

О. П. Шиліна, А. Ю. Осадчук

ГАЗОТЕРМІЧНІ МЕТОДИ НАПИЛЮВАННЯ ПОКРИТЬ

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

О. П. Шиліна, А. Ю. Осадчук

ГАЗОТЕРМІЧНІ МЕТОДИ НАПИЛЮВАННЯ ПОКРИТЬ

Затверджено Вченою радою Вінницького національного технічного університету як навчальний посібник для студентів напрямів підготовки 0923 – "Зварювання". Протокол № 11 від "30" червня 2005 р.

Вінниця ВНТУ 2007

УДК 621.762
Ш 23

Рецензенти:

В.Ф. Анісімов, доктор технічних наук професор

І. О. Сивак, доктор технічних наук професор

В.В. Біліченко, кандидат технічних наук доцент

Рекомендовано до видання Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України

О. П. Шиліна, А. Ю. Осадчук

Ш 23 Газотермічні методи напилювання покритть. Навчальний посібник. –
Вінниця: ВНТУ, 2007. – 103 с.

В навчальному посібнику розглянуті фундаментальні основи технологічних процесів газотермічного напилювання покритть та характерні практичні задачі. Посібник розроблений у відповідності з планом кафедри та програмою дисципліни "Технологія та обладнання для напилення".

УДК 621.382

ЗМІСТ

| | |
|---|----|
| ВСТУП..... | 5 |
| 1 НАНЕСЕННЯ І СТРУКТУРА ГАЗОТЕРМІЧНИХ ПОКРИТЬ..... | 6 |
| 1.1 Методи нанесення | 6 |
| 1.2 Покриття | 13 |
| 1.3 Механізм і кінетика фізико-хімічних процесів, які ведуть до міцного зчеплення напилюваних частинок..... | 22 |
| 2 РОЗПИЛЕННЯ..... | 23 |
| 2.1 Основні задачі розпилення | 23 |
| 2.2 Дуговий розряд..... | 24 |
| 2.3 Плазмове напилювання | 28 |
| 3 ЗАГАЛЬНІ ПИТАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ГАЗОТЕРМІЧНОГО НАПИЛЮВАННЯ ПОКРИТЬ | 34 |
| 3.1 Схема процесу й основні параметри напилювання..... | 34 |
| 3.2 Вплив параметрів на ефективність процесу..... | 36 |
| 4 ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ГАЗОТЕРМІЧНИХ МЕТОДІВ НАПИЛЮВАННЯ ПОКРИТЬ | 38 |
| 4.1 Методи газотермічного напилювання і їхня класифікація | 38 |
| 4.2 Основні загальні параметри газотермічного напилювання і їхній вплив на ефективність процесу | 39 |
| 4.2.1 Конструктивні параметри розпилювача..... | 39 |
| Параметри режиму роботи розпилювача..... | 40 |
| 4.2.2 Параметри розпилюваного матеріалу і умови його введення..... | 41 |
| 4.2.3 Параметри, що характеризують зовнішні умови напилювання..... | 42 |
| 4.2.4 Параметри розпилювальної струмینی і потоку напилюваних частинок..... | 44 |
| 4.3 Способи і технологічні особливості плазмового напилювання..... | 45 |
| 4.3.1 Плазманий струмінь як джерело нагрівання і розпилення матеріалу | 45 |
| 4.3.2 Гази для плазмоутворення | 46 |
| 4.3.4 Параметри плазмового напилювання і їхній вплив на ефективність процесу | 53 |
| 4.4 Способи і технологічні особливості газополуменевого напилювання..... | 60 |
| 4.4.1 Газове полум'я як джерело нагрівання і розпилення матеріалу..... | 60 |
| 4.4.2 Способи і технологічні особливості газополуменевого напилювання | 61 |
| 4.5 Способи і технологічні особливості детонаційно-газового напилювання..... | 65 |
| 4.5.1 Технологічні особливості способів детонаційно-газового напилювання..... | 66 |
| 4.5.2 Параметри детонаційно-газового напилювання і їхній вплив на ефективність процесу..... | 68 |
| 4.5.3 Галузі застосування. Переваги і недоліки. Перспективи розвитку.... | 72 |
| 4.6 Способи і технологічні особливості електродугової металізації..... | 73 |

| | |
|--|------------|
| 4.6.1 Дуга як джерело нагрівання розпилюваного матеріалу | 73 |
| 4.6.2 Технологічні особливості способів електродугової металізації | 75 |
| 4.6.3 Параметри режиму електродугової металізації і їхній вплив на ефективність процесу..... | 75 |
| 4.6.4 Застосування електродугової металізації. Переваги і недоліки. Перспективи розвитку..... | 79 |
| 4.7 Високочастотна металізація (ВЧМ) і її технологічні особливості | 80 |
| 5 УСТАТКУВАННЯ ДЛЯ ГАЗОТЕРМІЧНОГО НАПИЛЮВАННЯ | |
| ПОКРИТЬ | 83 |
| 5.1 Функціональна схема установок для газотермічного напилювання | 83 |
| 5.2 Розпилювачі для установок газотермічного напилювання..... | 84 |
| 5.2.1 Плазмові розпилювачі..... | 84 |
| 5.2.2 Газополуменеві розпилювачі | 87 |
| 5.2.3 Детонаційно-газові розпилювачі..... | 88 |
| 5.2.4 Електродугові металізаційні розпилювачі..... | 92 |
| 5.2.5 Високочастотні (ВЧ) металізаційні розпилювачі | 92 |
| 5.3 Механізми подачі розпилюваного матеріалу в установках для газотермічного напилювання | 94 |
| 5.3.1 Механізми подачі порошку..... | 94 |
| 5.3.2 Механізми подачі дроту (стрижнів)..... | 98 |
| ЛІТЕРАТУРА | 101 |

ВСТУП

Основними показниками якості машин є надійність і ККД, що переважно визначаються властивостями поверхневих шарів деталей і з'єднань (границею витривалості, корозійною стійкістю, зносостійкістю, коефіцієнтом тертя, контактною твердістю, міцністю посадок, герметичністю з'єднання й ін.). Кожна зупинка (останов) машини через ушкодження окремих її елементів або зниження технічних характеристик нижче припустимого рівня, як правило, спричиняє великі матеріальні збитки, а в окремих випадках приводить до катастрофічних наслідків. У наш час біля 15 — 30% щорічної виплавки металів витрачається на відновлення втрат на корозію. Втрати засобів у машинобудуванні розвинутих держав внаслідок тертя і зносу досягають 4,5 % національного доходу. На опір тертю в усьому світі іде 30 — 40 % всієї енергії, що виробляється.

Досягнення високої якості й експлуатаційної надійності машин, а також їх більш низької вартості, що є умовою забезпечення високого й стійкого рівня ринкової конкурентноздатності, можливо лише на основі нових наукомістких технологій напилення та відповідного обладнання.

Сучасний рівень технології напилювання дозволяє здійснювати відновлення і зміцнення деталей машин і механізмів порошковими композиційними матеріалами й одержувати спеціальні покриття з унікальними властивостями.

Напилювання розвилося в особливу технологію поверхневої обробки матеріалів, і відрізняється великою своєрідністю й галузями застосування.

У ряді сучасних способів поверхневої обробки матеріалів газотермічне напилювання займає особливе місце.

Навчальний посібник написаний для студентів напряму підготовки 0923 — “Зварювання”, відповідає навчальній програмі дисципліни “Технологія та обладнання для напилення” спеціальності 6.092300 — “Технологія і устаткування відновлення та підвищення зносостійкості машин і конструкцій”. Посібник може бути корисний і для студентів напряму підготовки 0902 — „Інженерна механіка”.

1 НАНЕСЕННЯ І СТРУКТУРА ГАЗОТЕРМІЧНИХ ПОКРИТЬ

1.1 Методи нанесення

Використання зносостійких, корозійностійких, жаростійких, хімічно стійких, електроізоляційних, теплоізоляційних і інших видів покриттів дозволяє різко скоротити втрати металів, витрачання ресурсів на їхнє відшкодування і дає можливість підвищити якість, надійність і довговічність машин, устаткування і споруд. Підвищення технічного рівня і якості машин — найважливіший резерв зростання продуктивності праці, економії усіх видів ресурсів і основа науково-технічного прогресу в народному господарстві.

Велике розповсюдження в даний час отримали методи нанесення покриттів напилюванням. Існує два різновиди цього процесу.

У першому випадку напилювання здійснюють, переважно, при атмосферному тиску частинками матеріалу покриття розміром 10 — 150 *мкм*. В другому — напилювання при зниженому тиску атомами або іонами, які, осаджуючись і конденсуючись на поверхні виробу (деталі), утворюють покриття. Конденсацією можна наносити покриття комбінованої структури. Для цього змішують потоки випарів різних компонентів або створюють умови для синтезу речовини покриття, шляхом хімічної взаємодії випарованого потоку з навколишньою газовою атмосферою. Наприклад, таким способом отримують покриття з оксидів, карбідів, нітридів і інших сполучень.

Нанесення покриттів випаром і конденсацією у вакуумі вперше було застосовано в 20-х роках нашого сторіччя для одержання тонких плівок (від 1 до 10 *нм*) в оптиці і радіотехнічній промисловості. Формування покриття починається з виникнення зародків.

Прямі спостереження і вимірювання форми і розмірів критичних зародків навіть сучасними методами електронної мікроскопії й іонних проекторів ускладнені. Непрямі експерименти і зроблені на їхній основі оцінки показують, наприклад, що розмір критичного зародка при конденсації натрію на різних кристалічних матеріалах складає 0,6—1 *нм*. Ці дані відносяться до критичних умов осадження. Очікується, що при більшому перенасиченні, ніж критичне, зародки, що виникають, будуть мати ще менші розміри.

Розрахункові оцінки, зроблені виходячи з термодинамічної теорії формування зародків, дають результати наближені до цих розмірів.

Застосування термодинамічної макроскопічної теорії зародкоутворення для опису таких малих об'єктів речовини, яким є зародок, і до того ж складаються з настільки невеликої кількості елементарних частинок —

атомів, некоректне. Тому була зроблена спроба перебороти ці ускладнення, використовуючи методи статистичної механіки фазових переходів.

Таблиця 1 — Розрахункова величина критичного радіуса зародка деяких металів при різних перенасиченнях пари

| Осаджува- ний метал | Об'єм, що йо- го займає атом $\Omega, \text{нм}^3$ | Енергія поверх- невого натягу σ , $\text{Дж}/\text{м}^2$ | Критичний радіус зародка $r_{кр}, \text{нм}$ | |
|------------------------|--|---|---|---------------|
| | | | $P/P_0 = 50$ | $P/P_0 = 100$ |
| Нікель | 1,54 | 1,81 | 1,29 | 1,09 |
| Мідь | 1,68 | 1,35 | 1,05 | 0,892 |
| Золото | 2,39 | 1,13 | 1,25 | 1,06 |
| Срібло | 2,39 | 0,93 | 1,03 | 0,876 |
| Алюміній | 2,34 | 0,91 | 0,986 | 0,837 |

Примітка. P — поточний тиск; P_0 — тиск насичуваної пари адсорбованої речовини при температурі експерименту.

Статистична теорія зародкоутворення описує процеси зародження і формування покриття виходячи з уявлень про міжатомну взаємодію. Застосування методів статистичної механіки дає можливість описати процес формування зародків, що складаються усього з декількох атомів. Однак ця теорія також має недоліки. Однією з головних її проблем є визначення числа атомів у критичному зародку й енергії зв'язку атомів у скупченні. Застосування цієї теорії доцільне при розгляді скупчень і зародків малих розмірів, коли додаткова інформація може бути отримана з аналізу можливих варіантів взаємного розташування атомів і орієнтації зародків щодо основи.

Процес формування покриття конденсацією у вакуумі можна умовно розділити на ряд послідовних стадій: 1 — формування зародків; 2 — зростання і об'єднання зародків в острівці; 3 — злиття острівців при їхньому зіткненні й формування «сітчастих» плівок-покриттів; 4 — формування суцільного покриття і заростання каналів; 5 — подальше зростання покриття.

Розглянуті теорії правильно описують процес формування покриття на стадії 1 доти, поки середня відстань між зародками не стане рівною середньому дифузійному пробігові адсорбованого атома. З цього моменту настає стадія 2, на якій зародки розвиваються, захоплюючи атоми, що дифундують, і в такий спосіб перешкоджають виникненню нових, зародків. Отже, до кінця першої стадії досягається максимальне для даних умов осадження концентрація зародків. Стадія 1 протікає дуже швидко і тому самі зародки не встигають вирости.

Приєднуючи адсорбовані атоми, які схильні до подальшої дифузії, розмір зародка зростає вище критичного і такий зародок, розвинутий до величини, коли його можна впевнено спостерігати за допомогою електронного мікроскопа або іонного проектора, вважають острівцем. Існуюча можливість зростання зародків за рахунок безпосереднього влучення в них атомів, що осаджуються, мала і нею можна знехтувати, оскільки зародки являють собою мішені набагато меншого розміру в порівнянні з розміром дифузійних зон на поверхні основи.

Спостереження за виникненням, ростом, орієнтацією, огранюванням, розташуванням, поведінкою острівців і іншими факторами виявили великий вплив реальної структури поверхні основи, її фізичної і хімічної неоднорідності на початкові стадії формування на ній покриття. Різні дефекти поверхні в багато разів прискорюють утворення на них зародків, тим самим викликаючи їхнє декорування. В даний час цей ефект широко застосовують для виявлення і вивчення недосконалостей поверхні твердого тіла. Оксидні плівки, забруднення, адсорбовані гази також прискорюють або сповільнюють утворення зародків на ділянках напилюваної поверхні, де вони розташовані.

Стадія 2 характеризується не тільки зростанням зародків, але і зменшенням їхньої концентрації, оскільки вони зливаються один з одним. Якщо злиття супроводжується зміною початкової форми й орієнтації острівців, то таке злиття називається коалесценцією. Коалесценція на стадії 2 називається первинною. Окремі зародки можуть переміщатися і зливатися при зіткненні. Однак міграція зародків спостерігається головним чином при їхньому слабкому зв'язку з основою і при досить високих температурах. Вона може бути також стимульована зовнішнім впливом на зародки, наприклад, електричним полем. Зменшення концентрації зародків спочатку відбувається дуже швидко, але із збільшенням їхніх розмірів сповільнюється злиття острівців без значної зміни їхньої форми й орієнтації, що зводиться до процесів тільки по границі зіткнення острівців, називається коагуляцією. Вона спостерігається при низькій температурі або коли деформація самих острівців утруднена, наприклад, через присутність у них оксидів.

На стадії 3 сусідні острівці зливаються й утворюють більш великі острівці. Якщо в результаті злиття острівців оголюється досить велика поверхня основи, то на ній може відбуватися вторинне зародкоутворення. При великому заповненні поверхні острівцями починається їхнє масове злиття й формування єдиної структури у вигляді сітки. Таке злиття називають вторинною коалесценцією і воно характеризується значним масопереносом острівців — зерен по поверхні. Із завершенням формування суцільної

сітчастої структури вторинна коалесценція сповільнюється. Отримана сітчаста плівка має в собі велику кількість пор і довгастих порожнин, що називаються каналами. Такі канали часто мають звивисту форму й іноді кристалографічне огранювання.

Стадія 4 характеризується повільним заповненням каналів — порожнин. У них виникають нові зародки, що дуже повільно розростаються і зливаються, що буває особливо добре помітно, якщо ділянка з вторинними зародками оточена суцільною товстою плівкою покриття. Довжина каналів із їх заростанням зменшується, а ширина змінюється мало. Заростання приводить до згладжування рельєфу покриття, його поверхня стає гладенькою, рівною, що копіює макрорельєф напилюваної поверхні.

На останній, стадії 5, товщина покриття зростає. Ріст покриття може супроводжуватися структурними змінами, такими як рекристалізація, зростання зерен, зниження кількості дефектів у кристалічних ґратках покриття, фазові переходи і т.і.

Важливим параметром процесу напилювання, що дозволяє в широкій межі регулювати структуру і властивості покриття, є температура поверхні основи, на яку наносять покриття. Ця температура має кілька характерних значень:

1) $T_{кр}$ — критична температура основи, вище якої конденсація не відбувається, оскільки всі падаючі атоми відбиваються від напилюваної поверхні; 2) Q_1 — температура, вище якої конденсація пари відбувається за механізмом пара — рідина — кристал; 3) $Q_2 \approx T_{пл}/3$ — температура, нижче якої покриття має аморфну структуру.

Теоретичні припущення про можливості конденсації за механізмом пара — кристал були висунуті М. І. Френкелем у 20-і роки. У той же час Н. Н. Семенов запропонував інший механізм конденсації пара — рідина. Обидва ці механізми виявлені експериментально і досліджені Л. С. Палатником. у 60-і роки. Ці механізми визначають форму острівців на початковій стадії їхнього формування і залежність цієї форми від температури основи.

Експериментально встановлено, що в залежності від температури основи конденсація може відбуватися за двома механізмами: пара — кристал і через рідку фазу пара — рідина — кристал. У першому випадку тільки що виниклі острівці мають огранену форму і кристалічну структуру, у другому — їхня форма наближена до сферичної форми рідкої краплі, що розтікається по поверхні. Перехід від одного механізму до іншого здійснюється при температурі Q_1 , яка при конденсації на нейтральній неорієнтованій поверхні, наприклад, поверхні скла, дорівнює приблизно $2/3 T_{пл}$ від температури плавлення напилюваного матеріалу $T_{пл}$.

При більш низькій температурі конфігурація острівців і проміжків між ними визначається можливістю їхньої формозміни. При температурі $Q_2 \approx T_{nl}/3$ і нижче дифузійна рухливість атомів у зародку й острівцях, а також і можливість формування самих острівців заглушені. У результаті утворюється структура з випадковим розташуванням атомів у ґратках. Така структура сформує покриття за своєю структурою близьке до аморфного. В інтервалі температур $Q_2 < T_0 < Q_1$, конденсація здійснюється за механізмом пара — кристал. Острівці ростуть у вигляді плоских утворень і, якщо ступінь заповнення поверхні основи невеликий, то можуть мати кристалічне огранювання. У цій області отриманий конденсат, як правило, текстурований. Цей процес оснований на здатності атомів металів і інших неорганічних матеріалів, нагрітих до температури випаровування у вакуумі, переміщатися прямолінійно у вигляді атомарних або молекулярних пучків і, конденсуючись на поверхні твердого матеріалу, утворювати плівки. Особливо інтенсивно процес нанесення покриття конденсацією у вакуумі почав розвиватися з 60-х років, коли для нагрівання і випаровування були застосовані такі потужні, інтенсивні і концентровані джерела енергії, як електронний промінь, різні види електричних розрядів, магнетрони і т.і. З'явилася можливість створювати з високою продуктивністю не тільки тонкоплівкові покриття, але і покриття товщиною в кілька десятків і сотень мікрометрів.

Нанесення покриття конденсованими частинками відбувається за допомогою газотермічних методів напилювання. У цих методах матеріал покриття піддають нагріванню і плавленню будь-яким джерелом теплоти, а потім диспергують і розганяють газовим потоком. Для одержання газотермічних покриттів комбінованої будови, його компоненти заздалегідь вводять у розпилювані частинки. У залежності від джерела теплоти, розрізняють такі методи газотермічного нанесення покриттів: електродугову металізацію, газополуменеве напилювання, детонаційне або детонаційно-газове напилювання і плазмове напилювання. В даний час розвивається газотермічне нанесення покриттів при зниженому тиску в контрольованій атмосфері, або як його ще називають — напилювання в динамічному вакуумі, оскільки розрідження створюється безперервним інтенсивним відкачуванням атмосфери камери. Цей процес, у першу чергу, застосовують для плазмового напилювання і дугової металізації.

Застосовувати газотермічні покриття вигідно при будь-яких масштабах виробництва — від індивідуального і малосерійного до високопродуктивного автоматизованого. Висока ефективність і універсальність цих методів визначається їх такими принциповими особливостями:

- можливістю нанесення покриттів з різних матеріалів — чистих ме-

талів і сплавів на їхній основі металоїдних і металевих сполук, оксидів, органічних речовин і ряду інших матеріалів, у тому числі в різних сполученнях;

- одержання покриттів на різних конструкціях і матеріалах — на металах, склі, кераміці, пластмасах, тканинах, папері і т.п.;

- відсутністю деформації і зниження міцності виробу, на яке наноситься покриття, оскільки, напилювання не викликає його істотного нагрівання;

- невеликою потребою в матеріалах для покриттів, оскільки їхня товщина, звичайно, становить 100—500 мкм;

- високою продуктивністю газотермічних методів напилювання, що коливається для різних процесів від 1 до 20 кг/год розпиленого матеріалу.

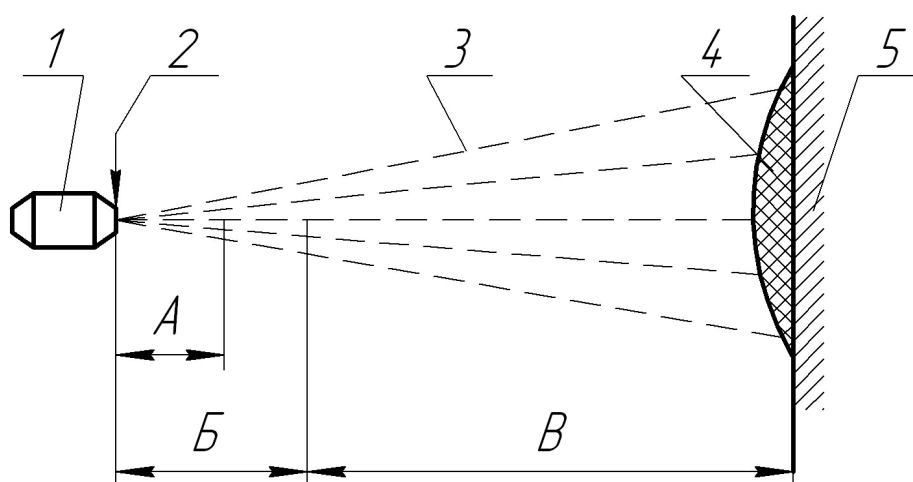


Рисунок 1 – Схема процесу газотермічного нанесення покриттів:

А — дистанція, на якій відбувається нагрівання напилюваного матеріалу; Б — дистанція, на якій частинки прискорюються газовим потоком; В — область вільного руху частинок.

За допомогою сучасної технології газотермічних покриттів можна вирішити ряд важливих задач машинобудування. До них, у першу чергу, варто віднести одержання матеріалів і покриттів з унікальними властивостями, що необхідні для розвитку нової техніки.

Загальним для всіх газотермічних методів є те, що матеріал покриття нагрівається, розпильовується і прискорюється у високотемпературному газовому потоці (рис. 1). На поверхню виробу або основи (раніше застосовували термін підкладка) напилюваний матеріал надходить у диспергованому стані у вигляді дрібних розплавлених або пластифікованих частинок, що вдаряються, деформуються і, закріплюючись, накладаються одна на

одну, утворюючи шарувате покриття. У високотемпературне джерело нагрівання 1, напилюваний матеріал може подаватися у вигляді порошку або дроту (прутка) 2. У випадку нанесення покриття із дроту, він нагрівається, плавиться і диспергується з торця, що знаходиться у високотемпературній області джерела нагрівання. При напилюванні порошоків, їх твердими вводять у високотемпературний потік, вони нагріваються в період руху на деякій ділянці *A*. Одночасно частинки розподіляються в газовому потоці і прискорюються ним на ділянці *B*, відповідно до закону газодинаміки. Ділянка *B*, звичайно, довша ділянки *A*. Далі на ділянці *B* частинки 3 спрямовано переміщуються до основи 5 і утворюють на ній покриття 4. При напилюванні частинки переплавляються, випаровуються і вступають у хімічну взаємодію з нагрітим газом і навколишнім середовищем. Удар і деформація частинок приводять до їх надзвичайно швидкої кристалізації й охолодження зі швидкостями, які досягають 10^6 — 10^8 K/c. Газотермічні покриття відрізняються незвичайною будовою як покриття в цілому, так і його окремих елементів, оскільки вони утворюються із маленьких частинок, які швидко кристалізуються. Великою перевагою технології газотермічного напилювання є можливість регулювання в процесі напилювання складу матеріалу і структури покриття від звичайної до дрібнокристалічної і аморфної, яка додатково надає їм комплекс надзвичайно цінних властивостей.

Перші газотермічні покриття були отримані на початку ХХ в. М. У. Шоопом, який розпилив розплавлений метал струменем газу і, направивши цей потік на зразок — основу, одержав на ній шар покриття. За іменем автора, цей процес називали шооніруванням і він був запатентований у Німеччині, Швейцарії, Франції й Англії. Конструкція першого газополуменевого дротового металізатора Шоопа відноситься до 1912 р., а першого електродугового дротового металізатора — до 1918 р.

У вітчизняній промисловості газополуменеву металізацію стали застосовувати з кінця 20-х років. Наприкінці 30-х років вона була успішно замінена електродуговою металізацією. Апаратуру для електродугової металізації створили Н. В. Катц і Е. М. Линник.

Плазмове напилювання різко підвищило якість газотермічних покриттів, оскільки, з'явилася можливість у широких масштабах керувати енергетикою процесу і створювати покриття, практично з будь-яких матеріалів. Однак, без розвитку теорії утворення газотермічних покриттів неможливо керувати цим процесом і оптимізувати технологію. Звичайно, досліджують властивості покриття в цілому і визначають його деякі службові характеристики. Однак, такий підхід не дозволяє виявити природу і дати оцінку фізико-хімічним явищам: формуванню покриття, а також його міцному зчепленню з основою.

З використанням сучасних методів дослідження – оптичної й електронної скануючої мікроскопії, фазового рентгенівського аналізу, електронографії, електрофізичних вимірювань, методів селективного травлення, визначали енергетичні умови і кінетику розвитку процесів формування покриття. Ці роботи склали основу сучасної теорії формування газотермічних покриттів. Головною частиною теорії є уявлення про контактну взаємодію частинок при формуванні напиленого покриття, а також оцінювання умов розпилення і перенесення матеріалів від джерела розпилення на поверхню виробу. Теорія дає певні уявлення про формування покриттів і пояснює їхні основні властивості. При цьому запропонований ряд критеріїв, які дозволяють оцінювати термічні, енергетичні і фізико-хімічні умови контактної взаємодії частинок, що приводять до утворення шару покриття і його міцного зчеплення з напилюваною поверхнею. Ці критерії дають можливість розглянути з єдиних позицій і обґрунтувати як технологію, так і способи газотермічного напилювання. Крім того, вони допомагають знаходити оптимальні режими напилювання, а також «конструювати» покриття складної будови, використовуючи для цієї мети матеріали з різними фізико-хімічними і механічними властивостями. Такі багатокомпонентні покриття мають комплекс властивостей, яким не відповідають ці матеріали окремо.

1.2 Покриття

Покриття — це шаруватий матеріал, що складається із сильно деформованих напилених частинок, з'єднаних між собою по контактних поверхнях зварюваними ділянками діаметром D_x і площею $F_x = (\pi D_x^2 x)/4$ (рис. 2). Зварені ділянки не заповнюють усю площу контакту (або контактної поверхні) між частинками і тому міцність і густина напилених покриттів нижча міцності і густини матеріалу покриття в компактному стані. Міцність самих зварених ділянок залежить від кількості осередків схоплення, що утворюються на площі F_x у період удару, деформації і затвердіння частинки, і визначається розвитком хімічної взаємодії матеріалів у контакті. У покритті можна виділити структурні елементи, що ілюструють процеси його формування і розділяються границями з певними властивостями. Границя розподілу між покриттям і основою 1 визначає міцність зчеплення або міцність з'єднання між ними. Властивості самого покриття обумовлюються міцністю зчеплення частинок 3 у ньому (див. рис. 2). Зчеплення покриття й основи називають адгезією, а зчеплення частинок у покритті когезією. Ці терміни походять від латинського *adhaesio* — прилипання і *cohaesus* — зв'язаний, зчеплений.

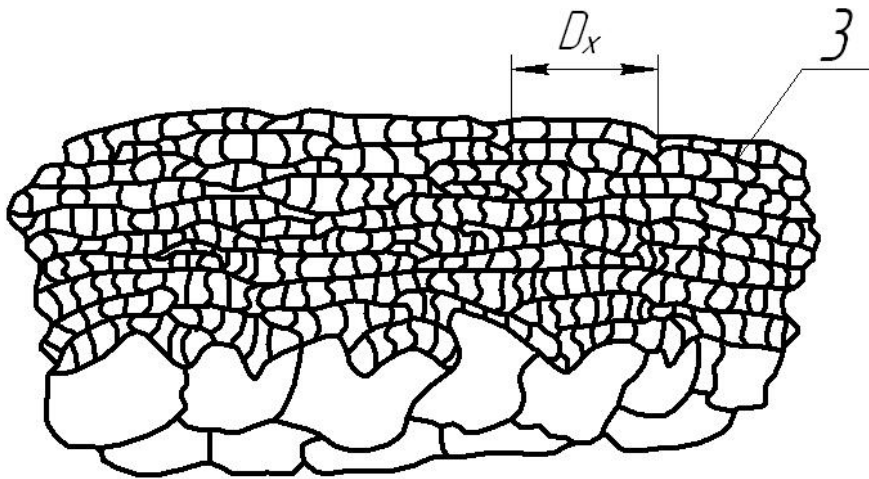


Рисунок 2 – Схема структури покриття:

1— границя між покриттям і основою; 2— границі між шарами; 3 — границя (контактна поверхня) між частинками в шарі

Границя розподілу між шарами (міжшарова границя), отримана за один прохід розпилювача 2, виникає через різну тривалість витримки між нанесенням частинок у шарі і між шарами. За період витримки міжшарового нанесення, поверхня раніше нанесеного шару покриття забруднюється, окислюється і контактні процеси між нею і напиленими частинками ускладнюються, що і є причиною виникнення границі.

Побудову окремих елементів і всього покриття в цілому добре видно на типовому протравленому мікрослїфі плазмового покриття (рис. 3).

Структура шару, сформованого за один прохід, неоднорідна і визначається різними розмірами й енергетичним станом — температурою і швидкістю частинок, що знаходяться в периферійній і центральній зоні двофазного потоку, що складається з частинок і газу. Крім того, спостерігається також екрануюча дія периферійних частинок відносно частинок центральної зони, оскільки периферійні частинки при русі розпилювача першими лягають на поверхню, що покривається. Нерівномірність енергетичного стану частинок і їхніх розмірів може бути знижена різними технологічними прийомами. Товщина шару в різних покриттях коливається в дуже широких межах у залежності від призначення покриття, технології його нанесення, матеріалів, що входять до складу покриття і т.і. Найбільш часто зустрічаються покриття з товщиною шару від 10 до 100 мкм.

Умови утворення границь між шарами і між частинками визначаються тривалістю перебування в атмосфері. У залежності від розмірів і конфігурації напилюваного виробу, траєкторії переміщення розпилювача «пауза» між моментами накладення шарів може досягати секунд і десятків се-

кунд. Це час на кілька порядків більший часу паузи між взаємодією частинок у шарі, нанесеному за один прохід.

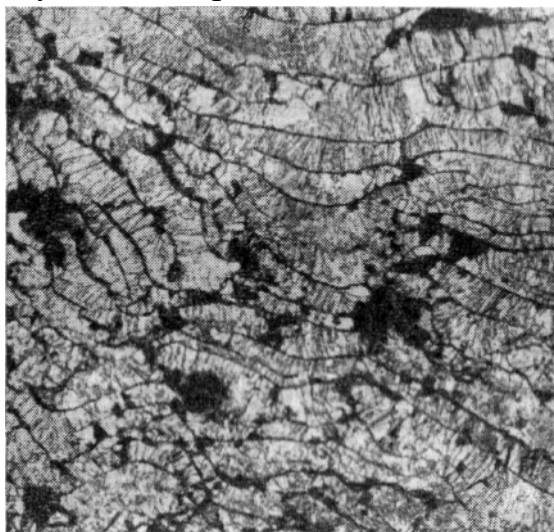


Рисунок 3 – Типовий мікрошліф плазмового покриття

У період між напилюванням шарів на поверхні покриття відбувається адсорбція газів, окислювання і відкладення пилоподібних фракцій розпилюваного матеріалу і його оксидів.

Утворення покриття послідовним нашаруванням безлічі частинок, що деформуються, неминуче приводить до появи мікропорожнин, у першу чергу на стиках частинок. Покриття формується в атмосфері, тому мікропорожнини заповнюються газом, що погіршує властивості границь, особливо міжшарових, які мають найбільшу насиченість адсорбованими газами. Внаслідок великої шорсткості покриття і надзвичайно швидкого розтікання і кристалізації частинок, у зоні контактів з поверхнею раніше нанесених частинок залишаються дефекти і порожнини, що утворюються також внаслідок виділення газів, розчинених у розплавлених частинках. Взаємодія з атмосферою, адсорбція газів і осідання пилоподібних фракцій погіршує властивості міжшарових границь.

Структура і властивості покриття залежать від гранулометричного складу напилюваного порошку. Зі зменшенням розміру частинок порошку поліпшується заповнення покриття — густина його збільшується, об'єм мікропорожнин зменшується, будова покриття стає більш однорідною. Однак занадто дрібні порошки не придатні для плазмового напилювання. Мінімальний розмір частинок може бути встановлений з ряду міркувань. Великі ускладнення виникають при спробах транспортування і введення в розпилювач частинок розміром 10 мкм і менше. Такі порошки не можуть бути заздалегідь підготовлені і вирівнені за розмірами частинок звичайними методами підготовки порошків, оскільки вони не розсіюються на ситах. Дрібні порошки грудкуються через вологість і прояв сил молекулярного

зчеплення й утворюють конгломерати з декількох частинок при подачі їх потоком транспортуючого газу. Уже будучи введеними в плазму дрібні частинки можуть в ній цілком випаруватися. Дрібні порошки у навколишній атмосфері швидко втрачають швидкість, відхиляються від заданої траєкторії і не досягають напилюваної поверхні. Звичайно для напилювання рекомендуються порошки з розміром частинок 40—70 мкм. Однак ця середня грануляція в залежності від задач технології може істотно відхилитися як у бік більш великих, так і більш дрібних порошоків. Наприклад, у динамічному вакуумі вдається наносити покриття з порошоків з розміром частинок кілька мікрометрів. Густина таких покриттів наближається до 100 %, а структура відрізняється високою однорідністю і відсутністю міжшарових границь.

Зчеплення між частинками в покритті, а також зчеплення між основою і покриттям (відповідно когезії й адгезії) виникають у результаті дії ряду сил: сил механічного зачеплення; слабких невалентних сил взаємодії (типу сил Ван-дер-Ваальса); хімічних сил зв'язку. Сили двох перших типів відрізняються нестабільністю, звичайно мають низький рівень і тому їх не слід приймати в розрахунок при створенні покриттів. Хоча при напилюванні на матеріали із сильно розвиненою поверхнею (пористі кераміка і графіт) міцність механічного зчеплення покриттів з підкладкою може досягати 10—15 МПа. Хімічна взаємодія приводить до приварювання частинок, що здійснюється шляхом утворення осередків схоплювання в контакт. Чим більше осередок схоплювання, тим вища міцність зчеплення частинок. Приварювання частинки настає тільки при підігріві основи до певної температури, що позначимо T'_2 і назовемо *температурою хімічної взаємодії*. Ця температура відповідає заповненню контактної поверхні під частинкою осередками схоплювання на 40—70 %. При такому заповненні хімічна взаємодія частинок з основою проходить досить глибоко і для їхнього видалення необхідно прикладати значне зусилля. При температурі підкладки нижче T'_2 частинки легко відокремлюються від основи, оскільки хімічна взаємодія не одержує необхідного розвитку.

Температура T'_2 , при якій утвориться міцне зчеплення, існує практично для всіх сполучень матеріалів частинок і основи: елементів, сплавів, простих або складних речовин. Тому напилюванням можна наносити покриття з багатьох неорганічних матеріалів, що можуть бути розплавлені, тобто не розкладаються або випаровуються у твердому стані. У залежності від конкретної пари матеріалів покриття — основа температура підігріву основи T'_2 може лежати як в області від'ємних температур (за стоградусною шкалою), так і досягати 1000 °C і більше. Особливо зручні для напилювання тугоплавкі метали, що утворять міцне покриття при природному

підігріві основи, тобто при кімнатній температурі. Тому покриття з тугоплавких металів часто використовують як підшари, що наносять на виріб під основне покриття і які підвищують міцність зчеплення між ними.

