ДУБОВИЙ Олександр Миколайович
ЛЕБЕДЄВА Наталія Юріївна
ШУМОВ Сергій Миколайович

ЗБІРНИК ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ З ДИСЦИПЛІН "ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ОСНОВИ СТВОРЕННЯ ПОКРИТТІВ" І "ТЕХНОЛОГІЯ НАНЕСЕННЯ ПОКРИТТІВ"

Видавництво НУК , 54002, м. Миколаїв, вул. Скороходова, 5

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного реєстру видавців, виготівників і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 1150 від 12.12.2002 р.

Редактор О.В. Нестеровська
Комп'ютерна правка та верстка В. Г. Єлесіна
Коректор Н.О. Шайкіна

Підписано до друку 16.11.04. Формат 60×84/16. Папір офсетний.
Ум. друк. арк. 4,4. Обл.-вид. арк. 4,7. Тираж 200 прим.
Вид. № 18. Зам. № 344. Ціна договірна.

О. М. Дубовий, Н. Ю. Лебедєва, С. М. Шумов

ЗБІРНИК
лабораторних робіт з дисциплін "Фізико-хімічні основи створення покриттів" і "Технологія нанесення покриттів"

Рекомендовано Методичною радою НУК

Миколаїв 2004

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

4. Чим задається режим напилення?
5. Які гази використовуються в якості плазмоутворюючих?
6. Як встановлюється режим напилення?
7. Назвіть переваги та недоліки плазмового нанесення покриттів.

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. *Дубовой А.Н., Хачатурое Э.Б., Лой С.А.* Технология нанесения газотермических порошковых покрытий: Учеб. пособие. – Николаев: НКИ, 1986. – 66 с.
2. *Кузін О.А., Дюк Р.А.* Металознавство та термічна обробка металів: Підручник. – Л.: Афіша, 2002. – 304 с.
3. *Кузнецов В.Д., Пащенко В.М.* Фізико-хімічні основи створення покриттів. – К.: Вища школа 1999. – 176 с.
4. *Петров С.В., Карп И.Н.* Плазменное газовоздушное напыление. – К.: Наукова думка, 1993. – 496 с.
5. Порошковая металлургия и напыленные покрытия / Под ред. *В.С. Штина.* – М.: Металлургия, 1987. – 792 с.
6. *Шехтер С.Я., Рехницкий А.М.* Напылка металлов. – М.: Машиностроение, 1982. – 71 с.

Робота № 1. **НАНЕСЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ Й ВЛАСТИВОСТЕЙ ГАЗОПОЛУМЕНЕВИХ ТА ЕЛЕКТРОДУГОВИХ ПОКРИТТІВ**

Мета роботи: ознайомитися з будовою, принципом роботи установок та процесами нанесення газополумневих і електродугових покриттів; дослідити особливості структури та властивості газополумневих і електродугових покриттів.

1.1. Теоретичні відомості

1.1.1. Загальні відомості

Газополумневі та електродугові покриття за класифікацією і за способом отримання відносяться до газотермічних покриттів. Газотермічні покриття отримують із нагрітих і прискорених частинок порошку або розплавленого компактного матеріалу із застосуванням високотемпературного газового струменю, при співударі яких з основою або напиленим матеріалом формується покриття за рахунок зварювання, адгезії та механічного зчеплення.

Газотермічне напилення покриттів характеризується узагальненою схемою (рис. 1).

Основні параметри процесу такі: дистанція напилення – L; кокус розпилення – φ_c; тиск навколишнього середовища – P_c; кут зустрічі потоку з поверхнею – $\alpha_н$; $d_н$ – діаметр плями напилення; величина перекриття проходів – $l_п$; температура виробу, на який напилюється покриття, – $T_в$.

Газотермічне напилення покриттів характеризується також

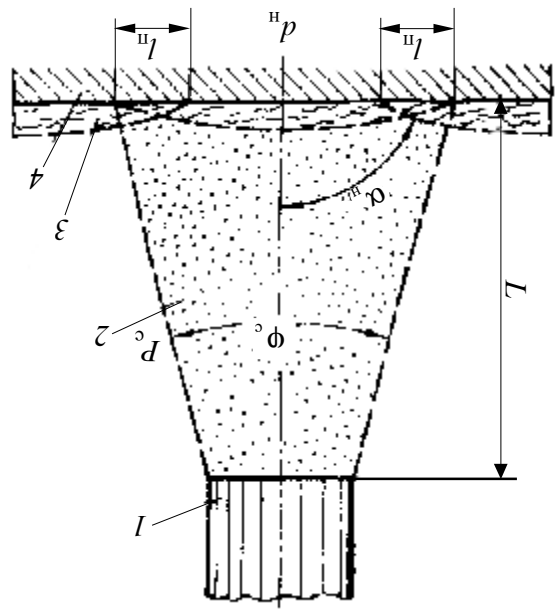


Рис. 1. Узагальнена схема процесу газотермічного напилення покриттів:
1 – генератор часток; *2* – струмінь; *3* – напилене покриття; *4* – виріб з покриттям

току напилених часток $\Delta H_{н.ч}$ до загальних витрат енергії W_e:

$$\eta_{е.р} = \frac{\Delta H_{н.ч}}{W_e},$$

де $\eta_{е.р}$ – енергетичний ККД процесу розпилення.

При напиленні тільки частина потоку часток переходить у

багатьма технологічними параметрами, які розділяють на такі групи:

конструктивні параметри розпилюючих пристроїв;
параметри, які характеризують режим роботи розпилювача;
параметри, які пов'язані з матеріалом, що розпилюється;
параметри, які характеризують умови напилення покриттів;
параметри струмена при напиленні покриттів.

Якість покриттів характеризується багатьма показниками. Найбільш значимими є показники міцності: адгезійна σ_a і когезійна $\sigma_к$ міцність. Ці показники тільки частина потоку часток переходить у покриття, в основному, визначають надійність напилених покриттів. При оцінці якості визначку уявлу приділяють міцності покриття $\gamma_{пк}$ і пов'язаній з нею пористості П. До складу критеріїв якості входять також шорсткість поверхні покриття R_z; рівномірність товщини $\delta_{пк}$; однорідність складу; макро- та мікроструктура. Узагальнюючим якісним показником покриття є експлуатаційні властивості.

Ефективність використання енергії для розпилення матеріалу визначають відношенням змін ентальпії по-

9.2. Обладнання, приладдя та матеріали

Установка для плазмового напилення покриттів "Київ-7", тригочирри загтовки однакової товщини для нанесення покриттів, приміник каталогу обладнання та опсання установки.

9.3. Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з будовою та принципом роботи установки для плазмового порошкового напилювання покриттів "Київ-7".
2. Ознайомитись з процесом нанесення плазмових порошкових покриттів та здобути навички роботи.
3. Дослідити вплив режиму напилення та товщини покриття на міцність зчеплення його з основою випробуванням на затин.

9.4. Порядок оформлення звіту

1. Коротко описати процес та принцип роботи установки для плазмового порошкового напилювання покриттів "Київ-7" та записувати схему.
2. Коротко описати технологію напилення та головні фактори, що впливають на якість покриття.
3. Вимірити кут затину зразків, при якому покриття, нанесені різними режимами напилення, починають відшаровуватися. Отримані дані занести в таблицю.

Номер зразка	Склад матеріалу, який напилюється	Розмір частинок порошку, мкм	Режим напилювання			
			Напруга, В	Сила струму, А	Витрати газу, $м^3/с$	Дистанція напилювання, мм
Кут затину	Товщина покриття, мм					

4. Подати висновки щодо режимів напилення.

9.5. Контрольні питання

1. Які покриття наносять на установці плазмового напилення "Київ-7"?
2. З яких основних блоків складається установка?
3. Принцип роботи установки.

ЗМІСТ

Робота № 1. Нанесення та дослідження структури й властивостей газополуменевих та електродугових покриттів 3
Робота № 2. Нанесення та дослідження структури й властивостей плазмових покриттів (4 години) 14
Робота № 3. Будова та робота установки для вакуумного конденсаційного напилення (осаджуваня) покриттів і дослідження впливу технологічних параметрів нанесення на властивості покриттів 22
Робота № 4. Відновлення деталей і конструкцій машин дуговим наплавленням 30
Робота № 5. Гальванічні покриття 37
Робота № 6. Підготовка поверхні для напилення покриттів. Дослідження впливу способу підготовки на шорсткість поверхні та міцність зчеплення 42
Робота № 7. Будова та робота установки для газополуменевого нанесення покриттів і дослідження впливу технологічних параметрів напилення на їх властивості 47
Робота № 8. Будова та робота установки для електродугового нанесення покриттів і дослідження впливу технологічних параметрів на їх властивості 53
Робота № 9. Будова та робота установки для плазмового нанесення покриттів і дослідження впливу технологічних параметрів на їх властивості 63
Рекомендована література 74

УДК 621.792: 621.793
ББК 30.3
Д 76

Рекомендовано Методичною радою НУК

Рецензент канд. техн. наук, проф. Є.Т. Бурдун

Дубовий О.М., Лебедєва Н.Ю., Шумов С.М.
Д 76 Збірник лабораторних робіт з дисциплін "Фізико-хімічні основи створення покриттів" і "Технологія нанесення покриттів". – Миколаїв: НУК, 2004. – 76 с.

Подано загальні теоретичні відомості та рекомендації щодо виконання лабораторних робіт, які пов'язані з методами та фізико-хімічними основами створення й технологією нанесення покриттів, методами дослідження структури та властивостей покриттів.

Призначено для студентів спеціальностей 8.090103 "Композиційні та порошкові матеріали, покриття", 1001 "Конструювання та виготовлення виробів із композиційних матеріалів" та 8.092301 "Технологія та устаткування зварювання".

УДК 621.792: 621.793
ББК 30.3

© Дубовий О.М., Лебедєва Н.Ю., Шумов С.М., 2004
© Видавництво НУК, 2004

покриття. Для оцінки втрат матеріалу, що розпорошується, застосовують коефіцієнт використання матеріалу

$$K_м = \frac{G_н}{G_р},$$

де $G_н$, $G_р$, – відповідно маси напиленого та розпиленого матеріалу. З урахуванням $K_м$ енергетичний ККД процесу напилення запишеться так:

$$\eta_{е.н.} = \frac{\Delta H_{н.ч}}{W_е} K_м.$$

У залежності від методу напилення $\eta_{е.р}$, $\eta_{е.н}$ та $K_м$ знаходяться в широких межах – від сотих часток до десятих часток.

