сварка / Б.Е. Патон, В.С. Гвоздецкий, Д.А. Дудко и др.; Под ред. Б.Е. Патона. – Киев: Наук. думка, 1979. – 248 с.
52. Weldability of iron-based powder metal materials using pulsed plasma arc welding process / E.O. Correa, S.C. Costa, J. N. Santos // Journal of Materials Processing Technology, V.198(1), 2008. – P. 323-329.
53. Gao G. Physical Characteristics of Plasma Cladding Fe-Cr-Nb-Si-Mo Alloy Cladding Layers on Different Substrates / Guijun Gao, Kang Li, Weiwang Chen etc. // Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed. V.35, 2020. – P. 820–824.
54. Боженко Б.Л., Шалимов В.Н. Особенности физико-химического взаимодействия газовой и жидкой фаз при плазменной сварке // Инженерно-физический журнал, Т.61, № 1, 1991. – С. 15-20.
55. Технология плазменной обработки металлов: Методические указания к лабораторной работе по дисциплине «Физико-химические процессы при обработке металлов» / Сост.: В.П. Расщупкин, Б.И. Калмин, М.С. Корытов, С.М. Колисниченко. – Омск: Изд-во СибАДИ, 2007. – 32 с.
56. Николаев А.А. Энерготехнологические характеристики плазменно-дуговой восстановительной плавки лейкоксенового концентрата / А.А. Николаев, Д.Е. Кирпичев, А.В. Николаев // Физика и химия обработки материалов, №5, 2017. – С. 18-25.
57. Козлов Г.О., Тополов В.Л. Конструкція електрометалургійних агрегатів, ч.1, Електросталеплавильні печі та установки спеціальної електрометалургії, Підручник для студентів ВНЗ I-II рівня акредитації спеціальності: 5.090409.01 "Електрометалургія сталі і феросплавів" денної та заочної форми навчання, Нікополь: НТ НМетАУ, 2006. – 106 с.

58. Єременко А.П. Конспект лекцій з дисципліни «Виробництво виливків з чорних металів» частина «Виробництво виливків зі сталі» для студентів напряму 6.050402 - «Ливарне виробництво» / А.П. Єременко. - Дніпродзержинськ, ДДТУ, 2015. – 51 с.
59. Современные проблемы комплексной переработки труднообогатимых руд и техногенного сырья (Плаксинские чтения – 2017) : материалы Междунар. науч. конф., Красноярск, 12–15 сентября 2017 г. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2017. – 452 с
60. Вакуумно-плазменные процессы и технологии: Учеб. пособие / А.М. Ефремов, В.И. Светцов, В.В. Рыбкин; ГОУВПО Иван. гос. хим.-технол. ун-т., Иваново, 2006. – 260 с.
61. Крампит Н.Ю. Способы управления плавлением и переносом электродного металла (обзор) // Сварочное производство, №3, 2009. – С. 31-36.
62. Защитные покрытия. – Электронный ресурс: <https://extxe.com/14890/zashhitnye-pokrytija-2/>
63. Классификация методов создания поверхностных покрытий. – Электронный ресурс: <https://ecm-zink.ru/info/stati/klassifikacziya-metodov-sozdaniya-poverxnostnyix-pokrytij.html>
64. Заяров Ю.В. Температура плазмы при гидродинамическом воздействии на дугу / Ю.В. Заяров, Б.Р. Рябиченко, В.А. Виноградов, Б.Л. Боженко, Ю.Д. Елизаров // Физика и химия обработки материалов, №2, 1997. – С. 118-120.
65. Ванновский В.В., Гольдфарб В.М., Гуревич Б.Н. Температура и скорость плазменных струй, применяемых для напыления // Физика и химия обработки материалов, №3, 1975. – С. 51-56.
66. Конструкции дуговых плазмотронов. – Электронный ресурс: <http://svarka.perm.ru/plasma/kp.htm>
67. Анахов С.В. Особенности теплофизического проектирования плазмотронов для резки металлов / С. В. Анахов [и др.] // Сварочное производство, № 11, 2011. – С. 25–30.
68. Ерохин А.А. Плазменно-дуговая плавка металлов и сплавов. Физико-химические процессы. – М.: Наука, 1975. – 188 с.
69. Моссэ А.Л., Буров И.С. Обработка дисперсных материалов в плазменных реакторах. – Минск: Наука и техника, 1980. – 208 с.
70. Разина Г.Н. Переработка углеродсодержащих веществ в низкотемпературной плазме: Учебное пособие / РХТУ им. Д.И. Менделеева. М.: 2004. – 85 с.
71. Классификация плазмотронов. – Электронный ресурс: <https://studopedia.info/10-38291.html>
72. Электродуговые плазмотроны. Рекламный проспект / Под ред. М.Ф. Жукова. Акад. наук СССР, Сиб. отд-ние, Ин-т теплофизики. Новосибирск: Наука, 1975. – 44 с.
73. Донской А.В., Клубникин В.С.. Электроплазменные процессы и установки в машиностроении. – Л.: «Машиностроение», ЛО, 1979. – 221 с.