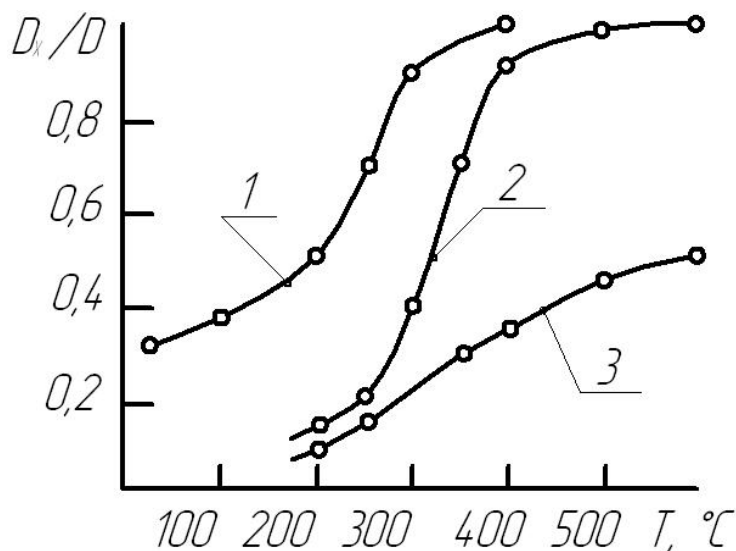


Рисунок 4 – Характер зміни відносної величини плями хімічної взаємодії D_x/D у залежності від температури підігріву основи T_2 при нанесенні частинок (діаметром 100 — 200 мкм) срібла на срібло (чистотою 99,99 % Ag): 1 — частинки нагріті вище $T_{пл}$ ($V_1 \approx 40$ м/с); 2 — частинки нагріті до $T_{пл}$ ($V_1 \approx 20 — 40$ м/с); 3 — частинки нагріті до $T_{пл}$ ($V \approx 5$ м/с)

У практиці напилювання часто доводиться наносити металеві покриття на метали. При напилюванні на повітрі підігрів металевих виробів обмежений стійкістю даного металу проти окислювання, оскільки на повітрі навіть при низьких температурах (до 20 °C) «свіжа» поверхня металів починає швидко окислятися. Але вже через кілька хвилин швидкість окислювання сильно сповільнюється, а через кілька годин на поверхні звичайно утвориться тонкий стійкий шар оксиду товщиною 2—5 нм. Цей процес прийнято описувати логарифмічною залежністю від часу. При нагріванні металу вище деякої критичної температури (звичайно 100—300 °C) оксид зростає значно швидше.

Товсті оксидні плівки перешкоджають утворенню міцного зчеплення металевих частинок з основою, розділяючи взаємодіючі метали. Наприклад, при напилюванні ванадію на полірований зразок з нікелю міцне зчеплення виникає вже при 20 °C. Однак, якщо зразок попередньо витримати протягом 1—3 хв на повітрі при 400—500 °C, а потім охолодити до 20 °C, то при наступному напилюванні приварюванню частинок заважає товста плівка NiO . При напилюванні товста оксидна плівка з'являється при нагріванні вище 100—150 °C.

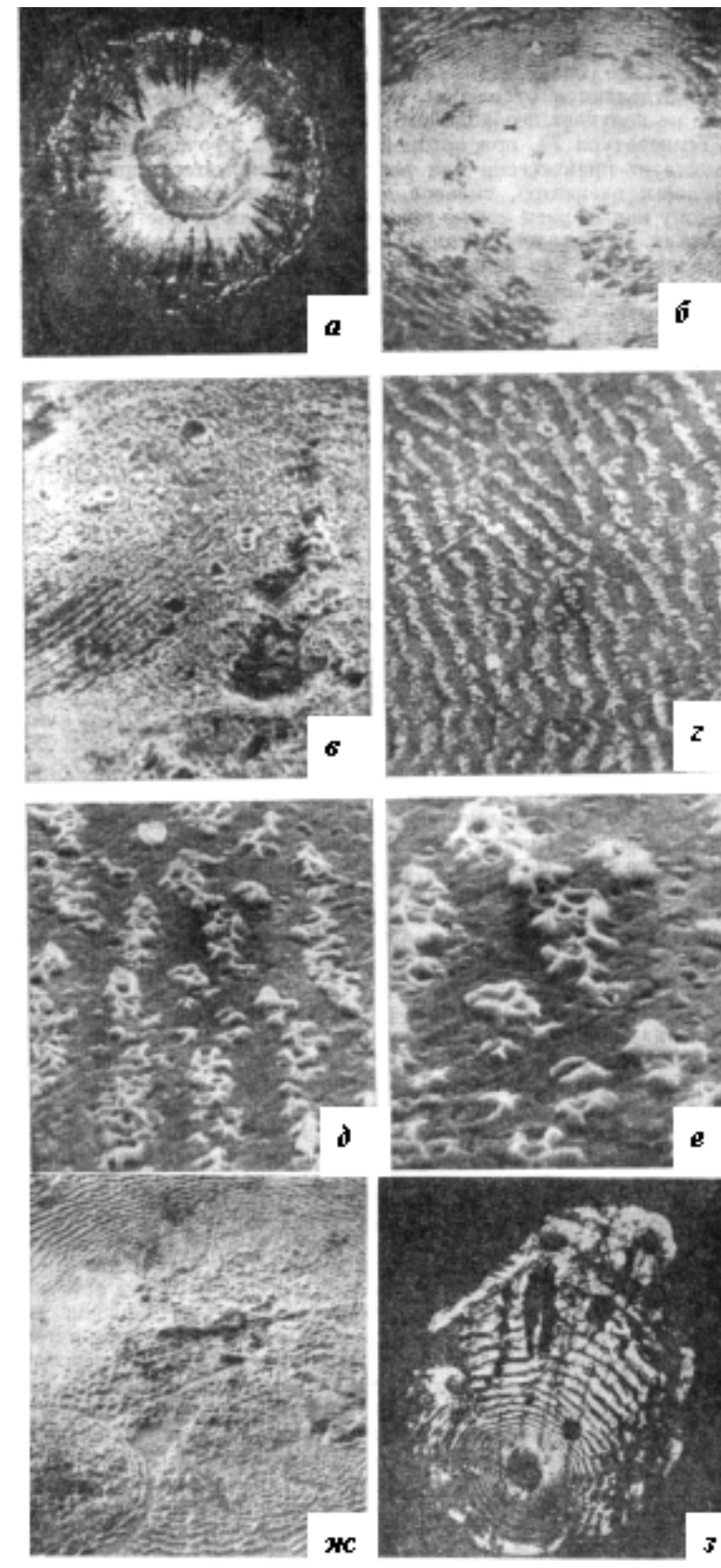


Рисунок 5 – Фрактографія поверхні срібної основи під привареною срібною частинкою після її відриву:

a — у центрі площі всього контакту частинки з основою діаметром D видна область D_x де частинка приварилася до основи $\times 300$;

б — область D заповнена осередками захоплення, на яких виникли вириви металу частинки при її відділенні $\times 800$;

в — осередки захоплення майже цілком заповнили D_x у результаті чого міцність приварювання частинки стала близька до максимального $\times 1000$;

г — збільшені вириви металу частинки у осередках захоплення $\times 3000$;

д — те ж $\times 6000$;

е — те ж $\times 40000$;

ж — утворення шару покриття — велика частинка накрила дрібну і відірвала її від основи $\times 600$;

з — вигляд контактної поверхні частинки, відділеної від основи $\times 800$

Природно виникає питання, чому металеві частинки не приварюються до товстої оксидної плівки на основі. Адже метали міцно з'єднуються при напилюванні на окремо взятих пластинках оксидів, наприклад, кварцове скло. Відсутність з'єднання пояснюється двома міркуваннями: 1) енергія активації оксидів вища енергії активації більшості металів, і для здійснення взаємодії необхідна більш висока температура в контакті; 2) температура в контакті частинка — оксидна плівка на металі істотно нижча температури контакту між напилюваною частинкою і компактним оксидом того ж складу, оскільки в першому випадку сильно впливає близькість металу, що має високу теплопровідність.

Збільшення міцності приварювання частинок до основи із підвищенням її температури T_2 пояснюється двома процесами: розширенням діаметра плями хімічної взаємодії D_x , на якому частинка приварювалася до основи, і підвищенням міцності в самій плямі D_x . Граничним випадком для першого процесу є приварювання частинки по всій площі $D_x/D = 1$ розплющеної частинки діаметром D (рис. 4), і для другого – одержання міцності зчеплення, що відповідає деякій максимальній величині, наближеній до міцності металів, що з'єднуються. Обидва ці процеси важливі для технології одержання якісних покриттів. За допомогою другого процесу можна описати хімічну взаємодію, і отже, високу міцність покриття.

Простежимо за розвитком контактних процесів при ударі і затвердінні частинок покриття на основі, температура якої послідовно підвищується. Ці експерименти були виконані на модельному металі — сріблі. Срібло мало окисляється під час експериментів і, крім того, унаслідок ви-

сокої пластичності срібла осередки захоплення мають чітко виражений рельєф після відділення частинок від основних по границі контакту. Спостерігати явища в контакті після відділення частинок зручно на електронному растровому мікроскопі.

На фотографії поверхні основи під частинкою що приварилася, яку потім механічно вилучили, добре видно рельєф поверхні (рис. 5). На початку взаємодії частинки з основою в їхньому контакті утворюються осередки захоплення. Після відриву частинки від основи на поверхні останньої в місцях захоплення залишаються сліди металу, вирваного з частинки (світлі виступи на фото, які називають осередками захоплення). На металах розміри осередків захоплення, які спостерігали за допомогою сканувального електронного мікроскопа, складають у поперечнику 200—700 нм. Із розвитком реакції число осередків збільшується і при міцності зчеплення, наближеній до максимального, вони практично зливаються, заповнюючи всю центральну область D_x деформованої частинки. Діаметр плями хімічної взаємодії D_x звичайно трохи більший діаметра напилюваної частинки $D_x > d$. Близькість діаметрів пояснюється тим, що саме на площі діаметром d інтенсивно діє тиск при ударі і деформації частинки. Ближче до краю частинки тиск знижується і краї приварюються гірше. Однак при сильному нагріванні основи або перегріві частинок температура, очевидно, компенсує недостачу тиску і частинки приварюються повністю $D_x \approx D$ по всьому діаметрі D (рис. 4, криві 1 і 2).

Накладаючись одна на одну, частинки утворюють шар покриття. Якщо когезія частинок вища, ніж їхня адгезія, то при відриві покриття руйнування відбувається на границі між основою і частинками. На рис. 5, *ж* видно слід відриву невеликої частинки (ліворуч нижня частина фото), що відокремила і потягнула з собою більш велику частинку, яка її накрила.

Перегрів напилюваних частинок вище температури плавлення $T_{пл}$ підвищує міцність їхнього з'єднання з основою (порівняйте криві 1 і 2, рис. 6) і збільшує площу плями хімічної взаємодії (див. рис. 4, крива 1). Ріст міцності пояснюється тим, що при перегріві частинок підвищується контактна температура і процес хімічної взаємодії різко прискорюється. Тому покриття варто наносити розплавленими частинками і, по можливості, нагрітими до високої температури.

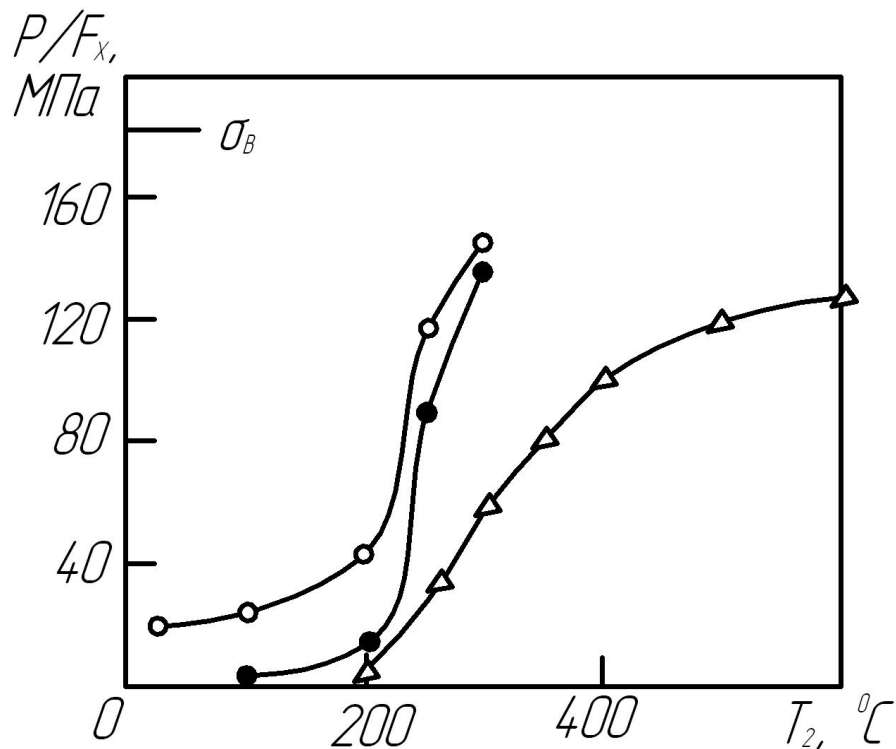


Рисунок 6 – Вплив перегріву срібних частинок і швидкості співударяння V_1 , на міцність їхнього зчеплення P/F_x зі срібною основою: 1 – напилювані частинки нагріті вище температури плавлення ($V_1 \approx 40$ м/с); 2 — частинки розплавлені при температурі близькій до плавлення ($V_1 \approx 20 - 40$ м/с); 3 — розплавлені частинки співударяються з основою при низькій швидкості ($V_1 \approx 5$ м/с); P — зусилля відриву; σ_y — тимчасовий опір срібла при розтяганні

Іншим важливим технологічним методом підвищення якості покриття є збільшення швидкості напилюваних частинок, що сприяє прискоренню й інтенсифікації фізико-хімічних процесів у контакті, а отже, підвищенню міцності, густини і поліпшенню ряду інших характеристик покриття.

Існує межа швидкості частинок. При напилюванні зі швидкістю частинок нижче цієї межі міцність їхнього зчеплення різко знижується. «Повільні» частинки мало деформуються і майже не розтікаються при ударі, у результаті чого контактні процеси взаємодії матеріалів частинки з основою порушуються. Установлено, що при швидкості частинок 5 м/с збільшення їхньої міцності зчеплення з основою сповільнюється (рис. 6, крива 3), одночасно дуже слабо збільшується відносний діаметр плями хімічної взаємодії і за абсолютною величиною не перевищує 0,5 навіть при дуже сильному підігріві основи (див. рис. 4, крива 3).

1.3 Механізм і кінетика фізико-хімічних процесів, які ведуть до міцного зчеплення напилюваних частинок

Взаємодію матеріалу основи з матеріалом частинок покриття на кожній елементарній ділянці поверхні контакту можна умовно показати у вигляді трьох послідовних стадій: 1) зближення матеріалів до утворення фізичного контакту між ними, тобто на відстань, близьку до величини параметра ґратки; 2) активація контактуючих поверхонь і хімічна взаємодія матеріалів на границі поділу фаз; 3) об'ємний розвиток взаємодії, що призведе до взаємного проникнення матеріалів частинки й основи внаслідок дифузійного масоперенесення через границю з вже сталими хімічними зв'язками.

Тривалість взаємодії при напилюванні оцінюється часом 10^{-3} — 10^{-7} с, після чого частинки кристалізуються, різко остигають і втрачають здатність взаємодіяти. За настільки малий час об'ємне проникнення матеріалів проходить на невелику глибину і мало впливає на міцність зчеплення частинок. Приварювання частинок визначається головним чином тим, наскільки повно проходить хімічна стадія. Зовнішнім проявом ступеня розвитку цієї стадії є заповнення поверхні контакту осередками схоплювання. Стадія фізичного контакту не лімітує взаємодії, оскільки під дією удару розплавлені частинки швидко розтікаються і придавлюються до поверхні основи.

Як показують розрахунки, якщо пройшли дві перші стадії, то об'ємні процеси при напилюванні встигають пройти головним чином по дислокаціях, малокутових границях зерен і інших дефектах структури. Дифузія істотно полегшується пластичною деформацією, що має місце в зоні контакту при зіткненні частинок з основою. Крім того, дифузії також сприяє висока температура в контакті.

Особливо легко протікають об'ємні процеси у напилюваному матеріалі, що відрізняється пористою, дефектною, нерівноважною структурою і сильно перекрученими кристалічними ґратками. Цю обставину завжди варто враховувати при тривалій експлуатації напиляних покриттів. У процесі роботи при підвищеній температурі вони схильні до посиленої дифузії й утворення нових фаз, особливо в перехідній зоні покриття — основа. Іноді полегшену дифузію елементів у покритті використовують для створення на його поверхні захисних плівок, забезпечуючи безперервну подачу необхідних компонентів з об'єму покриття. Цей принцип, наприклад, використовують у силіцидних покриттях на основі $MoSi_2$, що утворюють при окислюванні на поверхні склоподібну захисну плівку.

2 РОЗПИЛЕННЯ

2.1 Основні задачі розпилення

Для формування покриття розпилювані частинки повинні бути нагріті і мати досить високу швидкість. У сучасних процесах газотермічного нанесення покриття частинки напильюють у розплавленому або пластичному стані. Швидкість частинок сягає десятки і сотні метрів у секунду.

Найбільш просто нагріти частинки можна електричним дуговим розрядом або газовим полум'ям, а надати їм швидкість спеціальним потоком газу, якщо швидкість, отримана від джерела тепла, виявиться недостатньою. У деяких спеціальних випадках, наприклад, для нанесення дуже чистих покриттів або нанесення покриттів у кисневій плазмі, застосовують безелектродний високочастотний розряд.

Вихідним матеріалом для покриття звичайно служить порошок, іноді також застосовують дріт, стрижні або прутки. Тому на першій стадії нанесення покриття вирішується задача розпилення, тобто диспергування, розподілу і нагрівання речовини покриття в газовому потоці. У результаті одержують двофазну струмину (або потік), що складається з напильюваних частинок (розміром 10—150 *мкм*) і нагрітого газу. При ударі об поверхню деталі частинки деформуються і, накладаючись одна на одну, утворюють покриття. Одночасно двофазний потік нагріває поверхню деталі в зоні напильювання. Енергетичні характеристики двофазного потоку, кількість частинок і їхній розподіл у потоці регулюється в залежності від вимог технології.

Властивості покриття і його рівномірне нанесення на поверхню деталі залежать від розподілу частинок у потоці як за масою та швидкістю, так і за їх енергетичним станом. Однією з найважливіших задач технології й апаратури для нанесення покриттів є створення двофазних потоків із заданим розподілом і енергією частинок.

У процесі напильювання в двофазному потоці відбувається взаємодія між частинками і газом. Унаслідок високої температури газу ця взаємодія протікає швидко й у залежності від складу газу може вести до утворення нових речовин — нітридів, оксидів, карбідів і інших сполук. Тому склад газу двофазного потоку і його хімічна активність є важливим параметром процесу одержання покриття.

Для нанесення покриттів застосовують плазмотрони (дугові і високочастотні), газополуменеві пальники, дугові металізатори, детонаційно-газові гармати. Головне призначення апаратури: розпилення і розподіл частинок у двофазном потоці, нагрівання частинок і їхнє прискорення, а також створення навколо частинок і в зоні напильювання певної газової атмо-

сфери, що забезпечує заданий хімічний вплив на частинки.

2.2 Дуговий розряд

Для нанесення покриттів напилюванням найбільше застосування знайшов електричний дуговий розряд, що характеризується великим струмом і невеликим спадом потенціалу на катоді. Цими властивостями дуга відрізняється від іншого виду електричного тліючого розряду. Тліючий розряд має високий катодний і загальний спад потенціалу (сотні і тисячі вольт) при малому струмі. Його застосовують при нанесенні покриттів конденсацією.

Для нанесення покриттів використовують два крайніх види дугового розряду. Перший вид дугового розряду характеризується великим міжелектродним проміжком, при якому нагрівання і прискорення частинок здійснюється за рахунок теплової і кінетичної енергії — плазми стовпа дуги. Цей метод називають плазмовим напилюванням і з його допомогою наносять покриття як з електропровідних, так і неелектропровідних матеріалів у будь-якому вигляді — дроту, стрижнів, порошків. У другому типі розряду стовп дуги доведений до мінімальних розмірів, оскільки електроди безупинно рухаються на зустріч один одному, його застосовують при металізації. Нагрівання і розпилення в цьому процесі відбувається за рахунок енергії анодної і катодної плями, які розташовуються на дроті, що розпилюється. Для одержання покриттів з неметалевими включеннями серцевину дроту іноді заповнюють порошком.

З метою підвищення ефективності нанесення покриттів дугою її інтенсифікують, обдуваючи потоком газу, накладаючи на неї електромагнітні поля або застосовуючи розряди з дуже високою густиною струму на електродах. Високу густину струму одержують зменшенням перерізу електродів або застосуванням потужнострумівих розрядів.

У дузі можна чітко виділити три області проходження струму: область проходження через плазму — стовп дуги; область проходження через границю між катодом і плазмою і таку ж область, але між анодом і плазмою. Відповідно ці дві останні області називаються областю катодного спаду напруги й областю анодного спаду напруги. Процеси в приелектродних областях надзвичайно важливі і багато в чому визначають існування дуги. Однак їхні розміри малі і залежать від фізичних явищ у розряді, тому керувати ними досить складно. Довжина стовпа дуги, навпаки, може легко регулюватися розсовуванням електродів, що і знаходить застосування при нанесенні покриттів.

Електродугові металізатори застосовують для нанесення металевих покриттів шляхом розпилення дроту. Дуга плавить електроди, а розплавлені

ний метал видаляється і розпилюється із зони плавлення потоком газу, спрямованим уздовж електродного дроту (рис. 7). Електроди подаються назустріч один одному спеціальним механізмом подачі, таким чином, щоб компенсувати їхнє плавлення. Швидкість подачі електродів встановлюють у залежності від режиму горіння дуги. Її величина забезпечує підтримку певного зазору між електродами в зоні горіння дуги.

Плавлення електродів відбувається в основному за рахунок енергії, що виділяється дугою в зоні активних плям. Середньомасова температура рідкого металу \bar{T} , що розпилюється струменем газу, знаходиться в межах $T_{пл} < \bar{T} < T_{кип}$, де $T_{пл}$ – температура плавлення і $T_{кип}$ – температура кипіння металу електродів.

Вид оплавленого електрода після різкого припинення процесу розпилення після вимикання дуги показує, що фронт плавлення близький за формою до площини, нормаль до якої перетинається з віссю електрода під деяким кутом φ (рис. 7). Цей кут φ може змінюватися від 0° до $\varphi_{\max} = 90^\circ - \omega/2$, де ω — кут схрещування осей електродів. Зміна режиму розпилення приводить до зміни кута нахилу фронту плавлення: якщо швидкість подачі електродів постійна, то збільшення напруги дуги приводить до зменшення кута φ ; при збільшенні швидкості подачі електродів кут φ збільшується, прагнучи до свого граничного значення.

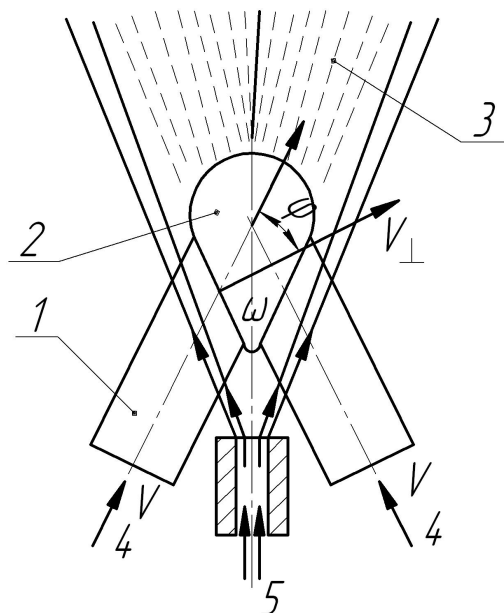


Рисунок 7 – Схема плавлення і розпилення електродів при дуговій металізації: 1 — розпилювані електроди; 2 — дуга; 3 — двофазний потік; 4 — напрямок подачі електродів зі швидкістю V ; 5 — розпилювальний газ; V_{\perp} — перпендикуляр до площини плавлення електрода

Стійкий процес розпилення відповідає режимам горіння дуги без коротких замикань і зривів, тобто тоді, коли між середньою швидкістю переміщення фронту плавлення і швидкістю подачі електродів установлюється динамічна рівновага. При такому режимі газовий потік забезпечує видалення і розпилення порції рідкого металу з електродів до їхнього зіткнення і короткого замикання. Далі знову накопичується розплавлений метал на торці електродів, стовп дуги коротшає і цикл повторюється. Поряд з періодичним викидом порцій металу з міжелектродного проміжку при металізації спостерігається також безперервне струминне стікання перегрітого металу з поверхні електродів. Воно пояснюється тим, що при сильному перегріві розплавленого металу сили поверхневого натягу в ньому убувають і виявляються недостатніми для утримання оплавленого шару на поверхні електродів. Під дією струмини розпилювального газу оплавлений шар змивається з поверхні електродів і розпилюється. Маса і розміри розпилюваних частинок значно менша маси порції металу, що видаляється з електродів за один цикл горіння дуги. Так, наприклад, при розпиленні алюмінієвого дроту діаметром 2 мм при куті схрещування електродів $\omega = 30^\circ$, витраті повітря, що розпилює, $0,03 \text{ м}^3/\text{с}$ і діаметрі повітряного сопла 7 мм, параметри газової струмини такі, що забезпечують видалення з зони горіння дуги за один цикл порції металу масою приблизно рівною 10^{-6} кг . У той же час середній розмір розпилюваних частинок, згідно гранулометричним аналізом, складає приблизно 100 мкм (що відповідає масі частинки $1,4 \cdot 10^{-9} \text{ кг}$). Максимальний розмір частинок, за рідкісним винятком, не перевищує 200 мкм. У такий спосіб метал, що залишив електроди, продовжує дробитися під впливом газодинамічних сил повітряного струменя. Причому це диспергування багато в чому залежить від властивостей розплавленого металу частинки й у тому числі від його перегріву.

Енергетичні витрати на нагрівання, плавлення і перегрівання металу електродів, що розпилюються, при дуговій металізації характеризується ефективним *ККД* нагрівання електродного дроту η' , що представляє відношення теплової ефективної потужності, одержуваної електродами q' , до потужності електричної дуги

$$\eta' = \frac{q'}{IU} \quad (3.1)$$

де I , U — сила струму і напруга дуги.

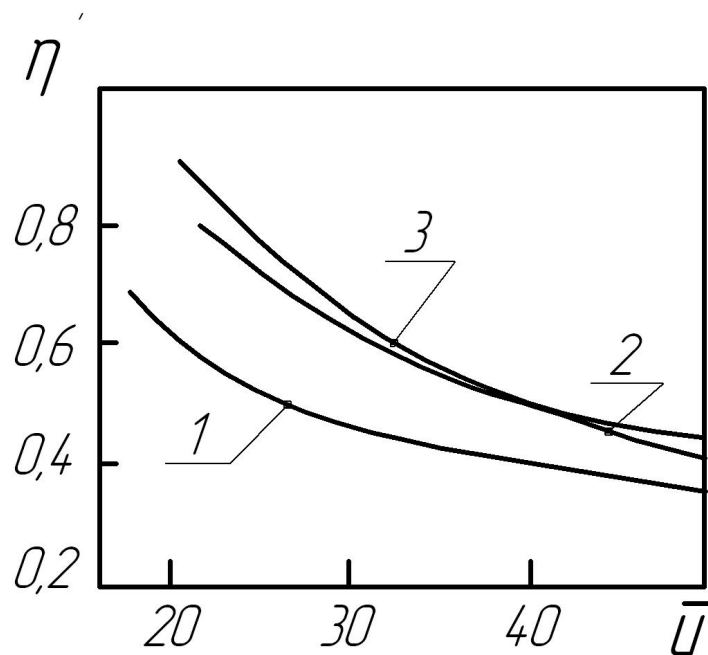


Рисунок 8 – Залежність ефективного ККД нагрівання електродів T') від ефективної напруги дуги \bar{U} при дуговій металізації: 1 — розпилення алюмінію А99; 2 — розпилення сталі 08А; 3 — розпилення цинку Ц-1

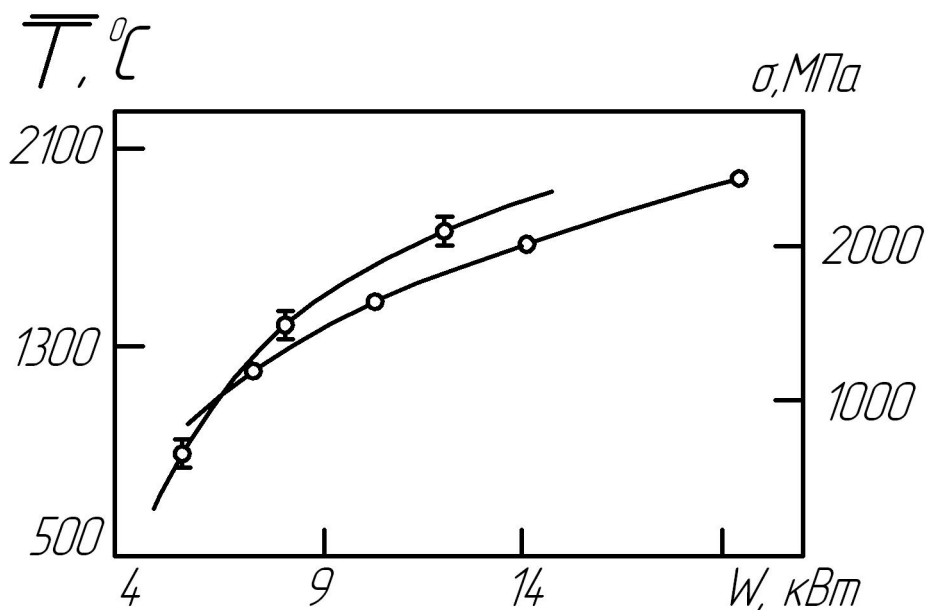


Рисунок 9 – Залежність середньомасової температури \bar{T} розпилюваних частинок алюмінію і міцності зчеплення σ покриття з алюмінієвою литою основою від потужності дуги $W = I\bar{U}$

Експерименти показують, що ефективний ККД при дуговій металізації залежить від напруги дуги і може коливатися в широких межах — від 0,35 до 0,9 (рис. 8). Оскільки при дуговій металізації на постійній силі

струму напруга дуги U змінюється внаслідок циклічності розпилення, на осі абсцис приведена величина ефективної напруги U , яка отримана усередненням його значення за період горіння дуги.

Збільшення довжини дуги яке приводить до росту напруги дуги, різко знижує ефективність нагрівання електродів. Наприклад, при розпиленні цинку складає 0,9 при напрузі 20 В, у той час як при напрузі 60 В ККД знижується до 0,4. Вимірювання показують, що сума анодного і катодного спадання напруги в цьому процесі складає 19,09—19,99 В. Таким чином, при зменшенні довжини дуги основним джерелом нагрівання електродів стають активні плями дуги, використання яких підвищує ефективність розпилення.

З енергетичного балансу плавлення електродів при дуговій металізації впливає можливість істотного перегріву напилюваного матеріалу. Визначити дійсну температуру кожної окремої частинки дуже важко, тому про ступінь нагрівання напилюваного матеріалу часто судять за середньомасовою температурою частинок \bar{T} , які утворюють покриття, тобто вважають, що температура всіх частинок однакова і дорівнює \bar{T} .

Средньомасову температуру частинок знаходять з ентальпії, що приходить на весь матеріал отриманого покриття. Ентальпію звичайно визначають калориметруванням зразків, на які перед цим наносять покриття.

З підвищенням потужності дуги при постійній продуктивності розпилення температура розпилюваних частинок збільшується. Так, при напилюванні алюмінію середньомасова температура частинок \bar{T} збільшується з 1200 °С при потужності дуги 7 кВт до 1900 °С при потужності дуги 19 кВт (рис. 9). Одночасно зростає міцність зчеплення покриття з основою і густина самого покриття. Збільшення міцності зчеплення і густини покриття при напилюванні перегрітими частинками пояснюється великим розвитком хімічної взаємодії в контактній частинці — основа, оскільки збільшення температури частинок приводить до росту контактної температури. Аналогічні результати були розглянуті раніше (див. рис. 6). Крім того, перегріті частинки краще деформуються при ударі і забезпечують більш щільне укладання в шарі покриття.

Таким чином, правильне використання активних плям дуги дозволяє регулювати і підвищувати якість нанесеного покриття при дуговій металізації.

2.3 Плазмове напилювання

Для нанесення покриття плазмовим напилюванням матеріал покриття вводять у струмінь плазми стовпа дуги, де він нагрівається і прискорю-

ється в напрямку до основи.

Плазма — це частково або цілком іонізований газ, що складається з позитивно і негативно заряджених частинок, сумарний заряд яких дорівнює нулю. Носіями зарядів у плазмі є електрони і позитивні іони. Поряд з іонами й електронами в плазмі можуть втримуватися неіонізовані атоми або молекули. Між плазмою і газом важко провести різку границю. Плазма підпорядковується більшості газових законів і поводить себе в багатьох випадках як газ. Однак вона відрізняється від газу електропровідністю і взаємодією з магнітними полями.

Плазму вважають квазінейтральною системою, тобто майже нейтральною. Квазінейтральна плазма — плазма, електрично нейтральна, у досить великих об'ємах або за досить великі проміжки часу.

Чим більша густина плазми, тим менші масштаби поділу зарядів як у часі, так і в просторі. Плазма, яку використовують для нанесення газотермічних покриттів при атмосферному тиску — плазма густа і тому в ній електрони не можуть відірватися від іонів і здійснюють колективний рух. Така плазма електронейтральна, тобто в ній дотримується умова квазінейтральності.

Назва плазма була запропонована в 1929 р. американськими фізиками Ленгмюром і Тонксом. Плазма — найпоширеніший стан речовини в природі. Сонце і всі зірки є згустками високотемпературної плазми. Верхній шар атмосферної оболонки Землі також утворений із плазми — це так звана іоносфера.

Для нанесення покриттів застосовують низькотемпературну плазму, сформовану при атмосферному тиску і яка являє собою високонагрітий газ з відносно невисоким ступенем іонізації. Температура в такій плазмі складає 10^3 — 10^5 K, тобто лише декілька електронвольт ($1 \text{ eV} \approx 11,600 \text{ K}$). Високотемпературна плазма має температуру, оцінювану сотнями електронвольт, з її допомогою фізики намагаються вирішити задачу одержання термоядерної енергії. Перевагою атмосферної густої низькотемпературної плазми є її гарні технологічні властивості, що визначаються високою ентальпією і гарними переносними властивостями плазми, тобто здатністю передавати температуру і швидкість розпилюваним частинкам.

Середня кінетична енергія електронів, іонів і нейтральних частинок у плазмі різна. Тому в плазмі розрізняють температуру електронів T_e , температуру іонів T_i і атомну температуру T_0 . Звичайно $T_e \gg T_i > T_0$. Дуже велика різниця між T_e і T_i характерна для більшості форм газового розряду, пояснюється великим розходженням у величині маси електронів і іонів. Газовий розряд створюється і підтримується зовнішнім джерелом електроенергії, що передає її безпосередньо електронам плазми. Іони набувають

свою енергію від електронів шляхом зіткнень з ними. Однак при кожному зіткненні внаслідок великої різниці в масі (відношення маси електрона до маси іона дорівнює $1 : 1840 A$, де A — атомна вага речовини іона) легкий електрон передає іонові лише невелику частину своєї кінетичної енергії і відскакує від нього. Для повної передачі енергії електрон повинний багато разів зіштовхнутися з іонами. Віддаючи енергію при зіткненні, одночасно електрон набуває енергію від джерел електричного струму, що живить розряд. Тому в газовому розряді звичайно температура електронів перевищує температуру іонів. Наприклад, у вакуумних газорозрядних приладах (ртутні випрямлячі, лампи денного світла, труби реклам і т.д.) величина T_i звичайно складає кілька десятків тисяч градусів, у той час як величина T_i і T_0 , як правило, не перевищує $1000\text{—}2000\text{ }^\circ\text{C}$. При дуговій металізації і плазмовому напилюванні електронна й іонна температура ближче одна до одної, оскільки розряд відбувається в густому газі, що забезпечує часті зіткнення між електронами й іонами, що вирівнюють їхню температуру.