Продуктивність процесу напилення є найважливішим показником ефективності. В основному вона залежить від величини енергії, що подається, а також значень $\eta_{е.р}$ і $K_м$. Продуктивність напилення оцінюють ваговим методом чи по товщині покриттів.

1.1.2. Нанесення газополуменевих покриттів

Джерело енергії

Газополуменевий струмінь. Як джерело енергії для нагрівання та прискорення частинок матеріалу, який утворює покриття, найчастіше використовується енергія горіння газів і пари рідких палив у суміші з киснем або повітрям. Переважно застосовуються вуглеводневі гази типу C_nH_m або їх суміш, і найбільш розповсюджений серед них – ацетилен (C_2H_2). Основні властивості горючих газів наведені в табл. 1.

Повне згорання ацетилену іде за реакцією

$$C_2H_2 + 2{,}5O_2 = 2CO_2 + H_2O + Q.$$

Теплота реакції згорання ацетилену Q складається з теплоти реакції екзотермічного розпаду ацетилену та суми теплот первинних реакцій згорання вуглецю та водню. Значення теплотворної здатності наведене в табл. 1. Процес горіння ацетилену має декілька стадій. Стадія підготовки пального до згорання характерна наявністю пірогенного (теплового) розкладання ацетилену в рівновазі з киснем, який протікає в ядрі полум'я. Пірогенне розкладання виникає внаслідок обмеженої теплової стійкості вуглеводнів. Пальне розкладається на складові елементи: вуглець і

Кут напилення, тобто кут між віссю струму плазми й дотичної до напилюваної поверхні, повинен знаходитись в межах 60...90°. Для зменшення залишкових напруг у покриттях, що виникають у результаті нарізу виробу плазмовим струменем, використовується суцільне охолодження виробу повітряним струменем.

При роботі з суміщено повітря та пропаного газу і охолодженні напилюваної поверхні повітрям дистанція напилення повинна складати 240...280 мм, за відсутності охолодження – 290...300 мм.

відстань від плазмотрона до напилюваної поверхні, мм	290...300
діаметр формуючого сопла, мм	8
розміри напилюваних частинок, мкм	40...160
тиск газу, кгс/см^2	2,3...2,9

9.1.5. Контроль роботи, регулювання і налагодження

Контроль роботи здійснюється візуально по пристроям, встановленим на пульті блоку керування.

Величина робочого струму та напруги контролюється амперметром А і вольтметром V_3, розташованими на модулі газу. Регулювання величини струму виконується резистором R_{37}, встановленим там же.

Робочий струм і напруга (діапазон) задається технологічним процесом напилення.

Вольтметр V_3 застосовується також для контролю напруги холостого ходу.

Кількість проходів напилення контролюється світлодіодами, розташованими на блоці задатчиків.

Швидкість обертання приводів живильників контролюється вольтметрами V_1 і V_2, розташованими на передній панелі модуля транспортуючих газів.

При налагоджувальному режимі швидкість обертання приводів регулюється відповідно резисторами R_{14} і R_{25}, встановленими на модулі транспортуючого газу.

Тиск горючого газу вимірюється манометром M_1 (*33*), витрати – ротаметром P_1. Вентилем $ВГ_1$ (*34*) регулюється витрата горючого газу, контроль тиску якого здійснюється датчиком тиску. Всі ці прилади знаходяться в модулі горючого газу.

Тиск плазмоутворюючого газу вимірюється манометром M_2 (*14*), витрата – ротаметром P_2. Вентилем $ВГ_2$ (*12*) регулюється витрата газу, контроль тиску якого здійснюється датчиком тиску. Всі ці прилади знаходяться в модулі плазмоутворюючих газів.

Вимірювання тиску транспортуючого газу в першому каналі та регулювання його витрати здійснюється манометром M_3 (*10*) і вентилем $ВГ_3$ (*20*). Вимірювання тиску транспортуючого газу у другому каналі та регулювання його витрати здійснюється манометром M_4 (*19*) і вентилем $ВГ_4$, контроль тиску якого здійснюється датчиком тиску. Всі ці прилади знаходяться у модулі транспортуючого газу.

Полум'я суміші ацетилену та кисню прийнято поділяти на нормальне, окислювальне та відновлювальне. Але практично, нейтральне полум'я (β = 1,1...1,2) інтенсивно протидіє окисленню, а відновлювальне (полум'я із надлишком ацетилену) – не відновлює і не відновлює метали, досить складна і малоймовірна річ.

Рис. 2. Форма, будова ацетилено-кисневого полум'я та діаграма розподілу температури в зонах:
а – нормальне полум'я; *б* – відновлювальне; *в* – окислювальне

Технологічні особливості газополуменевого напилення покриттів

Узагальнена схема процесу газополуменевого нанесення показана на рис. 3.

Горючий газ і кисень (рідко повітря) подається до сопла *1*. На виході із нього суміш підпалюється і утворює факел газового із вторинним киснем, тобто за рахунок кисню навколишнього середовища.

Наведені стадії процесу горіння характеризуються також змінною температурною станом суміші. На 1-й стадії, яка проходить у ядрі полум'я, іде підвищення температури зайнятання. На 2-й стадії (середня зона полум'я) температура різко підвищується від температури зайнятання до максимальної (близько 3150 °С) температури полум'я. На 3-й стадії (факел) іде зниження температури (рис. 2).

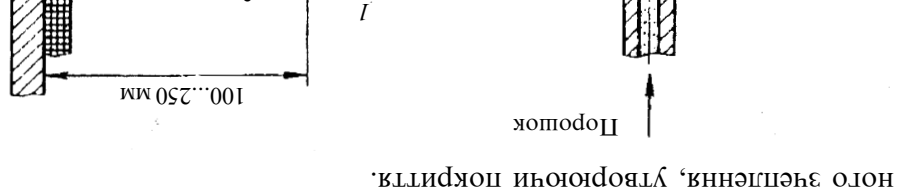


Рис. 3. Схема газополумневого напилення порошкового матеріалу

Установки газополумневого напилення включають наступні основні елементи (рис. 4): газополумневий пальник для розпилення порошку *1* чи дроту (прутка) *2* і нанесення покриття; пристрій подачі напилювального матеріалу в газове полум'я (для напилення порошків – це порошковий дозатор *3*, а для дроту – бухта *4*, механізм подачі дроту або прутка – це повітряна турбіна або електродвигун, розташований безпосередньо на пальнику), пристрої для контролю та керування витратами й тиском газів (манометри та редуктори *6*, витратоміри *5*), систему подачі стисненого повітря балони *11*, шланги *12*, компресор для подачі стисненого повітря *10*, ресивер *8*, осушувач *7*, теплообмінник *9*). Осушувач і теплообмінник *9*, при цьому за допомогою транспортуючого газу (зазвичайного це повітря) подається вздовж осі газополумневого струменя. Частинки порошку взаємодіють з газовою фазою, яка складається з горючих газів, продуктів їх згорання та дисоціації кисню і повітря. Газополумневий струмінь нагріває та прискорює частинки порошку. При цьому формується газопорошковий струмінь, який утворює покриття *3* на виробі *4*. Матеріал, що напилюється, надходить на поверхню основи у вигляді потоку рідких крапель або обплавлених пластичних частинок; вони ударяються об неї і закріплюються за рахунок зварювання та механічного зчеплення, утворюючи покриття.

Натиснути кнопку $КН_6$, при цьому загалюється дуга в плазмотроні й струм плавно нарощує до номінального.

При досягненні струмом номінального значення в плазмотрон подається робочий газ (пропан-бутан, природний газ) і порошок.

При необхідності перевірки роботи плазмотрона без подачі порошка тумблерами $В_4$, $В_5$ відключити дозатори.

Вентилем $ВГ_1$ (*3*, *4*) встановити витрату робочого газу, потрібну для заданого технологічного процесу. Витрату контролювати по ротаметру $Р_1$.

Резистором R_{37} встановити необхідну величину робочого струму.

Тривалість роботи плазмотрона при перевірках 3...5 хв.

Для припинення роботи на тривалий термін необхідно вилучити порошок із живильника, злити воду зі всієї системи та продути її повітрям, відʼєднати систему газоживлення та загальшити газові магістралі, відʼєднати джерело електроживлення від мережі.

9.1.4. Технологія нанесення покриттів

Для підвищення адгезійної міцності покриття напилювану поверхню піддають абразивно-струменевій обробці.

При нанесенні покриттів на деталі з матеріалів, схильних до корозії, у якості абразиву можна рекомендувати подрібнений білий чавун Д4К1 або Д4К1,5.

Присутність парів масел у стисненому повітрі при абразивно-струменевій обробці неприпустима.

При нанесенні покриттів на корозійностійкі деталі, що працюють в умовах корозії, використання Д4К неприпустиме, оскільки залишені на поверхні деталі частинки чавуну викликають корозію. У якості абразиву для всіх типів деталей можна рекомендувати електрокорунд зернистістю 30...100 мкм за ТУ 2–036–297–76. Абразивну обробку треба проводити не раніше ніж за чотири години до напилення. Рекомендується підігрівати поверхню перед напиленням до температури 150 °С.

Для отримання якісних покриттів тривалі перерви (більше трьох годин) при напилюванні однієї деталі неприпустимі. Однак для отримання покриття товщиною більше 3 мм у деяких випадках рекомендується застосовувати реалкасаційні перерви в роботі з поміщенням деталі у піч з нейтральною атмосферою і температурою 150...200 °С від 3 до 24 год.

Будь-які забруднення обробленої під напилення поверхні неприпустимі.

водень (С і H_2). Кінцевим продуктом пірогенного розкладання ацетилену за наявності кисню, який надходить із пальника і називається *первинним*, є СО і H_2.