74. Большаков А.П. Лазерный плазмотрон для безкамерного осаждения алмазных пленок / А.П. Большаков, В.Г. Востриков, В.Ю. Дубровский и др. // Квантовая электроника, 35, №4, 2005. – С. 385-389.
75. Плазменные процессы в металлургии и технологии неорганических материалов / Под ред. Б.Е. Патона. М.: «Наука», 1973. – 243 с.
76. Глебов И.А., Рутберг Ф.Г. Мощные генераторы плазмы. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 153 с.
77. Эсибян Э.М. Плазменно-дуговая аппаратура. – Киев: Техника, 1971. – 164 с.
78. Клименко Г.К., Ляпин А.А. Генераторы плазмы: методические указания к выполнению курсового проекта. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. – 62 с.
79. Электродуговые плазмотроны. Рекламный проспект / Под ред. М.Ф. Жукова. Новосибирск: Наука, 1980. – 84 с.
80. Николаев Г.А., Ольшанский Н.А. Специальные методы сварки. – М.: «Машиностроение», 1975. – 231 с.
81. Коротеев А.С., Миронов В.М., Свирчук Ю.С. Плазмотроны. Конструкции, характеристики, расчёт. – М.: «Машиностроение», 1993. – 295 с.
82. Анахов С.В. Принципы и методы проектирования плазмотронов: монография / С.В. Анахов. – Екатеринбург: Изд-во Рос. гос. проф.-пед. ун-та, 2018. – 165 с.
83. Дресвин С. В. Плазмотроны: конструкции, параметры, технологии / С. В. Дресвин, С. Г. Зверев. – Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. – 208 с.
84. Клименко А.А. Конструкции электродуговых плазмотронов / А.А. Клименко, Г.К. Ляпин. – Москва: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. – 56 с.
85. Krink V. Plasmaschneidtechnologie – Erweiterung wirtschaftlicher Anwendungsgebiete / V. Krink, H. Simler, F. Laurisch // ICCT 2006: Internationale Schneidtechnische Tagung; Vorträge der gleichnamigen Konferenz. [Hannover, 10 und 11 Oktober 2006]. – S. 18–25.
86. Исакаев Э. Х. Разработка генератора низкотемпературной плазмы с расширяющимся каналом выходного электрода и некоторые его применения: диссертация ... доктора технических наук в форме научного доклада / Э. Х. Исакаев. – Москва: ОИВТ РАН, 2002. – 84 с.
87. Ширшов И.Г. Плазменная резка / И.Г. Ширшов, В.Н. Котиков. – Ленинград: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1987. – 192 с.
88. Анахов С.В. Методика акустического проектирования соплового узла плазмотронов / С.В. Анахов, Ю.А. Пыкин // Технология машиностроения, №10, 2012. – С. 27–32.
89. Малаховский В.А. Плазменные процессы в сварочном производстве / В.А. Малаховский. – Москва: Высшая школа, 1988. – 72 с.
90. Anakhov S. V. Gas-dynamic factors of noise emission from plasma torches / S. V. Anakhov, Yu. A. Pykin // Welding International, Vol.19, №6, 2005. – P. 490–494.