При плазмовому нанесенні покриттів з порошків незважаючи на високу температуру плазми важко домогтися рівномірного і повного плавлення усього напилюваного матеріалу. Це пояснюється декількома причинами. Більшість неметалевих матеріалів мають низьку теплопровідність, і тому частинки таких матеріалів повільно прогріваються в плазмі. Час перебування частинок у плазмі складає близько 10^{-3} с і часто виявляється недостатнім для повного плавлення на всю глибину частинок з матеріалів з низькою теплопровідністю. Крім того, деякі із застосовуваних у даний час плазмоутворювальних газів ефективно передають тепло порошкові, що нагрівається.

Однією з важливих задач теорії і практики розпилення є дослідження двофазності струменів при нанесенні покриттів. Двофазний потік, що складається з плазми і напилюваних частинок, а також розподіл частинок у плазмі, визначають не тільки їх нагрівання і прискорення, але й умови формування покриття і розподіли його товщини по поверхні деталі.

При розпиленні і нанесенні покриттів дуговими плазмотронами відбуваються коливання параметрів плазмового струменя, що пояснюється нестабільністю розташування і горіння дуги в каналі сопла плазмотрона. Ці коливання можна розділити на періодичні і неперіодичні. Періодичні пульсації плазмового струменя відбуваються з низькою і високою частотою. Низькочастотні пульсації є шкідливими для процесу напилювання, оскільки викликають нестабільність властивостей покриттів на різних ділянках напилювання. Ці пульсації створюються в основному джерелом живлення плазмотрона, а також ерозією електродів. Підвищення стійкості електро-

дних систем плазмотронів для нанесення покриттів, а також створення і застосування джерел живлення зі спеціальною стабілізацією вихідних параметрів підвищує якість і стабільність властивостей плазмових покриттів.

Турбулентний характер теплообміну плазмоутворювального газу зі стовпом дуги приводить до появи пульсацій іншого виду — високочастотні пульсації. Їхня амплітуда і частота залежать від витрати, складу, температури газу, від динаміки шунтування стовпа дуги в каналі сопла плазмотрона і ряду інших причин. Ці пульсації викликають коливання ентальпії, швидкості і температури плазмового струменя з частотами до декількох кілогерців. Думають, що високочастотні пульсації позитивно впливають на коефіцієнт тепловіддачі α , оскільки порушують приграничний шар на частинках, що ускладнює їхній теплообмін із плазмою. Поліпшення нагрівання порошку в плазмі робить процес напилювання більш економічним і продуктивним.

Одним з потужних засобів підвищення продуктивності розпилення є застосування високоентальпійних газів, що утворюють плазму, і середовищ. В даний час для нанесення покриттів у якості плазмоутворювальних газів використовують аргон, гелій, азот, водень, аміак, повітря, природний газ, вуглекислий газ і їхні суміші. Так, є розпилювачі, що використовують для стабілізації дуги і розпилення воду. Зіставимо деякі з найбільш широко застосовуваних плазмоутворювальних газів.

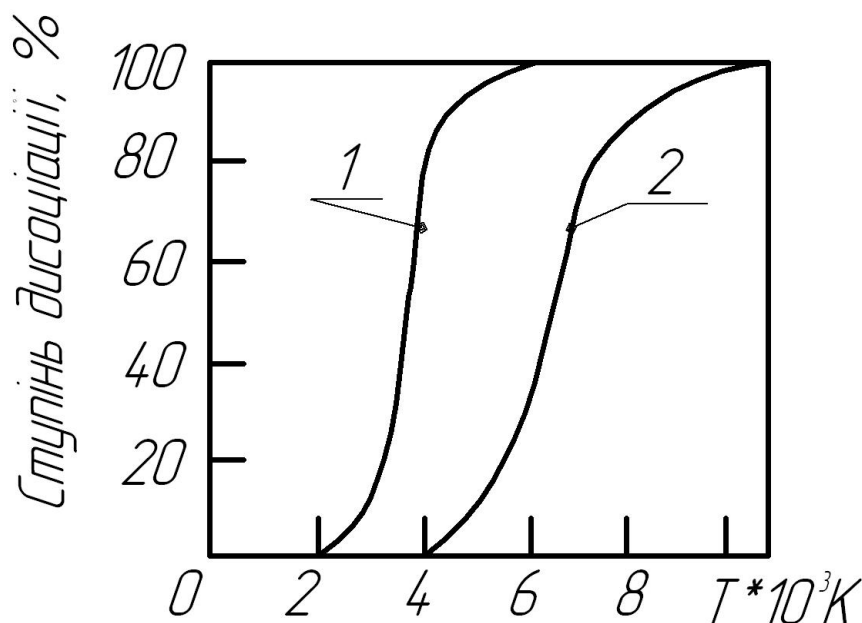


Рисунок 10 — Залежність ступеня дисоціації молекул водню й азоту від температури: 1 — $\text{H}_2 = 2\text{H}$; 2 — $\text{N}_2 = 2\text{N}$

Утворення плазми двохатомних газів відрізняється від процесу утворення плазми одноатомних газів тим, що іонізація атомів двохатомного газу настає після дисоціації його молекул. Енергія дисоціації різних газів різна. Водень дисоціює на 90% при температурі 4700 K, а азот при температурі близько 9000 K (рис. 10)

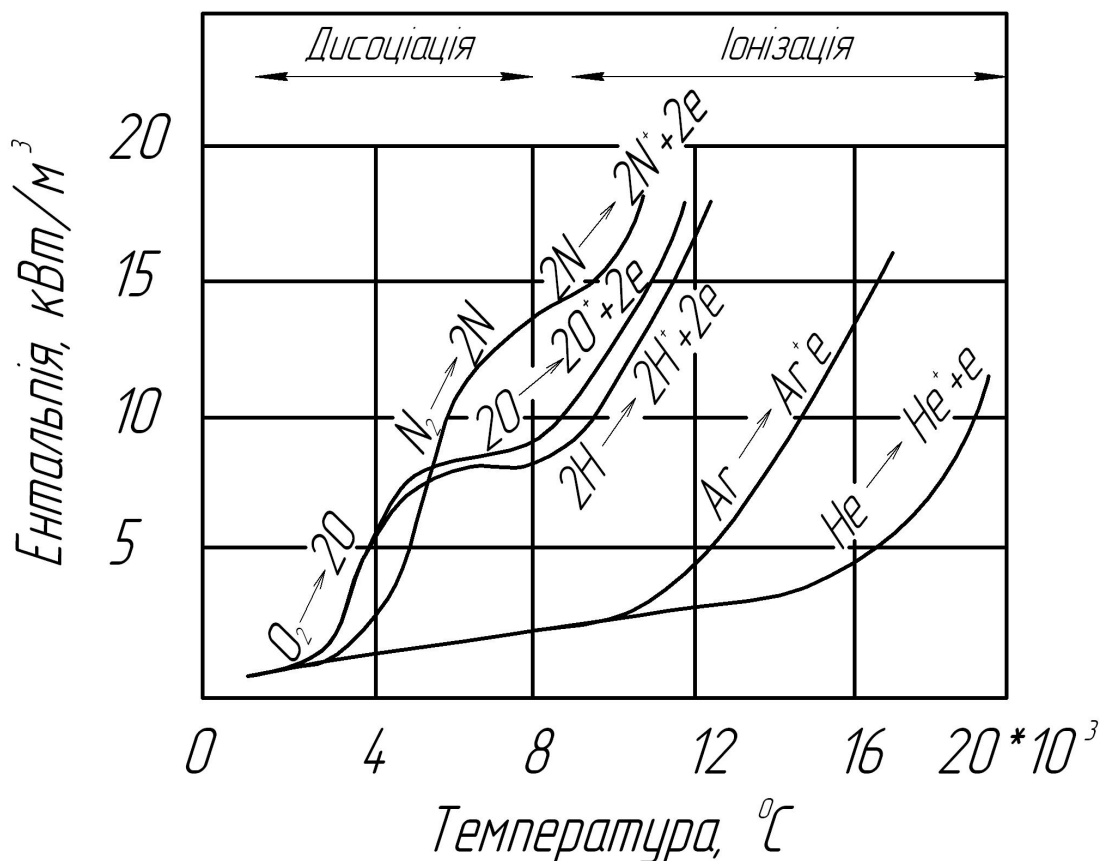


Рисунок 11 — Залежність теплоємності плазмоутворювальних газів від температури

При однаковій температурі теплоємність двохатомного газу набагато перевищує теплоємність одноатомного газу. Наприклад, при температурі 6000 K азот має майже в п'ять разів більшу теплоємність, ніж аргон (рис. 11). Менша теплоємність одноатомних газів пояснюється тим, що енергія, яка набувається ними при нагріванні в стовпі дуги, визначається теплоємністю й енергією іонізації, тоді як у двохатомних газів велика кількість енергії додатково набувається за рахунок дисоціації молекул на атоми. Частинки напилюваного матеріалу одержують тепло від плазми й одночасно її прохолоджують. В охолоджуваній зоні плазми в результаті рекомбінації іонів і електронів в одноатомний газ виділяється енергія, що була витрачена колись на іонізацію. Якщо плазма утворена двохатомним газом, то в більш холодній зоні виділяється також ще й енергія дисоціації.

Для підвищення ефективності нагрівання і плавлення частинок у

плазмі застосовують гази, що мають велику тепломісткість при відносно низьких температурах (4000—7000 K). У плазмі з високою температурою частинки з поверхні починають інтенсивно випаровуватися, у результаті чого навколо частинки утвориться парова оболонка, що перешкоджає її теплообмінові з плазмою і знижує ефективність нагрівання. Завдяки високій тепломісткості плазма двохатомних газів прохолоджується повільніше плазми одноатомних газів і тому утворює плазмові струмені більшої довжини. Збільшення довжини струменя приводить до збільшення шляху (або часу перебування) напилюваних частинок у плазмі, що дає можливість розплавляти частинки при меншій температурі плазми.

Плазма служить джерелом енергії не тільки для нагрівання, плавлення і розпилення наносимого матеріалу — вона повідомляє йому ще і визначений запас кінетичної енергії у вигляді швидкості руху напилюваних частинок. Унаслідок того, що температура і швидкість плазми розподілені по перерізі струменя нерівномірно, швидкість частинок на осі струменя вища ніж на її периферії. Рух частинки речовини в неізотермічному потоці газу, яким є плазмовий струмінь, визначається сумарною дією на неї ряду сил, напрямок і величина яких різні. До цих сил можна віднести: силу, що виникає внаслідок градієнта тиску в потоці; силу, обумовлену нестационарністю процесу і залежну від характеру руху частинки за попередній відрізок часу; силу, обумовлену обертанням частинки, що виникає внаслідок градієнта швидкості в поперечному перерізі струменя плазми, що обтікає частинку; сили тяжіння й інших сил. Однак основною силою, що діє на напилювану частинку в потоці плазми, є сила аеродинамічного опору. Всі інші сили мають величину наступного порядку малості.

Частинки напилюваного матеріалу прискорюються плазмовим потоком унаслідок дії сил в'язкості і динамічного напору. Для розв'язання задачі про рух частинок у плазмі звичайно вводять ряд спрощених допущень: 1) частинки є сферичними і мають однаковий діаметр; 2) розподіл частинок по перерізі каналу сопла рівномірний; 3) частинки не взаємодіють між собою і зі стінкою сопла; 4) присутність частинок конденсованої фази в плазмі не впливає на термодинамічні і теплофізичні властивості газу; 5) випаровування частинок не відбувається.

3 ЗАГАЛЬНІ ПИТАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ГАЗОТЕРМІЧНОГО НАПИЛЮВАННЯ ПОКРИТЬ

3.1 Схема процесу й основні параметри напилювання

Незважаючи на істотні відмінності процесів газотермічного і вакуумного конденсаційного напилювання покриттів, у їхній технології є і загальні елементи. Наприклад, підготовка напилюваної поверхні; одержання рівномірних по товщині покриттів; наступна обробка напиляних виробів і ін. Доцільно також розглядати для єдиних позицій технологію газотермічного і вакуумного напилювання покриттів з різних груп матеріалів. Аналізуючи узагальнену схему газотермічного і вакуумного конденсаційного напилювання (рис. 12), можна виділити однакові параметри процесу. У першому наближенні це дистанція напилювання L ; конус розпилення φ_c ; тиск навколишнього середовища P_c , кут дотику потоку з поверхнею напилювання α_n ; діаметр плями напилювання d_n ; величина перекриття проходів l_p і температура напилюваного виробу T_u .

Газотермічне і вакуумне конденсаційне напилювання покриттів характеризується багатьма технологічними параметрами, що впливають на ефективність процесу. Найбільш доцільно розглядати вплив параметрів при їхньому поділі на такі групи:

1. Конструктивні параметри розпилювальних пристроїв.
2. Параметри, що характеризують режим роботи розпилювача.
3. Параметри, які пов'язані з розпилюваним матеріалом.
4. Параметри, що характеризують умови напилювання покриттів.
5. Параметри потоку при напилюванні покриттів.

Перераховані групи параметрів істотно розрізняються між газотермічними і вакуумними конденсаційними методами напилювання.

Конструктивні параметри. Характеризують вплив на процес напилювання конструктивних елементів розпилювача. Для більшості газотермічних методів напилювання найбільш важливим конструктивним параметром є геометрія сопла або стовбура розпилювача. В установках для вакуумного напилювання — форма і розміри: камери розпилювача, основних і допоміжних електродів і ін.

Параметри, що характеризують режим роботи розпилювача. В основному — це енергетичні параметри, що визначають процес розпилення матеріалу: потужність дуги, електронного променя, тліючого електричного розряду й інші, вид і витрата паливних і розпилювальних газів.

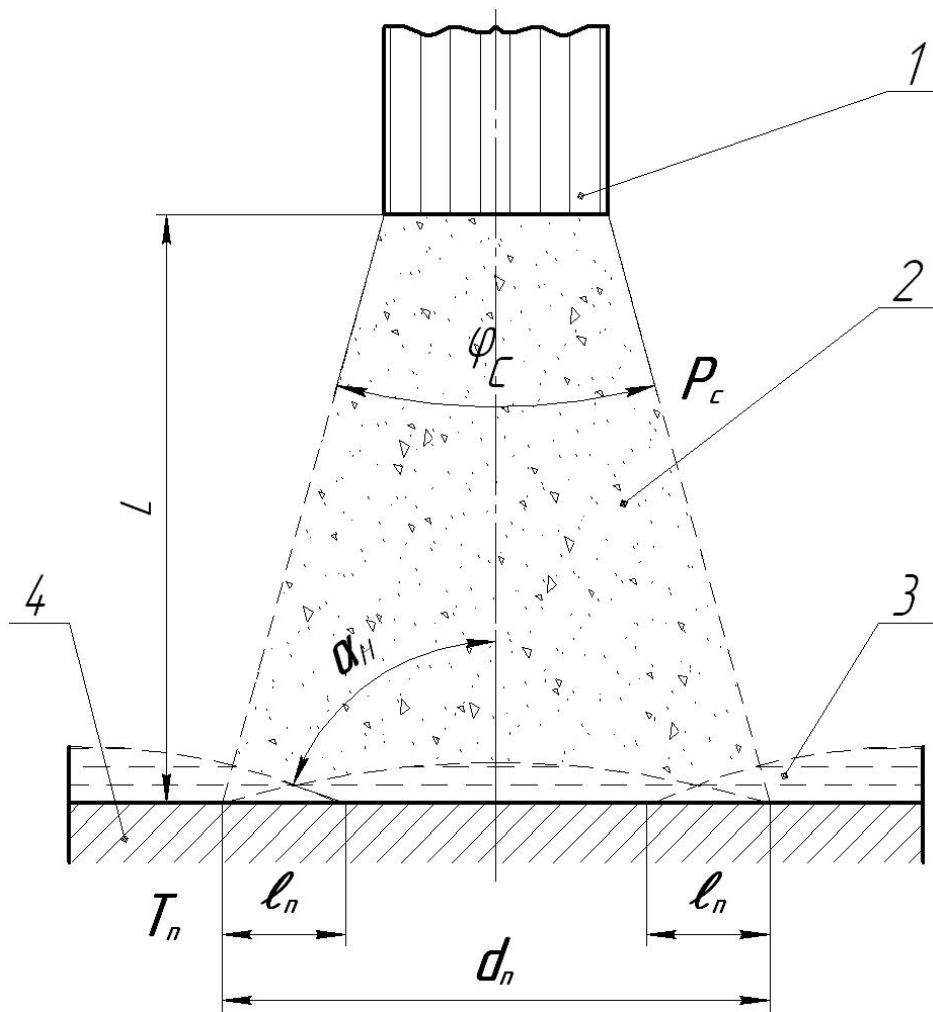


Рисунок 12 — Узагальнена схема процесу газотермічного і вакуумного конденсаційного напилювання покриттів:

- 1 — генератор напилюваних частинок;
- 2 — потік напилюваних частинок;
- 3 — напилене покриття;
- 4 — напилюваний виріб

Параметри, які пов'язані з розпилюваним матеріалом. Найбільший вплив на стан процесу чинять параметри розпилюваного матеріалу: діаметр і форма порошку, дроту, геометрія мішеней при вакуумному розпиленні й ін. Велике значення мають також параметри введення матеріалу в зону розпилення, його фізико-хімічні властивості (температура плавлення, теплоємність, густина і ін.) і початкова температура.

Параметри, що характеризують умови напилювання покриттів. Загальними параметрами для газотермічного і вакуумного конденсаційного напилювання є: дистанція напилювання (L); кут падіння потоку до напилюваної поверхні (α_n); розміри і температура напилюваного виробу $T_{вир}$; тиск навколишнього середовища (P_c); діаметр плями напилювання (d);

швидкість переміщення плями; величина перекриття напилених проходів l_n і ін.

Параметри потоку. Потоки, що утворюються при напилюванні, розділяються на дві групи. Однофазні потоки, що складаються тільки з розпилюваних частинок, характерних для вакуумних конденсаційних методів напилювання. При газотермічних методах напилювання утворюються в основному двофазні потоки. Розпилювані частинки рухаються в струмені розпилюваного газу. Параметри однофазних потоків оцінюють за енергією розпилюваних частинок, їхньою густиною й іншими показниками. У двофазних потоках необхідно враховувати і параметри струмини: ентальпію, температуру, швидкість і ін. У такому випадку параметри струмини іноді мають вирішальне значення на стан розпилюваних частинок. У цілому параметри потоку є основними при формуванні покрить.

3.2 Вплив параметрів на ефективність процесу

Під ефективністю технологічного процесу напилювання варто розуміти, у першу чергу, якість покрить, коефіцієнт використання розпилюваного матеріалу і підведеної енергії, а також продуктивність.

Якість покрить характеризується багатьма показниками. Найбільш значимими є міцнісні показники — адгезійна (σ_a) і когезійна (σ_k) міцність. Ці показники, в основному, визначають надійність напиляних покрить. При оцінюванні якості велику увагу приділяють густині покрить ($\lambda_{нк}$) і пов'язаній з нею пористості (Π). До критерію якості входять також шорсткість поверхні покрить (Ra); рівномірність по товщині ($\delta_{нк}$); однорідність складу мікро- і макроструктури. Узагальнювальним якісним показником покрить є експлуатаційні властивості.

Ефективність використання енергії для розпилення матеріалу визначають відношенням зміни ентальпії потоку розпилюваних частинок (ΔH) до загальних витрат енергії (W_e)

$$\eta_{ep} = \frac{\Delta H_{нч}}{W_e} \quad (3.1)$$

де η_{ep} — енергетичний ККД процесу розпилення.

При напилюванні тільки частина потоку частинок переходить у покриття. Для оцінювання втрат розпилюваного матеріалу, вводять коефіцієнт використання матеріалу (K_m), що називають *КВМ*

$$K_m = \frac{G_n}{G_p} \quad (3.2)$$

де G_n , G_p — відповідно маса напиленого і розпилюваного матеріалу.

З врахуванням K_m енергетичний ККД процесу напилювання ($\eta_{ен}$) за-

пишеться:

$$\eta_{ен} = \frac{\Delta H_{нч}}{W_e} \cdot K_m. \quad (3.3)$$

У залежності від методу напилювання $\eta_{ер}$, $\eta_{ен}$, K_m знаходяться в широких межах — від сотих частинок до десятих частинок.

Продуктивність процесу напилювання є найважливішим показником ефективності. В основному вона залежить від величини підводжуваної енергії, а також значень $\eta_{ер}$ і K_m . Продуктивність напилювання оцінюють ваговим методом або за товщиною покриття.

4 ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ГАЗОТЕРМІЧНИХ МЕТОДІВ НАПИЛЮВАННЯ ПОКРИТЬ

4.1 Методи газотермічного напилювання і їхня класифікація

У методах і технології газотермічного напилювання є багато загального. При малому числі методів зустрічається велика кількість їхніх різновидів, які називаються способами газотермічного напилювання покриттів. Узагальнена схема процесу газотермічного напилювання показана на рис. 13.

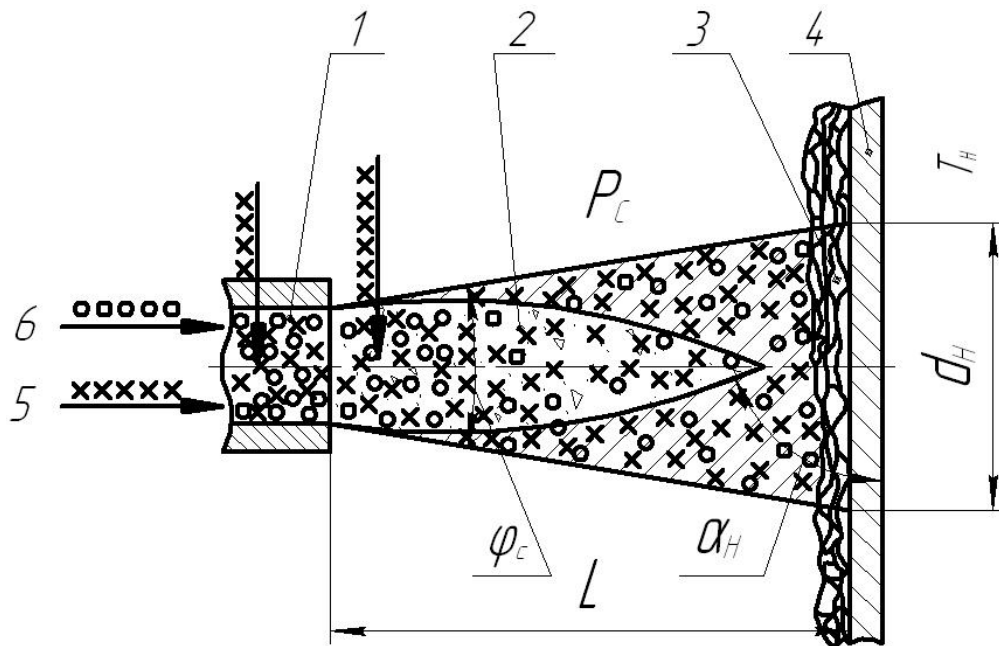


Рисунок 13 — Узагальнена схема процесу газотермічного напилювання покриттів:

1 — генератор напилюваних частинок; 2 — двохфазна струмина; 3 — покриття; 4 — напилюваний виріб; 5 — подача розпилюваного матеріалу; 6 — подача розпилювального газу

Розпилюваний матеріал у вигляді порошку, дроту (шнурів) або стрижнів подають у зону нагрівання. Розрізняють радіальну й осьову подачу матеріалу. Нагрівання розпилюваних частинок сполучають з розпилювальним газом. Основне його призначення полягає в розпиленні і прискоренні частинок в осьовому напрямку. У ряді методів напилювання розпилювальний газ виконує і функцію нагрівання.

Класифікація процесів газотермічного напилювання покриттів

В основу класифікації покладені різні ознаки.

Вид енергії. Розрізняють методи з використанням електричної енергії (газоелектричні методи) і методи, у яких теплова енергія утворюється за

рахунок згорання палих газів (газополуменеві методи).

Вид джерела теплоти. Для нагрівання розпилюваного матеріалу використовують дугу, плазму, високочастотні індукційні джерела і газове полум'я. Відповідно до цього установилися назви методів напилювання: електродугова металізація, плазмове напилювання, високочастотна металізація, газополуменеве напилювання, детонаційно-газове напилювання. Перші три методи відносяться до газоелектричних, останні — до газополуменевих.

Вид розпилюваного матеріалу. Застосовують порошкові, дровові (стрижневі) і комбіновані способи напилювання. При комбінованих способах використовують порошковий дріт.

Вид захисту. Відомі способи напилювання без захисту процесу, з місцевим захистом і з загальним захистом у герметичних камерах. При загальному захисті розрізняють ведення процесу при нормальному (атмосферному) тиску, підвищеному і при розрідженні (у низькому вакуумі).

Ступінь механізації й автоматизації процесу. При ручних способах напилювання механізована тільки подача розпилюваного матеріалу; механізованих — механізована подача і переміщення розпилювача відносно напилюваного виробу. Часто використовують рух напилюваних виробів щодо нерухомого розпилювача. Рівень автоматизації процесів напилювання залежить від конструкції установки. У найпростіших варіантах автоматизація відсутня. У складних комплексах можлива повна автоматизація процесу.

Періодичність потоку. Більшість методів напилювання здійснюється безперервним потоком. Для деяких методів можливе тільки циклічне ведення процесу. В такому разі покриття формується в імпульсному режимі напилювання, через деякі паузи.

Газотермічні методи напилювання широко використовують для нанесення покриттів різного призначення. В основному, це захисні покриття, що підвищують корозійну стійкість виробів або знижують знос робочих поверхонь. На велику кількість деталей і вузлів напиляють теплозахисні або електроізоляційні покриття.

До основних переваг методів газотермічного напилювання відноситься висока продуктивність процесу при задовільній якості покриттів.

4.2 Основні загальні параметри газотермічного напилювання і їхній вплив на ефективність процесу

4.2.1 Конструктивні параметри розпилювача

Ці параметри повинні забезпечувати максимальне використання підведеної енергії, можливість регулювання зміни ентальпії і швидкості напи-

люваних частинок. Найбільш відповідальними параметрами є конструктивні особливості і розміри соплового пристрою. Незважаючи на істотні розходження соплових пристроїв для різних методів напилювання в них необхідно, у першу чергу, враховувати діаметр і довжину сопла (стовбура), а також його профілювання. Ці параметри визначають, головним чином, швидкість потоку розпилювального газу і, відповідно, швидкість напилюваних частинок. Конструктивні параметри дуже впливають на тепловий ККД розпилювача η_{mp}

$$\eta_{mp} = \frac{W_{\tau}}{W_p} \quad (4.1)$$

де W_{τ} — потужність джерела теплоти (дуги, газового полум'я і т.д.); W_p — потужність, що вводиться в розпилювач.

У залежності від методу і способу напилювання η_{mp} знаходиться в межах 0,3—0,9. Конструкція розпилювача значною мірою визначає і параметри введення розпилюваного матеріалу. Наприклад, введення порошку в газове полум'я, плазмовий струмінь, детонаційну камеру й ін.

Параметри режиму роботи розпилювача

Найбільший вплив на ефективність процесу здійснює підведена до розпилювача енергія (W_p) і витрата розпилювального газу, ($G_{p\tau}$)

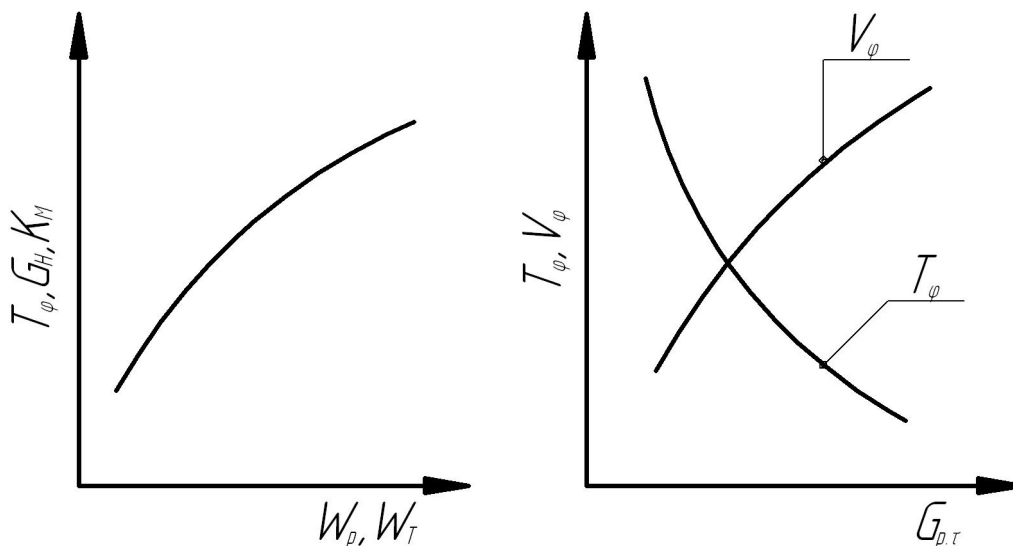


Рисунок 14 — Вплив параметрів газотермічного напилювання (W_p, W_T і $G_{p\tau}$) на швидкість (v_{φ}) і температуру (T_{φ}) розпилюваних частинок:

G_H — продуктивність процесу; K_M — коефіцієнт використання матеріалу

Підведена енергія реалізується в джерело теплоти для нагрівання розпилюваного матеріалу: дугу, яка безпосередньо плавить матеріал, плазму, газове полум'я й ін. Ступінь використання енергії визначається значеннями η_{mp} . Теплова потужність джерела нагрівання визначає продуктивність процесу. Варто враховувати, що тільки частина теплової потужності джерела витрачається на нагрівання розпилюваного матеріалу, (η_u).

$$\eta_u = \frac{\Delta H_{nc}}{W_\tau} \quad (4.2)$$

де ΔH_{nc} — ентальпія розпилюваних частинок, η_i — ефективний ККД нагрівання розпилюваного матеріалу.

При газотермічних методах напилювання η_i складає 0,05— 0,90. Зі збільшенням W_p , W_τ , η_{mp} і η_i зростає продуктивність напилювання, збільшується температура розпилюваних частинок, і, відповідно, якість покриттів.

Витрата розпилювального газу визначає швидкість газового потоку і, відповідно, його ефективність при розпиленні матеріалу. Зі збільшенням витрати зростає швидкість розпилюваних частинок. При великих витратах розпилювального газу зменшується температура розпилюваних частинок, а їхня швидкість може перевищити припустимі значення.

На рис. 14 наведені якісні залежності впливу W_τ , W_p , G_{pg} на деякі показники ефективності процесу.

4.2.2 Параметри розпилюваного матеріалу і умови його введення

Найбільш важливими параметрами є: фізико-хімічні властивості розпилюваного матеріалу, діаметр дроту (стрижнів) і порошкових частинок, а також швидкість їхньої подачі в зону нагрівання і розпилення. Великий вплив на ефективність процесу робить характер введення розпилюваного матеріалу. Наприклад, осьова подача порошку в більшості методів напилювання краща. При цьому зростає температура розпилюваних частинок і їхня швидкість. Істотно може бути також підвищена компактність потоку частинок.

При газотермічному напилюванні використовується дріт діаметром 0,5—5 мм. Швидкість подачі дроту вибирається максимальною при заданих режимах роботи розпилювача.

Газотермічне напилювання порошками відбувається із застосуванням частинок діаметром 10—200 мк. При збільшенні розмірів порошкових частинок для їхнього прогріву потрібне збільшення потужності розпилювача (рис. 15). Аналогічно впливає підвищення температури плавлення і зниження густини порошку.

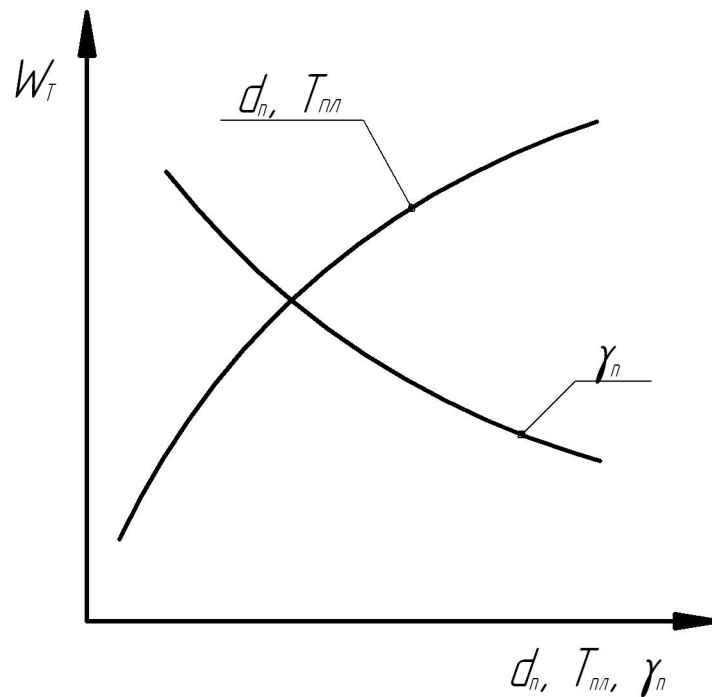


Рисунок 15 – Залежність потужності джерела теплоти W_T від діаметра порошку d_n , температури його плавлення $T_{пл}$ і густини γ_n при газотермічному напилюванні

Тонкодисперсні порошки важко вводити в розпилювач. Крім того, вони малоінерційні. Металеві порошки легко окислюються на всю глибину. Швидкість подачі порошку (масову витрату) вибирають з умови не істотного зниження ентальпії джерела теплоти. Цей параметр визначається експериментально за максимальним значенням коефіцієнта використання матеріалу K_m .

До параметрів відноситься форма порошку, морфологія при використанні композиційних порошків і ін.

4.2.3 Параметри, що характеризують зовнішні умови напилювання

Найбільш значимими параметрами цієї групи є: дистанція напилювання (L), кут напилювання (α_n), температура виробу в процесі нанесення покриття, його форма і розміри, швидкість переміщення плями напилювання й ін.

Зі збільшенням дистанції знижується температура і швидкість розпилюваних частинок біля поверхні напилювання (рис. 16, а). Крім того, зростання довжини пробігу розпилюваних частинок може бути пов'язане з великою здатністю до окислювання і насичення газами. Тривалість часу перебування розпилюваних частинок при переносі сприяє завершенню екзотермічної реакції. При цьому досягається максимум значення ентальпії потоку розпилюваних частинок. Зі збільшенням дистанції зростає діаметр

плями напилювання. Це дозволяє одержувати покриття більш рівномірні по товщині. Зростання дистанції знижує імовірність перегріву напилюваних виробів.