Таблиця 1. **Властивості горючих газів**

Вид пального	Густина при 20 °С і 0,1 МПа, кг/м^3	Теплотворна здатність (20 °С, 0,1 МПа), кДж/м^3	Температура полум'я суміші із киснем, °С	Швидкість розповсюдження полум'я, м/с	Співвідношення кисню до пального у нормальному полум'ї
Ацетилен С	1,09	52920	3100...3200	13,5	1,15
Водень H_2	0,084	10080	2100	8,9	0,40
Метан CH_4	0,67	33600	2400	3,3	2,0
Природний газ	0,68...0,90	31500...37800	2000...2200	3,1...3,3	1,0…1,5
Пропан	1,88	87360	2700...2800	3,7	3,5...4,0
Бутан	2,54	116760	2400...2500	–	3,5...4,0

Для пірогенного розкладання на один об'єм ацетилену потрібен один об'єм кисню. Полум'я з таким складом газової суміші називається *нормальним*. Практично через те, що невелика кількість водню згорає із утворенням водяної пари за рахунок кисню горючої суміші і через деяку забрудненість кисню, який надходить із пальника, співвідношення кисню й ацетилену встановлюється трохи більшим за одиницю:

$$\beta = \frac{V_к}{V_а} = 1{,}15...1{,}20,$$

де $V_к$ – об′єм кисню, м^3; $V_а$ – об'єм ацетилену, м^3.

Стадія займання проходить в середній зоні полум'я та характеризується процесом активного окислення СО і H_2 до вуглекислого газу CO_2 і водяної пари H_2O. Момент переходу процесу в стадію активного окислення і є процесом горіння.

Стадія догорання проходить в зоні факела полум'я і характеризується процесом окислення продуктів пірогенного розкладання ацетилену в кінцеві продукти CO_2 і H_2O. Процес догорання іде

Для роботи на повітрі з природним газом

$$\alpha = 0{,}101\frac{\theta_п}{\theta_{пр.газ}},$$

де $\theta_п$ – кількість повітря, що надходить у змішувач перед плазмотроном, м^3/г; $\theta_{пр.газ}$ – кількість природного газу, що надходить у змішувач перед плазмотроном, м^3/г.

Для роботи на повітрі з пропан-бутаном

$$\alpha = 0{,}037\frac{\theta_п}{\theta_{п\text{-}б}},$$

де $\theta_п$ – кількість повітря, що надходить у змішувач перед плазмотроном, м^3/г; $\theta_{п\text{-}б}$ – кількість пропан-бутану, що надходить у змішувач перед плазмотроном, м^3/г.

При $\alpha = 1$ середовище в плазмовому струмені нейтральне, при $\alpha > 1$ середовище окисне, при $\alpha < 1$ – середовище відновлювальне.

Нижче наведені параметри процесу напилення тугоплавких керамічних матеріалів і металічних порошків.

При напиленні оксиду алюмінію ГА85:

робоча напруга, В	210...215
робочий струм, А	295...300
витрата газу (суміші повітря з природним газом),у тому числі:	
повітря, м^3/г	4,8...5,0
природного газу, м^3/г	0,3...0,5
витрата транспортуючого газу (повітря), м^3/г	2,0
відстань від плазмотрона до напилюваної поверхні, мм	280...290
тиск газу, кгс/см^2	2,2...2,3
діаметр формуючого сопла, мм	12
розміри напилюваних частинок окису алюмінію, мкм	40...120

При напиленні металічних порошків:

робоча напруга, В	245...250
робочий струм, А	290...300
витрата газу (суміші повітря з природним газом), у тому числі:	
повітря, м^3/г	8,5...9,0
природного газу, м^3/г	1,4...1,5
витрата транспортуючого газу (повітря), м^3/г	2,0

Плазмотрон призначений для перетворення електричної енергії у тепловy у вигляді плазмового струменя, в якому відбувається розпіб та розпіл напилюваних порошкових матеріалів.

Будова та робота складових частин установки

Блок керування (див рис. 28) складається з таких модулів:

модуля газоелектричного плазмотворючого газу *16* (МЕП)*;

модуля газоелектричного транспортуючого газу *17* (МГЕТ)*;

модуля задавання програми зміни продуктивності живильників *4* (МЗП)*;

модуля електропривода *3* (МЕП)*;

модуля підживлення газу *2* (МПД);

модулі МГЕТ, МЗП, МЕП вільносяться до блоку подачі порошків.

* Модулі МГЕТ, МЗП, МЕП вільносяться до блоку подачі порошків.

колекторного модуля *1* (МК);

модуля горючого газу *30* (МГГ).

Усі модулі є елементами блоку (пульта) керування.

Модуль газоелектричний горючого газу призначений для подавання, регулювання та контролю газу (повітря, азоту).

Плазмотворючий газ із мережі (балону) при відкритому електропневмоклапані через ротаметр надходить у змішувач, подається у плазмотрон. Витрата газу встановлюється вентилем по ротаметру. Датчик тиску контролює встановлений тиск. При відхиленні від заданого тиску датчик спрацьовує і відключає живлення плазмової дуги.

МЕП призначений для плавної зміни продуктивності порошкових живильників. МПД забезпечує збудження дуги в плазмотроні і являє собою конструкцію, зібрану на шасі, на якій встановлено покупний вирів "Пристрій підпалення дуги". МК призначений для передачі до плазмотрона електричного струму й охолоджуючого середовища.

Блок подавання порошків призначений для керування подаванням і дозуванням одного чи двох різнорідних порошкових матеріалів у автоматичному режимі за раніше заданою програмою. Блок складається з таких модулів: МЖ (на стояку); МГЕТ (у пульті керування); МЗП (у пульті керування); МЕП (у пульті керування).

МЖ призначений для подачі порошка до плазмотрону. Він включає в себе два живильники з редукторами й електродвигунами.

Трьом типам ґранулів відповідають три типи структурних елементів: основа, на яку наносять покриття, напилений шар матеріалу та дисперсна частинка матеріалу в кінцевому стані – після розплювання, удару й твердіння. Будова шару, який формується за один прохід, або "ріжку", яка отримується напилюванням у нерухомому плямі, є неоднорідною внаслідок нерівномірності розподілу температури та швидкості частинок матеріалу по перерізу потоку. Утворення покриття послідовним укладанням великої кількості частинок із різною температурою, швидкістю, ареалтним станом, масою неминуче веде до характерної лускатої будови із зернистими включеннями і мікропорожнинами – порами.

Газополуменеві покриття мають відкриту пористість до 10...15 %, а міцність зчеплення з основою близько 30 МПа.

1.1.3. Електродугове напилення

Принципова схема електродугового напилення показана на рис. 6, 7.

Як джерело енергії для нагрівання та подрібнення матеріалу, який напилюється, використовується електрична дуга. Через два канали у електрометалізатор безперервно подають два дроти (діаметром 1,5...3,2 мм), між кінцями яких збуджується електрична

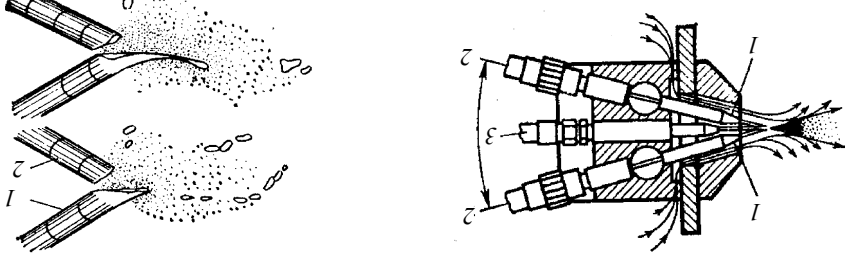


Рис. 6. Схема електродугового напилення:
1 – насадка; *2* – місце вводу напиленного матеріалу (дроту); *3* – місце подачі стисненого повітря

Рис. 7. Процес розпилювання напиленного матеріалу в електрометалізаторі:
1 – анод; *2* – катод

лообмінник можуть бути встановлені на магістралі стиснутого повітря з метою видалення вологи й мастила з повітря.

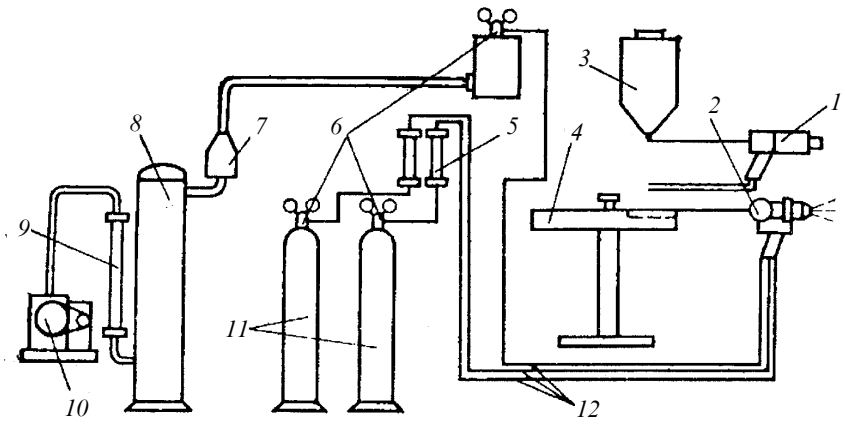


Рис. 4. Схема установки для газополуменевого напилення покриттів із порошків або прутків

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

Параметри струменя і потоку напилених часток. Максимальна температура полум'я поблизу зрізу сопла складає 3273...3473 К і залежить, в основному, від роду горючого газу та 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 та складу по осі струменя й у перетинах аналогічна плазмовим струменям.

Довжина високотемпературної частини газополуменевого струменя залежить від роду горючого газу, його витрати й β. Для ацетилену та пропанбутанової суміші тривалість нагрівання складає 70...150 мм. Верхня межа відноситься до максимальних витрат горючого газу й оптимальних значень β.

Температура напилюваних часток при порошкових способах напилення не перевищує 2473 К. Дротове напилення може забез-

МГГ являє собою стояк з основою, на якому змонтовані арматура, вузли та прилади подавання, регулювання та контролю горючого газу (пропан-бутану, природного газу).

Горючий газ (пропан-бутан, природний газ) із балону (мережі) при відкритому електромагнітному клапані через ротаметр надходить до змішувача, де, змішуючись з повітрям, подається в плазмотрон. Витрати газу встановлюються вентилем по ротаметру. Датчик тиску контролює необхідний тиск. При відхиленні від заданого тиску датчик спрацьовує і відключає ланцюг живлення плазмової дуги.

9.1.3. Порядок роботи на установці "Київ-7"

Увімкніть вентиляцію робочого місця. Перевірте роботу блоку порошкових живильників і спрацьовування клапанів, блокувань і органів керування щодо наявності сигналів готовності блоків до роботи (по запалюванню сигнальних ламп). Для перевірки необхідно виконати таку послідовність дій:

увімкнути автомат на БЕП, при цьому повинна загорітися лампочка *15* ($Л_8$);

натиснути кнопку $КН_1$, при цьому повинна загорітися лампочка *7* ($Л_1$);

установити тумблер $В_1$ у положення "Вкл.", при цьому повинно спрацювати блокування і загорітися лампочка *15* ($Л_3$).