91. Анахов С.В. Газодинамические особенности проектирования плазматронов / С.В. Анахов [и др.] // Сварочное производство, №12, 2011. – С. 10–15.
92. Anahov S.V. Special features of design of the profile of gas-air circuits of low-noise plasma torches / S.V. Anahov, Yu.A. Pykin, A.V. Matushkin // Welding International, Vol.26, Issue 10, 2012. – P. 819–822.
93. Карп И.Н., Петров С.В. Новое оборудование для плазменного упрочнения: Ремонт и модернизация оборудования. – Электронный ресурс: <https://leg.co.ua/arhiv/raznoe-arhiv/novoe-oborudovanie-dlya-plazmennogo-uprochneniya.html>
94. Матушкин А.В. Совершенствование системы газовихревой стабилизации электродуговых плазматронов для резки металлов: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.10 – сварка, родств. проц. и технол. / А.В. Матушкин // Екатеринбург, ФГАОУ ВПО «УрФУ им. Первого Президента России Б.Н.Ельцина», 2017. – 132 с.
95. Чуркин И.С. Повышение производительности процесса плазменно-дугового нанесения покрытий на тела вращения: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.09.10 – элетротехнология / И.С. Чуркин // С.-Пб., ФГБОУ «СПбГПУ», 2011. – 16 с.
96. А. Н. Герасимов. Плазменная технология: Опыт разработки и внедрения. – Л.: Лениздат, 1980. – 152 с.
97. Patent US5938944A United States. Plasma transferred wire arc thermal spray apparatus and method / J. R. Vaughman, D. J. Cook, D. R. Marantz, K. A. Kowalsky // B23K10/027, 17.08.1999.
98. Abkenar A.-H.P. WIRE-ARC SPRAYING SYSTEM: Particle Production, Transport, and Deposition // University of Toronto, Department of Mechanical and Industrial Engineerin, 2007. – 149 p.
99. Карп И.Н., Рудой А.П. Влияние скорости подачи стальной проволоки на диспергирование металла воздушной струей // Автоматическая сварка, №10, 1991. – С. 36-38.
100. Порошковая металлургия и напыленные покрытия / Под ред. Б.С.Митина. – М.: Металлургия, 1987. – 792 с.
101. Чернов В.А., Сысоев Ю.С, Прокопенко В.В. Определение мгновенной скорости плавления электрода // Сварочное производство, №11, 1991. – С. 34-35.
102. Babiak Z. Fundamentals of Thermal Spraying, Flame and Arc Spraying / Z. Babiak, T. Wenz, L. Engl // Editor(s): Prof. Dr.-Ing. F.-W. Bach, Dr. A. Laarmann Dipl.-Ing. T. Wenz; Modern Surface Technology, Chapter 8, 2006, 325 p. – Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2006. – P. 119-136.
103. 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, №1, 2014. – С. 21-24.

104. Русев Г.М. Влияние параметров напыления токоведущей проволокой на фракционный состав распыляемых частиц / Г.М. Русев, А.Г. Русев, В.В. Овсянников и др. // Автомат. сварка, №1(717), 2013. – С. 45-47.

105. Петруничев В.А., Кулагин В.В., Кулагин И.Д. Получение сфероидизированного металлического порошка распылением проволоки // Известия АН СССР. Сер. Металлы. - 1965. - №2. - С. 68-94.

106. Бабкин А.С., Шарапов С.Н. Моделирование напряженности магнитного поля сварочного тока // Сварочное производство, №10, 2009. – С. 9-12.

107. Брунов О.Г., Солодский С.А. Физико-математическое моделирование перехода капли электродного металла в сварочную ванну // Сварочное производство, №4, 2008. – С. 16-19.

108. Гецкин О.Б. Физико-математическая модель системы «источник питания - дуга» для сварки плавящимся электродом в защитных газах / О.Б. Гецкин, С.И. Полосков, В.А. Ерофеев, О.П. Витько // Тяжелое машиностроение, №6, 2008. – С. 18-20.

109. Быковский О.Г. Материалы и технология плазменного напыления токоведущей проволокой / О. Г. Быковский, А. Н. Лаптева, Г. М. Русев // Заготовительные производства в машиностроении, №12, 2013. – С. 19–22.

110. Русев Г.М. 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, №1, 2013. – С. 45–47.

111. Быковский О.Г. Определение температуры частиц при плазменном напылении токоведущей проволоки / О. Г. Быковский, А. В. Ершов, А. Н. Лаптева, А. Н. Глотка // Заготовительное производство в машиностроении, №5, 2013. – С. 12–14.

112. Лаптева Г.М. Удосконалення технології нанесення плазмових покриттів при використанні струмоведучих дротів за рахунок оптимізації фракцій складу та розтікання металевих частинок: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.03.06 – зварювання та спорідн. проц. і технол. / Г.М. Лаптева // Київ, НТУУ «КПІ ім. І.Сікорського», 2018. – 20 с.

113. Гладкий П.В., Павленко А.В., Зельниченко А.Т. Математическое моделирование нагрева порошка в дуге при плазменной наплавке // Автоматическая сварка, №11, 1989. – С. 17-21, 54.

114. Черных А.В., Черных В.В. Расчет температуры электродных капель при дуговой сварке плавящимся электродом с помощью метода конечных элементов // Сварочное производство, №3, 2008. – С. 6-7.

115. Николаев А.В., Горонков О.А. Исследование газодинамического давления встречных плазменных дуг на анод // Физика и химия обработки материалов, №3, 1975. – С. 40-42.

116. Сахиев А.С. К расчету процесса испарения частиц в высокотемпературном потоке газа в неадиабатических условиях // Физика горения. – Киев: Наукова думка, 1966. – С. 70-84.

117. Бобров Г.В. Образование частиц при плавлении проволоки в плазменном потоке / Г.В. Бобров, В.И.Привезенцев, Л.В. Умнова, И.С. Суров // Порошковая металлургия, №5(77), 1969. – С. 104-111.