Температура напилюваних виробів дуже впливає на ефективність процесу. З її збільшенням зростає температура в плямі напилювання і контакті частинок (рис. 16, б). Зростає також і час активної взаємодії розпилюваних частинок при їхньому контактуванні (рис. 16, в). При можливості ведення процесу напилювання із загальним високим рівномірним нагріванням виробів, наприклад, у камерах із загальним захистом, удається реалізувати максимально високу якість покриття. Нагрівання виробів позитивно впливає і на інші показники ефективності. У більшості випадків напилювання покриттів у відкритій атмосфері перегрів виробів неприпустимий. Звичайно температура нагрівання виробів не перевищує 200—300 °С. При перегріві виробів спостерігається окислювання поверхні. Нерівномірність температури приводить до виникнення напруженого стану. Часте відшаровування покриття є

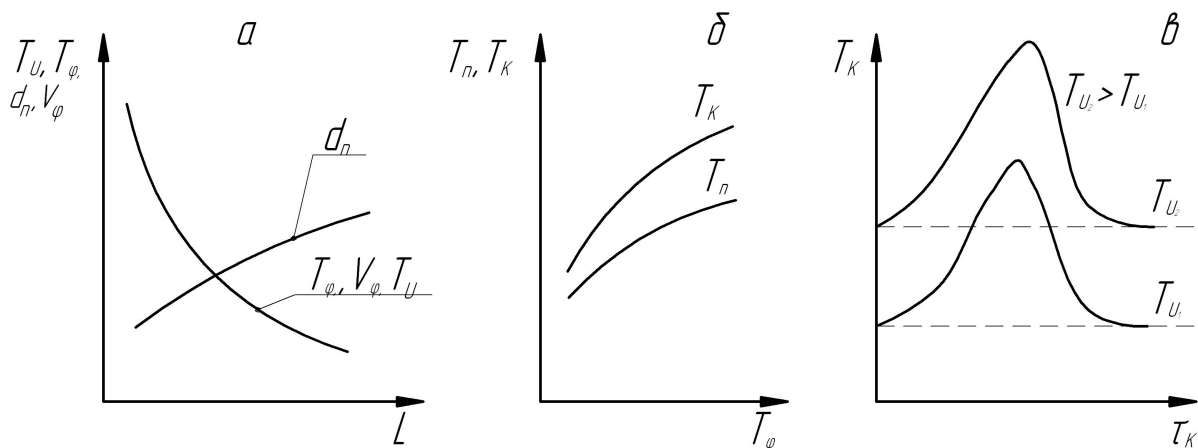


Рисунок 16 – Вплив дистанції напилювання L (а) і температури напилюваного виробу (б, в) на температуру плями напилювання T_n , температуру контакту частинок T_k і час її активної взаємодії τ_k

Кут падіння при газотермічному напилюванні вибирають у межах 45—90°. Кращі результати виходять при дії струменя нормально до поверхні напилювання. Просторове розташування розпилювача і напилюваних виробів значення не мають.

Швидкість переміщення плями напилювання V_n істотно впливає на ефективність процесу. Зокрема, зі збільшенням V_n одержують більш рівномірні покриття по товщині, зменшується можливість перегріву виробів. Звичайно V_n вибирають у межах 0,1—0,5 м/с. Величина перекриття прохо-

дів $I_{\text{п}}$ (рис. 12) складає близько $1/3d$. Висока рівномірність покриття досягається при переміщенні плями напилювання за програмою, розрахованою для конкретних умов ведення процесу.

Великий вплив на ефективність процесу при газотермічному напилюванні робить форма поверхні і, особливо, розміри напилюваних виробів. При невеликих розмірах різко знижується $K_{\text{м}}$, спостерігається перегрів і т.д.

4.2.4 Параметри розпилювальної струмини і потоку напилюваних частинок

Ця група параметрів залежить від раніше розглянутих і безпосередньо впливає на ефективність напилювання. До них відносяться: температура, ентальпія і швидкість газової струмини по осі y у перерізах, кут розбіжності струмини; температура, ентальпія і швидкість потоку частинок, особливо біля поверхні напилювання; кут розбіжності і густина потоку частинок.

Газова струмина виконує або одну функцію, пов'язану тільки з розпиленням розплавленого матеріалу, або, частіше, дві. В другому випадку газова струмина виконує і функцію нагрівання частинок. В обох випадках швидкість розпилюваних частинок визначається швидкістю газового потоку. При нагріванні високотемпературною газовою струминою важливе значення має її температура і ентальпія. Ефективність процесу зростає зі збільшенням температури розпилюваних частинок. Тому необхідно прагнути до нагрівання частинок до температури плавлення і вище. При цьому швидкість частинок повинна бути оптимальною і складати 100—300 м/с. Недостатня швидкість частинок обумовлює невисоку міцність покриття і велику кількість нещільностей. Високі швидкості неприпустимі через підвищене розбризкування частинок при ударі. При формуванні покриття з нерозплавлених частинок, що знаходяться у в'язкопластичному стані, необхідно прагнути до високих швидкостей, що складають 800—1200 м/с. Завдяки цьому буде забезпечена висока ефективність процесу. Продуктивність значною мірою визначається густиною потоку напилюваних частинок. Звичайно густину оцінюють або за кількістю напилюваних частинок [часток/(см²·с)]; або за їх масою [г/(см²·с)]. Для газотермічних методів напилювання інтегральна густина потоку складає 10³—10⁵ часток/(см²·с) або 10⁻²—10⁻³ г/(см²·с).

Кут розбіжності потоку частинок визначає фігуру напилювання і рівномірність їхнього нагрівання. Часто кут розбіжності складає 12—20°.

4.3 Способи і технологічні особливості плазмового напилювання

4.3.1 Плазмовий струмінь як джерело нагрівання і розпилення матеріалу

Плазмовий струмінь широко використовують як джерело нагрівання і розпилення при напилюванні покрить. Маючи високу швидкість витікання і температуру, він забезпечує можливість напилювання практично будь-яких матеріалів. Плазмовий струмінь отримують різними способами. В одних випадках використовується дуговий підігрів газу; в інших — високочастотний індукційний. Відомі способи отримання плазмового струменя лазерним нагріванням і ін. Узагальнена схема процесу плазмового напилювання покрить приведена на рис. 17. При плазмовому напилюванні можлива як радіальна, так і осьова подача розпилюваного матеріалу у вигляді порошку або дроту (стрижнів). Використовуються різні види плазмового струменя: турбулентні, ламінарні, дозвукові і надзвукові.

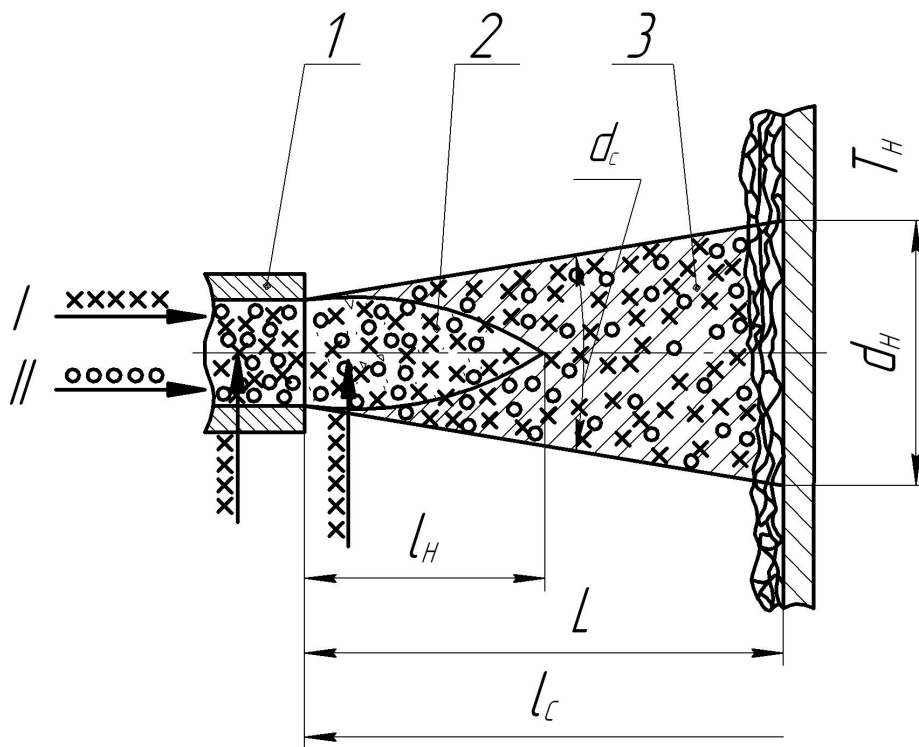


Рисунок 17 — Узагальнена схема плазмового напилення покриття:

1 — плазмоутворювальне сопло; 2 — ядро плазмового струменя (початкова ділянка); 3 — основна ділянка плазмового струменя; I — подача розпилюваного матеріалу; II — подача плазмоутворювального газу

Ламінарні струмені забезпечують значно більші за довжиною витікаючі потоки (l_H, l_C). Завдяки цьому зростає час нагрівання напилюваних частинок. Ламінарні струмені характеризуються більш високими значен-

нями відношення підведеної енергії до витрати плазмоутворювального газу. Отже, ламінарні струмені мають великі значення ентальпії, швидкості витікання і менший рівень шуму (до 40—30 дБ). В даний час ще не знайдені рішення, що дозволяють широко використовувати ламінарні струмені для напилювання. Труднощі пов'язані, головним чином, з подачею порошку, малими розмірами плями напилювання й ін.

Досить перспективні для напилювання надзвукові плазмові струмення. Високі швидкості розпилюваних частинок дають можливість формування покрив без їхнього розплавлення.

Сучасний рівень плазмового напилювання, в основному, базується на використанні дозвукових, турбулентних плазмових струменів із широким діапазоном теплофізичних властивостей.

Незважаючи на високу енергію, яку підводять до плазмового розпилювача, на нагрівання плазмоутворювального газу витрачається біля її половини. Звичайно тепловий ККД розпилювача (η_{mp}) складає 0,5—0,65. Слід також зазначити слабе використання плазмового струменя як джерела теплоти на нагрівання порошкових частинок. Ефективний ККД нагрівання порошкових частинок плазмою (η_u) знаходиться в межах 0,01—0,15.

4.3.2 Гази для плазмоутворення

Для плазмового напилювання можуть бути використані багато газів і їх суміші. Найбільш загальними вимогами, що ставляться до плазмоутворювальних газів, є високі значення теплообмінних критеріїв; інертність до елементів плазмового розпилювача; невисока вартість і недефіцитність. У ряді випадків плазмоутворювальний газ повинний бути інертним стосовно розпилюваного матеріалу; мати високі значення температури або ентальпії; забезпечувати максимальні показники $\eta_{m,p}$; η_i й ін. Для плазмового напилювання необхідно застосовувати газы, регламентовані стандартами або технічними умовами.

Газы для плазмоутворення розбивають на такі групи: 1) інертні газы і їхні суміші; 2) активні газы і їхні суміші; 3) інертні газы в суміші з активними.

Інертні газы і їх суміші. Як інертні газы в основному, використовують аргон, значно рідше гелій. Одноатомні інертні газы забезпечують високу температуру плазми на зрізі сопла розпилювача при порівняно невисоких значеннях ентальпії (рис. 18). Для підвищення температури і ентальпії аргонних плазмових струменів використовують аргонно-гельові суміші із широким діапазоном концентрацій. Для плазмового напилювання застосовують аргон різного ступеня чистоти. Вміст аргону в марках вищого, першого і другого сорту відповідно дорівнює 99,99 %; 99,98 %; 99,95%

об'єму (ГОСТ 10157—79). До домішок відносяться кисень, азот і волога. У якості газу для плазмоутворення використовується технічний гелій і більш чистий. Вміст азоту, водню і вологи в гелії високої чистоти 0,02 % (об'єму), технічному — до 0,2 % (об'єму) (ТУ51—589—75).

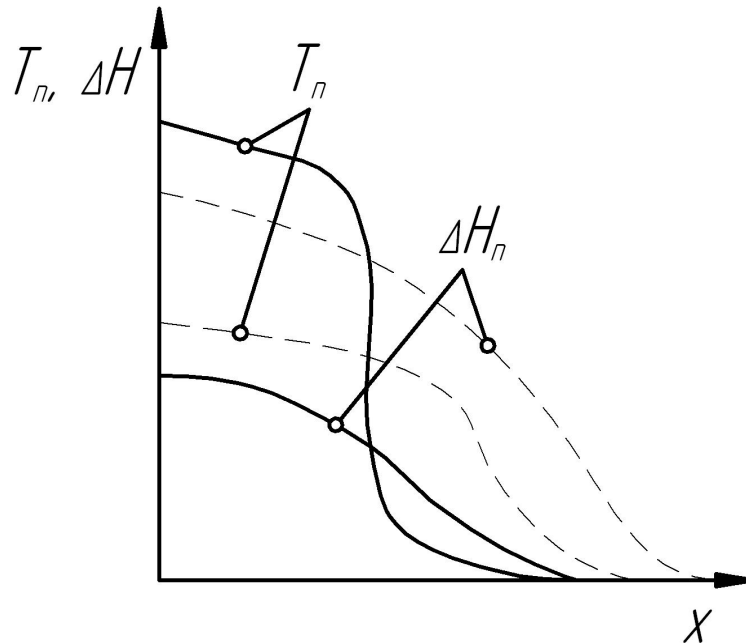


Рисунок 18 – Розподіл середньомасової температури T_p і ентальпії ΔH_p по осі плазмового струменя X : суцільні лінії — для аргону; пунктирні — для азоту

Активні гази і їх суміші. Найчастіше часто застосовують азот або азот з домішками водню, аміаку, паливних газів. Іноді як плазмоутворювальний газ використовують повітря. Активні гази і їх суміші мають високі значення ентальпії з порівняно невисокими температурами. При великих домішках водню до азоту (20 % (об'єму) і більш) або при використанні аміаку спостерігається інтенсивна ерозія сопла. Для одержання плазмових струменів з високою тепловою потужністю, як домішки, особливо доцільно використовувати паливні гази (ацетилен, метан, пропан). Додаткове тепловиділення обумовлене згоранням паливних газів за рахунок кисню повітря. Поряд з цим такі домішки дозволяють регулювати окислювально-відновний потенціал струменя стосовно розпилюваного матеріалу.

Для напилювання покриттів застосовують, в основному, технічний азот чистотою 98,5 % (об'єму) або в разі потреби високої чистоти 99,5 % (об'єму.) (ГОСТ 9293—74). Домішками в азоті є: кисень, волога й ін. Водень для плазмоутворення можна використовувати різного ступеня чистоти. Найбільш чистим є водень марки А, який одержують електролізом води: 98,8 % (об'єму) інше — домішки — кисень, волога й ін. (ГОСТ

3022—70).

Інертні гази в суміші з активними. Для підвищення ентальпії аргонних плазмових струменів до основного газу часто додають азот (10—50 % (об'єму)) або водень (5—20 % (об'єму)). Доцільно застосовувати й інші домішки, наприклад, аміак, пальні гази й ін.

4.3.3 Способи плазмового напилювання і їхні технологічні особливості

Для напилювання застосовують, в основному, плазмові струмені, що одержують в дугових плазмотронах. Плазмотрони з високочастотним індукційним нагріванням газу показані на рис. 19.

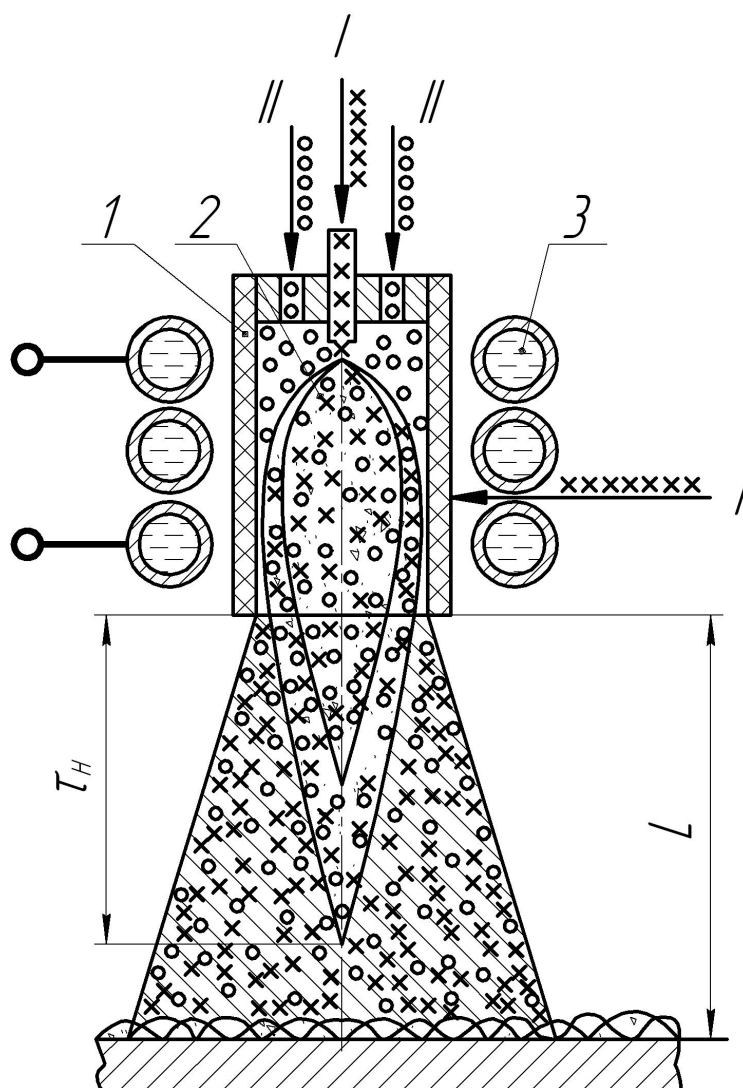


Рисунок 19 – Схема плазмового напилювання з високочастотним індукційним нагріванням газу:

1 – сопло плазмотрона; 2 – плазмовий струмінь; 3 – індуктор; I – подача розпилюваного матеріалу; II – подача плазмоутворювального газу

У дугових плазмових розпилювачах (рис. 20) джерелом нагрівання газу є дуга 1, що горить між водоохолоджуваними електродами. У верхній частині плазмотрона розташовують стрижневий електрод (2) з вольфраму або іншого тугоплавкого металу. У нижній частині знаходиться електрод у вигляді соплового пристрою 3, який, в основному, виготовляють з міді. Іноді застосовують вставки з тугоплавких і теплопровідних металів. До електродів підводять напругу від джерела постійного струму. При цьому найчастіше вибирають пряму полярність (мінус на стрижневому електроді). При зворотній полярності значно вище навантаження на електродах. Поряд з однодуговими плазмотронами (рис. 20, а) для напилювання покриття можуть бути використані і більш складні схеми: двоструйні (рис. 20, б), трифазні (рис. 20, в) і ін. При порошкових способах напилювання особливо велике значення має перетворення потужності дуги в теплову потужність плазмового струменя. Найбільша ефективність нагрівання газу буде відбуватися при максимальних значеннях напруженості стовпа і його довжини. Тому в однодугових плазмотронах розрізняють схеми порошкового напилювання із самовстановлювальною довжиною дуги і з фіксуванням по довжині. Довжина фіксованої дуги звичайно значно перевершує довжину самовстановлювальної. Це досягається за допомогою розтягування стовпа дугового розряду до максимальних значень.

Порошок подають у радіальному напрямку в різні ділянки плазмового розпилювача (див. рис. 20). Порошок вводять у плазмовий струмінь нижче зрізу сопла (на зріз сопла) або безпосередньо в сопло. Найбільш ефективна подача в сопло вище розташування анодної (або катодної) плями. Таку подачу порошку називають доанодною або в стовп дуги. При високій ентальпії плазмового струменя порошок устигає прогрітися при подачі його на зріз сопла. Відомий ряд способів осьової подачі порошку (див. рис. 20, б, в). У однодугових плазмових розпилювачах осьова подача порошку ускладнена.

Плазмове напилювання з розпиленням дроту проводять двома способами (рис. 21): нейтральним дротом і дротом-анодом. Подача радіальна, головним чином, — на зріз сопла. Нагрівання, плавлення і розпилення нейтрального дроту здійснюється плазменним струменем. У випадку дроту-анода на нього подається позитивний потенціал джерела живлення дуги. Нагрівання і плавлення дроту відбувається переважно за рахунок виділення тепла в анодній плямі. Плазмовий струмінь, в основному, виконує функції розпилення.

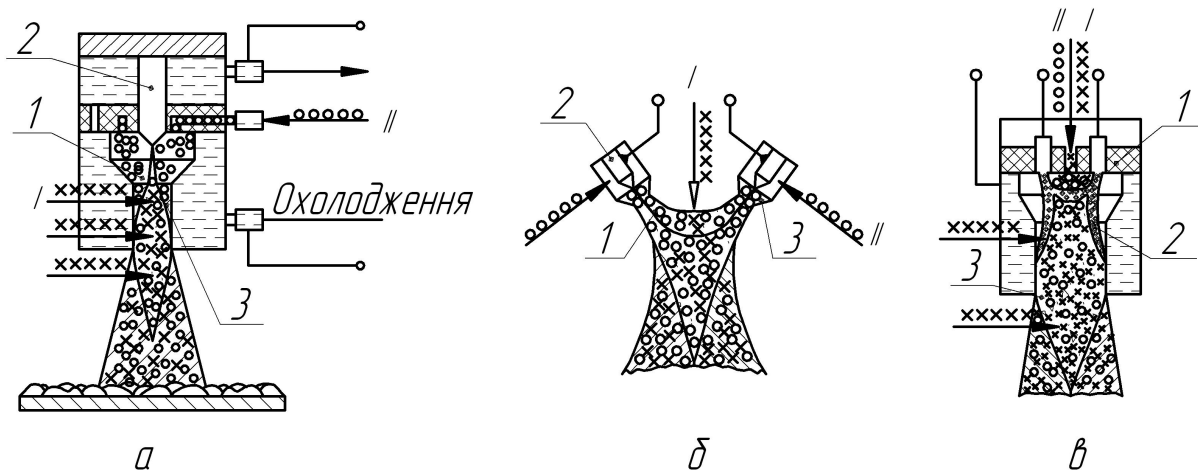


Рисунок 20 — Схеми плазмового напилювання:
 а — однодуговими; б — дводуговими; в — трифазними плазмотронами; I — подача розпилюваного матеріалу;
 II — подача плазмоутворювального газу.

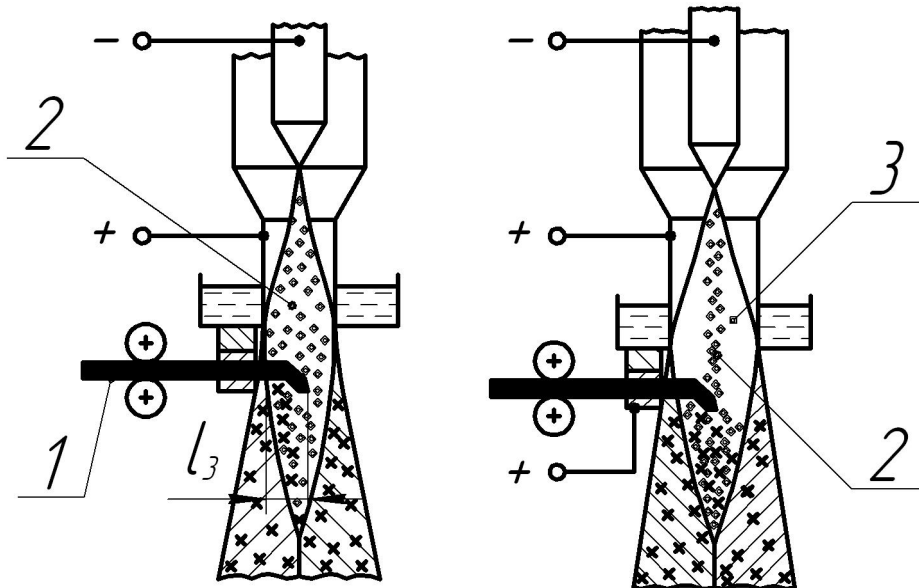


Рисунок. 21 — Схема плазмового напилювання розпиленням дроту: а — нейтральний дріт; б — дріт (анод); 1 — механізм подачі дроту; 2 — основна дуга; 3 — допоміжна дуга.
 Хрестиком показані напилювані частинки

Процес плазмового напилювання легко механізується й автоматизується. Поряд з ручними способами застосовують механізовані з різним ступенем автоматизації. Створені комплекси дозволяють напилювати покриття при автоматичній підтримці багатьох параметрів процесу.

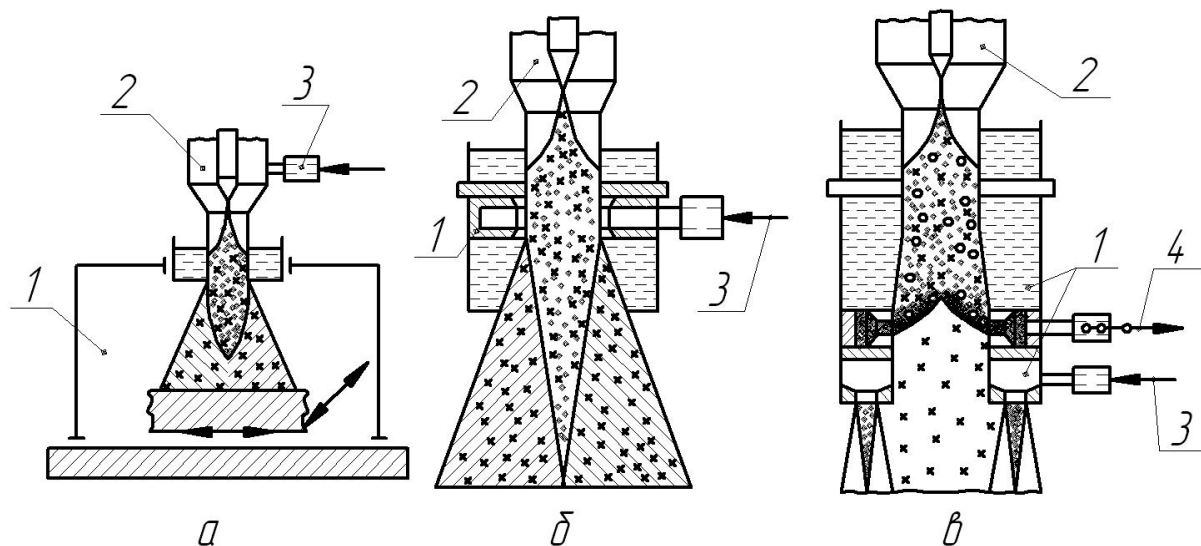


Рисунок 22 — Схема плазмового напилювання з місцевою захисною атмосферою: а — місцева камера; б — струминний захист із сопла; в — струминний кільцевий захист із насадки:

1 — місцева камера, сопло, насадка; 2 — плазмовий розпилювач; 3 — подача захисного газу; 4 — відсмоктування плазмового струменя

За ступенем захисту процесу розрізняють плазмове напилювання: без захисної атмосфери, з місцевою і загальною захисною атмосферою.

Плазмове напилювання без захисту (рис. 20). Процес ведуть у відкритій атмосфері без ізоляції плазмового струменя, потоку розпилюваних частинок і плями напилювання від повітря. При цьому створюються сприятливі умови для влучення повітря в зону протікання процесу. З'являється можливість окислювання розпилюваного матеріалу, насичення його азотом. Навіть застосування інертних плазмоутворювальних газів не забезпечує захист процесу від взаємодії з повітрям.

Плазмове напилювання з місцевою захисною атмосферою (рис. 22). Часто місцева захисна атмосфера недостатньо ефективна. Для цих цілей застосовують місцеві камери (рис. 22, а) або газову атмосферу з використанням додаткових соплових пристроїв (рис. 22, б, в). Досить надійний спосіб захисту при використанні насадків на соплову частину розпилювача. У насадці відбувається нагрівання і прискорення розпилюваних частинок плазмовим струменем при повній їхній ізоляції від повітря. На виході плазмовий струмінь відбирається за допомогою його відсмоктування. У цьому випадку потік напилюваних частинок і пляма напилювання легко ізолюються кільцевим потоком захисного газу, створюваного сопловим пристроєм. Спосіб дозволяє також усувати або регулювати термосиловий вплив плазмово-

го струменя на поверхню напилювання. При веденні процесу з регульованим термосиловим впливом струменя вдається усунути перегрів напилюваних виробів.

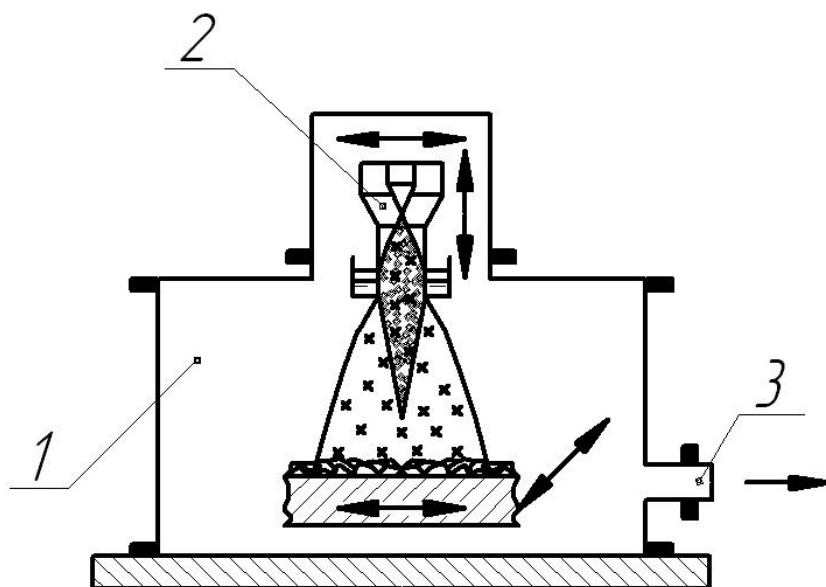


Рисунок 23 — Схема плазмового напилювання із загальним захистом у камерах: 1 — камера; 2 — плазмовий розпилювач; 3 — відкачування камери перед напилюванням (стрілками позначене переміщення розпилювача і напилюваного виробу)

Плазмове напилювання із загальною захисною атмосферою (рис. 23). Напилювання покриття проводять у камері. У цьому випадку процес цілком ізольований від повітря. Атмосфера в камері формується з плазмоутворювального газу. Спосіб застосовують для напилювання покриття особливо відповідального призначення. В теперішній час використовують два способи напилювання із загальним захистом: при нормальному тиску газу в камері (невеликий надлишковий тиск) і при зниженому тиску $(0,133—2,66) \cdot 10^3 \text{ Па}$. Останній – плазмове напилювання в динамічному вакуумі. Його застосування обумовлене одержанням покриття найбільш високої якості. У цьому способі реалізуються: висока чистота атмосфери по активних газах; високі швидкості розпилюваних частинок; можливість активації поверхні напилювання газовими електричними розрядами.

При напилюванні в камері плазмоутворювальний газ виводиться в атмосферу або надходить на регенерацію і процес проводять за замкнутим циклом. У ряді випадків це економічно доцільно.

Способи плазмового напилювання в камері перспективні. Дозволяють одержувати покриття більш високої якості.

4.3.4 Параметри плазмового напилювання і їхній вплив на ефективність процесу

Плазмове напилювання характеризується великою кількістю параметрів. Як і раніше розглянемо їхній вплив на ефективність процесу по групах.

Конструктивні параметри плазмового розпилювача. Найбільше впливають параметри електродного вузла. До них відносяться (рис. 24, а) діаметр сопла d_c ; довжина каналу сопла l_c ; профілювання каналу сопла; заглиблення електрода в соплі l_3 ; довжина прив'язки самовстановлювальної або фіксованої анодної плями (l_a); характер і місце введення розпилюваного матеріалу щодо зрізу сопла; діаметр (d_e), кут заточення (α_e) і діаметр притуплення (d_n) електрода.

Діаметр сопла в основному впливає на швидкість витікання плазмового струменя і, відповідно, на швидкість і температуру розпилюваних частинок. Якісні залежності наведені на рис. 24, б. Звичайно $d_c = 3\text{—}8$ мм.

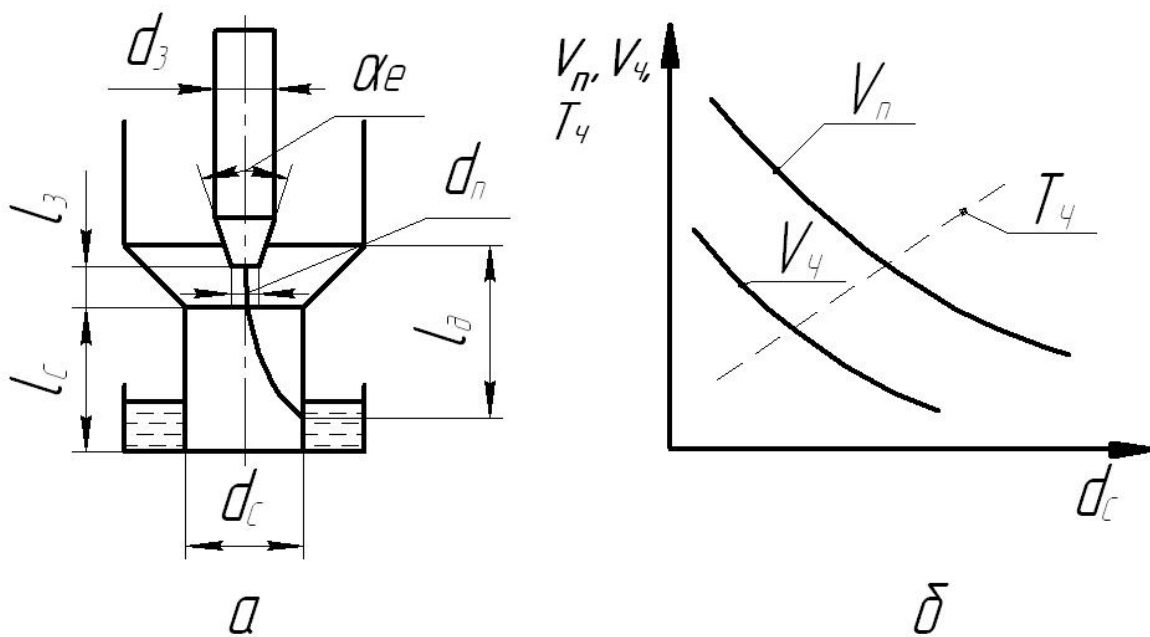


Рисунок 24 — Конструктивні параметри соплової частини плазмового однодугового розпилювача (а) і вплив d_c на швидкість плазмового струменя V_n , температуру T_4 і швидкість V_4 напилюваних частинок (б)

Довжину каналу сопла вибирають мінімальною для підвищення теплового ККД розпилювача. У першому наближенні $l_c > l_a$. При коротких соплах анодна пляма розташовується на його торцевій частині. Разом з тим, збільшення довжини дуги підвищує тепловий ККД. Прагнення максималь-

но розтягти дугу приводить до конструкції подовжених сопел. Для самоустановлювальних дуг $l_c = (2—3) d_c$. У плазмових розпилювачах з фіксованою розтягнутою довжиною дуги $l_c = (5—10) l_c$. На рис. 25 показано вплив конструкції сопла і, відповідно, довжини дуги на середньомасову температуру плазмового струменя. У плазмотроні 2 коротке сопло і самовстановлювальна довжина дуги. У плазмовому розпилювачі з міжелектродними вставками (МЕВ) 1 довге сопло з розтягнутою фіксованою дугою.

Фіксування довжини дуги доцільне і з інших розумінь. Зокрема, усувається пульсація плазмового струменя, характерна для самовстановлювальних дуг. Звичайно частота пульсацій порівнянна з часом нагрівання порошку в плазмовому струменеві і складає від одиниць до десятків і сотень кілогерц. У моменти пульсацій, коли $l_d = \min$, різко скорочується довжина плазмового струменя і його температура.

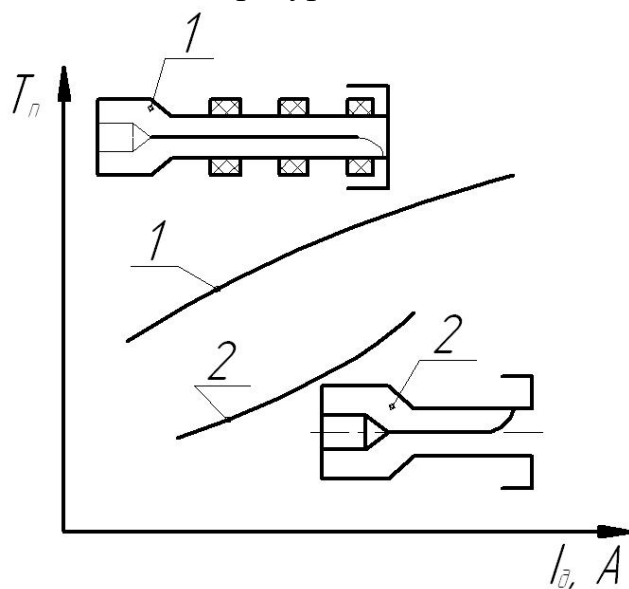


Рисунок 25 – Вплив конструкції сопла на середньомасову температуру плазмового струменя на зрізі сопла:

1– плазмовий розпилювач з МЕВ; 2 – плазмовий розпилювач із самовстановлювальною довжиною дуги

У ці проміжки часу частинки порошку слабо розігріваються.