Тумблерами $В_4$, $В_5$ увімкнути живильники, які в ручному режимі керуються потенціометрами R_{14}, R_{25}.

За манометрами $М_3$, $М_4$ встановити потрібний тиск транспортуючого газу.

Для набору програми роботи живильника необхідно натиснути кнопку $КН_3$ і відповідними резисторами встановити потрібну продуктивність живильників.

Після набору програми роботи живильників тумблер $В_1$ установити в положення "Выкл."

Установити тумблери $В_2$ і $В_3$ в положення "Вкл."

Установити тумблер $В_7$ і перемикач $В_6$ в положення "Ручной".

Натиснути кнопку $КН_4$, при цьому вмикаються електромагнітні клапани, повинні спрацювати блокування і загорітися лампочки $Л_3$, $Л_4$, $Л_5$.

Вентилем $ВГ_2$ (*1*, *2*) встановити витрату повітря (газу), потрібну для заданого технологічного процесу. Витрати контролювати за ротаметром $Р_2$.

дуга та здійснюється розплавлення дроту. Розплавлений метал підхоплюється струменем стисненого повітря, яке виникає із центрального сопла електрометалізатора, і у дрібнорозплавленому вигляді переноситься на поверхню основного матеріалу. Розпилення та транспортування розплавленого металу здійснюється повітрям, хоча при напилюванні корозійностійких сталей і алюмінієвих сплавів використовують азот.

На рис. 7 наведена схема розплавлення електродного дроту при напилюванні та перенесенні частинок розплавленого металу повітряним струменем. Температура дуги залежить від виду газу, складу електродного дроту, режимів напилення та інших параметрів. При використанні металевих електродів і сили струму 280 А досягається температура приблизно 6100 ± 200 К. При такій температурі легше утворюється крапля матеріалу, що напилюється.

Електродугове напилення має ряд переваг. Застосування потужних електрометалізаційних установок дозволяє значно підвищити продуктивність процесу та скоротити витрати часу. Наприклад, при силі струму 750 А можна напилювати сталеве покриття з продуктивністю 36 кг/год, а при силі струму 500 А – цинкове покриття з продуктивністю 1,2 кг/хв, що у декілька разів перевищує продуктивність газополуменевого напилення. У поєднанні з газополуменевим напиленням електрометалізація дозволяє отримати більш міцне покриття, яке краще з'єднується з основою. При використанні в якості електродів дротів із двох різнорідних металів можна отримати покриття із їх сплавів. Такі сплави називають псевдосплавами. Експлуатаційні витрати при електродуговому напиленні невеликі.

До недоліків електродугового напилення відносяться можливість перегрівання та окислення матеріалу, який напилюється при малих швидкостях подачі дроту. Крім того, велика кількість теплоти, яка виділяється при роботі електричної дуги, призводить до значного випрацювання легуючих елементів, які входять до складу, що напилюється (наприклад, вміст вуглецю у покритті зменшується на 40...60 %, а силіцію і марганцю – на 10...15 %).

1.2. Установки, прилади та матеріали

Для виконання роботи використовуються: установка для газополуменевого порошкового напилення покриттів типу Л5405А,

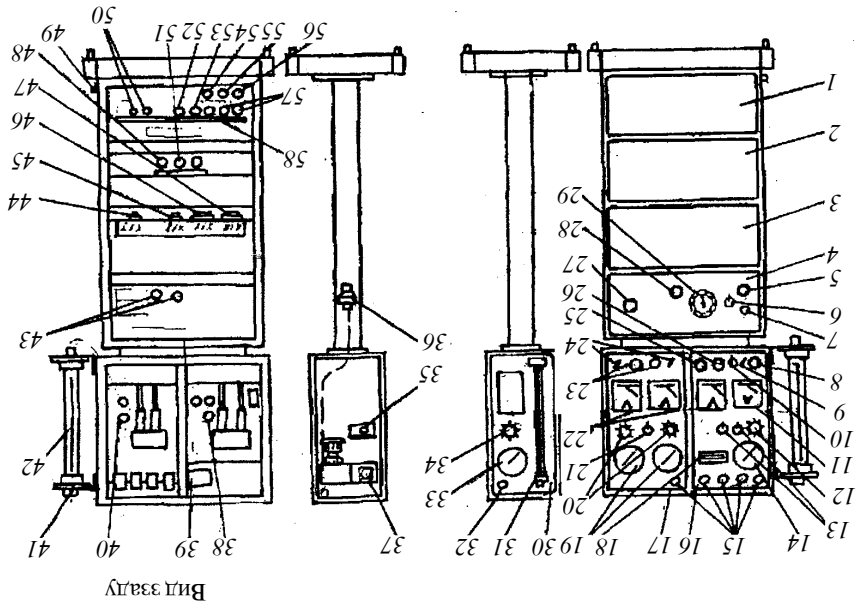


Рис. 28. Блок керування установки "Київ-7":

1 – модуль колекторний; *2* – модуль підмагнічення дуги; *3* – модуль електропривода; *4* – модуль задатчиків; *5* – кнопка "Вкл." (КН$_1$); *6* – перемикач роботи живильників (В$_6$); *7* – сигнальна лампа *(ЛІ)*; *8* – кнопка "Ручний режим" (КН$_4$); *9* – резистор (R$_{37}$) регулювання робочого струму; *10* – тумблер (В$_7$) вимкнення води; *11* – амперметр; *12* – вентиль подавання газу; *13* – тумблер вимкнення плазмотворючих газів; *14* – манометр плазмотворючого газу (М$_2$); *15* – сигнальні лампи; *16* – модуль газоелектричний плазмотворючого газу; *17* – модуль газоелектричний транспортуючого газу; *18* – лічильник кількості вимкнень; *19* – манометри транспортуючого газу (М$_3$, М$_4$); *20* – вентилі подавання транспортуючого газу; *21* – тумблер вимкнення газовідпостачання в нагалоджувальному режимі (В$_1$); *22* – вольтметри (V$_1$, V$_2$, V$_3$); *23* – тумблери увімкнення живильників (В$_4$, В$_5$); *24* – резистори (R$_{14}$, R$_{35}$) регулювання витрати живильників у ручному режимі; *25* – кнопка "Стоп" (КН$_5$); *26* – кнопка "Пуск" (КН$_6$); *27* – кнопка "Вимк." (КН$_2$); *28* – кнопка перемикання проходів при налагодженні (КН$_3$); *29* – перемикач числа проходів зі світловою індикацією (В$_8$); *30* – модуль робочого газу; *31* – ротаметр (Р$_1$); *32* – сигнальна лампа; *33* – манометр робочого газу; *34* – вентиль подачі робочого газу; *35* – шуцер підведення робочого газу; *36* – затвор ЗСУ-5; *37* – розйм підключення електроживлення; *38* – шуцер підведення транспортуючого газу; *39* – шуцер для подачі газу в порошкові живильники; *40* – шуцер підведення плазмотворючого газу; *41* – шуцер подачі плазмотворючого газу в плазмотрон; *42* – ротаметр (Р$_2$); *43* – запобіжники; *44* – розйм підключення модуля напилного газу; *45* – розйм підключення блока подачі порошків; *46* – розйм підключення на до напівавтомата; *47* – розйм підключення джерела струму; *48* – розйм "Источник" (чергова дуга); *49* – заземлення; *50* – вихід води; *51* – розйм "Плазмотрон" (чергова дуга); *52* – вихід води до катоду (–); *53* – підключення силового кабеля від джерела (–); *54* – підключення силового кабеля від джерела (+); *55* – вихід води з аноду (+); *56* – вихід води з катоду (–); *57* – вихід води на злив; *58* – вхід води до аноду (+)

печити частки з більш високою температурою порядку 2973 К. Швидкість часток поблизу поверхні напилення знаходиться в межах 20...100 м/с і вище. Щільність потоку напилюваних часток складає 103...105 ч./(с·см^2).

Газополуменеве напилення використовується для нанесення покриттів різного призначення за допомогою розпилення порошкових і дротових матеріалів. Цей метод не забезпечує можливість нанесення тугоплавких матеріалів. При порошковому напилюванні температура матеріалу, що розпиляється, обмежена, приблизно 2473 К, при дротовому напилюванні – 2973 К.

До недоліків методу варто віднести: невисоку продуктивність процесу, особливо при порошковому напилюванні тугоплавкими матеріалами; наявність у струмені активних газів, взаємодіючих з металевими і металоподібними матеріалами; невисока якість покриттів при напилюванні ряду порошкових матеріалів; низькі значення енергетичного ККД нагрівання частинок порошку.

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

Особливості структури та властивостей газополуменевих покриттів

Схематична структура газотермічних покриттів зображена на рис. 5.

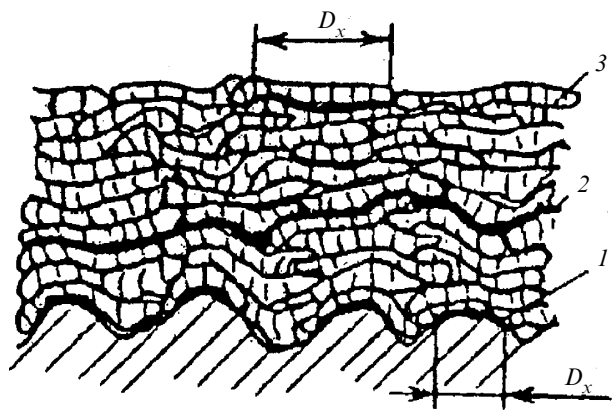


Рис. 5. Схема структури покриттів:

1 – межа між покриттям і основою; *2* – межа між шарами покриття; *3* – межа між частинками; D_x – діаметр ділянки контакту, на якій відбувається приварювання частинки

Живильник (рис. 29) складається з таких основних вузлів: бачка, механізму переміщення порошка, системи транспортуючого газу, приводу з кулачковою муфтою.

Бачок живильника циліндричної форми ємністю 5 л щільно закривається кришкою, виготовленою з прозорого оргскла, з метою зручності перевірки наявності порошка в бачку. Прозора кришка закріплюється на бачку за допомогою спеціальної накидної обичайки, що має ексцентрикові запори. Бачок обладнаний запобіжним клапаном, котрий відкривається при підвищенні тиску в бачку більше 50 кПа (0,5 кгс/см^2). Через додатковий штуцер корпусу клапана здійснюється подавання транспортуючого газу. У днищі бачка є лійка для приймання та виведення через ніпель газопорошкової суміші.