118. Харламов М.Ю. Математическая модель дуговой плазмы, генерируемой плазмотроном с проволокой-анодом / М.Ю. Харламов, И.В. Кривцун, В.Н. Коржик и др. // Автоматическая сварка, №12, 2007. – С. 14-20.

119. Kharlamov M.Yu. Effect of the type of concurrent gas flow on characteristics of the arc plasma generated by plasmatron with anode wire / Kharlamov M.Yu., Krivtsun I.V., Korzhik V.N., Petrov S.V., Demianov A.I. // The Paton Welding Journal, No.6, 2008. – P. 14-18.

120. Kharlamov M.Yu. Refined mathematical model of the electric arc burning in plasmatron with external current-conducting wire / M.Yu. Kharlamov, I.V. Krivtsun, V.N. Korzhik etc. // The Paton Welding Journal, No.1, 2009. – P. 42-45.

121. Krivtsun I.V. Numerical analysis of characteristics of the arc plasma in air-vapour plasmatrons with refractory cathode / I.V. Krivtsun, M.Yu. Kharlamov, S.V. Petrov etc. // The Paton Welding Journal, No.10, 2009. – P. 4-11.

122. Харламов М.Ю. Нагрев и плавление проволоки - анода при плазменно-дуговом напылении / М.Ю. Харламов, И.В. Кривцун, В.Н. Коржик, С.В. Петров // Автоматическая сварка, №5, 2011. – С. П-11.

123. Kharlamov M.Yu. Formation of liquid metal film at the tip of wire-anode in plasma-arc spraying / M.Yu. Kharlamov, I.V. Krivtsun, V.N. Korzhik, S.V. Petrov // The Paton Welding Journal, No.12, 2011. – P. 2-6.

124. Биковський О.Г. Особливості формування плазмового покриття в залежності від виду напилюваних матеріалів / Биковський О. Г., Лаптева Г. М., Пасько М. П. // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. №2(44), 2018. – С. 9-14.

125. Gulyaev I.P. Experimental investigation of process of plasma-arc wire spraying / I.P. Gulyaev, P.Yu. Gulyaev, V.N. Korzhik etc. // The Paton Welding Journal, No.3/4, 2015. – P. 36-41.

126. Gulyaev I. Arc-Plasma Wire Spraying: An Optical Study of Process Phenomenology / I. Gulyaev, A. Dolmatov, M. Kharlamov et al. // Journal of Thermal Spray Technology, V.24(11), 2015. – pp. 1566-1573.

127. Dolmatov A.V. Control of dispersed-phase temperature in plasma flows by the spectral-brightness pyrometry method / A. V. Dolmatov, I. P. Gulyaev, P. Yu. Gulyaev, V. I. Iordan // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, V.110 (012057), 2016. – P. 1-6.

128. Kharlamov M.Yu. The optical control system of dispersed phase properties in thermal spray process / M.Yu. Kharlamov, I.V. Krivtsun, V.N. Korzhik etc. // Yugra State University Bulletin, V.11(2),2015. – P. 33-41.

129. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий: 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Наука, 1976. — 280 с.

130. Atkins M.D. Velocity Field Measurement Using Particle Image Velocimetry (PIV) // Application of Thermo-Fluidic Measurement Techniques, 2016. – P. 125-166.
131. Ринкевичюс Б.С. Лазерная доплеровская анемометрия : монография / Ринкевичюс Б.С. – М.: РУСАЙНС, 2020. – 158 с.
132. ГОСТ 9450-76 «Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников» (Measurements microhardness by diamond instruments indentation).
133. Микротвердомер ПМТ – 3: инструкция по пользованию. - 17 с.
134. Лунёв В.М. Адгезионные характеристики покрытий и методы их измерения / В.М. Лунёв, О.В. Немашкало // Физическая инженерия поверхности, Т.8, №1, 2010. – С. 64-71.
135. Шпаков П. С., Попов В. Н. Статистическая обработка экспериментальных данных: учебное пособие. – Москва: Московский государственный горный университет, 2003. – 261 с.
136. Горелик С.С. Рентгенографический и электроннооптический анализ / Горелик С.С., Расторгуев Л.Н., Скаков Ю.А. – Metallurgia, Москва, 1970 г. – 366 с.
137. Коваленко В.С. Металлографические реактивы. Справочник. – М.: Metallurgia, 1981. – 120 с.
138. Свет Д. Я. Оптические методы измерения истинных температур. Текст. / Д. Я. Свет. – М.: Наука, 1982. – 296 с.
139. Чернин С.М. Измерение температуры малых тел пирометрами излучения. Текст. / С.М. Чернин, А.В. Коган. – М. Энергия, 1980. – 96 с.
140. Лелевкин В.М., Семенов В.Ф. Расчет течения закрученного потока газа в диафрагмированном канале плазмотрона // Те высоких температур, Т.40, вып.4, 2002. – С. 544–551.