Параметри, що обумовлюють профілювання сопла, найчастіше пов'язані зі збільшенням швидкості плазмового струменя. Так, застосування сопел типу Лавалля дозволяють одержати надзвукове витікання.

Заглиблення електрода у сопло дуже впливає на процес плазмоутворення. При малих значеннях l_3 різко скорочується η_{mp} плазмового розпилювача. Основна частина енергії дуги виділяється на анодній плямі.

Велике значення для нагрівання і формування потоку розпилюваних частинок має місце введення розпилюваного матеріалу. Так, наприклад,

осьова подача розпилюваного матеріалу обумовлює отримання компактного потоку розпилюваних частинок з високими значеннями швидкості і температури. Конструктивно осьова подача ускладнена. Тому застосовують радіальну подачу. На рис. 26 показаний вплив місця введення порошку в плазмовий розпилювач на ефективність його нагрівання. Найбільш високі значення ККД нагрівання (η_e) досягаються при введенні порошку в доанодну область. Значення η_e і КВП при подачі порошку мінімальні за зрізом сопла.

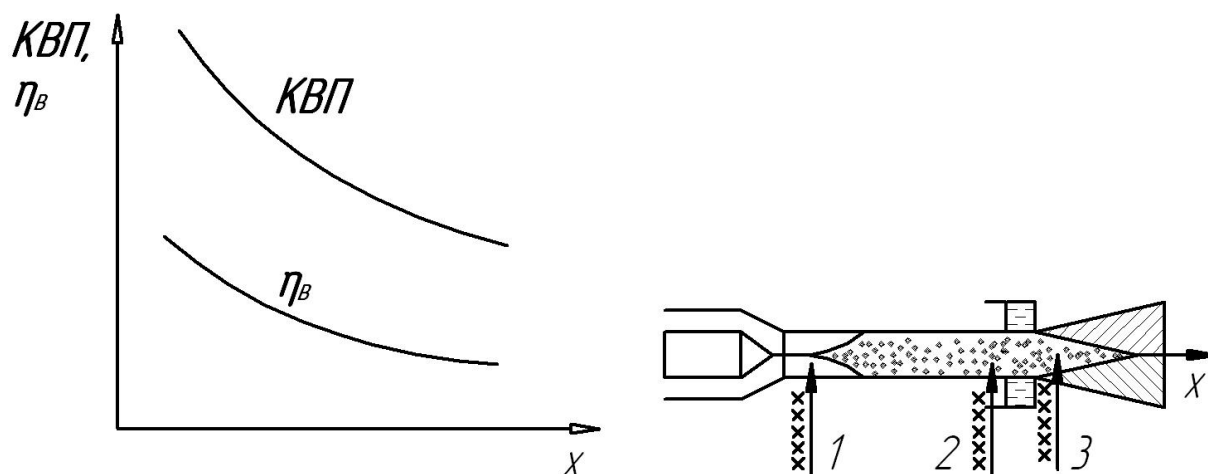


Рисунок 26 – Вплив місця введення порошку на коефіцієнт його використання (КВП) і ефективний ККД нагрівання η_e : доанодне введення; 2 — післяанодне введення; 3 — введення у плазмовий струмінь за зрізом сопла; X — вісь плазмового струменя

Параметри, пов'язані з формою електрода (d_a ; α_e ; d_n), в основному визначають його стійкість. У плазмових розпилювачах використовують електроди з торованого або лантанованого вольфраму з $d_a = 4\text{—}10$ мм або з інших тугоплавких металів. Кут заточення вибирають у межах $45\text{—}60^\circ$; притуплення $d_n = 1\text{—}2$ мм.

Параметри, що характеризують режим роботи плазмового розпилювача. Визначальними в нагріванні розпилюваного матеріалу є ентальпія, температура і швидкість плазмового струменя. Найбільш значимі параметри режиму роботи плазмового розпилювача витікають з рівняння:

$$\Delta H_{\Pi} = T_{\Pi} \cdot c_{\Pi} = \frac{N_{\text{д}} \cdot \eta_{\text{ТР}}}{K_p \cdot G_{\text{гз}}} \quad (4.3)$$

де K_p – коефіцієнт, що характеризує рівномірність нагрівання газу по перерізі сопла, рівний $0,4\text{—}0,7$;

$G_{\text{гз}}$ – витрата плазмоутворювального газу в припустимих межах.

Зі збільшенням потужності дуги ($N_{\text{д}}$) інтенсивно зростає температура

(T_n) і ентальпія (ΔH_n) плазмового струменя як на зрізі сопла, так і в інших її перерізах. Вплив іншого важливого параметра — витрата плазмоутворювального газу (G_{ne}) — протилежний. Потужність дуги визначається, у свою чергу, двома параметрами: величиною сили струму і напруги. Напруга дуги залежить від довжини дуги, що, в основному, визначається конструкцією розпилювача, а також родом і частково витратою плазмоутворювального газу. При реалізації заданої потужності дуги необхідно вибирати такий режим роботи плазмотрона, при якому напруга на дузі буде максимальною. При заданій напрузі потужність дуги регулюється досить гнучким параметром — силою струму дуги. Вплив потужності дуги на ефективність напилювання показано на рис. 27.

При зростанні витрати плазмоутворювального газу понад оптимальні значення істотно знижується густина покриття, $K_{ВП}$ і інші показники ефективності (рис. 27, а, б). Зі збільшенням витрати плазмоутворювального газу зростає розпилювальна здатність плазмового струменя, його швидкість і, відповідно, швидкість розпилюваних частинок (рис. 28). При розпиленні дроту збільшення витрат плазмоутворювального газу сприяє утворенню більш дисперсного потоку розпилюваних частинок (рис. 28, а). При незмінній потужності дуги збільшення витрати плазмоутворювального газу знижує температуру нагрівання порошкових частинок. Первісне зниження невелике. Підвищення швидкості частинок при цьому виявляється позитивним і в цілому ефективність процесу досить висока. При плазмовому напиленні об'ємна витрата плазмоутворювального газу складає 2,0—4,0 m^3/god , відповідно вагова 0,5—2,0 g/c .

Особливо дуже впливає на теплофізичні характеристики плазмового струменя й умови теплообміну при порошковому напилюванні вид газу. Незважаючи на високу температуру, аргонний струмінь слабо розігріває порошкові частинки. Це обумовлено низькими значеннями критерію Біо (Ві) і малою довжиною високотемпературної частини плазмового струменя. Більш високий ступінь прогріву розпилюваних частинок досягається при використанні азоту й особливо водневмісних газів. Домішки водню до аргону, азоту або застосування аміаку дозволяє одержувати плазмовий струмінь з високою теплопровідністю. У цих умовах інтенсифікується теплообмін між порошковими частинками і плазмою. Крім того, довжина ділянки нагрівання водневмісних струменів набагато більша. Збільшується час нагрівання розпилюваних частинок і, відповідно, їх ентальпія.

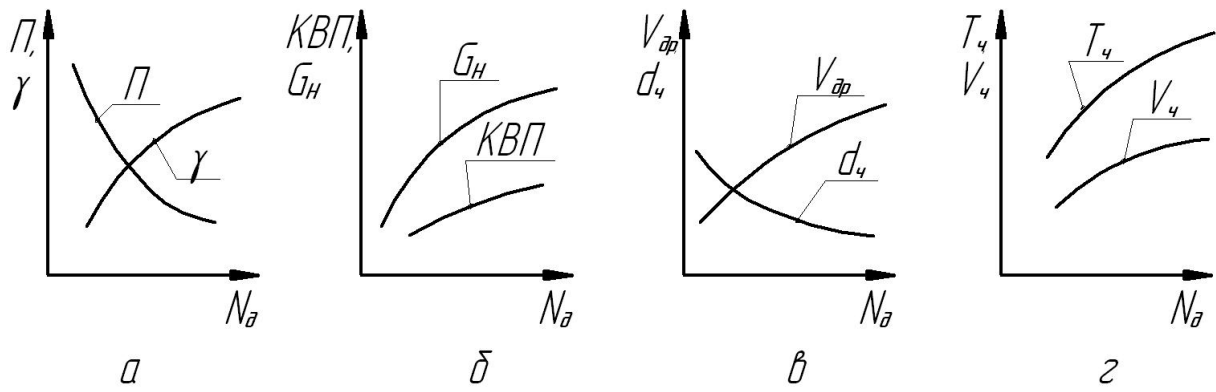


Рисунок 27 — Вплив потужності дуги в плазмовому розпилювачі:

а — на густину γ і пористість Π ; б — на коефіцієнт використання порошку $KBП$ і продуктивність G_n , в — швидкість плавлення дроту V_{Π} і діаметр розпиленних частинок d_4 ; з — на температуру T_4 і швидкість V_4 частинок

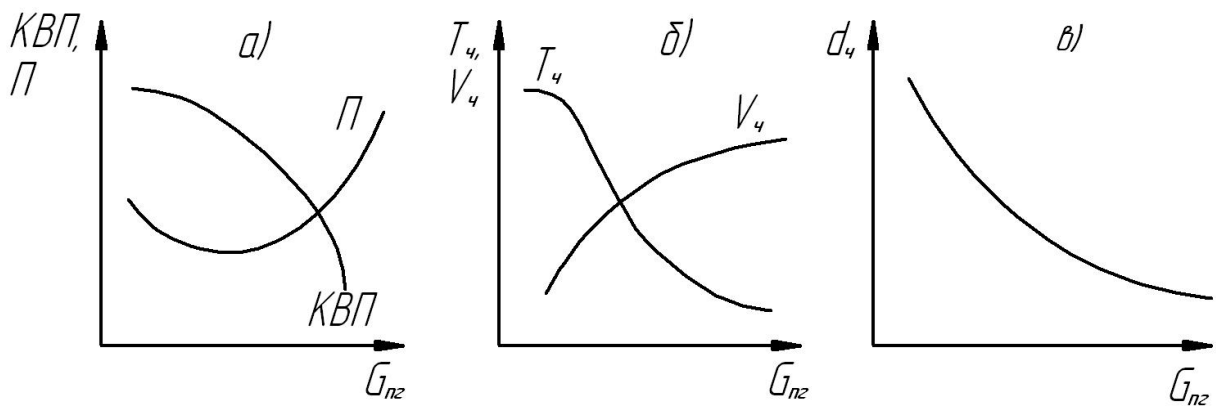


Рисунок 28 – Вплив витрати плазмоутворювального газу на коефіцієнт використання порошку $KBП$ і пористість Π (а); температуру T_4 і швидкість V_4 частинок (б); діаметр частинок при розпиленні дроту (в)

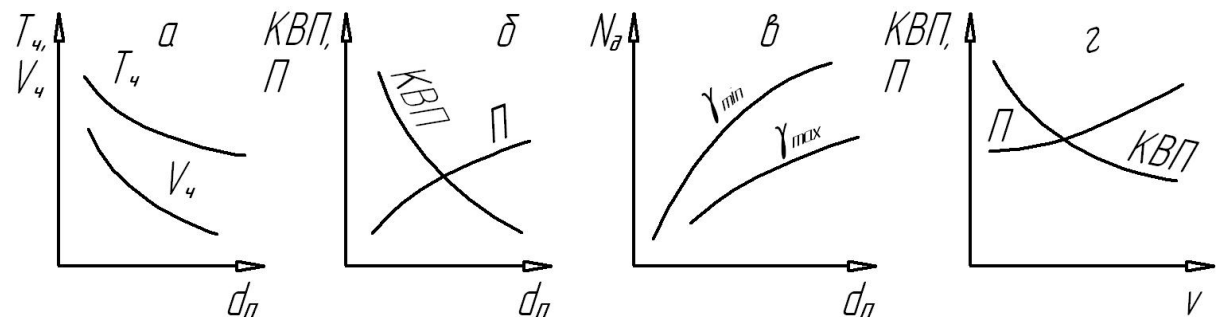


Рисунок 29 – Вплив діаметра порошкових частинок d і швидкості подачі на ефективність процесу

Параметри розпилюваного матеріалу і умов його введення. Для плазмового напилювання застосовують порошок із середнім діаметром частинок від 10 до 200 *мкм*. Зі збільшенням розміру частинок виникають труднощі їх нагрівання до температури плавлення. При цьому різко знижується ефективність процесу (рис. 29). Особливо складно проплавити великі частинки тугоплавких матеріалів з низькою теплопровідністю або малою густиною, наприклад, оксидів цирконію, магнію, карбїду титану й ін. Для цього потрібні високі потужності дуги і застосування газів з високою ентальпією. До параметрів, що характеризують введення порошку, відноситься швидкість його подачі в розпилювач. Звичайно швидкість оцінюється витратою порошку і складає 0,25—2 *г/с*. Велика кількість порошку, який подається у плазмовий струмінь, приводить до його охолодження. При цьому знижуються показники ефективності процесу. Для подачі порошку використовуються гази, аналогічні плазмоутворювальним. Можуть бути також використані й інші з іншими фізико-хімічними властивостями.

Витрата газу на подачу порошку складає близько 10 % від витрати плазмоутворювального газу. Збільшення витрати транспортуючого газу полегшує і стабілізує подачу порошку. Разом з тим, спостерігається зсув потоку розпилюваних частинок відносно плазмового струменя. При цьому різко знижується температура, зменшуються швидкість частинок і *КВП*. Раніше був відзначений вплив ряду конструктивних параметрів розпилювача, що визначає умови введення порошку (місце введення, кількість введення — його геометрія і розміри, кут введення й ін.). На ступінь нагрівання порошку у плазмовому струмені впливає і його початкова температура. У практиці напилювання іноді використовують попередній підігрів порошку.

При дрових (стрижневих) способах плазмового напилювання застосовують дріт діаметром 0,8—2,5 *мм*. Збільшення діаметра дроту приводить до зростання середнього розміру розпилюваних частинок. При напилюванні нейтральним дротом дисперсність розпилюваних частинок залежить від величини заглиблення дроту у плазмовий струмінь при подачі його на зріз сопла (див. рис. 21, *а*).

Малі заглиблення ($l_3 < 1/2d_c$) сприяють утворенню великих, слабо диспергованих краплин. Зі збільшенням швидкості подачі дроту величина заглиблення зростає ($l_3 > 1/2d_c$) і, відповідно, формується потік більш дисперсних частинок. Експерименти проводили при розпиленні молібденового дроту, діаметром 0,8—1,0 *мм*, аргонною плазмою з потужністю дуги 10,0 *кВт*. Плазмове напилювання нейтральним дротом необхідно проводити з максимальною швидкістю її подачі при заданому режимі роботи розпилювача. Оптимальні швидкості подачі нейтрального дроту при плазмовому напилюванні складають 10—25 *мм/с*; дроту (аноду) 30—70 *мм/с*. Для

збільшення продуктивності може бути використаний безпосередній підігрів дроту, наприклад, джоулевим теплом.

Параметри, що характеризують зовнішні умови напилювання. Для плазмового напилювання оптимальні дистанції в залежності від режиму роботи плазмотрона складають 50—300 мм. Малі дистанції напилювання, близькі до довжини початкової ділянки плазмового струменя, не завжди забезпечують прогрів порошкових частинок і додання їм необхідної швидкості. Разом з тим, зростає небезпека неприпустимого нагрівання напилюваного виробу. Зі збільшенням дистанції на основній ділянці струменя різко падає її температура і швидкість. Відповідно до цього спостерігається зниження температури і швидкості розпилюваних частинок. Найбільші значення дистанції напилювання вибирають при веденні процесу з використанням ламінарної плазми або в низькому вакуумі. Істотно зростає дистанція напилювання зі збільшенням потужності дуги, особливо при використанні газів з високою ентальпією.

Для плазмового напилювання характерні такі специфічні параметри розглянутої групи: витрата захисного газу при веденні процесу з місцевим захистом; тиск і температура газу при плазмовому напилюванні в камері.

Особливо великий вплив на ефективність процесу робить зниження тиску в камері. При цьому істотно змінюються теплофізичні властивості плазмового струменя, характер його витікання, а також температура і швидкість розпилюваних частинок. Кут розбіжності аргонного струменя знижується з 16—17°, при нормальному тиску до 7—9°, при тиску $3,3—10^3$ Па. Осьова швидкість плазмового струменя на відстані 200 мм зростає приблизно в 4 рази. Швидкість розпилюваних частинок збільшується в 2—5 разів, досягаючи максимум при тиску в камері $(5,3—10,6) \cdot 10^3$ Па. В усіх варіантах напилювання зі зменшенням тиску в камері коефіцієнт використання порошку знижується. Плазмове напилювання проводять багатьма способами і це визначає універсальність методу та широке його використання при нанесенні покриттів.

Основні переваги методу наступні:

- висока продуктивність процесу (від 2—8 кг/год для плазмотронів потужністю 20—60 кВт до 50—80 кг/год для плазмотронів потужністю 150—200 кВт);
- широкий діапазон видів розпилюваного матеріалу (дріт, порошки з різною температурою плавлення);
- велика кількість параметрів, що забезпечують гнучке регулювання процесу напилювання;
- регулювання в широких межах якості напиляних покриттів. У тому числі отримання особливо якісних покриттів при веденні процесу із

загальним захистом.

Високі значення коефіцієнта використання матеріалу при напилюванні дротових матеріалів (0,7—0,25) і коефіцієнта використання порошку (0,3—0,8); можливість комплексної механізації й автоматизації процесу; широке використання методу, достатня економічність і невисока вартість найпростішого устаткування.

До недоліків методу варто віднести: невисокі значення коефіцієнта використання енергії: при дротовому напилюванні 0,02—0,18; порошковому 0,001—0,02; наявність пористості й інших видів суцільностей (2—15%); невисока адгезійна і когезійна міцність покриття (максимальні значення складають 80,0—100,0 МПа); високий рівень грохота при відкритому веденні процесу (60—120 дБ).

Із удосконалюванням методу плазмового напилювання кількість недоліків і їхній рівень знижується. Наприклад, перспективні розробки напилювання з надзвуковим витіканням плазмового струменя. Це дає можливість формувати покриття з частинок без розплавлення, які знаходяться у в'язкопластичному стані. У порівнянні з радіальною найбільш ефективна осьова подача розпилюваного матеріалу у дугових плазмових розпилювачах.

Значний інтерес становить плазмове напилювання з використанням двох дуг або трифазних плазмотронів. У цих випадках одержують плазму, не забруднену матеріалами електродів. Спрощується осьова подача розпилюваного матеріалу.

4.4 Способи і технологічні особливості газополуменевого напилювання

4.4.1 Газове полум'я як джерело нагрівання і розпилення матеріалу

Газове полум'я одержують за допомогою згоряння пальних газів у кисні або повітрі. У спеціальних пальниках — розпилювачах по периферії сопла подається пальна суміш. Центральна частина призначена для подачі в сформований газополуменевий струмінь розпилюваного матеріалу (рис. 30, а). Біля зрізу сопла форма газового полум'я являє собою порожній конус з кільцевим перерізом. Із віддаленням від зрізу газове полум'я утворює суцільний потік високотемпературного газу.

Газополуменевий струмінь як джерело нагрівання, розпилення і прискорення при напилюванні покриттів подібний плазмовим струменям. Однак, температура і ентальпія газополуменевого струменя значно нижча. Розпилювані частинки взаємодіють з газовою фазою, що складається з пальних газів, продуктів їхнього згоряння і дисоціації, кисню й азоту. Окис-

лювально-відновний потенціал на початковій ділянці струменя легко регулюється зміною співвідношення між палим газом і киснем. Умовно можна виділити три режими утворення полум'я: нейтральне, окислювальне і відновне.

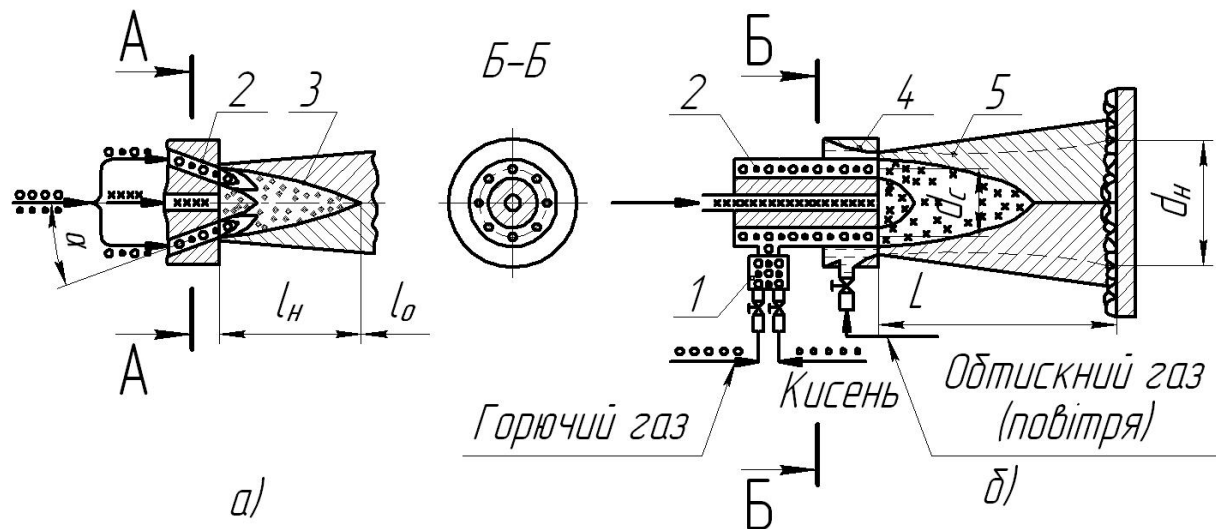


Рисунок 30 — Схема газополуменевого напилювання покрить;

1 — змішувач; 2 — газополуменеве сопло; 3 — газовий струмінь; 4 — повітряне сопло; 5 — обтискний потік повітря;
 а — формування газового полум'я; б — схема процесу напилення

Як пальні гази для напилювання покрить застосовують; ацетилен (C_2H_2), метан (CH_4), пропан (C_3H_8), бутан (C_4H_{10}), водень (H_2) і ін. Іноді використовують суміші, наприклад, пропанбутанову суміш і ін. Деякі фізико-хімічні властивості палих газів наведені в таблиці 2.

Найбільш висока температура полум'я досягається при використанні ацетилено-кисневих сумішей. Однак теплотворна здатність вища в пропану і бутану. Тому для напилювання найчастіше застосовують ацетилен технічний (ГОСТ 5457—75) або пропанбутанову суміш (ГОСТ 20448—80). При утворенні газополумевих струменів тепловий ККД розпилувача досить високий ($\eta_{mp} = 0,8—0,9$). У цьому випадку велика частина підведеної енергії витрачається на нагрівання газу. Однак ефективний ККД нагрівання порошкових частинок (η_w) складає усього лише 0,02—0,1.

4.4.2 Способи і технологічні особливості газополуменевого напилювання

Узагальнена схема процесу газополуменевого напилювання показана на рис. 30, б. Пальний газ і окисний (кисень, рідше повітря) подають у змішувальну камеру 1. Пальна суміш далі надходить у сопловий пристрій

2. На виході з нього суміш підпалюється й утворює факел газового полум'я
 3. Для обтиснення газового полум'я застосовують додаткове сопло 4, у яке подають стиснутий газ, звичайно повітря. Зовнішній потік газу 5 подовжує високотемпературну частину газового струменя, підвищує її температуру і швидкість. У деяких газополумєневих установках стиснутий газ використовують для охолодження теплонапружених елементів розпилювача.

Таблиця 2 — Фізико-хімічні властивості пальних газів

| Газ | C_2H_2 | CH_4 | C_3H_8 | C_4H_{10} | H_2 |
|--|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Відносна густина (відносно повітря) | 0,91 | 0,56 | 1,57 | 2,10 | 0,07 |
| Теплотвірна здатність при температурі 293К і тиску 0,1 МПа, МДж/м ³ | 56,5 | 35,8 | 93,5 | 125,1 | 10,8 |
| Теплота виділення при нейтральному згорянні, МДж/м ³ | 18,5 | 1,4 | 12,6 | — | — |
| Тепловий потік полум'я, кДж/см ² , °С | 44,8 | — | 10,8 | — | 14,0 |
| Швидкість розповсюдження газового полум'я в суміші з киснем, м/с | 13,5 | 3,3 | 3,7 | — | 8,9 |
| Максимальна температура газового полум'я в суміші з киснем, К | 3373– 3473 | 2273– 2373 | 2673– 2973 | 2673– 2973 | 2273– 2773 |

Розпилюваний матеріал у вигляді порошку або дроту (стрижнів) подають по осі газополумєневої струменя. Такий спосіб подачі сприяє більш інтенсивному нагріванню і розпиленню матеріалу. В основу класифікації методу газополумєневого напилювання покладені такі ознаки: вид розпилюваного матеріалу. Розрізняють газополумєве напилювання порошковими і дрововими матеріалами; вид пального газу. Відомі способи напилювання з використанням ацетилену або газів, замінників ацетилену (пропану, бутану, їхніх сумішей і ін.); ступінь механізації. Застосовують ручне напилювання і механізоване (машинне).

Параметри газополуменевого напилювання і їхній вплив на ефективність процесу.

Конструктивні параметри. До конструктивних параметрів, що найбільше впливають на ефективність процесу відносять (див. рис. 30) діаметр газового сопла, діаметр отворів по периферії сопла. Кут нахилу осі отворів до осі розпилювача. Характер витікання струменя і його теплофізичні властивості значною мірою залежать від розмірів і профілювання сопла. Звичайно конструктивні параметри газополуменевого розпилювача розраховують або вибирають експериментально.

Параметри режиму роботи газополуменевого розпилювача. Найбільш значимими параметрами є: вид пального газу, його тиск на вході в розпилювач і витрата; тиск окислювального газу і його витрата; співвідношення між окислювальним і горючим газами і т.д.

Найбільш висока ефективність процесу спостерігається при використанні, як горючого газу, ацетилену або пропан-бутанової суміші.

Тиск горючого газу (P_2) визначає його витрата і стабільність подачі. Звичайно рекомендується $P_2 \geq (30—35) 10^3 \text{ Па}$. При цьому витрата горючого газу (G_2) складає $0,5—2,5 \text{ м}^3/\text{год}$. Велику роль грає відношення кисню до горючого газу (β). У практиці напилювання $P = 1,1—4$: нижня межа для ацетилену, верхня — для пропан-бутанової суміші. Значення β визначає фізико-хімічні властивості полум'я. Збільшення витрати горючого газу при вибраному β приводить до зростання теплової потужності газового полум'я W_{pn} , його швидкості V_{zn} і довжини високотемпературної частини потоку l_6 (рис. 16, а). При цьому росте швидкість подачі розпилювального матеріалу (V_{np}) і, відповідно продуктивність G_n (рис. 31, б).

Для обтиснення газового полум'я тиск газу (повітря) повинне складати $(300—400) 10^3 \text{ Па}$, а його витрата $30—40 \text{ м}^3/\text{год}$.

Параметри розпилюваного матеріалу і його введення в газове полум'я. Дисперсність порошкових частинок, що подаються у газове полум'я, складає $10—100 \text{ мкм}$. Більші частинки порошку нагріваються недостатньо.

Витрата порошку складає $0,5—10,0 \text{ кг/год}$. Подачу порошку здійснюють двома способами. У багатьох випадках порошок подають у газове полум'я за рахунок власної маси в поєднанні з інжектуванням струменя. При цьому прагнуть до мінімальної довжини комунікаційних каналів. В інших випадках порошок подають додатковим транспортуючим газом: киснем або повітрям. Тиск транспортуючого газу вибирають у межах $(100—200) 10^3 \text{ Па}$, а витрата $0,3—0,6 \text{ м}^3/\text{год}$. Діаметр дроту при газополуменево-му напилюванні складає $1,0—5,0 \text{ мм}$. Швидкість подачі знаходиться в межах $1,0—0,15 \text{ м/с}$. Максимальну продуктивність процесу одержують при високих потужностях газового полум'я і великих діаметрах дроту.

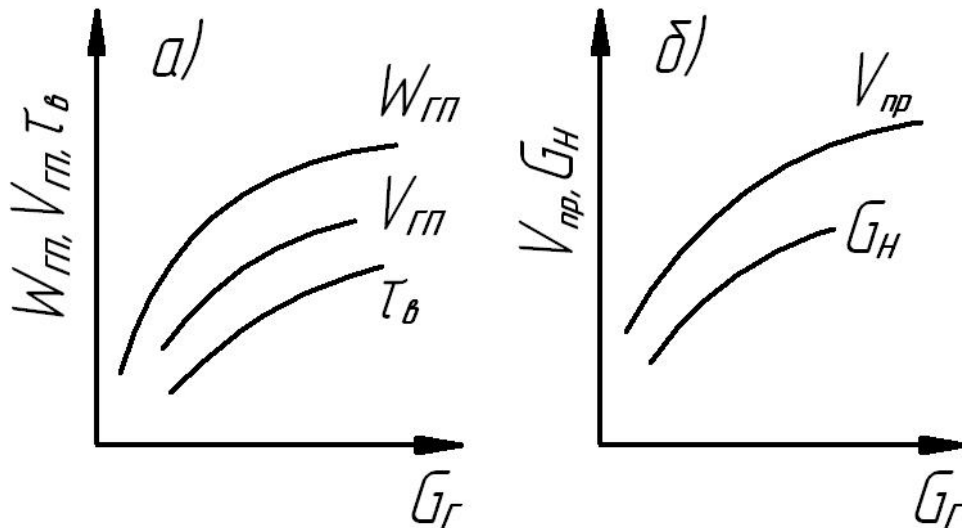


Рисунок 31 — Вплив витрати горючого газу G_p на ефективність процесу газоплазмового напилювання

Параметри, що характеризують зовнішні умови напилювання. Для газополуменевого процесу це, насамперед, дистанція напилювання. Вплив цього параметра аналогічний іншим методам газотермічного напилювання і складає 100—200 мм.

Параметри розпилюваного струменя і потоку розпилюваних частинок. Максимальна температура полум'я біля зрізу сопла складає 3273—3473 К і залежить, в основному, від виду горючого газу і величини β . Швидкість газополуменевих струменів складає 150—300 м/с і визначається витратою горючого газу, значеннями β і профілюванням сопла. У ряді випадків досягається надзвукова швидкість витікання. Склад газового полум'я, в основному, визначається значеннями β .

Зміна температури, ентальпії, швидкості і складу по осі струменя й у перерізах аналогічна плазмовим струменям. Довжина високотемпературної частини газополуменевого струменя залежить від виду горючого газу, та його витрати β . Для ацетилену і пропан-бутанової суміші тривалість нагрівання складає 70—150 мм. Верхня межа відноситься до максимальних витрат горючого газу й оптимальних значень β . Теплові і швидкісні границі струменя близькі і складають 17—25°.

Температура розпилюваних частинок при порошкових способах напилювання не перевищує 2473 К. Дротове напилювання може забезпечити частинки з більш високою температурою, порядку 2973 К. Швидкість частинок біля поверхні напилювання знаходиться в межах 20—100 м/с і вище. Густина потоку розпилюваних частинок складає 10^3 — 10^5 частинок/с·см².

Газополуменеве напилювання призначене для нанесення покриттів рі-

зного призначення за допомогою розпилення порошкових і дротових матеріалів. Цей метод не забезпечує можливість нанесення тугоплавких матеріалів. При порошковому напилюванні температура розпилюваного матеріалу обмежена, приблизно 2473 K , при дротовому напилюванні — 2973 K .

До недоліків методу варто віднести: невисоку продуктивність процесу, особливо при порошковому напилюванні тугоплавкими матеріалами; наявність у струмені активних газів, які взаємодіють з металевими і металопоподібними матеріалами; невисоку якість покриттів при напилюванні ряду порошкових матеріалів; низькі значення ефективного *ККД* нагрівання порошкових частинок.

До переваг методу відноситься: наявність нескладного і недорогого устаткування; високі значення коефіцієнта використання матеріалу (*КВМ*) при дротовому розпиленні.

4.5 Способи і технологічні особливості детонаційно-газового напилювання

Детонаційний вибух газової суміші і продукти його розпаду – джерело нагрівання і розпилення матеріалу.

При детонаційно-газовому напилюванні покриттів використовують специфічне джерело нагрівання, розпилення і прискорення розпилюваних частинок. Джерело являє собою високотемпературний потік газової суміші, що утвориться в результаті спрямованого вибуху. Для цього задану кількість газової суміші, здатної детонувати, подають у камеру запалювання і стовбур установки. Як детонаційна хвиля, так і продукти її розпаду мають високу швидкість поширення з досить високою температурою. Теплова потужність детонаційних газових струменів складає 10^4 — 10^7 Вт . З них найбільш висока для ацетилено-кисневих сумішей дорівнює $15 \cdot 10^6\text{ Вт}$ (діаметр стовбура 16 мм , $45\% \text{ C}_2\text{H}_2$). Склад продуктів розпаду продетонованої суміші визначається, в основному, складом вихідної газової суміші. Протікання детонаційного вибуху і теплофізичні параметри продуктів реакції легко регулюються введенням до складу пальної суміші різних газоподібних технологічних домішок. Найчастіше використовують азот, аргон і ін. Розглянемо вплив азоту на характеристики еквімолярної суміші C_2H_2 — O_2 .

Газові домішки виконують і інші функції, зокрема, закривають канали робочих газів від дії вибуху, очищають камеру згоряння і стовбур від продуктів детонації.

Швидкість продуктів детонації визначає і швидкість розпилюваних частинок. Звичайно це високі швидкості, що складають 800 — 1300 м/с . Час нагрівання порошкових частинок при перенесенні вкрай малий. Його

оцінюють тисячними і меншими частинками секунди. Якщо ентальпію розпилюваних частинок віднести до підведеної енергії, як це приймається для інших методів газотермічного напилювання, то енергетичний *ККД* процесу буде малий. Однак у момент удару частинка додатково розігрівається, і її ентальпія істотно зростає.

| | | | |
|------------------------------------|------|------|------|
| Домішка азоту , моль | 0 | 3 | 4 |
| Тиск вибуху, МПа | 0,5 | 0,23 | 0,22 |
| Температура вибуху, К | 4560 | 3300 | 3110 |
| Швидкість звуку, м/с | 1585 | 1290 | 1150 |
| Швидкість продуктів детонації, м/с | 1375 | 880 | 870 |
| Швидкість детонаційної хвилі, м/с | | | |
| теоретична | 2960 | 2170 | 2020 |
| фактична | 2920 | — | 2015 |

При розрахунку η_{ep} варто враховувати температуру частинок у момент їхнього контактування з поверхнею напилювання. З урахуванням цього η_{ep} складе 0,1—0,15. Ефективний *ККД* нагрівання порошкових частинок (η_u) при їхньому перенесенні оцінюється сотими частинками.

При використанні вуглемістких детонувальних газів продукти розпаду, в основному, мають відбудовний потенціал стосовно розпилювального матеріалу. Можливе виділення горючої газової суміші вільного вуглецю.

4.5.1 Технологічні особливості способів детонаційно-газового напилювання

Узагальнена схема процесу наведена на рис. 32. У камеру запалювання 1 подається задана кількість робочої суміші газів, наприклад, $C_2H_2-O_2-N_2$. За допомогою малопотужного електричного розряду 2 суміш підпалюють. Теплові хвилі, які виникають при цьому, породжують ударну 3, а потім і детонаційну хвилю 4. У каналі стовбура 5 детонаційна хвиля розпадається з утворенням продуктів згоряння газової суміші 6. Одночасно з заповненням стовбура вибуховою сумішшю вводять напилюваний порошок. На виході зі стовбура утворюється стовбурове полум'я 7 і потік розпилюваних частинок 8.

Детонаційно-газове напилювання відноситься до циклічних проце-

сів. Виділяються три складові циклу ($\tau_{ци}$): 1 — час, необхідний для заповнення камери і стовбура газовою сумішшю і порошком (τ_3); 2 — час, затрачуваний на утворення вибуху і викиду продуктів детонації і порошку ($\tau_в$); 3 — час продувки камери і стовбура ($\tau_п$)

$$\tau_{ци} = \tau_3 + \tau_в + \tau_п. \quad (4.4)$$

Час циклу складає 0,2—0,5 с. Звичайно прагнуть до мінімальних значень $\tau_{ци}$. Цим визначається кількість циклів устанавлення в часі, а отже, і продуктивність. Протягом одного циклу на поверхню напилювання переноситься 30—40 мг розпилюваного матеріалу.