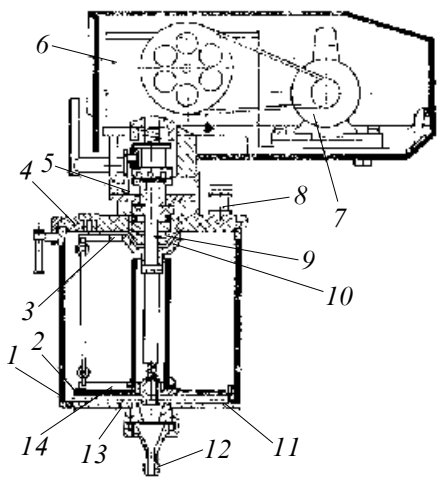


Рис. 29. Живильник:

1 – бачок живильника; *2* – днище знімне; *3* – лопатки верхні; *4* – кришка; *5* – муфта кулачкова; *6* – редуктор; *7* – електродвигун; *8* – клапан запобіжний; *9* – валик ротора; *10* – підвіска; *11* – стовпчик; *12* – лійка з ніпелем; *13* – шнек; *14* – лопатки нижні

МГЕТ призначений для регулювання, контролю транспортуючого газу та його подавання в один або два порошкових живильника.

Газ із мережі при відкритому електропневмоклапані через розподільник поділяється на два потоки для подачі до живильників. Витрати газів встановлюються вентилями за показниками манометра. Датчик тиску контролює установлений на вході в колектор тиск. При відхиленні від заданого тиску датчик спрацьовує та розриває ланцюг живлення плазмової дуги.

МЗП програми зміни продуктивності живильників призначений для забезпечення дозованого подавання порошків з живильників за заданою програмою.

установка для електродугового напилення покриттів КДМ-2, металографічні мікроскопи МІМ-7 з об′єкт- і окулярмікрометрами, мікротвердомір ПМТ-3 або твердомір типу Вікерса, набір макро- та мікрошліфів, каталог обладнання для напилення покриттів.

1.3. Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з будовою та принципом роботи установок для газополуменевого порошкового й електродугового напилення покриттів.
2. Ознайомитися з процесами нанесення газополуменевого й електродугового покриттів.
3. Дослідити особливості макро- та мікроструктури газополуменевих та електродугових покриттів.
4. Визначити товщину покриття металографічним методом при 200-кратному збільшенні шляхом не менше як трьох вимірювань.
5. Визначити твердість (мікротвердість) покриттів.

1.4. Порядок оформлення звіту

1. Коротко описати процеси та зарисувати схеми напилення газополуменевих та електродугових покриттів.
2. Зарисувати схеми й описати мікроструктуру досліджених зразків з покриттями.
3. Отримані дані щодо товщини, твердості й особливостей мікроструктури покриттів оформити у вигляді таблиці.

Метод формування	Склад	Особливості мікроструктури	Товщина, мкм	Твердість	Особливості отримання

4. Подати висновки щодо фізико-хімічних особливостей створення газополуменевих та електродугових покриттів.

1.5. Контрольні питання

1. Дайте характеристику процесу нанесення газотермічних покриттів.
2. Назвіть основні параметри процесу газотермічного напилення.

нічні властивості повинна проводитись на понижених режимах з обов′язковим застосуванням емульсії.

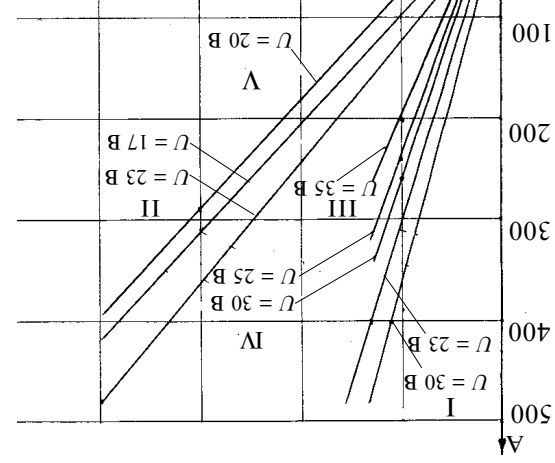


Рис. 26. Графік визначення продуктивності розпилення порошку ∅ 2 мм:
I – алюмінію та його сплави; II – цинк; III – мідь; IV – сталь маловуглецевa; V – цинк для дроту ∅ 2,5 мм

8.2. Обладнання, прилади та матеріали

Установки для електродугового напилювання покриттів КДМ-2 та ЕМ-14М, 3–4 заготовки однакової товщини для нанесення покриттів і 6–8 примірників каталогу обладнання та описання комплексу.

8.3. Порядок виконання робіт

1. Ознайомитися з будовою та принципом роботи установок для електродугового напилювання покриттів КДМ-2 та ЕМ-14М.
2. Ознайомитися з процесом нанесення електродугового покриття.
3. Дослідити вплив режиму та товщини покриття на міцність зчеплення його з основою випробуванням на затин.

8.4. Порядок оформлення звіту

1. Коротко описати процеси електродугового напилювання та записувати схему установки.

вищення ступеня іонізації.

Порівняно високий ступінь іонізації обумовлює високу температуру плазми дугового розряду, що сягає 4000 °С. Ця температура може бути тихо збільшена шляхом підвищення напруги або сили струму, однак таке використання електричної енергії за звичайних умов спричинює збільшення обсягу плазми, а не пропорційне зростання її температури.

Інший шлях підвищення температури плазми – обмеження частині розряду та збільшення частоти зіштовхування часток дугового розряду, що може бути досягнуто наступлним чином. Електрична дуга отримується обгонкою з газу під високим тиском. Ця текуча обгонка охолоджує газ у зовнішніх шарах плазми, знижуючи тим самим іонізацію і, отже, провідність газу в зовнішній області плазми. Струм дугового розряду прагне сконцентруватися в більш гарячій центральній частині. Це збільшення щільності струму, що може бути названо тепловим ефектом стиску (тепловий пінч-ефект), призводить до подальшого росту температури та провідності.

У той момент, коли густина струму в центрі розряду досягає досить великої величини, більш істотним стає другий механізм стискування – магнітний пінч-ефект, що є наслідком взаємного наближення паралельних струмів у магнітному полі. Під дією магнітного пінч-ефекту заряджені частки плазмового струмевя ще більше наближаються одна до одної. Магнітне поле, яке створюється самим потоком плазми, перетискує плазмовий шнур у декількох місцях, зтиває та перекриує його. У такий спосіб температура плазми підвищується до 10000...50000 К.

Розміри бігя електродних областей невеликі, основну частину міжелектродного простору складає плазма. Характерною ознакою плазми є її квазінейтральність, тобто концентрація позитивних і негативних часток у плазмі майже однакова і результуючий просторовий заряд практично дорівнює нулю. Усі складові плазми: іони, електрони, молекули, атоми, світлові кванти – знаходяться в постійній взаємодії.

Вважають, що переважним механізмом іонізації газу у стовпі дуги є термічна іонізація. Електрони та іони одержують енергію за рахунок електричного поля, під дією якого виникає спрямований рух часток. Подальше зіткнення електронів та іонів з нейтральними частками й останніх між собою приводить до підвищення ступеня іонізації.

Порівняно високий ступінь іонізації обумовлює високу температуру плазми підвищується до 10000...50000 К.

9.1.2. Будова та принцип роботи установки для плазмового напилення "Київ-7"

Установка для плазмового напилення "Київ-7" використовується для механізованого напилення одно- і двокомпонентних покриттів з порошкових керамічних та металічних матеріалів, а також для наплавлення самофлюсівних твердих сплавів.

Установка "Київ-7" (рис. 27) має блочно-модульну структуру.

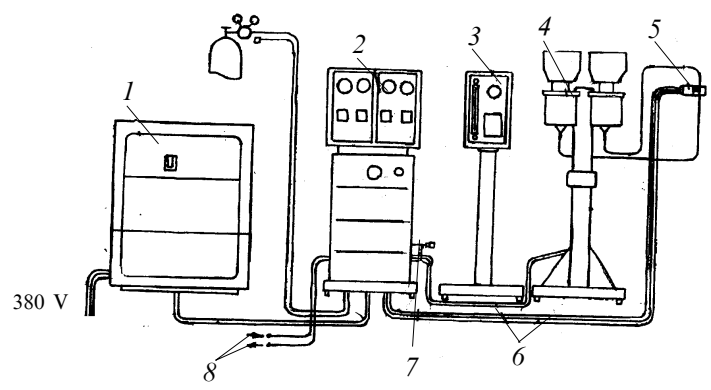


Рис. 27. Загальний вигляд установки "Київ-7":

1 – блок електроживлення; *2* – блок (пульт) керування; *3* – модуль горючого газу; *4* – блок подавання порошків; *5* – блок плазмотрона; *6* – комплект кабелів та шлангів; *7* – кабель підключення до напівавтомата; *8* – вхід та злив охолоджувальної води

Блок керування (рис. 28) призначений для контролю готовності плазмової апаратури, пуску та зупинки процесів напилення, візуального спостереження та регулювання параметрів режиму, а також для передавання до плазмотрона електричного живлення, плазмоутворюючих газів і охолоджувального середовища.

Блок подавання порошків *4* (див. рис. 27) призначений для подавання та дозування одного чи двох різнорідних порошкових матеріалів у ручному та автоматичному режимах за заздалегідь заданою програмою.

Модуль горючих газів *30* (див. рис. 28), призначений для подавання та вимірювання витрат природного газу або пропан-бутану.

3. Наведіть основні технологічні параметри процесу газотермічного напилення.

4. Як визначається КВМ?

5. Дайте характеристику джерелам енергії газополуменевого напилення.

6. Як відрізняють нормальне, окислювальне та відновлювальне полум'я за складом суміші ацетилену і кисню?

7. Проаналізуйте основні особливості газополуменевого напилення покриттів.

8. Дайте характеристику структури газотермічних покриттів.

9. Визначте та дайте характеристику особливостям електродугового напилення покриттів.

10. Проаналізуйте переваги та недоліки електродугового напилення покриттів.

Робота № 2. НАНЕСЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ Й ВЛАСТИВОСТЕЙ ПЛАЗМОВИХ ПОКРИТТІВ (4 години)

Мета роботи: ознайомитися з будовою, принципом роботи установки для плазмового нанесення покриттів; дослідити особливості структури та властивості плазмових покриттів.

2.1. Теоретичні відомості

Серед методів нанесення покриттів плазмове напилення завдяки своїм технологічним можливостям знаходить найбільш широке застосування. Плазмове напилення є логічним розвитком електродугової металізації та газополуменевого напилення, тому при плазмовому напилюванні використовують основні технологічні прийоми нанесення покриттів цими методами. Застосовуючи плазму, можна наносити покриття практично з усіх відомих тугоплавких матеріалів, що у плазмовому струмені не сублімують і не зазнають інтенсивного розкладання.

Для отримання плазмового струменя використовують електричну дугу постійного струму. Будова дугового розряду досить складна, однак у першому наближенні його можна поділити на три області: катодну, анодну й область плазми.

Пристрій для отримання плазмового струменя (рис. 8) називається плазмотроном, який, як правило, складається з трьох основних частин: мідного анода *3*, який охолоджується водою, водяхрамового катода *1* та розташованого між ними ізолятора *2*. У технології нанесення покриттів найбільш розповсюдженими плазмоутворюючими газами є аргон, азот, водень, гелій та їх суміші.

При нанесенні покриттів плазмою як вихідний матеріал застосовується, головним чином, порошок, інколи дріт. Напилений матеріал нагрівається, плавиться, розпорошується і сформований потік часток направляється у бік підкладки. При ударі та деформації відбувається взаємодія часток з поверхнею підкладки і формування покриття.

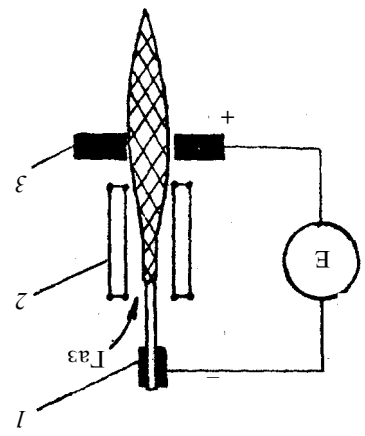


Рис. 8. Принципова схема плазмотрона

Порошок вводять у плазмовий струмінь. Причому найбільш поширена схема подачі порошку – перпендикулярно або під невеликим кутом назустріч потоку плазмового струменя на зрізі сопла (рис. 9). З метою підвищення ефективності нагрівання порошку його вводять у струм плазмового дугового розряду. При такому введенні порошку потрібне точне конструктивне оформлення плазмового розпилювача й точна підтримка режиму його роботи.

Якісні покриття з оксиду алюмінію можна одержати при введенні порошку в струм розряду з електричною потужністю розпилювача 12...15 кВт. При цьому продуктивність напилення досягає 2 кг/год, тоді як стандартні розпилювачі для такого процесу вимагають у 1,5...2,0 раза вищу потужність.

Продуктивність напилення плазмового розпилювача – до 5 кг/год при напилюванні важких металів і 2...4 кг/год при напилюванні легких оксидів. Вона залежить від фізико-хімічної характеристики напилюваного матеріалу, роду плазмоутворюючого газу, потужності розпилювача і т. п.

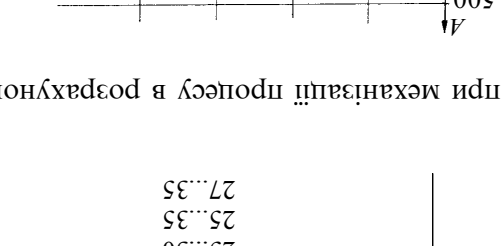
досягти до них зручний, не слід закладати в розрахунок вибору режиму продуктивність розпилення цинку більше 10...15 кг/год, а алюмінію – 5...7 кг/год через фізичні можливості людини.

Таблиця 5. **Напруга дуги для напилення різних матеріалів**

Матеріал дроту	Інтервал напруг на дузі, В
Цинк	17...23
Алюміній та його сплави	23...30 і 40
Сталь	25...30
Мідь	25...35
Молібден	27...35

У стаціонарних умовах при механізованій процесу в розрахунок можна закладати більш високу продуктивність розпилення.

Відстань від точки плавлення дроту до металізованої поверхні слід витримувати в границях 80...120 мм. При механізації процесу рекомендується застосовувати меншу дистанцію напилювання, оскільки підвищується коефіцієнт використання металу при напилюванні.



При нанесенні покриття необхідно запобігати нагріванню металізованої поверхні вище 70...80 °С.

Товщина шару при нанесенні покриття на плоских поверхнях не повинна перевищувати 0,35...0,50 мм. Для тіл обертання при відновленні зношених поверхонь або при нанесенні антифрикційних покриттів товщина шару може досягати декількох міліметрів.

Рис. 25. Графік визначення продуктивності розпилення дроту ∅ 1,5...1,6 мм: I – алюміній та його сплави; II – сталь маловуглецева; III – молібден; IV – цинк

Наступна механічна обробка покриттів через невеликі меха-

2. Коротко описати технологію напилювання, визначити режими напилювання щодо різних матеріалів, зарисувати графіки визначення продуктивності розпилення дроту.

3. Виміряти кут загину зразків, нанесених в різних режимах, при якому покриття починає відшаровуватися. Отримані дані занести в таблицю.

Номер зразка	Матеріал дроту	Режим			Кут загину
		U, В	*I*, А	Тиск повітря, МПа	

4. Подати висновки щодо режимів напилювання.

8.5. Контрольні питання

1. Які покриття наносять електродуговим напиленням?
2. Назвіть переваги електродугового напилення.
3. Назвіть недоліки електродугового напилення.
4. З яких основних елементів складається установка КДМ-2?
5. Принцип роботи апарата ЕМ-14М.
6. Від чого залежить якість електродугового покриття?
7. Яким чином продуктивність напилення залежить від величини робочого струму?
8. Як визначається продуктивність процесу?

Робота № 9. БУДОВА ТА РОБОТА УСТАНОВКИ ДЛЯ ПЛАЗМОВОГО НАНЕСЕННЯ ПОКРИТТІВ І ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ НАПИЛЕННЯ НА ЇХ ВЛАСТИВОСТІ

Мета роботи: вивчити будову та принципи роботи установки для плазмового порошкового напилення покриттів; дослідити вплив технологічних параметрів напилення на міцність зчеплення покриттів з основою.

9.1. Теоретичні відомості

9.1.1. Загальні відомості

Див. п. 1.1. лабораторної роботи № 2.

У комплект устаткування входять плазмовий розпилювач, джерело живлення, пульт керування, пристрій для подачі газопорошкової суміші (бункер постачальник) та ін.

Плазмове нанесення покриттів здійснюють на попередньо підготовлену поверхню деталі. Поверхню деталі очищають від механічних забруднень. Вологу й мастило видаляють протиранням ганчіркою, змоченою в розчиннику (ацетон, бензин і т. д.), далі деталь піддають абразивно-струменевій обробці (корундом, чавунним чи сталевим дробом). Час між підготовкою поверхні та напиленням повинен бути якомога меншим і не перевищувати одну годину, тому що очищена поверхня виробу швидко втрачає активність і на неї з навколишнього середовища потрапляє волога, пил і т. п., що зменшує міцність зчеплення покриття з підкладкою. Покриття, як правило, наносять на поверхню, розташовану перпендикулярно плазмовому струменю. Для отримання рівномірного покриття необхідно переміщати розпилювач відносно деталі або навпаки, деталь – відносно розпилювача.

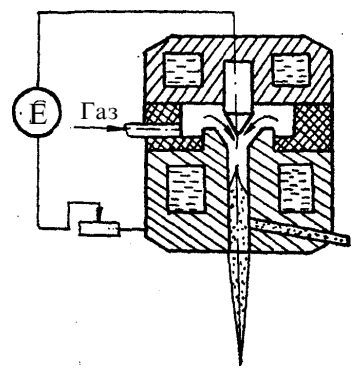


Рис. 9. Принципова схема плазмового нанесення порошкових покриттів

Мінімальна товщина покриття визначається розміром часток напилювального матеріалу. При плазмовому напилюванні бажане застосування порошку грануляції 40...100 мкм. Якщо використовувати порошок грануляції 5...20 мкм (порошок повинен при цьому мати підвищену сипкість), то можна одержати покриття мінімальної товщини 15...20 мкм. Верхня межа товщини покриття практично не обмежена. Однак зі збільшенням товщини покриття в ньому підвищуються внутрішні напруження, що прагнуть відірвати покриття від підкладки. Здійснюючи спеціальні заходи при напилюванні (охолодження покриття, підкладки і т. п.), отримують покриття на плоских поверхнях товщиною 1...2 мм, на тілах обертання – товщиною 20...30 мм.

При плазмовому напилюванні порошку можна регулювати склад покриття по товщині та по довжині деталі. Для цього поро-

Трубінний привід забезпечує безперервне обертання подаючих роликів механізму подавання дроту та плавне регулювання їх швидкості обертання. Швидкість обертання самої трубіни досягає 35000 об/хв. В електродуговому металізаторі ЕМ-14М використовується трисгуненевий редуктор, два черв'ячні ступені якого (7, 12 – колеса черв'ячні, 8, 11 – черв'яки), розташовані у герметичному корпусі. Двоступеневий черв'ячний редуктор передає обертання на третій ступінь редуктора (13, 14 – шестірні заміни), за допомогою якого здійснюється ступеневе регулювання швидкості подавання дроту. Положення шестерень на рис. 23 відповідає подаванню дроту зі швидкістю 5,5...12,0 м/год. Для того, щоб одержати швидкість подавання дроту 2,0...6,5 м/год, шестірні необхідно поміняти місцями.

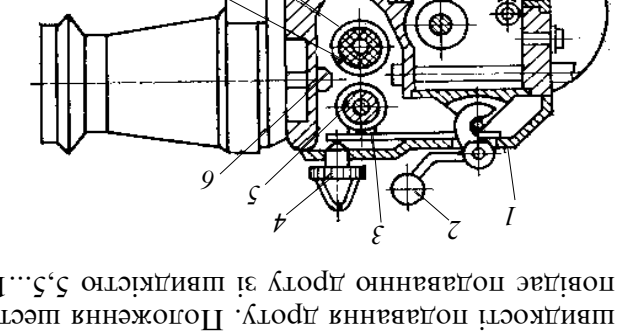


Рис. 23. Електродуговий металізатор ЕМ-14М

Ведучі ролики *10* закріплені на ізоляцій вгулках *9*. Обертання роликів здійснюється за допомогою шестерень *13, 14*. На відкидний верхній кришці *1* закріплені на колиняній підвісці *3* притискні ролики *5*. При працюючому апараті кришка повинна бути зачинена і її положення зафіксоване за допомогою спеціальної рукоятки *2*. Необхідне зусилля натиснення притискних роликів встановлюють за допомогою гвинта *4*, розташованого на кришці.