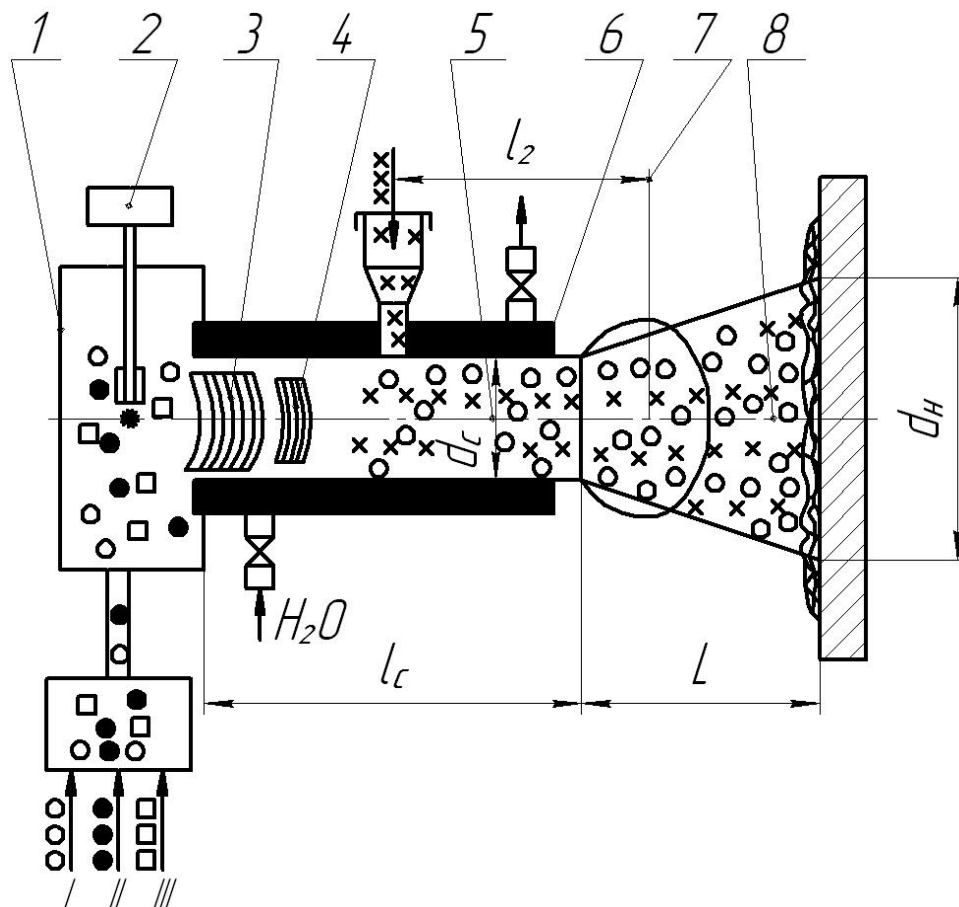


Рисунок 32 — Схема дистанційно-газового напилювання покриття: I — горючий газ; II — окислювальний газ; III — технологічний газ; d_c , l_c — діаметр і довжина стовбура, відповідно

Детонаційно-газове напилювання здійснюється в основному порошковими способами. Подачу порошку здійснюють як в осьовому, так і в радіальному напрямках. Для одержання якісних покриттів необхідно рівномірний розподіл порошкових частинок по перерізі стовбура. Незважаючи на короткочасність перебування частинок у потоці, гравітація

на короткочасність перебування частинок у потоці, гравітація впливає на рівномірність розподілу. У нижній частині каналу стовбура спостерігається більша кількість порошку, особливо великих і важких фракцій. Цей недолік значною мірою усувається при вертикальному розташуванні стовбура установки.

Процес детонаційно-газового напилювання механізований і автоматизований. Здійснюється в спеціальному звукоізолюваному боксі. Керування процесом дистанційне, з винесеного за межі боксу пульта.

На практиці широко застосовують різновид методу детонаційно-газового напилювання. Класифікацію роблять за типом детонувальної суміші, конструктивними особливостями газового температурного тракту і кількістю детонаційних камер-стовбурів.

Тип детонувальної суміші. Використовують детонувальні гази C_2H_2 , CH_4 , C_3H_8 , CO , H_2 і ін., а також продукти піролізу бензину, гасу і т.д.

Конструктивні особливості газового температурного тракту. Застосовують процес з попереднім форкамерним запалюванням і запалюванням безпосередньо в стовбурі установки. Використовують напрямні канали стовбурів з постійним і змінним перерізом: прямолінійні, у вигляді зміювика й ін.

Кількість детонаційних камер-стовбурів. Розрізняють одностовбурні установки і багатостовбурні. Останні забезпечують підвищення продуктивності процесу.

Поряд з цим можна виділити й інші різновиди методу.

4.5.2 Параметри детонаційно-газового напилювання і їхній вплив на ефективність процесу

Конструктивні параметри розпилювача. Найбільший вплив на ефективність процесу робить діаметр стовбура (d_c), його довжина (l_c) і форма. Звичайно калібр стовбура вибирають у межах 8—40 мм. Зі зменшенням d_c ускладнюється детонаційний вибух, зростають теплові втрати. Часто застосовують гармати з $d_c = 16$ мм. Довжину стовбура вибирають у межах 1200—2000 мм. Мінімальна довжина стовбура повинна бути більша переддетонаційної відстані. Максимальні значення l_c вибирають з умов одержання найбільш високих швидкостей розпилюваних частинок і формування потоку заданої конфігурації. Слід також зазначити, що при зменшенні d_c і l_c знижується порція детонуючої газової суміші і, відповідно, енергія вибуху і продуктів розпаду. Дуже впливає на ефективність процесу форма детонаційного каналу, чистота його поверхні, відношення l_c/d_c , застосування стовбурів змінного перерізу, наявність форкамери й ін. До конструктивних параметрів варто віднести також кількість циклів детонаційного роз-

пилювача в часі. Зі збільшенням кількості циклів збільшується продуктивність процесу і знижується прояв гравітаційних сил при введенні порошку в детонаційну суміш. Для усунення гравітації при $d_{cm}=25$ мм необхідна швидкострільність понад 14 циклів у 1 секунду.

Параметри режиму роботи детонаційно-газового розпилювача. Найбільш значимими параметрами є вид і витрата газів, що входять у суміш і детонують співвідношення між горючим газом і киснем.

Найбільш висока ефективність напилування забезпечується при використанні для утворення суміші детонувального ацетилену і рідше пропанбутанової суміші. Це пояснюється високими значеннями теплофізичних властивостей названих газів. На продуктивність процесу особливо дуже впливає витрата детонувальної суміші. Звичайно витрата ацетилену і кисню складає $0,2—6,0$ м³/год у залежності від конструкції установки і тиску застосовуваних газів (тиск $0,05—0,15$ МПа). Зі збільшенням витрати основних газів продуктивність зростає. Істотний вплив на ефективність процесу має домішка до суміші технологічного детонувального газу. Збільшення частки азоту — кисень знижує температуру і швидкість розпилюваних частинок. При використанні суміші $C_2H_2—NO_2$ додають 10—15 % (об'єму) азоту. Виключення азоту зі складу детонувальної суміші приводить до посилення процесу сажоутворення. На ефективність процесу дуже впливає параметр P , що виражає відношення кисню до горючого газу в детонувальній суміші. На рис. 33 показані залежності теплоти реакції Q , швидкості детонації V_d і рівноважної температури газової суміші T_{pc} за фронтом детонаційної хвилі від значення β . Найбільш високі показники ефективності спостерігаються при значеннях P , що відповідають еквімолярному складові, наприклад, $C_2H_2 + O_2 = 2CO + H_2$. Однак, у цьому випадку в продуктах розпаду детонаційної хвилі утвориться сажистий вуглець, що негативно впливає на якість покриттів. При використанні ацетилену за оптимальне значення P приймають 1,21—1,25.

Параметри розпилюваного матеріалу і умов його введення. Найбільше впливають на ефективність процесу діаметр порошкових частинок і їхня густина. Звичайно застосовують порошки із середнім діаметром 10—50 мкм. Більш великі частинки розігріваються і прискорюються недостатньо для утворення міцних зв'язків у момент удару. Порошки малої густини мають найбільш високі швидкості.

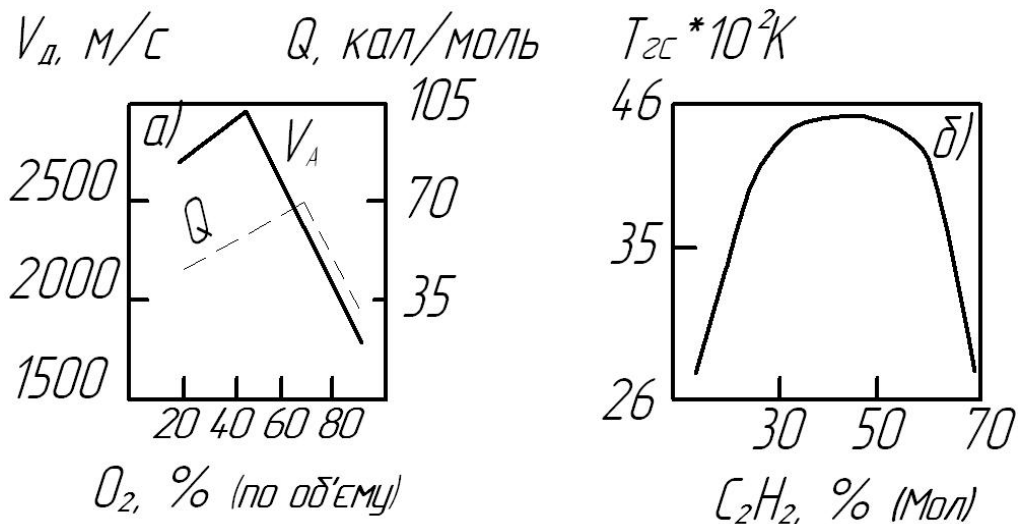


Рисунок 33 — Залежність теплоти реакції Q , швидкості детонації V_d (а) і рівноважної температури газової суміші T_{gc} (б) від значень β

Кількість подаваного порошку знаходиться в широких межах. Для установок невеликої потужності продуктивність складає 0,5—1,5 кг/год. У більш потужних установках ця величина складає від 12 кг/год і більш. За один цикл викидається приблизно 50—100 мг. Завантаженість порошком газової суміші складає 0,2—0,6 кг/м³. Температура і швидкість розпилюваних частинок значною мірою залежать від умов його введення в канал стовбура. Найбільш високі швидкості частинок реалізуються при подачі порошку на відстані 200—400 мм від зрізу детонаційного стовбура.

Параметри, що характеризують зовнішні умови детонаційно-газового напилювання. Напилювані вироби жорстко кріпляться на пристосуванні, що забезпечує необхідну рухомість переміщення щодо стовбура установки. При цьому повинні бути усунуті перешкоди на шляху потоку розпилюваних частинок. Кут дотику (кут напилювання) також, як і для інших методів газотермічного напилювання, змінюється в межах 45—90°. Дистанція напилювання задається в залежності від матеріалу виробу, його розмірів і форм, товщини покриття і змінюється від 50 до 200 мм.

Необхідну товщину покриття отримують багаторазовим повторенням циклів детонації, шляхом переміщення виробу перед зрізом стовбура гармати. Зсув деталей між двома циклами (крок) не повинний перевищувати $1/2d_n$.

Параметри детонаційної хвилі, продуктів її розпаду і потоку розпилюваних частинок. На нагрівання і прискорення розпилюваних частинок впливають багато з розглянутих раніше параметрів. Стан частинок біля поверхні напилювання визначається в першу чергу параметрами детонаційної хвилі і, особливо, продуктів її розпаду. Найбільш значимими парамет-

рами є температура, ентальпія і швидкість газового потоку усередині каналу стовбура і на виході з нього. В основному ці параметри залежать від складу і витрати робочої газової детонувальної суміші. Температуру детонаційної хвилі (T_{dx}) оцінюють значеннями 4000—5700 K, а її швидкість (V_{dx}) 2000—3000 м/с. Продукти розпаду – горюча суміш, яка йде за детонаційною хвилею, має менші показники: $T_{zc} = 3000—4000$ K, $V_{z.c} = 850—1400$ м/с.

При детонаційному вибуху тиск газової суміші, що розвивається усередині каналу стовбура, складає 0,2—0,75 МПа. Слід зазначити, що всі параметри вихідної газової суміші (тиск, температура, густина і об'єм) змінюються в момент вибуху стрибкоподібно. Дулове полум'я, що утвориться на виході зі стовбура, (див. рис. 32) при нагріванні і прискоренні напилюваних частинок істотної ролі не відіграє. Швидкість і температура полум'я швидко знижується на відстані 40—70 мм від зрізу стовбура.

Параметри потоку розпилюваних частинок характеризуються такими параметрами.

Температура частинок у більшості випадків нижча температури плавлення розпилюваного матеріалу. Очевидно, варто вибирати температури нагрівання частинок, близькі до температури солідуса. Розплавлені частинки при їхніх високих швидкостях у момент удару розплескуються. Експериментами показано, що при детонаційно-газовому напилюванні температура частинок біля поверхні напилювання може досягати 1673—1873 K і більше.

Швидкість частинок знаходиться в межах 800—1500 м/с. Варто прагнути до реалізації максимальних швидкостей. Це полегшує утворення міцних зв'язків при контактуванні. Високошвидкісні потоки частинок і забезпечують одержання найбільш якісних покриттів із усіх методів газотермічного напилювання. Розподіл швидкості і температури частинок по осі потоку й у перерізах підпорядковується загальним закономірностям газотермічного напилювання. Однак значно більш сприятливий. У багатьох випадках розкидом цих параметрів можна знехтувати. Виняток складають периферійні частинки, що знаходяться в пристінкових областях каналу стовбура.

Взаємодія нерозплавлених розпилюваних частинок з газовою фазою не приводить до істотної зміни їх хімічного складу. Однак, варто враховувати окислювально-відновний потенціал високотемпературної газової суміші і можливість утворення в ній вільного сажистого вуглецю. У потоках нерозплавлених частинок слабо виявляються такі процеси, як випаровування, сублімація і дисоціація.

Густина потоку частинок по плямі напилювання також, як і при ін-

ших методах газотермічного напилювання, підкоряється законові нормального розподілу. Інтегральна густина частинок по плямі напилювання складає 10^3 — 10^5 частинок/см²·с. Параметри потоку частинок визначають коефіцієнт використання порошку. Для цього методу $K_m = 0,3 - 0,6$.

4.5.3 Галузі застосування. Переваги і недоліки. Перспективи розвитку

Детонаційно-газове напилювання застосовують для осадження покриття різного призначення з багатьох порошкових матеріалів.

Розміри і форма виробів при цьому методі напилювання також не обмежені і визначаються технічними можливостями пристроїв для їх переміщень у процесі нанесення покриття, а також розмірами звукоізовованого боксу. Наприклад, напилюванню піддають вироби довжиною до 10 м і діаметром 2—3 м, масою до 4 т, а також дрібні (хірургічний інструмент, свердла, мітчики й ін.). Внутрішні циліндричні поверхні діаметром більше 10 мм і відкриті з обох кінців повинні мати довжину, що не перевищує півтора діаметра.

Твердість матеріалу напилюваних виробів не повинна перевищувати 60 HRC. Товщину покриття звичайно вибирають у межах 0,05—1,5 мм. Оптимальна товщина покриття складає 0,1—0,5 мм.

До переваг методу варто віднести: високу якість напиляних покриттів ($\sigma_e \geq 10,0$ МПа; $P \leq 1$ %); можливість напилювання покриттів на холодні вироби ($T_{вир} \leq 473$ К); помірне нагрівання виробів при їх напилюванні ($T_u \leq 573$ К); досить висока продуктивність ($G = 1 - 10$ кг/год) і широка номенклатура розпилюваних матеріалів; невисока чутливість до стану вихідної поверхні напилювання.

Недоліки методу: ускладнення нанесення покриттів на вироби, що мають високу поверхневу твердість ($HRC \geq 60$); важко напилювати покриття з порошків з невисокою питомою масою (карбіди титану й ін.); неможливе напилювання внутрішніх поверхонь на глибину, що перевищує діаметр вхідного отвору; високий рівень грохоту (140 дБ і більше); необхідність застосування герметичних боксів і дистанційного керування процесом; досить висока вартість устаткування.

4.6 Способи і технологічні особливості електродугової металізації

4.6.1 Дуга як джерело нагрівання розпилюваного матеріалу

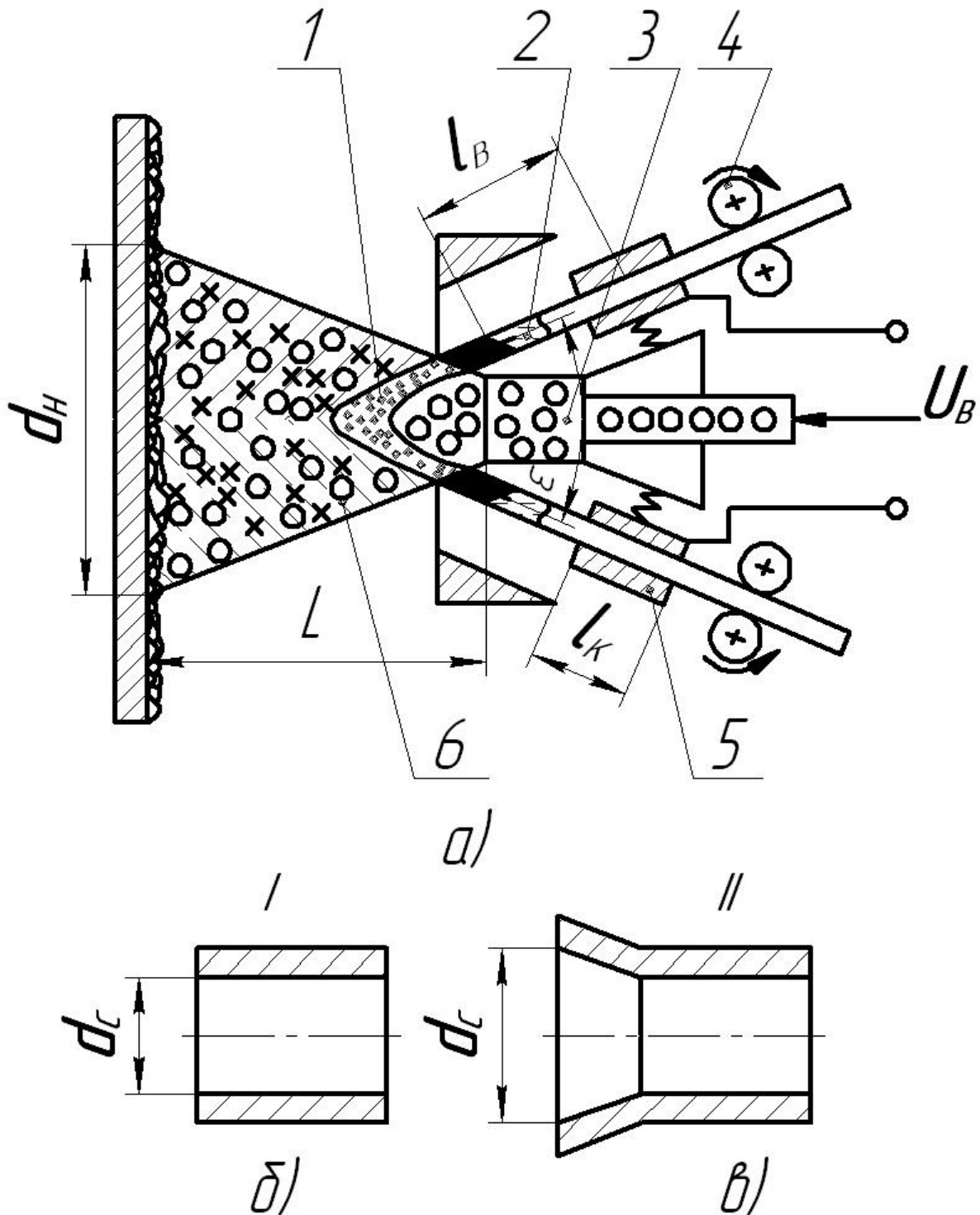


Рисунок 34 – Схема процесу електродугової металізації:

I — циліндричне сопло; II — циліндричне в з'єднанні з конічним; l_K — довжина контакту; l_B — довжина вольту дроту

При дуговій металізації утворення потоку розпилюваних частинок відбувається за рахунок плавлення розпилюваного матеріалу високоампе-

рною дугою і його диспергування швидкісним потоком газу. З наведеної на рис. 34 схеми електродугової металізації видно, що горіння дуги відбувається в специфічних умовах. Площа активних плям на електродах обмежена невеликими діаметрами використовуваних для розпилення дротів. Горіння дуги відбувається в умовах впливу могутнього швидкісного потоку газу. Це обумовлює стиск (контрагування) стовпа дуги. Іншою особливістю горіння дуги є змінність її довжини. Принципово можливі дві схеми горіння дуги: без коротких замикань і з періодичними короткими замиканнями. Характер горіння дуги визначається, насамперед, родом струму і режимом процесу. При живленні дуги змінним струмом коротких замикань не відбувається. Застосування джерел постійного струму дає можливість ведення процесу як з короткими замиканнями, так і без них. Однак і в цьому випадку в горінні дуги простежується циклічність.

Дуга, знаходячись під впливом електродинамічних і газодинамічних сил, рухається в міжелектродному просторі. Досить чітко простежується два етапи в циклі горіння. Перший етап пов'язаний з порушенням і розвитком початкової стадії горіння дуги. На другому етапі відбувається винос дуги за межі оплавлених торців електродів (зависання дуги). На цій стадії, щодо стабільного горіння, можна прийняти $I_d \approx \text{const}$. У цей час відбувається інтенсивне плавлення металу. Відмітним моментом між двома етапами в циклі є скидання розплавленого металу з торців електродів. Час існування першого і другого етапів у циклі залежить від багатьох змінних. Зокрема, статичних і динамічних властивостей джерела живлення, режиму процесу, властивостей розпилюваного матеріалу і ін. Час першого етапу може бути оцінено в $\tau_I = 10^{-5}—10^{-6}$ с; другого $\tau_{II} = 10^{-2}—10^{-3}$ с. Смуга частот знаходиться в межах 250—2500 Гц. Теплота, що виділяється в активних плямах, практично цілком витрачається на плавлення електродного дроту. Значна частина теплоти стовпа дуги витрачається на нагрівання розпилювального газу.

При нагріванні дугою торців електродів фронт їхнього плавлення орієнтується під кутом φ до осі дроту. Оптимальні значення кута встановлюються автоматично в залежності від режиму роботи розпилювача. Наприклад, при постійних значеннях кута схрещування електродів ω і швидкості подачі дроту зміна потужності дуги приводить до зміни кута нахилу фронту плавлення. У цьому виражається процес саморегулювання системи. Так, при живленні дуги постійним струмом, незважаючи на різне тепловиділення на катоді й аноді, швидкість подачі обох дротів однакова. Енергетичний ККД розпилення при електродуговій металізації має найбільш високі значення з усіх методів газотермічного напилювання і складає 0,7—0,9.

4.6.2 Технологічні особливості способів електродугової металізації

Найбільше розповсюдження для напилювання покриттів отримала двохелектродна схема (див. рис. 34). Розпилюваний матеріал у вигляді дроту 2 діаметром 1,0—5,0 мм подається в зону горіння дуги 1 механізмом подачі 4. Напруга від джерела живлення U_0 підводиться до контактних пристроїв 5. Між перехресними електродами розташовується сопло 5, призначене для створення швидкісного потоку розпилювального газу. Часто для цих цілей використовують стиснене повітря. Газовий струмінь зриває розплавлений метал з торців дроту, диспергує його й утворює потік розпилюваних частинок разом з розпилювальним газом (двофазний струмінь). Конфігурація потоку аналогічна іншим методам газотермічного напилювання.

Поряд із двохелектродною застосовують і трьохелектродні схеми напилювання. При цьому способі електродні дроти розташовуються по твірних зрізаного конуса з відстанню в 120° (при двохелектродній схемі 180°). Для живлення використовують трифазний змінний струм. При цьому на кожен електрод подається окрема фаза. Особливістю електродугової металізації є напилювання тільки металевих матеріалів, які є електричними провідниками. При цьому легко реалізується напилювання композиційних покриттів. З цією метою використовуються дроти з різних матеріалів. Застосовуючи трьохелектродну схему, отримують трикомпонентне покриття. Електродугову металізацію ведуть у відкритій атмосфері. Створення ефективного місцевого захисту металізаційного струменя є, як і при плазмовому напилюванні, значно трудним. Однак ведення процесу в камері із загальним захистом принципово можливе.

Метод електродугової металізації може бути класифікований за кількістю електродних дротів (розрізняють двох- і трьохелектродні способи напилювання), а також за механізацією процесу. Застосовують ручне напилювання і механізоване. Механізований процес обладнаний пристроєм для переміщення розпилювача відносно напилюваного виробу або навпаки. Для одержання рівномірних за товщиною покриттів на великих поверхнях задаються за програмою складні рухи розпилювача.

4.6.3 Параметри режиму електродугової металізації і їхній вплив на ефективність процесу

Конструктивні параметри. Найбільш впливає на процес розпилення форма і розміри сопла. В основному застосовують циліндричні сопла з $d_c = 3 - 6$ мм. Для створення ефективного розпилювального потоку такі сопла вимагають великої витрати газу 50—60 м³/год. Іншим недоліком циліндри-

чних сопел є вплив дроту на характер газів, які розпорошують, зокрема, на більш високий ступінь турбулентності. Звичайно циліндричні сопла працюють у режимі «недорозширення». Статичний тиск газу на зрізі сопла вищий атмосферного. У цьому випадку струмінь дорозширюється за межами сопла. Такий режим роботи відносять до нерозрахованого. У надзвуковому струмені нерозрахованого режиму виникають стрибки ущільнення, супроводжувані ударними хвилями. На їхнє утворення витрачається значна частина енергії струменя. В умовах «недорозширення» ефективна довжина струменя знижується, а його розпилювальна здатність падає. Відзначені недоліки значною мірою усуваються із застосуванням циліндричних сопел у з'єднанні з основною частиною, що розширюється, (див. рис. 34, в).

Діаметр циліндричних сопел вибирається в межах $d_c = 4—6$ мм. У конічній частині, що розширюється, $d_c = 6,5—8,5$ мм. Загальна довжина сопла складає 30—50 мм.

Кут схрещування електродів ε (див. рис. 34) впливає на формування потоку розпилюваних частинок. При малих кутах часто спостерігається утворення двох потоків частинок, відповідно з кожного дроту. Великі кути ускладнюють конструктивне виконання розпилювача; на практиці $\omega = 30^\circ$. На процес розпилення впливає конструкція контактних пристроїв (див. рис. 34, а). Зі збільшенням довжини контакту (l_k) знижується сумарний спад напруги. Допускається сумарний спад напруги, рівний 0,8—1,0 В на 1000 А. Більшість конструкції забезпечують 0,2—0,3 В на 1000 А.

Конструктивні параметри електродугового розпилювача визначають і його тепловий ККД (η_{mp}), що має високі значення (0,8—0,9).

Параметри режиму роботи електродугового розпилювача. Найбільш суттєвим параметрами режиму роботи є потужність дуги і витрата розпилювального газу. Процес розпилення доцільно вести при мінімальних значеннях питомої енергії, затрачуваної на плавлення, перегрівання і випаровування металевих матеріалів. Ентальпія частинок легко регулюється зміною питомої потужності дуги N_δ^* . У практиці напилювання цей параметр знаходиться в широких межах і складає 2000—10000 кДж/кг. Зі збільшенням N_δ^* зростають витрати перегрітого металу на випаровування і можливе розбрикування при формуванні покриття. Однак збільшення ентальпії температури частинок позитивно впливає на якість покриття (рис. 20). Експериментальними дослідженнями встановлено, що при електродуговій металізації алюмінієм підвищення N_δ^* з 3000 до 8500 кДж/кг (при постійній швидкості подачі дроту) температура розпилюваних частинок зростає з 1173 до 2173 К.

Вибрана потужність дуги (N_δ) визначає як продуктивність процесу,

так і ентальпію потоку частинок. Ефективний *ККД* розпилення складає 0,7—0,85 і є найвищим із усіх методів газотермічного напилювання. Потужність дуги визначається значеннями струму і напруги. Напруга дуги звичайно не є регульованим параметром. Необхідну величину потужності встановлюють за допомогою зміни струму дуги. У практиці електродугової металізації використовують потужність від 5 до 20 *кВт*, силу струму 80—600 *А* і напругу 18—35 *В*.

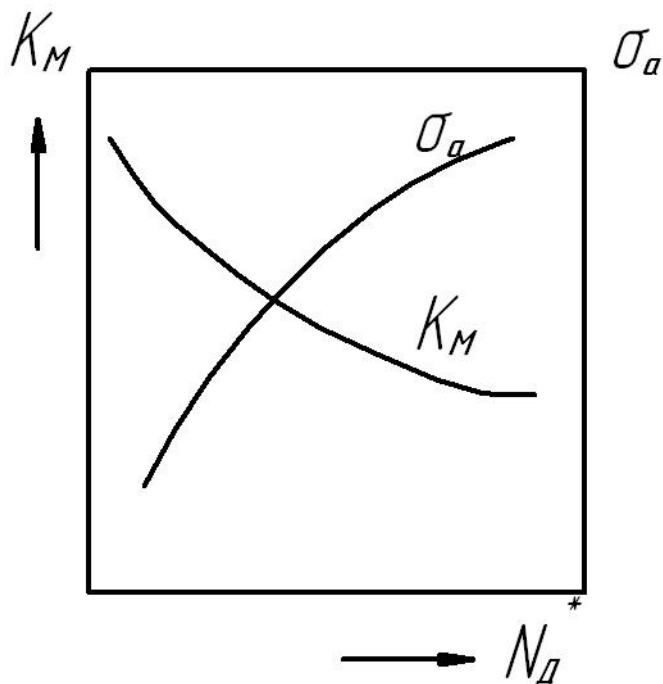


Рисунок 35 – Вплив питомої потужності дуги N_d на коефіцієнт використання матеріалу K_M і адгезійну міцність σ_a

Тиск, витрата і властивості розпилювального газу дуже впливають на вагомість показників ефективності процесу. Збільшення тиску газу, а отже, і його витрати, приводять до зростання швидкості струменя і його здатності до розпилення. Необхідно прагнути до надзвукового характеру витікання з мінімальним перепадом тисків на зрізі сопла. При цьому полегшується евакуація розплавленого металу з поверхні плавлення дроту, його диспергування і зростання швидкості частинок. На практиці тиск розпилювального газу вибирають рівним 0,35—0,55 *МПа*. При цьому його витрата складає 60—150 $m^3/2$.

Параметри розпилюваного матеріалу і введення його в зону нагрівання. Як розпилювальний газ, в основному, використовують стиснене повітря. Найбільш значимими параметрами є діаметр електродного дроту d_n і швидкість його подачі. Звичайно d_n вибирають у межах 1,0—3,5 *мм* і більше. При максимальних d_n можна домогтися більш високої продуктивності.

Необхідно враховувати, що зі збільшенням діаметра дроту підсилюється турбулізація α розпилювального струменя. Коефіцієнт турбулізації α

може бути визначений із залежності

$$a = (0,4 \cdot d_{II}/d_c)^{2,56} + a_1, \quad (4.5)$$

де a_1 — коефіцієнт турбулізації при вільному витіканні струменя із сопла.

Малі діаметри дроту, крім того, ускладнюють процес. При цьому потрібна висока швидкість подачі. Спостерігається інтенсивне блукання торців дроту, що плавиться. Швидкість подачі дроту вибирають максимальною для заданого режиму роботи розпилювача. Завдяки цьому досягаються мінімальні значення питомої потужності дуги (N_0^*). У практиці електродугової металізації швидкість подачі дроту складає 0,05—0,35 м/с або продуктивність розпилення $G_n = 2—50$ кг/год.

Істотно впливає на процес довжина вильоту дроту з контактного пристрою l_6 (рис. 34, а). Зі збільшенням l_6 починає виділятися джоулеве тепло. Особливо це характерно для металів з підвищеним питомим електроопором (сталі, титану, нікелю й ін.). Для таких металів швидкість плавлення дроту зростає на 10—20 %. Збільшення вильоту приводить до небажаного блукання торців дроту. Величину зсуву дротів у процесі їхнього розпилення допускають $\Delta \leq 1/4 d_n$.

Параметри, що характеризують зовнішні умови напилювання. Ці параметри мало відрізняються від інших методів газотермічного напилювання. Кут дотику потоку з поверхнею напилювання складає 65 – 90°. Мінімальний кут відповідає 45°. Дистанція напилювання L знаходиться в межах 60—150 мм. Швидкість переміщення плями напилювання обмежують 1мі 30—50 м/хв.

Параметри розпилювального струменя і потоку частинок. Характер витікання газу із сопла підпорядковується загальним закономірностям утворення затоплених струменів. Середньомасова температура газу безпосередньо за межами стовпа дуги досить висока. Однак при великих витратах розпилювального газу температура (на порядок вища у порівнянні з плазмовим напилюванням) по осі й у перерізах швидко падає. Цьому сприяє і турбулізація газового потоку схрещеними електродами. Очевидно, додаткового нагрівання розпилених частинок на початковій ділянці струменя не відбувається. На основній ділянці струменя частинки охолоджуються.

Швидкість розпилювального струменя максимальна на зрізі сопла і зберігається практично постійною в межах початкової ділянки. Вона оцінюється значеннями, близькими до звукового або трохи його перевищують. Зривання з фронту плавлення розплавленого металу і його диспергування відбувається в межах початкової ділянки високошвидкісним пото-

ком газу або так званим «жорстким» струменем. На цій же ділянці розпилені частинки одержують високе прискорення.

У момент диспергування розпиленого металу частинки, що утворюються, знаходяться в рідкому стані. Їхній середній розмір орієнтовно може бути оцінений за рівнянням:

$$d_{\text{ч}} = K_1 \cdot K_2 \cdot \sqrt[3]{G_H / \gamma \cdot \mu}, \quad (4.6);$$

де G_H — продуктивність розпилення; γ — густина розпилюваного матеріалу;

μ — коефіцієнт, що враховує безперервність горіння дуги ($\mu_{\text{max}} = 1$);

K_1 — константа, що залежить від властивостей розпилюваного матеріалу (для сталі 1,61; алюмінію 1,45; цинку 1,64; олова 0,85);

K_2 — константа, що залежить від радіуса та форми сопла (для циліндричних сопел $3,75/r_c + 0,29$).

За даними багатьох досліджень при розпиленні вуглецевих сталей більшість частинок має розмір 30—50 мкм. Для інших металів 10—100 мкм.

Із віддаленням від осередку плавлення і розпилення швидкість частинок падає. Біля поверхні напилювання швидкість газового струменя і потоку розпилюваних частинок приблизно однакові і складають 50—150 м/с. Температура частинок у низькотемпературному газовому середовищі на основній ділянці струменя падає досить інтенсивно. Однак, завдяки високим швидкостям і перегрівові металу при плавленні, більшість частинок надходить на поверхню напилювання в розплавленому стані. Особливо це справедливо для великих частинок, 40—100 мкм і більше. Таке твердження базується на формуванні напиленого покриття. Різко виражена шаруватість характерна для умов, при яких покриття формується з розплавлених частинок.

Висока продуктивність розпилення визначає великі густини потоку розпилюваних частинок біля поверхні формування. Їх оцінюють значеннями 10^3 — 10^5 частинок/см·с.

Струмінь на всій довжині складається з повітря. Тому створюються сприятливі умови для окислювання розпилюваного металу і насичення його азотом.

4.6.4 Застосування електродугової металізації. Переваги і недоліки. Перспективи розвитку

Найбільш широке застосування електродугова металізація одержала при створенні корозійностійких покриттів на різних будівельних спорудах. Для цих цілей, в основному, напилюють покриття з алюмінію і цинку. Як зносостійкі покриття напилюють різні сталі, бронзи й ін. Перспективні

композиційні покриття, наприклад, зі сталі і міді, міді й олова й інших сполук. Основною перевагою методу є його висока продуктивність, що досягає 50 кг/год. Цей метод забезпечує також максимальні значення енергетичних ККД розпилення η_{ep} і напилювання $\eta_{ен}$. Завдяки великим значенням ентальпії розпилюваних частинок можуть бути отримані якісні покриття з достатньою адгезійною, когезійною і низькою пористістю.