8.1.3. Технологія нанесення покриттів

Технологія нанесення покриттів складається з підготовки поверхні, нанесення покриття, та, у випадку необхідності, його наступної обробки. Значення параметрів шорсткості поверхні виробу, вимоги до термічного напилювання покриття та методи контролю повинні відповідати ГОСТ 9.304–84.

Підготовка поверхні має на меті вилучити з неї різні забруднення та окисну плівку, а також додати їй необхідної шорсткості, тобто розпилюваний метал (за винятком молібдену та деяких інших) з гладкою поверхнею зчіплюватися не може.

Для тіл обертання інколи застосовується підготовка поверхні нарізанням "рваної різьби" (глибина нарізання та крок різьби 0,8...1,0 мм), накатка, а також нанесення підшарка з молібдену, алюмідонікелю.

Підготовлену поверхню слід металізувати не пізніше двох годин після закінчення підготовки.

Якість напилюваного покриття та ефективність процесу здебільшого залежить від обраного режиму роботи апарата. Режим роботи апарата встановлюється оператором у залежності від джерела електричного живлення, використовуваного матеріалу, діаметра дроту, тиску стиснутого повітря. Зі збільшенням тиску стиснутого повітря на вході в апарат щільність покриття зростає, підвищується стабільність роботи апарата. Тому для одержання оптимальних результатів необхідно працювати на максимальному тиску стиснутого повітря (0,5...0,6 МПа/см^2). При різких коливаннях тиску повітря у результаті відбору повітря іншими споживачами роботи з металізації проводити не треба. Напруга встановлюється в залежності від вимог, поставлених до покриття.

Коли антикорозійне покриття з цинку й алюмінію працює у звичайних умовах, то напилювання слід проводити при можливо меншій напрузі.

Вибір режиму зробити за табл. 5.

Величина робочого струму приблизно пропорційна обраній продуктивності розпилення.

На рис. 25 і 26 наведені графіки для визначення продуктивності за робочим струмом. Вибір продуктивності розпилення визначається технічною доцільністю. При виконанні робіт вручну, коли нанесення покриттів здійснюється на великі поверхні і

У реальному покритті можна виділити ряд структурних елементів, що мають межі розділу з визначеними властивостями. При плазмовому напилюванні заготовлюються частки матеріалу, при цьому можуть зберігатися високотемпературні фази та розчинені за високої температури газа. У процесі твердіння часток ці газа частково видиваються з утворенням закритих і відкритих пор. Газоначнення напиленого матеріалу відбувається в результаті взаємодії його з плазмою та навколишнім середовищем при русі часток до підкладки. Незважаючи на невеликий час взаємодії (10^{-3} с) покриття можуть сильно насичуватися газами в кількостях, що нагадато перевищують розчинність їх у матеріалах.

Міцність зчеплення покриття з підкладкою є найважливішою характеристикою покриття. Здебільшого вона не перевищує 100 МПа. Існує ряд методів визначення міцності зчеплення покриття з підкладкою, що дозволяють одержувати як якісні, так і кількісні оцінки цієї характеристики покриттів: вилин плоского зразка; відривання покриття на циліндричному зразку; пропзвання покриття й термоциклювання зразка з покриттям; відривання зразка, приклеєного до покриття; витягування циліндричного штифта з 3 бобишки; витягування конічного штифта з бобишки; відривання циліндричного штифта з бобишки. Схема одного з найбільш розповсюджених методів визначення міцності зчеплення показана на рис 10. Цей метод дозволяє одержувати надійстовірні дані про міцність зчеплення плазмового покриття з підкладкою.

Міцність напилених на поверхні металевих покриттів не перевищує 10...60 МПа, що на порядок нижче міцності металів. Низька міцність покриттів пояснюється їхньою будовою й умовами, за яких вони утворюються. Перелічимо основні причини низької міцності покриттів:

сумарна площа всіх дзвинок між частками, на яких утворилося міцне з'єднання, складає тільки частину всієї площі їхнього контакту;

міцність у місці приварювання нижча від міцності компактного матеріалу, що пояснюється макро- та мікроскопічною дефектністю утвореного з'єднання та невеликим взаємним проникненням матеріалів підкладки та покриття внаслідок малих об'ємних взаємодій

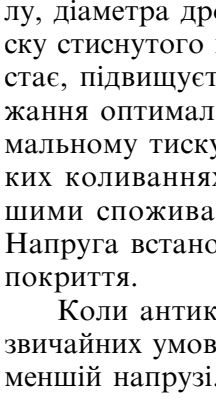


Рис. 10. Схема визначення міцності зчеплення покриття з підкладкою

шок подають із двох бункерів-живильників. Створено технологічні варіанти отримання композиційних порошків для плазмового напилення, тобто порошків, до складу яких входить кілька матеріалів. Звичайно частки таких порошків складаються з ядра основи, оточеного шаром другого компонента, що плакує. Плакуючий шар можна наносити хімічним осаджуванням, вакуумним випаровуванням.

Якість покриттів залежить від великого числа змінних факторів (за даними різних авторів, до 60), таких, як конструкція розпилювача, рід і витрата плазмоутворюючого газу, потужність; фізико-хімічні властивості та грануляція напилювального матеріалу, швидкість його подачі, відстань від розпилювача до поверхні виробу, відносна швидкість переміщення розпилювача та виробу, склад захисного середовища, спосіб підготовки поверхні виробу, температурний режим у процесі формування покриття і т. д. Тому в залежності від напилювального матеріалу, а також від матеріалу та форми виробу для кожного конкретного випадку вибирають режим напилення, керуючись положеннями теорії газотермічного напилення.

В області плазмового нанесення покриттів проводяться роботи, направлені на поліпшення властивостей покриттів, на підвищення надійності та стабільності процесу. Одним із способів, що дозволяє підвищити якість покриттів, особливо з металів і матеріалів, які розкладаються або піддаються окислюванню, азотуванню, є напилення у вакуумній камері з контрольованим за складом і тиском середовищем. Для цього застосовують також захисні соплові насадки, що створюють закритий простір між розпилювачем і виробом, заповнений плазмоутворюючим газом.

Плазмове покриття є своєрідним матеріалом, отриманим у результаті удару, деформації та надзвичайно швидкої кристалізації невеликих (5...100 мкм) часток матеріалу, напиленого на підкладку. Послідовно накладаючись одна на одну, частки утворять лускате покриття з анізотропією фізичних і механічних властивостей, неоднорідне в структурному та хімічному відношенні. Таке покриття характеризується розвинутою поверхнею меж між частками і підвищеним вмістом оксидних включень, особливо на межах окремих шарів.

Конкретні процеси при ударі, деформації, твердінні й охолодженні часток, а також процеси їхньої фізико-хімічної взаємодії з плазмоутворюючими газами й навколишнім середовищем при русі до підкладки визначають структуру та властивості покриття.

На рис. 24 показано улаштування розпилюючої головки. На передній стінці *2* з ізоляційного матеріалу встановлені струмоведучі шини *11* з припаяними до них контактними трубками *1*. На трубках за допомогою клемових затискачів закріплюються башмаки *12*. Трубки одночасно служать для закріплення розпилюючої голівки на корпусі апарата. Болти *6* (див. рис. 23) для закріплення розпилюючої головки на корпусі апарата мають отвори, скрізь які проходять дроти, що надходять у розпилюючу головку. На верхній поверхні башмаків закріплені спрямовуючі пластини *3* (див. рис. 24), за допомогою яких струм передається рухомому дроту. Для одержання міцного контакту та фіксування точки схрещення дротів в центрі *5* їх притискують до спрямовуючих пластин спеціальними вкладками *6*. Вкладки вставляють у скоби *13* підтискувальними пружинами *4*. На нижній поверхні башмаків гвинти *7* утримують скоби. На передню стінку накручують ковпак *8*, у середині якого розташовані башмаки та змонтовані на них деталі. Скрізь отвори в передній стінці стиснуте повітря надходить у внутрішню порожнину ковпака. Витікання потоку стиснутого повітря здійснюється через сопло *9*. Крізь сопло також рухаються дроти (не торкаючись кромок отвору). На передній частині ковпака закріплюється захисний екран *10*.

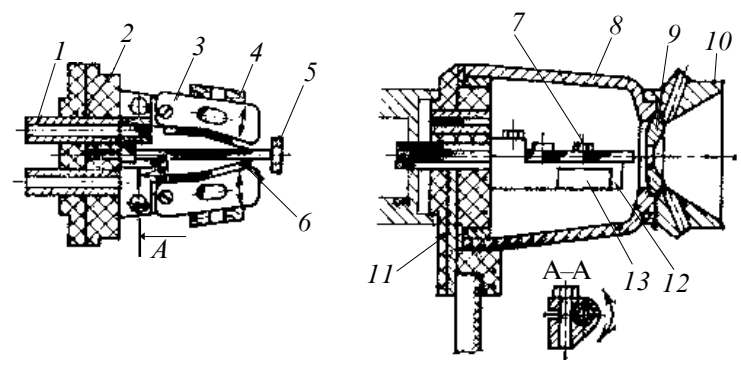


Рис. 24. Головка розпилююча

У розпилюючій головці апарата передбачена можливість регулювання положення точки схрещення дротів шляхом обертання башмаків на контактних трубках та переміщення спрямовуючих пластин по їх поверхні.

та спрямення кристалічних ґраток з різним видом хімічного зв'язку, наприклад покриття з оксиду на металі;

велика залишкова напруга, що виникає у напиленому матеріалі в процесі формування покриття;

знижена густина покриття (85...93 %) у порівнянні з густиною компактного матеріалу.

Густина і пористість – основні характеристики покриття, за якими можна побічно судити про якість напиленого матеріалу покриття. Загальнопринятий спосіб визначення густини та пористості покриття – ґідростатичне зважування. Однак через особливості структури покриття, його малої товщини і т. п. похибка при ґідростатичному зважуванні зразків може досягати 100 % і більше. Для отримання точних результатів необхідне повніше насичення відкритих пор рідини, тому просочення здійснюють у вакуумі. Густину та пористість визначають також металографічним способом, принципом якого є порами, що усі видимі в полі зору мікроскопа темні ділянки є порами.