До недоліків варто віднести інтенсивну взаємодію частинок з активною газовою фазою. Напилюваний метал насичений киснем і азотом, також містить значну кількість оксидів. Використання для напилювання тільки дроту обмежує можливості методу.

Можна проводити напилювання порошковим дротом, що складається з металевої оболонки і порошкового сердечника. Якість покриття може бути особливо високою при веденні процесу в камері із загальним захистом і розпиленні металу інертними газами. У цьому відношенні перспективне ведення процесу в низькому вакуумі. Регенерація розпилюваного газу (замкнений цикл) дозволить досягти задовільної економічності.

4.7 Високочастотна металізація (ВЧМ) і її технологічні особливості

Серед газотермічних методів напилювання покриття ВЧМ застосовують рідко. Процес вивчений недостатньо.

Для плавлення металу використовують індукційне нагрівання струмами високої частоти. Особливістю цього джерела є поверхневе плавлення металу на невелику глибину, що складає десяті частинки міліметра. Глибина проникнення високочастотного струму z може бути оцінена за рівнянням

$$z = 5030 \cdot (\rho/\mu \cdot f)^{1/2} \quad (8.7)$$

де ρ — питомий опір розпилюваного металу;

μ — магнітна проникність;

f — частота струму.

Глибина проникнення тим менша, чим більша частота струму, електропровідність металу і його магнітна проникність.

Схема напилювання покриття ВЧМ показана на рис. 36. Розпилювальна головка працює за принципом концентратора вихрових струмів і є високочастотним трансформатором. Первинна зовнішня багатогвинтова обмотка — індуктор 1 охоплює вкладиш 2, що є вторинною одновитковою обмоткою цього трансформатора. Магнітний потік індуктора концентрується в центральній частині вкладиша, отвір у якому називають гребенем концентратора. У цей отвір подається розпилюваний дріт 3. Розплавлення поверхні дроту роблять на невелику глибину. По каналах 4 подається

ся розпилювальний газ, найчастіше повітря. Потік розпилюваних частинок одержують безперервним зрушенням розплавленого металу з поверхні дроту і його диспергування розпилювальним струменем. ВЧМ здійснюють механізованими способами, в основному, без захисту потоку частинок і плями напилювання.

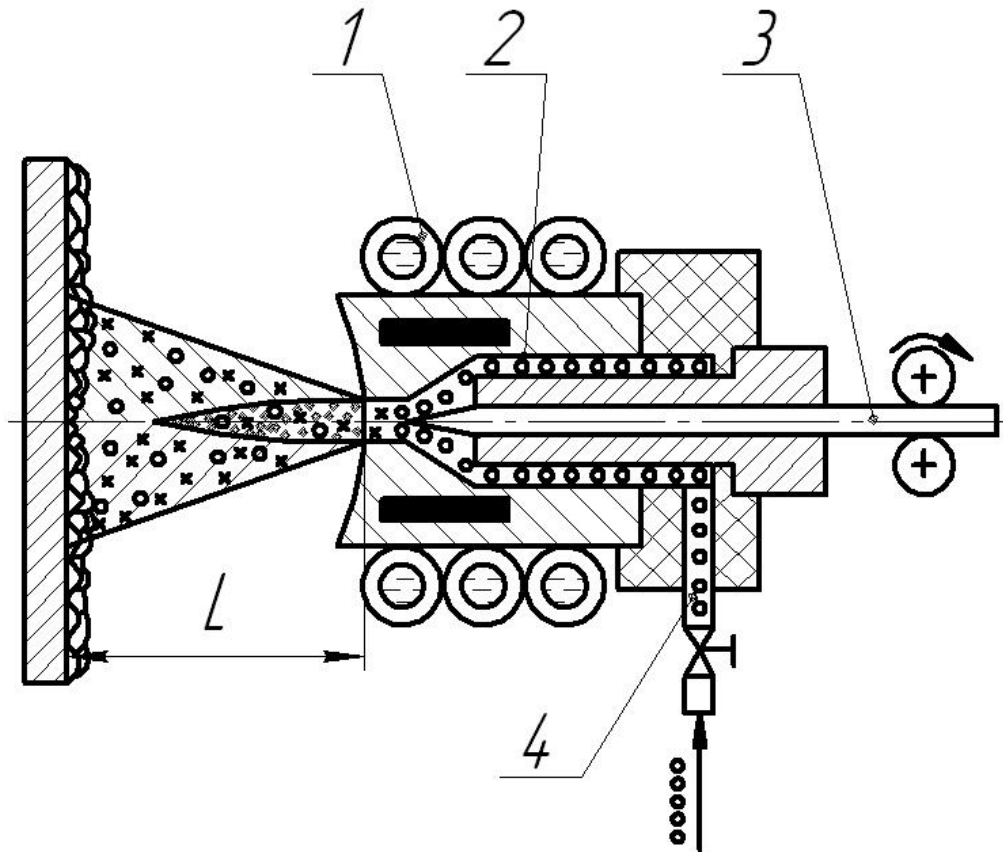


Рисунок 36 — Схема напилювання покриттів високочастотною металізацією (ВЧМ)

Конструктивні параметри розпилювача значно впливають на ефективність процесу (особливо форма і розміри індуктора і концентратора, їх взаємне розташування). Діаметр сопла і його довжина, а також форма аналогічні електродуговим металізаційним розпилювачам. Сопло безпосередньо зв'язано з концентратором. Подача до нього стиснутого газу здійснюється по периферійних каналах. Індуктор і концентратор охолоджуються водою. При цьому втрачається значна частина підведеної енергії. Тепловий ККД розпилювача знаходиться в межах 0,24—0,4.

До основних параметрів режиму роботи при ВЧМ відносять потужність високочастотного генератора, його частоту і тиск розпилювального газу. Для одержання досить високого енергетичного ККД розпилення варто обирати частоту струму відповідно до діаметра розпилюваного дроту. Так, для сталевого дроту ($d_n = 5—6$ мм) необхідна частота близько $70—10^3$ Гц. Зі зменшенням d_n необхідна частота різко зростає. При

$d_n = 3$ мм вона вже складає $200\text{—}10^3$ Гц.

Збільшення тиску розпилювального газу зменшує середній розмір частинок і збільшує їхню швидкість. Наприклад, при напилюванні вуглецевого дроту збільшення тиску від 0,2 до 0,4 МПа знижує розмір частинок від 100—120 до 20—30 мкм. При цьому їхня максимальна швидкість зростає з 65 до 130 м/с. Витрата стиснутого газу складає 0,5—1,0 м³/хв.

Параметри розпилюваного матеріалу вибирають у таких межах: $d_n = 3\text{—}6$ мм, довжина відрізків 3—5 м, швидкість подачі 0,4—1,3 м/хв. Необхідно витримувати високий ступінь співвісності дроту і соплового концентратора.

Параметри, що характеризують зовнішні умови при ВЧМ, аналогічні іншим методам газотермічного напилювання. Наприклад, дистанцію напилювання вибирають у межах 50—150 мм.

Параметри розпилювального струменя і потоку розпилюваних частинок близькі до параметрів при електродуговій металізації. При однаковій продуктивності розпилення, ВЧМ дозволяє одержувати більш концентровані потоки розпилюваних частинок, що досягають 10^6 частинок/см²·с.

ВЧМ має обмежене застосування, обумовлене значно більш складним устаткуванням і умовами експлуатації. Метод придатний для напилювання обмеженої номенклатури матеріалів, головним чином сталей.

В останні роки метод ВЧМ не був удосконалений. Очевидно, з розвитком нової техніки, зокрема, високочастотних генераторів, вакуумних пристроїв і т.д. можуть бути усунуті деякі недоліки, що стримують його застосування.

5 УСТАТКУВАННЯ ДЛЯ ГАЗОТЕРМІЧНОГО НАПИЛЮВАННЯ ПОКРИТЬ

5.1 Функціональна схема установок для газотермічного напилювання

Будь-яка установка для газотермічного напилювання складається з розпилювача, механізму подачі розпилюваного матеріалу (дроту або порошку); джерела енергоживлення; системи подачі газів для розпилення; пульта керування. У деяких установках передбачена система охолодження. На рис. 37 наведена функціональна схема узагальненої установки для газотермічного напилювання.

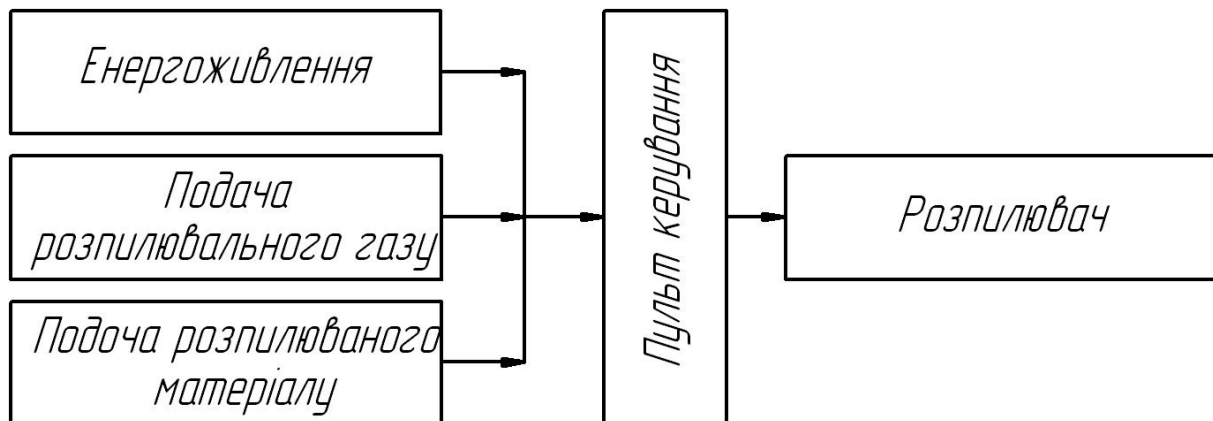


Рисунок 37 – Функціональна схема установки для газотермічного напилювання

ГОСТ 11966—78 передбачає різні типи апаратів для газотермічного напилювання. Регламентується також питома продуктивність установок і їхні основні параметри.

Приклад умовної позначки газополуменевого апарата для полуменевого нагрівання, ручного, дротяного з питомою продуктивністю 1,5 кг/год для алюмінію ГпПР—1,5—А (ГОСТ 11966—78), Умовне позначення газоелектричного плазмового апарата для механізованих робіт, порошкового з питомою продуктивністю для оксиду алюмінію 0,5 кг/год ГэПлСІІ—0,5—ОА (ГОСТ 11966—78).

Загальні вимоги, які пропонуються до установок (апаратів) для газотермічного напилювання: стабільність потоку напилюваних частинок заданої форми; можливість регулювання потоку напилюваних частинок за продуктивністю, температурою і швидкістю; забезпечення високих значень енергетичних коефіцієнтів розпилення (η_{ep}) і напилювання ($\eta_{e.n}$); можливість механізації й автоматизації процесу; висока довговічність і надійність; безпека і зручність в експлуатації; екологічна прийнятність; висока продуктивність процесу і питома продуктивність апарата; мі-

німальна матеріалоемність і невелика вартість.

Установки класифікують у залежності від методу напилування, виду підведеної енергії, рівня механізації і форми розпилюваного матеріалу.

5.2 Розпилювачі для установок газотермічного напилування

Розпилювачі призначені для створення потоку дисперсних частинок із заданою густиною, температурою і швидкістю. Ряд вимог, сформульованих для установок у цілому, відноситься і безпосередньо до розпилювачів. До розпилювачів існують специфічні вимоги: мала маса, особливо для ручних розпилювачів (до 2,5 кг) і зручність у роботі; відсутність перегріву при тривалому напилуванні; високі значення теплового ККД (μ_{mp}); можливість швидкої заміни зношених деталей; легкість введення розпилюваного матеріалу.

5.2.1 Плазмові розпилювачі

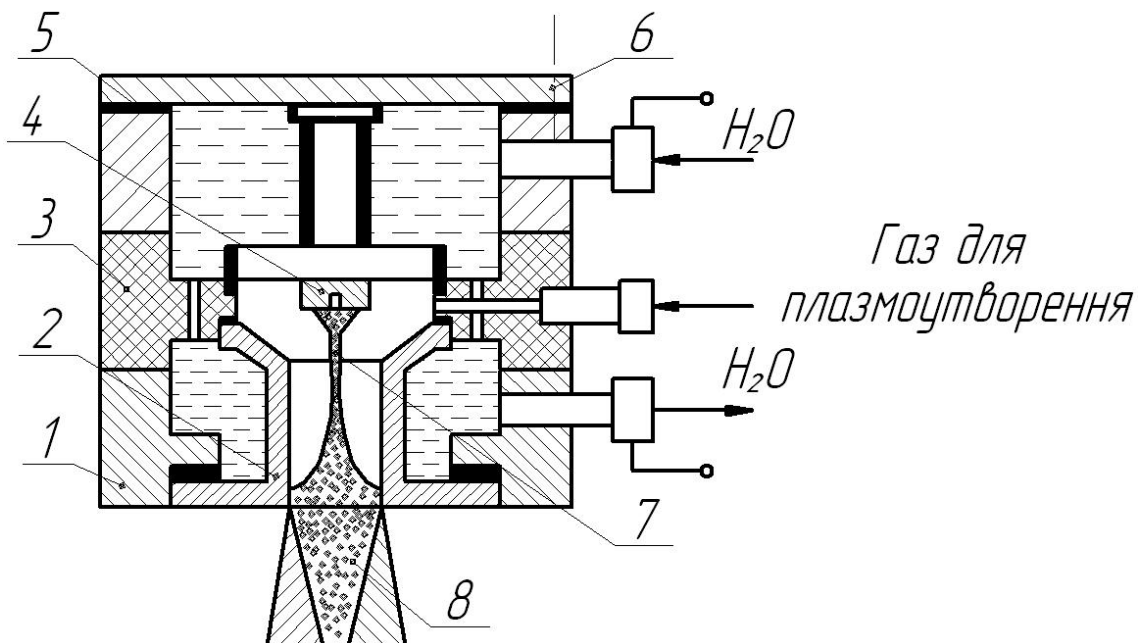


Рисунок 38 – Конструктивна схема плазмового розпилювача

Для плазмового напилування використовують, в основному, дугові плазмові розпилювачі. ВЧ- і СВЧ-плазмотрони, а також деякі інші, що знаходяться в стадії розробки й удосконалювання.

Плазмові розпилювачі повинні забезпечувати: потужність дуги на рівні 5—120 кВт; високий термічний ККД плазмотрона ($\eta_{mp} \geq 0,5$), ефективний ККД процесу ($\eta_i \geq 0,02—0,3$); універсальність щодо плазмотворювальних газів; стабілізацією параметрів режиму роботи;

В даний час розроблено велику кількість плазмових розпилювачів. Найпростіша конструктивна схема, що відтворює принцип його роботи,

наведена на рис. 38.

Корпус розпилювача 1 складається з трьох частин. Нижня частина зв'язана із соплом 2 плазмотрона. При живленні дуги прямої полярності (мінус на електроді) — це анодний вузол розпилювача. Верхня частина є стрижневим електродним вузлом. При прямій полярності — це катодний вузол плазмотрона. У його центральній частині розташовується електрод 4. Соплові і стрижневий електродний вузол пальника з'єднані між собою електроізоляційною прокладкою 3. Для герметизації, при інтенсивному охолодженні плазмотрона водою, передбачені прокладки 5 і кріпильні гвинти 6. Струмопровід і канал підведення води взаємопов'язані. Дуга 7 збуджується і горить між стрижневим електродом і соплом. Плазмоутворювальний газ подається в дугову камеру розпилювача через отвір у прокладці. Плазмовий струмінь 8, що витікає із сопла, і є джерелом нагрівання, розпилення і прискорення частинок.

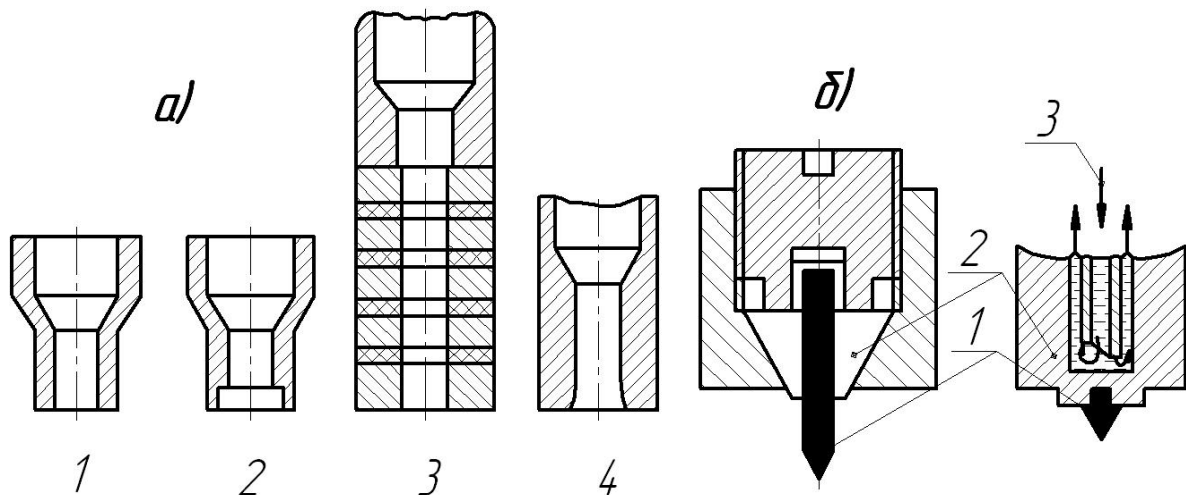


Рисунок 39 – Конструктивні схеми електродних вузлів у плазмових розпилювачах: а) 1— циліндричне гладеньке сопло; 2 — циліндричне сопло з уступом; 3 — сопло з міжелектродними вставками; 4 — профільоване сопло стрижневого електрода; б) 1 –вольфрамова вставка; 2 — тримач електрода; 3 — охолодження

Подача розпилюваного матеріалу на схемі не показана. Дріт подається на зріз сопла. Порошок вводять або в різні ділянки плазмового струменя, або в дугову камеру сопла (див. рис. 38).

Найбільш відповідальним елементом плазмового розпилювача є сопло. Саме конструкція сопла визначає довжину дуги і її стабільність, швидкість і характер витікання струменя, а отже, значною мірою тепловий ККД розпилювача й ефективний ККД процесу нагрівання розпилюваного мате-

ріалу. У плазмотронах із самоустановлювальною дугою канал сопла гладенький і має невелику довжину (10—30 мм). Для деякої фіксації дуги розрядний канал виконується з виступом. У плазмових пальниках з фіксованою дугою застосовують секціоновані сопла. Наявність секцій (5—10) дозволяє спочатку розтягти дугу, а потім сфокувати активну пляму на виході з каналу. Для одержання ламінарних і надзвукових плазмових струменів сопла профілюють. На рис. 39, а наведені конструкції сопел різного призначення. Тривалість роботи сопла невелика і складає 10—50 год. Тому конструкція розпилювача повинна забезпечувати легку і швидку його заміну. У цьому відношенні перспективні так звані «сухі» сопла, що не потребують при зміні розгерметизації плазмотрона.

Сопла виготовляють, в основному, з міді, розраховують на максимальне охолодження водою, краще дистильованою, по замкнутому циклу. Для зменшення ерозії каналу сопла застосовують вставки з вольфраму. Це особливо необхідно при роботі плазмотрона в режимі зворотної полярності («мінус» на соплі).

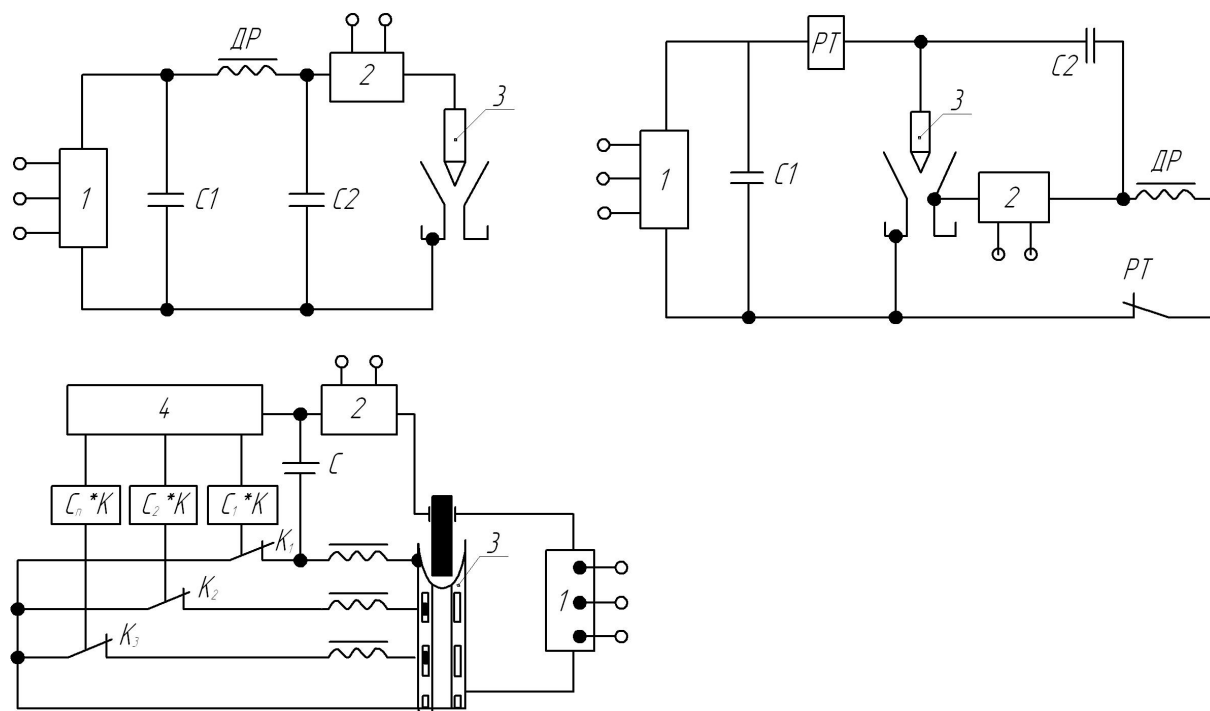


Рисунок 40 – Електричні схеми пристроїв для збудження дуги: а — осцилятор послідовного підключення; б — осцилятор рівнобіжного підключення; у — багатоступінчаста схема збудження дуги; 1 — джерело живлення дуги; 2 — осцилятор; 3 — плазмовий розпилювач; 4 — блок керування

Іншим відповідальним елементом плазмового розпилювача є стрижневий електрод. Найчастіше його виготовляють з вольфраму у вигляді вставки з інтенсивним охолодженням водою (рис. 39, б). При використанні

окисних газів вольфрам заміняють цирконієм або гафнієм. Оксидна плівка, що утвориться на поверхні такого електрода тугоплавка і перешкоджає його руйнуванню. При роботі плазмотрона в режимі зворотної полярності стрижневий електрод (анод) виготовляють з міді. Слід зазначити необхідність високої співвісності електродів.

Системи збудження дуги в плазмових розпилювачах. Застосовують дві системи збудження: електричну і механічну. Електрична система є безконтактною. За допомогою малопотужного високовольтного, високочастотного генератора, який називають осцилятором, здійснюється пробій газового проміжку між стрижневим електродом і соплом. При цьому створюється початкова газопровідна область, здатна забезпечити виникнення струмопровідності основного розряду. На рис. 40, *а, б* показані схеми підключення осциляторів, що випускаються електротехнічною промисловістю. Для запобігання джерела живлення дуги від влучення на нього пробивної напруги передбачений захист у вигляді індуктивних DP і ємнісних C_1 опорів. При рівнобіжному включенні після збудження дуги осцилятор відключається за допомогою реле струму PT . Осцилятор послідовного включення дає менші радіоперешкоди і не шунтує дугу. Рівнобіжне включення осцилятора можливе на дугу будь-якої потужності.

У плазмотронах з міжелектродними вставками (MEB) застосовують багатоступінчасту схему збудження дуги (рис. 40, *в*). Реле часу K підключені до контакторів K в певній послідовності. Спочатку спрацьовує контактор DO_1 через збуджену початкову дугу. Далі спрацьовує контактор K_2 з одночасним відключенням контактора K_1 і т.д. до останньої MEB , що включається контактором K_n і реле часу $C_n—K$.

Механічна система збудження пов'язана з замиканням дугового проміжку. Відомі різні способи замикання: безпосереднім торканням електрода стінки сопла; плавкими металевими вставками в міжелектродний простір; подачею в дуговий проміжок додаткового електрода й ін. У плазмових розпилювачах, які зараз виготовляють, застосовують безконтактну схему збудження.

5.2.2 Газополуменеві розпилювачі

У залежності від способу подачі горючого газу розрізняють інжекторні і безінжекторні роспилювальні головки. На рис. 41, *а* наведена зразкова конструктивна схема інжекторної головки. У корпусі головки 1 розміщені кільцевий канал і перпендикулярно до нього подовжні канали по периферії. Центральний канал з наконечником 2 призначений для подачі розпилюваного матеріалу. Корпус головки має газове сопло 3 з розсікачем пальної суміші. Для дротового й іноді порошкового напилювання передба-

чене повітряне обтискне сопло 5 з повітряним ковпаком 4 і відповідні комунікаційні канали. Для подачі горючого газу в змішувальну камеру 6 передбачено інжектор 7. До інжектора підводиться кисень під тиском 0,2—0,4 МПа. На виході з інжектора розвивається висока швидкість витікання кисню і відповідно до цього місцеве розрідження.

Крізь периферійні канали інжектора відбувається підсмоктування горючого газу. При наявності інжектора розпилювач може працювати із застосуванням горючого газу, який подається під низьким тиском. Це важливо для ацетилену, який виробляють на місці роботи від переносних ацетиленових генераторів низького тиску (0,005—0,01 МПа).

При більш високих тисках горючого газу роль інжекції знижується. У випадку рівних або близьких тисків кисню і горючого газу може відбуватися безінжекторна подача (див. рис. 41, б). Наявність інжектора робить розпилювач універсальним за тиском горючого газу. На виході з газового сопла утворюється полум'я, що є джерелом нагрівання, розпилення і прискорення розпилюваних частинок. Розпилювальну головку закріплюють у корпусі апарата. Для напилювання внутрішніх поверхонь застосовують змінні кутові головки з подовжувачами. На відміну від плазмових пальників розпилювальні головки складають найчастіше невід'ємну частину газополуменевого апарата. Розпилювальні головки не взаємозамінні.

5.2.3 Детонаційно-газові розпилювачі

Основним елементом детонаційно-газового розпилювача є вибухова або детонаційна камера. Конструктивно вона являє собою, найчастіше, стовбур постійного або змінного перерізу. У розпилювальній камері відбувається детонаційний вибух і, як наслідок його, високотемпературний, високошвидкісний потік пальної суміші разом з напилюваним порошком. У найпростішому варіанті вибухова (розпилювальна) камера є довгою трубою з отворами для введення робочої газової суміші, порошку і запального пристрою. Для роботи в автоматичному режимі потрібне охолодження водою.

Вибухові розпилювальні камери класифікують: за способом введення порошку: з осьовою і радіальною подачею; за способом ініціювання суміші — із прямим і форкамерним запалюванням; за способом подачі вибухової суміші — із прямим змішуванням і попереднім; за способом створення рушійної сили порошку — з інжекторною і примусовою подачею; за періодичністю введення газової суміші — з періодичним введенням і безперервним; за конструктивними особливостями: з камерою — стовбуром постійного і змінного перерізу; із прямолінійним стовбуром і у вигляді змішувача.

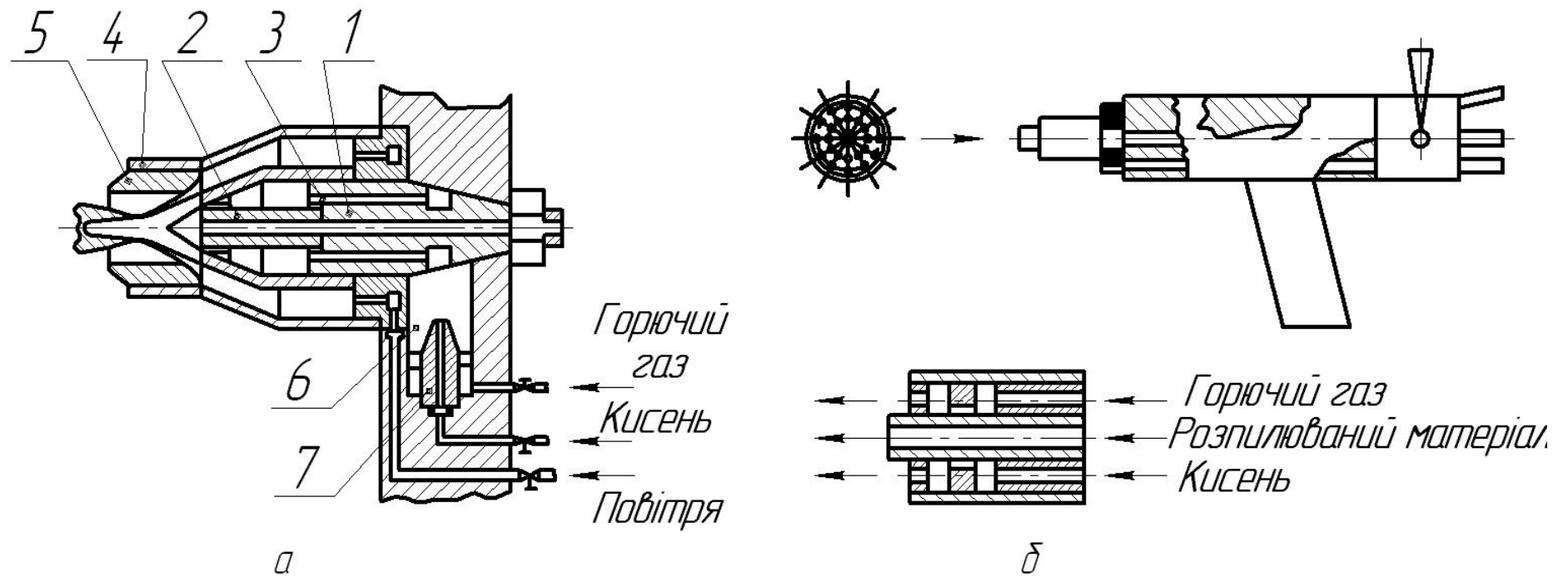


Рисунок 41 - Конструктивна схема газополуменевого інжекторного (а) і безінжекторного (б) розпилювачів

Є й інші ознаки класифікації. Усе це свідчить про велику кількість можливих конструктивних рішень детонаційно-газових розпилювачів.

Конструктивна схема розпилювальної вибухової камери з інжекторною осьюовою подачею порошку, форкамерним запалюванням, прямим стовбуром постійного перерізу, показана на рис. 42, *a*. Вибухова камера 6 через змішувальну камеру 5 з'єднана з форкамерою 3. Вибухову суміш подають через штуцер 10 у замкнуту кільцеву порожнину з отворами 9 і далі у форкамеру. Отвори виконують таким чином, щоб навколо порошкового сопла 2 створювалося розрідження і здійснювалася інжектуюча подача порошку з живильника через штуцер 1. Вибухову суміш у форкамері підпалюють за допомогою свічки 4, на яку подається високовольтний розряд від спеціального джерела. Горюча суміш з порошком з форкамери направляється в змішувальну камеру 5 і далі в стовбур розпилювача. Інжекторний пристрій і форкамера є найбільш відповідальними вузлами розпилювача. Від них значною мірою залежить сумішоутворення порошку з газом, формування детонаційної хвилі і двофазного потоку. Наявність форкамери надійно захищає свічку від можливого влучення на неї порошкової суспензії. Зворотний рух порошкових частинок обумовлений розрідженням у камері після вибуху газової суміші. Для охолодження форкамери і вибухової камери застосовують охолодження водою 7 через штуцери 8.

На рис. 42, *б* наведена схема детонаційно-газового розпилювача з форкамерним запалюванням, радіальною інжекторною подачею порошку зі стовбурами змінного перерізу. Характерною ознакою такого розпилювача є наявність двох стовбурів: переднього вихідного з довжиною L_1 і заднього з довжиною L_2 . Між собою стовбури з'єднані камерою 4. Робочу суміш подають у форкамеру 1, де здійснюють її збудження свічкою 2. У задній камері суміш детонує, і на виході в камеру змішування продукти горіння мають надзвукову швидкість. Кільцева частина задньої камери і камера змішування утворюють між собою інжектуючий вузол. Порошок за рахунок інжекції надходить у змішувальну камеру з живильника через радіальні отвори 3. Зі змішувальної камери продукти детонації зі зваженим порошком направляються в передню камеру розпилювача. Проходячи циліндричну ділянку цієї камери, потік турбулізується. При цьому створюються сприятливі умови для подальшого перемішування порошку з продуктами згорання. У розширюваній частині суміш отримує додаткову швидкість. Наявність переднього відокремленого стовбура дозволяє мати строго задану ділянку розгону розпилюваних частинок. Для напилювання багатошарових покриттів передбачено кілька вхідних штуцерів, пов'язаних з різними порошковими живильниками. Для запалювання суміші необхідна певна енергія — енергія запалювання. Мінімальна енергія запалювання при ат-

мосферному тиску відповідає стехіометричному складові суміші $C_2H_2—O_2$ і складає $10^{-4}—10^{-6}$ Дж. З підвищенням тиску і температури ці значення стають ще менші. Отже, для первісного порушення можуть бути використані автомобільні свічки з енергією іскрового розряду 0,05—0,2 Дж.

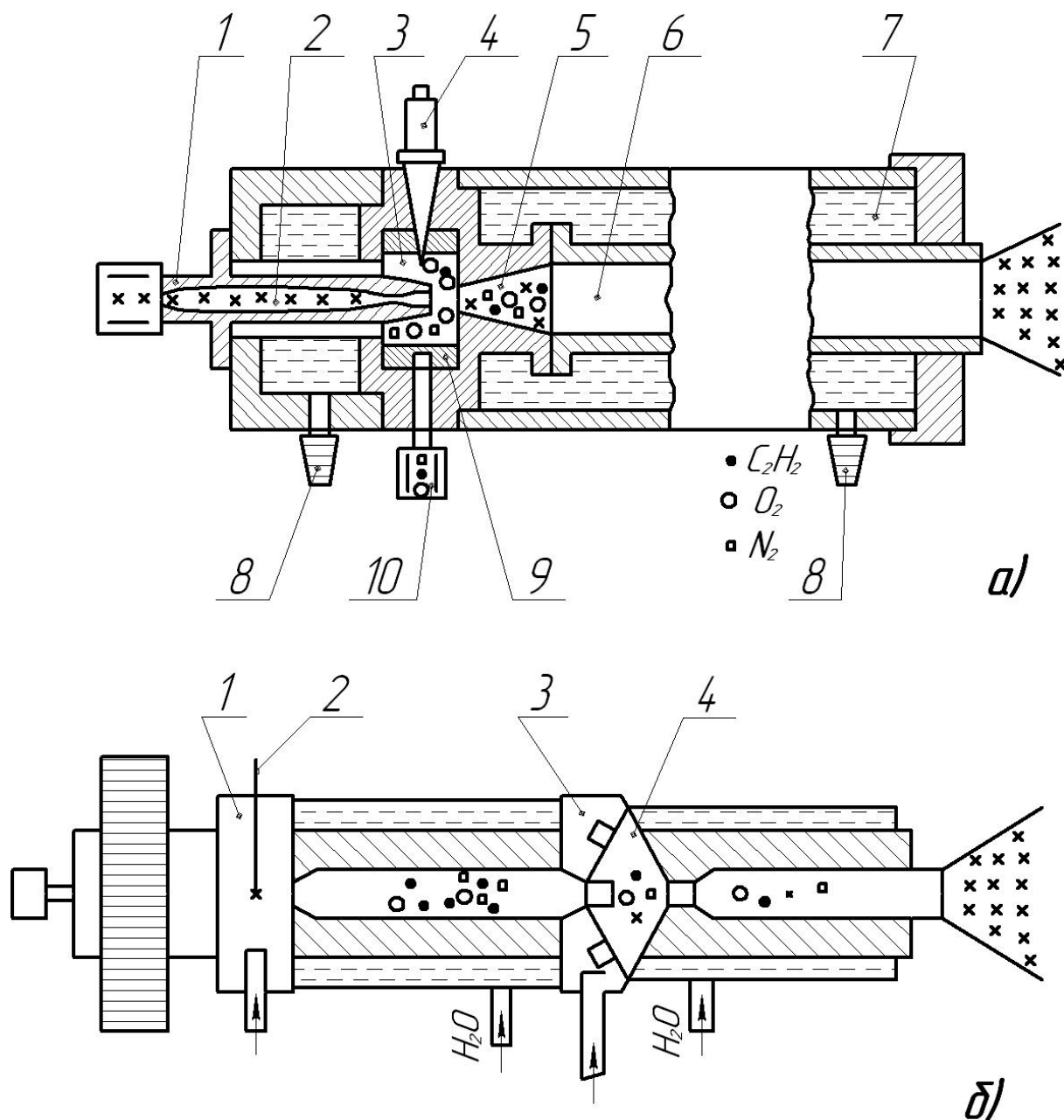


Рисунок 42 – Конструктивна схема детонаційно-газового розпильовача з осовою інжекторною подачею порошку і форкамерним запалюванням (а), а також з радіальним введенням порошку зі стовбуром змінного перерізу (б)

Детонаційні розпилювальні камери виготовляють з високолегованих сталей. Внутрішня поверхня, особливо передньої частини стовбура, повинна бути гладенькою і без виступів. При роботі розпилювача форкамера, детонаційна камера й інші вузли нагріваються. Це приводить до передчасної детонації суміші і нестійкості процесу. Тому в розпилювачі передбачене водяне охолодження теплонапружених елементів, що обмежує їх перегрівання понад 673 К.

У сучасних розпилювачах передбачені змінні стовбури різного діаметра і довжини. Це дозволяє отримувати оптимальні параметри потоку напилюваних частинок.

5.2.4 Електродугові металізаційні розпилювачі

Приблизна конструктивна схема розпилювальної головки двохелектродного дугового металізатора показана на рис. 43, а. У роз'ємному корпусі головки 1 з електроізоляційного матеріалу розміщуються напрямні канали 3 для подачі електродного дроту. У центральній частині знаходиться канал для подачі розпилювального газу і закінчується соплом 11, що формує металізаційний струмінь. На вході напрямних каналів встановлюють струмопровідні шини 5, а на виході контактні притискачі 7. Для подачі дроту застосовують механізм 4. На корпус головки кріпиться газовий ковпак 8 зі змінною вставкою 10 і захисним кожухом 9. Розпилювальна головка закріплена в корпусі апарата 2. Багато розпилювальних головок не мають газового ковпака і захисного кожуха. Особливо це відноситься до верстатних апаратів. При експлуатації необхідно особливу увагу звертати на контактні струмопровідні притискачі. Для забезпечення надійного електричного контакту з дротом необхідне їхнє періодичне зачищення і швидка заміна.

5.2.5 Високочастотні (ВЧ) металізаційні розпилювачі

Конструктивна схема ВЧ-розпилювача наведена на рис. 43, б. Розпилювальна головка складається з таких основних елементів: індуктора 1; вкладиша 2; центрального напрямного каналу для подачі розпилювального дроту 3 від механізму 6. У центральній частині вкладиша розташований гребінь концентрації вихрових струмів, який одночасно виконує роль сопла, що формує потік металізаційного струменя. Розпилювальна головка за допомогою проміжної вставки 4 кріпиться до корпусу апарата 5. Передбачено охолодження водою вкладиша й індуктора.

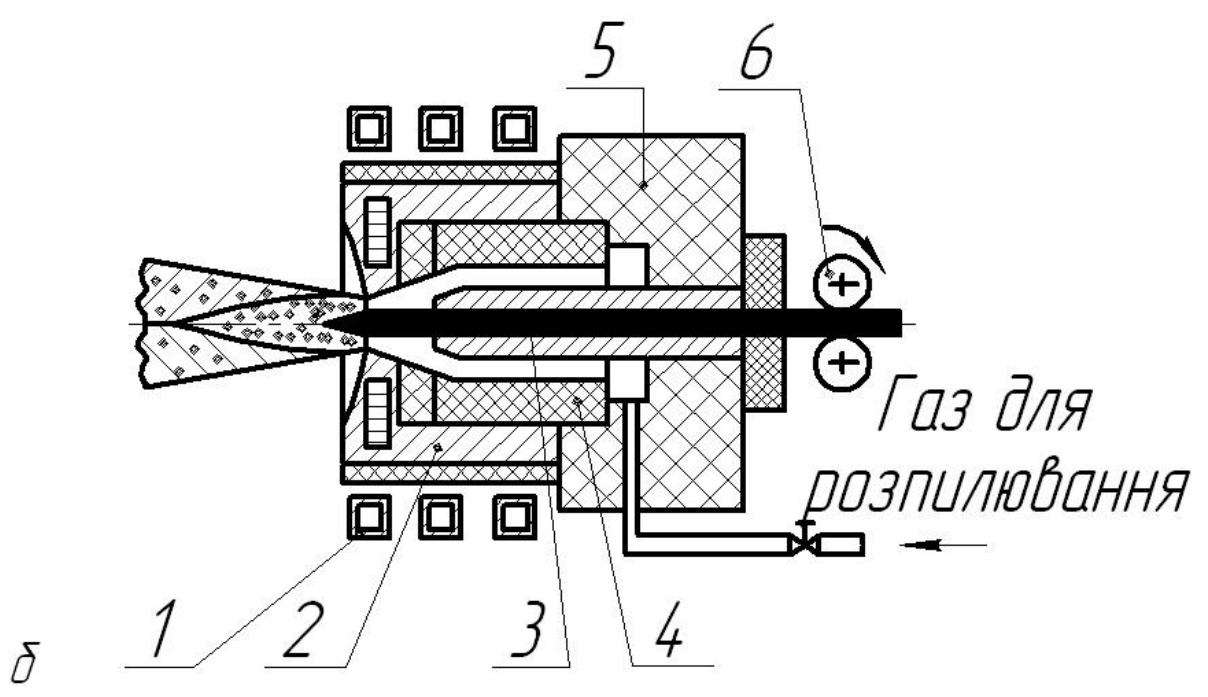
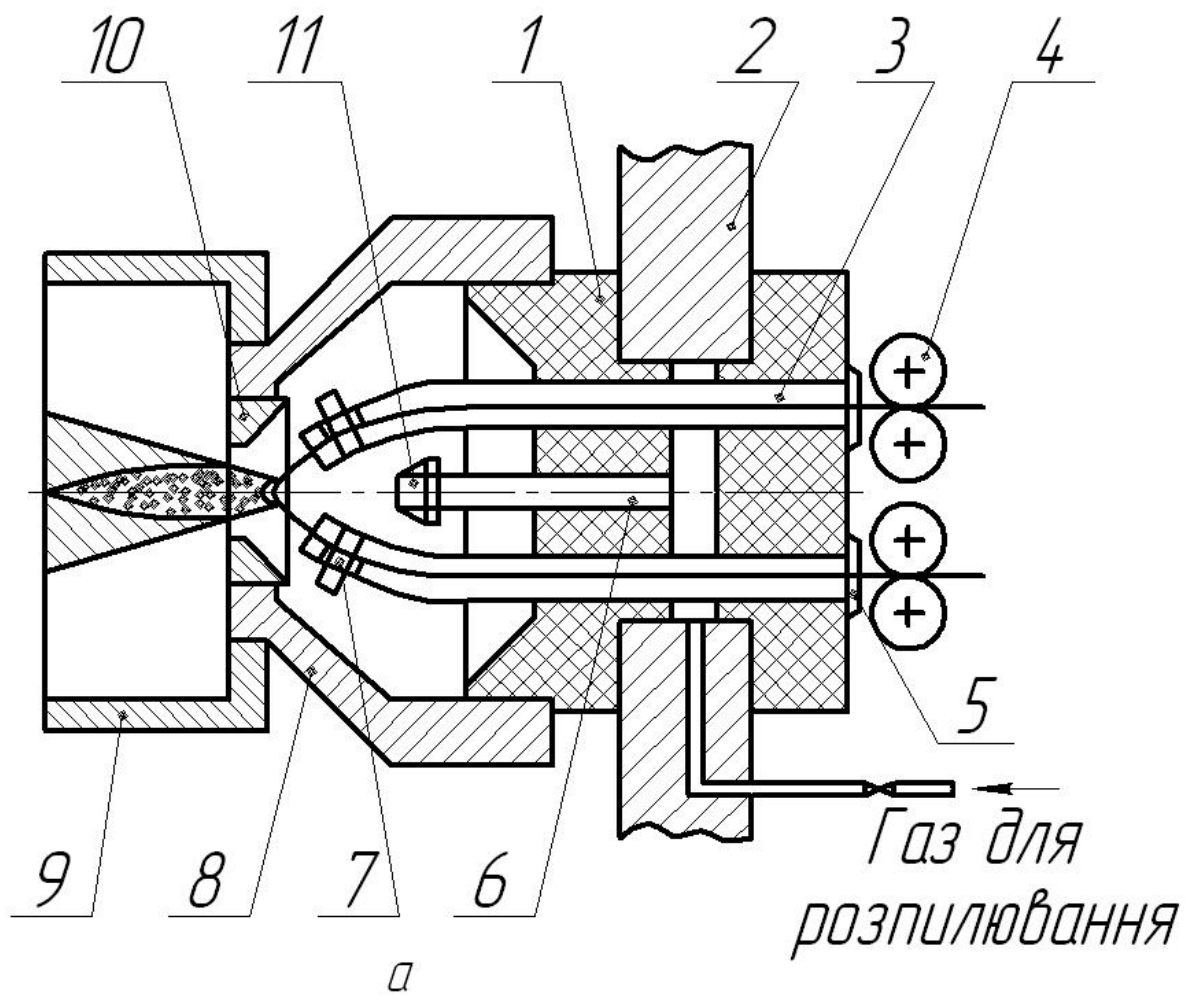


Рисунок 43 – Конструктивна схема розпилювальної головки електродугового (а) і високочастотного (б) металізатора

5.3 Механізми подачі розпилюваного матеріалу в установках для газотермічного напилювання

Особливістю газотермічного напилювання є механізована подача в розпилювач порошку, дроту або стрижнів. Цим і визначається призначення механізмів подачі. Загальні вимоги до них такі: стабільність подачі; широкі межі регулювання швидкості подачі розпилюваного матеріалу; компактність і мала маса для механізмів, з'єднаних з розпилювачем (у ручних апаратах); можливість автоматизації подачі розпилюваного матеріалу у залежності від параметрів процесу напилювання; простота конструкції, а також надійність і довговічність.

У залежності від виду розпилюваного матеріалу їх підрозділяють на дві групи.

У першу групу входять механізми подачі порошків; у другу — механізми подачі дроту або стрижнів. Механізми подачі встановлюють в одному корпусі з розпилювачем і окремо від нього. В останньому випадку здійснюється дистанційна подача. Однокорпусне виконання особливо характерне для деяких ручних апаратів.

5.3.1 Механізми подачі порошку

Порошкові живильники або дозатори використовують для плазмового, газоплазмового і детонаційно-газового напилювання. Звичайно застосовують таку схему подачі: бункер-дозатор-розпилювач (рис. 44). Бункер і дозатор розміщують в одному корпусі. Для подачі порошку до розпилювача використовують транспортувальний газ. Однак зустрічаються способи подачі порошку і без транспортуючого газу, наприклад, самопливом або за рахунок інжекції розпилювального струменя.

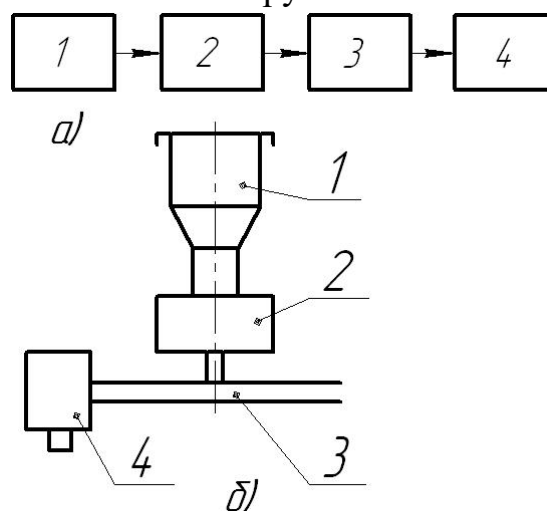


Рисунок 44 – Функціональна схема механізму подачі порошку (а) і його компонування (б): 1 — бункер; 2 — дозатор; 3 — транспортна магістраль; 4 — розпилювач

Для дистанційної подачі порошку застосовують гнучкі шланги з мінімальним гідравлічним опором, особливо біля стінок шлангів. Добре зарекомендували себе хлорвінілові трубки. Подача по них газопорошкової суспензії досить стабільна і надійна. В усіх випадках необхідно прагнути до мінімальної довжини комунікаційного каналу. Часто його довжина не перевищує 1 м. Винятково важливе значення має контроль швидкості подачі порошку.

Розрізняють порошкові живильники з безперервною подачею й імпульсною. Для детонаційно-газового напилювання застосовують обидва типи живильників.

Найбільш проста схема порошкового живильника пневматичного типу наведена на рис. 45, а. Розпилювальний порошок 1 засипають у бункер 2 через кришку 3. Під дією власної маси порошок висипають у дозуючий вузол 8 і далі в транспортуючу магістраль 7.

Дозуючий вузол являє собою циліндричний отвір з голкою 4, що переміщається в ньому. При переміщенні голки в осьовому напрямку змінюється прохідний переріз Δ для зсипання порошку. Щоб виключити зависання порошку в прохідному перерізі, застосовують різні способи, наприклад, вібрацію бункера. У приведеній схемі зависання усувається подачею в зазор стиснутого газу по центральному отвору голки.

По каналі 7 подається стиснутий газ, який називається транспортуючим. До розпилювача газопорошкова суміш надходить по гнучкому шлангу ($G_{mz} + G_n$). Для вирівнювання тиску в бункері і дозуючому вузлі передбачена врівноважувальна трубка 6. Продуктивність подачі порошку в розглянутій схемі визначається витратою транспортуючого газу ($G_{m.z}$) і зазором Δ у дозуючому вузлі (рис. 45, а). В установках для порошкового напилювання застосовують значно більш досконалі конструкції живильників, що забезпечують високу рівномірність і точність подачі порошку, що досягає $\pm 5\%$.

На рис. 45, б наведена схема порошкового живильника роторного типу. Відмітною рисою такого живильника є конструкція ротора 1 у дозуючому вузлі. На твірних ротора є подовжні канавки. Порошок з бункера зсипається в канавки і переноситься в транспортну магістраль. Для обертання ротора використовують малогабаритний електродвигун, найчастіше постійного струму із широким діапазоном регулювання числа оборотів. Регульовальна характеристика дозатора наведена в залежності від частоти обертання двигуна n . У промислових конструкціях застосовують і інші типи роторних пристроїв.

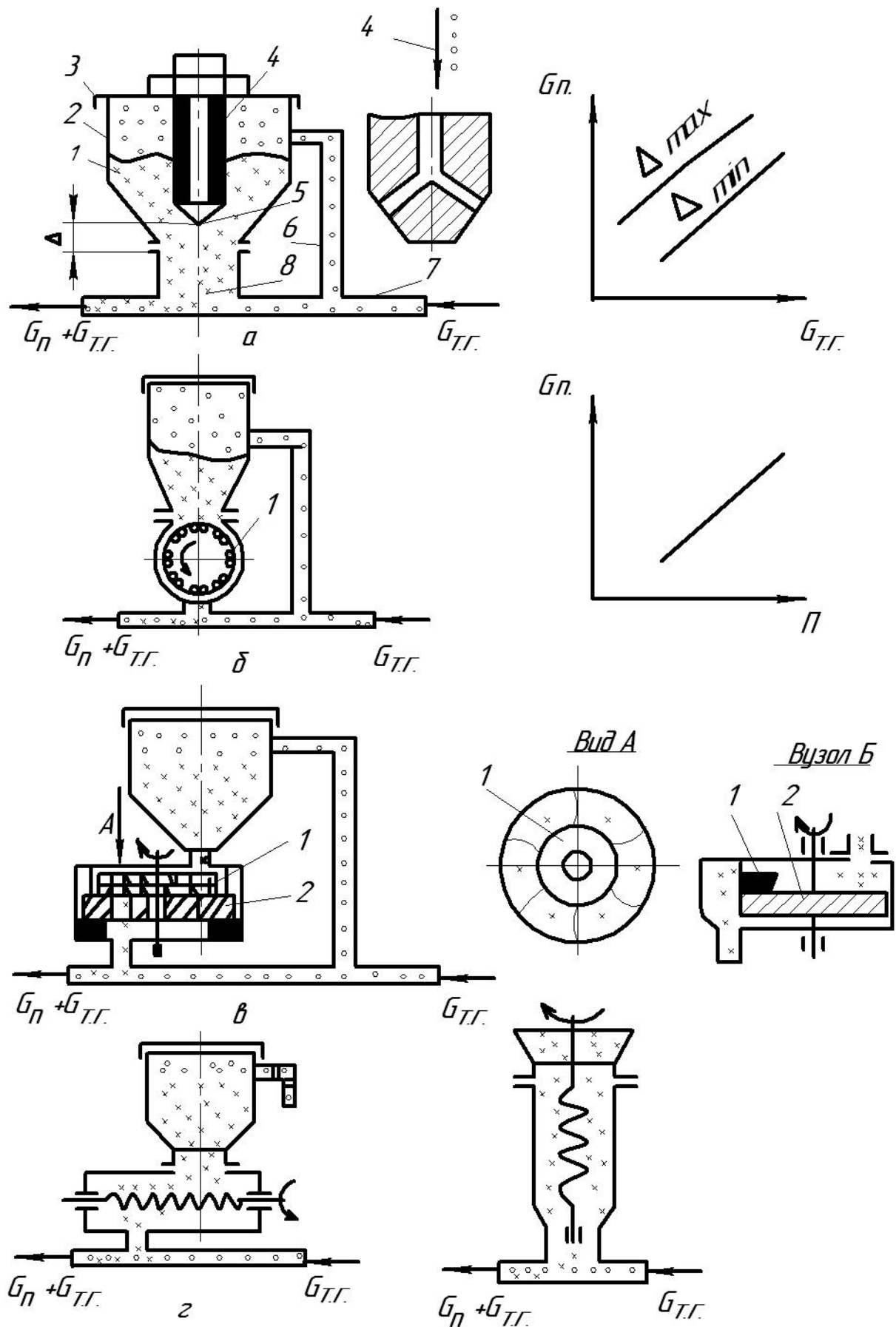


Рисунок 45 – Схемы порошковых живильників: а — пневматического типа; б — роторні; в — дискові; г — шнекові

На рис. 45, *в* наведені широко використовувані схеми порошкових живильників з дозатором дискового типу. При обертанні диск 1 захоплює порошок, що зсипався з бункера, і переносить його в приймальний пристрій транспортної магістралі. На схемі показана конструкція подавального диска виконаного у вигляді колеса з вигнутими лопатками. У нерухомому диску 2 є отвір, через який порошок зсипають у транспортну магістраль. Розповсюджений й інший варіант дискового дозатора (вузол У). У цій конструкції порошок скидають з рухомого диска 2 спеціальним щітковим пристроєм 1. Вихідні характеристики дискових живильників аналогічні роторним.

На рис. 45, *г* наведені схеми порошкового живильника шнекового типу. Відрізняються вони, головним чином, конструкцією шнекового дозуючого пристрою. Поряд з горизонтальним шнеком застосовують і вертикальні шнекові дозатори. Регульовальна характеристика аналогічна роторним і дисковим живильникам.

Розглянуті схеми, як і ряд інших, в основному, застосовуються при плазмовому і газополуменевому напилюванні.

Для детонаційно-газового напилювання конструкції порошкових живильників специфічні. Наприклад, при малих комунікаційних відстанях між живильником і розпилювальною вибуховою камерою застосовують механізми подачі порошку всмоктувальної (інжекторної) дії. Однак більшість установок комплектується живильниками нагнітальної дії, аналогічними за принципом роботи тим, що були розглянуті раніше. При детонаційно-газовому напилюванні в більшості розпилювачів використовується циклічна подача порошку. У ряді установок передбачена безперервна подача.

Конструкції порошкових живильників для детонаційно-газового напилювання повинні забезпечувати: стабільну циклічну (0,5—4 *циклів/с*) подачу порошку розміром 5—30 *мкм*; строго задану дозу порошку на кожен цикл (100—400 *мг*); невеликий об'єм транспортувального газу, що всмоктується з порошком, (10—15 % об'єму вибухової камери або 3—4 % (об'ємн.) горючого газу); надійний захист дозатора від зворотних ударів; рівномірність розподілу порошкових частинок у потоці продуктів розпаду вибухової суміші; можливість ручного і дистанційного автоматичного керування як кількістю транспортуючого газу, так і порошку; вільну текучість порошку при заповненні мірного об'єму в дозаторі.

У вітчизняних і закордонних установках застосовують велику кількість живильників різних за конструкцією.

5.3.2 Механізми подачі дроту (стрижнів)

При плазмовому, газополуменовому і інших методах напилювання покриття з використанням дроту, стрижнів, гнучких шнурів і застосовують різні механізми подачі. Велику роль відіграє рівномірність подачі і фіксоване положення торця дроту, що плавиться. Тому часто в механізмах подачі передбачені пристрої для виправлення дроту. Найбільш загальна функціональна схема механізму подачі дроту зображена на рис. 46 а. Приводні двигуни, які використовують у механізмах подачі, поділяються на дві групи: пневмоприводи й електроприводи. Компонування механізму подачі показані на рис. 46, б. Механізм встановлюють або в одному корпусі з розпилювачем, або окремо від нього. У першому варіанті використовують принцип тягової подачі дроту, в другому — принцип штовхання по напрямних каналах.

Пневмоприводи в механізмах подачі. В даний час пневмоприводи застосовують тільки в ручних апаратах для газополуменового напилювання й електродугової металізації, там, де для розпилення дроту використовують стиснене повітря або інший газ. У пневмопривод вбудовують малогабаритну турбіну або ротаційний двигун.

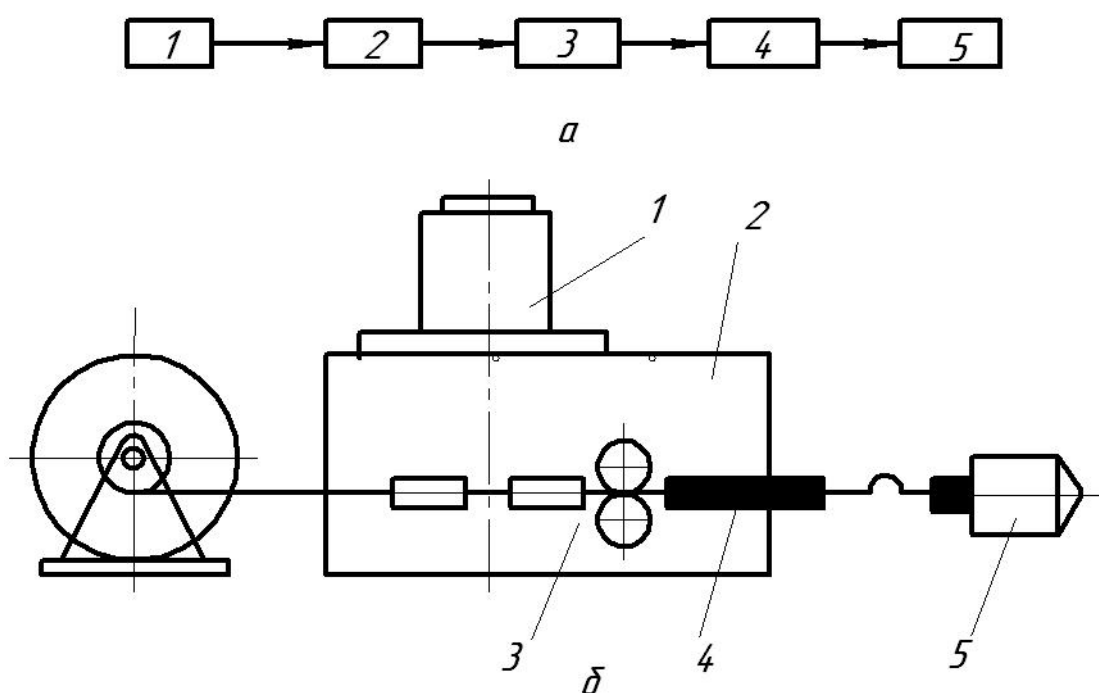


Рисунок 46 – Функціональна схема механізму подачі дроту (а) і його компонування (б): 1 — приводний двигун; 2 — редуктор; 3 — подавальні ролики; 4 — механізм виправлення; 5 — розпилювач

Конструктивна схема ротаційного двигуна наведена на рис. 47, а. Стиснене повітря або інший газ через отвір у статорі 1 подається в робочу камеру 2. Простір камери утворюється між лопатками за рахунок ексцентрично розташованого ротора 3, що є приводним валом механізму подачі. У роторі по прорізах вільно переміщуються лопатки 4. Відцентрові сили забезпечують надійне підтискання лопаток до внутрішньої поверхні статора. Стиснутий газ, потрапляючи в простір між двома лопатками, тисне на них. Сила, що діє на лопатку, пропорційна її площі. Ротор починає обертатися убік лопатки, займає в даний момент більшу площу (див. рис. 47, а за годинниковою стрілкою). Для встановлення необхідного числа оборотів служить гальмова система, що складається з гальмової колодки 6 і гальмового диска 5, який вільно переміщається по осі вала ротора. Між колодкою і диском установлена пружина 7, що компенсує силу, яка змінюється при натисканні диска на колодку, а, отже, і задані оберти двигуна. Гальмівний диск приводиться в осьове переміщення обертовими вагами 8, розташованими шарнірно на кінці вала ротора. При прагненні зайняти вертикальне положення вони натискають на ковзну втулку гальмівного диска.

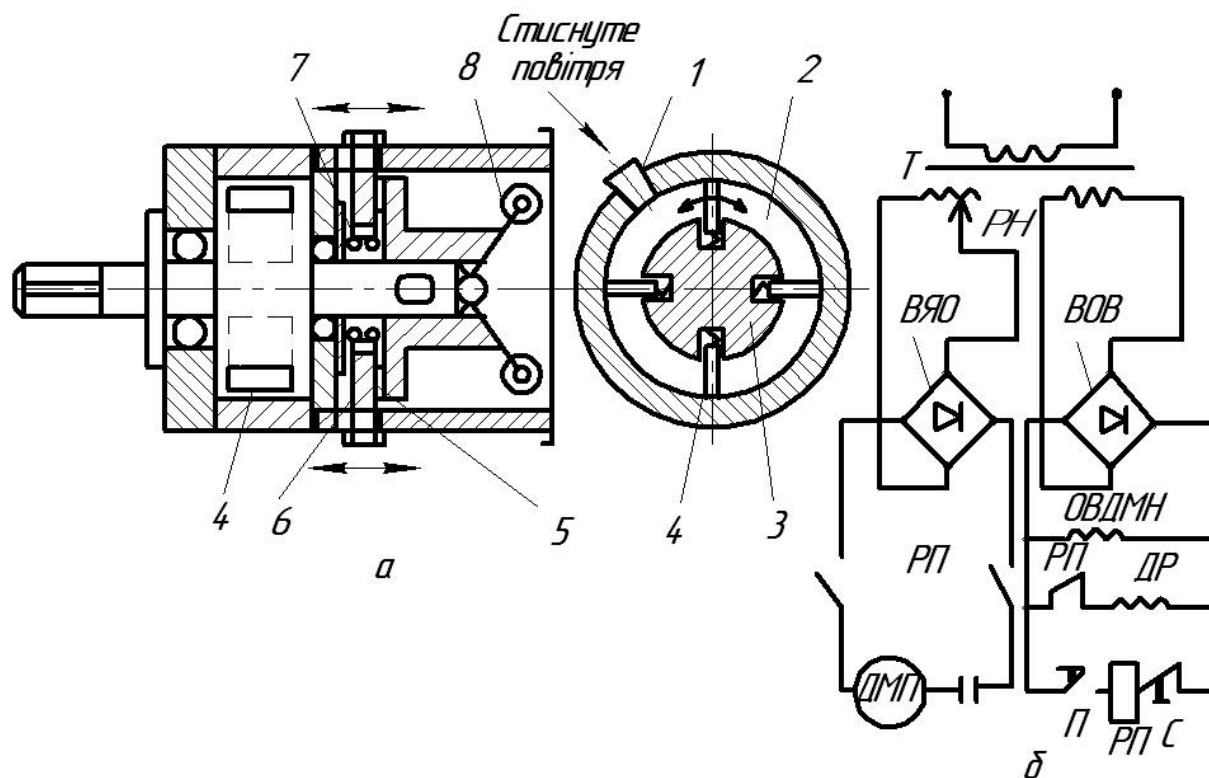


Рисунок 47— Схема приводів у механізмах подачі дроту: а — пневмопривід; б — електропривід

Більш надійні в пневмодвигунах індукційні регулятори швидкості. Швидкість обертання регулюється за рахунок кільця, що охоплює лопатки ротора. Із просуванням магніту змінюються вихрові струми, які наводяться

в кільці. Завдяки цьому змінюється індуктивність у зазорі і, отже, обороти двигуна.

Переваги пневмоприводів полягають у невеликій масі, великій частоті обертання (до 25000 *об/хв*), досить високій потужності (60—90 *Вт*). На обертання витрачається той же газ, що і на розпилення дроту.

Недоліки пов'язані зі значними труднощами статичного і динамічного балансування обертової частини двигуна, а також зносом фрикційних гальмівних пристроїв і появою продуктів зносу.

Пневмоприводи, які застосовують в механізмах подачі дроту, не відносяться до комплектуючих виробів. Їх виготовляють відповідно до конкретних апаратів.

Електроприводи в механізмах подачі. На відміну від пневмоприводів електроприводи значно простіші у виготовленні. Їх використовують як комплектуючі вироби і їх легко можна замінити. Стаціонарні установки для всіх методів напилювання містять у механізмах подачі дроту тільки електропривод. По гнучких шлангах (напрямних каналах) дріт подається від механізму подачі до розпилювачів. При цьому відстані між ними можуть досягати 3 м і більше. При подачі тонкого дроту доцільно використовувати механізми тягового типу із закріпленням його безпосередньо на розпилювачі. Товстий дріт подають механізмами штовхального типу з відділенням його від розпилювача.

В електроприводах, в основному, застосовують двигуни постійного струму. При цьому використовують нерегульований редуктор або регульований з невеликою кількістю ступенів.

Регулювання швидкості подачі дроту здійснюють зміною напруги на якірній обмотці двигуна. Для цих цілей застосовують автотрансформаторні і тиристорні регулятори напруги (РН).

На рис. 47, б показана принципова електрична схема керування двигуном постійного струму з автотрансформаторним регулятором напруги. Усі ланцюги електропривода живляться від знижувального трансформатора Т. Від випрямляча якірної обмотки ВЯО напруга через реле РП подається на якірну обмотку двигуна механізму подачі ДМП. Його регулювання здійснюється регулятором напруги РН. Живлення обмотки збудження ОВДМП походить від випрямляча ВОВ. Від цього ж випрямляча здійснюється живлення допоміжних ланцюгів: котушки реле РП, дроселя ДР, кнопки «Пуск» (П) і «Стоп» (С). подача дроту починається з натискання кнопки «Пуск». Велике поширення в електроприводах отримують схеми з регулятором напруги тиристорного типу. Використовуючи фазообертачі або інші засоби, регулюють напругу, що подається на ДМП. В іншому робота схеми аналогічна раніше розглянутій.

ЛІТЕРАТУРА

1. Владимирский Т. А., Жарков А. Ф., Лопинский В. Н., Мельников О. Е. Газопламенная обработка материалов на железнодорожном транспорте. – М.: Транспорт, 1977. – 200 с.
2. Витязь П. А., Ивашко В. С., Манойло Е. Д. Теория и практика газопламенного напыления. – Мн.: Наука і техника, 1993. – 295 с.
3. Шоршоров М. Х., Харламов Ю. А. Физико-химические основы детонационно-газового напыления покрытий. – М: Наука, 1978. –227 с.
4. Бартенев С. С., Федько Ю. П., Григоров А. И. Детонационные покрытия в машиностроении. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1982. – 215 с.
5. Порошковая металлургия и напыленные покрытия / Под ред. В. С. Митина. – М.: Металлургия, 1987. –792 с.
6. Кудинов В. В., Пекшев П. Ю., Белашенко В. Е. й др. Нанесение покрытий плазмой – М.: Наука, 1990. – 408 с.
7. Кудинов В. В. Плазменные покрытия. – М.: Наука, 1977. –184 с.
8. Кулик А. Я., Борисов Ю. С., Мнухин А. С., Никитин М. Д. Газотермическое напыление композиционных порошков. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1985. – 199 с.
9. Борисов Ю. С., Борисова А. Л. Плазменные порошковые покрытия. – К: Техніка, 1986.–223с.
10. Мовчан Б.А., Малашенко И.С. Жаростойкие покрытия, осаждаемые в вакууме. – К.: Наук, думка, 1983. – 230 с.
11. Аппен А.А. Температурустойчивые неорганические покрытия. – Л.: Химия, 1976. –296 с.
- 12.Макаров З. Л. Холодные трещины при сварке легированных сталей. – М.: Машиностроение, 1981. – 247 с.
13. Антропов Л. И., Лебединский Ю. Н. Композиционные электрохимические покрытия и материалы. – К.: Тэхника, 1986, – 200 с.
14. Осаждение из газовой фазы / Под ред. К. Пауэлла, Дж. Оксли, Дж. Блочера: – М.: Атомиздат, 1970. – 427 с.
- 15.Шатинский В. Ф., Нестеренко А. И. Защитные диффузионные покрытия. – К.. Наук, думка, 1988. – 272 с.
- 16.Самсонов Г. В., Верхотуров А. Д., Бовкун Г. А., Сычев В. В. Электроискровое легирование металлических поверхностей. – К.: Наук. думка, 1976. –220 с.
17. Повышение качества поверхности и плакирование металлов: Справочное издание. Пер. с нем. / Под ред. Кнаушнера А.– М.: Металлургия, 1984.– 368 с.
18. Анциферов В.Н., Бобров Г.В., Дружинин Л.К. и др. Порошковые по-

крытия и напыленные покрытия. Учебник для вузов. – М.: Металлургия, 1987. – 792с.

19. Корж В. М., Кузнецов В. Д., Борисов Ю. С., Ющенко К. А. Нанесення покриття: Навчальний посібник / За редакцією академіка НАН України К. А. Ющенка. – К.: Арістей, 2005. – 204 с.
20. Кузнецов В. Д., Пащенко В. М., Ющенко К. А., Борисов Ю. С. Фізико-хімічні основи інженерії поверхні: навч. посібник. – К.: ВІПОЛ, 2005. – 372 с.

Навчальне видання

Олена Павлівна Шиліна
Андрій Юрійович Осадчук

ГАЗОТЕРМІЧНІ МЕТОДИ НАПИЛЮВАННЯ ПОКРИТЬ

Навчальний посібник

Оригінал-макет підготовлено Осадчуком Андрієм Юрійовичем

Редактор В. О. Дружиніна

Коректор З. В. Поліщук

Науково-методичний відділ ВНТУ
Свідоцтво Держкомінформу України
серія ДК № 746 від 25.12.2001
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ВНТУ

Підписано до друку
Формат 29,7x42 $\frac{1}{4}$
Друк різнографічний
Тираж прим.
Зам. №

Гарнітура Times New Roman
Папір офсетний
Ум. друк. арк.

Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі
Вінницького національного технічного університету
Свідоцтво Держкомінформу України
серія ДК № 746 від 25.12.2001
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ВНТУ