Плазмою можна наносити покриття практично з усіх матеріалів. Широкі технологічні можливості плазмового напилення обумовили використання його в різних галузях промисловості й машинобудування.

Призначення й галузі застосування плазмових покриттів:

авіація – лопатки газових турбін, цапфи, шасі, гальмові колодки, бандажі, лопатки компресора, обтічники радіомерж та ін.;

космічна техніка – обтічники, теплозахисні, апарати для космічних досліджень тощо;

машинобудування – напрямновачі верстатів, прес-форми для лиття під тиском, електронагрівальні елементи печей, наливоприймальний інструмент, матриці для екструзії труднолежних металів, розливники для прокатних станів, бандажі промислових пристроїв, кришталки насосів для перекачування цукрової бадди, елементи машин для формування цегли, ножі для подрібнення сировини при виготовленні харчових продуктів (м'ясорубки, мукомолки і т. п.) та ін.;

металургія – сопла для кисневого дуття, фурми доменних печей, кристалізатори для установок безупинного розливання сталі, дюзи електропливок тощо;

транспорт – лопаті поршів і поверхня камер згорання, поршневі кільця, циліндри (гільзи) двигунів, підшипники ковзання, ґребні валів, корпуси суден;

матеріалознавство – композиційні матеріали, зміцнені волокном;

Споживча потужність при холостому ході, Вт	450
Потужність дуги, кВт	до 16
Вага без кабелів, кг	350
Розміри, мм	800×710×1105

Джерело можна експлуатувати при температурах від 263 до 313 К при відносній вологості на більше 80 % (при 293 К). TIME3-500 обладнаний блоком дистанційного керування *5* (див. рис. 22). Будова пульту керування *2* забезпечує контроль витрат і тиску стисненого повітря, очищення повітря від вологи та жиру, блокування електричної схеми комплекта за мінімально припустимими витратами повітря, контроль електричних параметрів дуги (струму та напруги).

На передній панелі пульта керування встановлені дифманометр ДСП-4Ст *6*, манометр *7*, вольтметр *8*, амперметр *9*, рукоятка потенціометра для регулювання напруги, що подається на дугу, кнопка "Стоп", світлодіод *10*, який показує, що навантаження на джерело струму перевищує припустиме, світлодіод *11*, який сигналізує про підключення до джерела струму, тумблер, що блокує увімкнення струму на апарат при відсутності подачі стисненого повітря. Касетний блок *3* може бути встановлений на пульт керування або на підлозі на спеціальний підставці. Блок має тумбиний пристрій для підтягування касет при ратовій зупинці апарата.

Електродуговий металізатор ЕМ-14М може використовуватися як у складі комплекту КДМ-2, так і автономно за наявності відповідного джерела струму та допоміжних пристроїв. Він призначений для нанесення металевих покриттів із цинку, алюмінію, міді, бронзи, сталі, молібдену та інших металів і сплавів з температурою плавлення не більше 3273 К способом газотермічного електродугового напилювання. При механізованому процесі апарат встановлюють на суппорт токарного верстата або іншим пристрій-переміщувач для взаємного відносного руху напилюваної деталі та металізатора.

Електродуговий металізатор (рис. 23) складається з трубіного приводу *17* з індукційним регулятором швидкості подавання, трисгуннового редуктора, механізму подавання дротів, розпилюючої голівки *15* та повітряного крану *16*, який перекриває подавання повітря до турбінного приводу і під ковпачок розпилюючої голівки.

будівництво – внутрішня та зовнішня обробка будинків, декоративне панно.

2.2. Установка, прилади та матеріали

Для виконання роботи використовуються установка для плазмового порошкового напилення покриттів "Київ-7", металографічні мікроскопи МІМ-7, твердомір типу Вікерса або Роквелла ТК-2, набір макро- та мікрошліфів (4×2 мікрошліфи з плазмовими самофлюсуючими або керамічними та металевими покриттями).

2.3. Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з будовою та принципом роботи установки для плазмового порошкового напилення покриттів "Київ-7".
2. Ознайомитися з процесом нанесення плазмових порошкових покриттів.
3. Дослідити особливості макро- та мікроструктури плазмових порошкових покриттів.
4. Визначити товщину покриття металографічним методом при 200-кратному збільшенні шляхом не менше як трьох вимірювань або за допомогою штангенциркуля.
5. Визначити твердість покриттів.

2.4. Порядок оформлення звіту

1. Коротко описати процес та зарисувати схему напилення плазмових порошкових покриттів.
2. Зарисувати схеми й описати особливості мікроструктури досліджених зразків із покриттями.
3. Отримані дані щодо режиму напилення, товщини, твердості й особливостей мікроструктури покриттів оформити у вигляді таблиці.

Склад матеріалу, який напилюється	Розмір частинок порошку, мкм	Режим напилення				Товщина покриття, мкм	Твердість	Особливості мікроструктури
		Напруга, В	Сила струму, А	Витрати плазмоутворюючого газу, м³/с	Дистанція напилювання, мм			

молібдену та інших металів з метою захисту виробів від корозії, відновлення зношених деталей механізмів та машин різноманітних галузей промисловості. Комплект КДМ-2 можна експлуатувати як у цехових, так і у монтажних умовах (наприклад, на будівельних майданчиках).

Технічна характеристика КДМ-2 наведена нижче.

Номінальна продуктивність розпилення матеріалу, кг/год:	
алюмінію	12,5
цинку	32
сталі	10
молібдену	8
Коефіцієнт використання розпилюваного матеріалу (КВМ):	
алюмінію (U = 23 В)	0,75
цинку (U = 17 В)	0,75
Діаметр розпилюваного дроту, мм	1,5...2,0
Швидкість постачання дроту, м/хв	2…12
Робочий тиск стиснутого повітря, МПа	0,5...0,6
Витрати стиснутого повітря, м³/год	до 90
Споживча потужність, кВт	до25
Робоча напруга дуги, В	17...44
Робочий струм, А	до 400
Розміри, мм, не більше	1330×710×1390
Вага, кг, не більше	470
Рівень шуму, дБ, не більше	112

Комплект КДМ-2 (див. рис. 22) включає в себе джерело живлення ТІМЕЗ-500 *1* з установленим на ньому пультом керування *2* та касетним блоком *3*, апарат для електродугової металізації ЕМ-14М *4*, касети, шланги, навушники, окуляри, респіратор, допоміжний інструмент.

Комплект можна використовувати для ручної та механізованої металізації.

Джерело живлення являє собою спеціалізований тиристорний випрямляч.

Технічна характеристика ТІМЕЗ-500 є такою:

Напруга холостого ходу, В	64
Струм при тривалому навантаженні, А	400
Максимальний струм, А	630
Діапазон плавного регулювання напруги, В	17...44

Можна проводити напилювання порошковим дротом, складеним з металевої оболонки та порошкового наповнювача. Якість покриттів може бути особливо високою при проведенні процесу в низькому вакуумі з розпилюванням дротів інертними газами.

Електрометалізатор може працювати як на постійному, так і на змінному струмі. При використовуванні змінного струму дуга горить не рівномірно, горіння супроводжується великим шумом. При постійному струмі характер роботи виявляється рівномірним, напилюваний матеріал має дрібнозернисту структуру, продуктивність напилювання – висока. Тому в наш час для дугового напилювання використовують електричного струму-джерела постійного електричного струму. У виглядi кранець розпилюється спецгтим повітрям. У момент відриву розплавленої краплі від дроту її швидкість практично дорівнює нулю, а швидкість витікання стисненого повітря або іншого газу, що використовується для розпилення, досягає

іонів або з тих та інших частинок одночасно. Тому для одержання покриттів з атомів різних елементів випаровування проводять одночасно з декількох джерел, а їхні парові потоки змішують. Оскільки потоки пари здатні змішуватися в будь-який пропорції, покриття може складатися з будь-яких компонентів незалежно від їхньої взаємної розчинності у твердому чи рідкому стані. Конденсаційно одержують покриття з різних поєднань металів між собою, металів з оксидами, карбідами, нітридами й іншими хімічними сполуками, також наносять покриття зі стехіометричних з'єднань. Змінюючи в часі продуктивність та інтенсивність потоків пари, регулюють структуру покриття, одержуючи мікрошарові, багатофазні, мікропористі, дисперсно-зміцнені і інші види покриттів.

Утворення покриття конденсаційно визначається послідовним рядом складних фізико-хімічних процесів:

випаровуванням або розпиленням вихідного матеріалу покриття;

спрямованим масоперенесом у вигляді потоку атомів чи іонів матеріалу покриття на поверхню основи;

зіткненням потоку з поверхнею і наступною адсорбцією чи десорбцією атомів або іонів на ній;

поверхневою дифузією атомів до місць крайового утворення зародків покриття;

міграцією та коалесценцією зародків і ростом зародків-острівців до зрощення;

зрощенням острівців у суцільну плівку;

ростом суцільної плівки й утворенням покриття необхідної товщини.

Випаровування, перенесення атомів та іонів, а також формування самого покриття залежать від ступеня вакууму в камері, де проходить напилення. У залежності від співвідношення між відстанню L від випарника до поверхні, що покривається, і середньою довжиною λ вільного пробігу атомів (без зіткнення з іншими) розрізняють три типи вакууму. Низький вакуум, коли $\lambda < L$, середній вакуум, коли $\lambda = L$, високий вакуум, для якого $\lambda > L$.

У низькому вакуумі кожен атом до утворення покриття багато разів зіштовхується з молекулами навколишнього газу і тому перемішається хаотично, а його траєкторія руху має вигляд ламаної лінії. Перехідний напрямок руху атомів порушується, потік пари перемішується, що дозволяє наносити в такому парному середовищі покриття, рівномірні за товщиною.

4. Подати висновки щодо фізико-хімічних особливостей створення плазмових порошкових покриттів.

2.5. Контрольні питання

1. Дайте характеристику процесу нанесення плазмових порошкових покриттів.
2. Назвіть основні параметри процесу плазмового нанесення порошкових покриттів.
3. Яким чином утворюється низькотемпературна плазма при напилюванні покриттів?
4. Проаналізуйте основні особливості плазмового нанесення порошкових покриттів.
5. Перелічіть основні причини низької адгезійної міцності плазмових покриттів.
6. Проаналізуйте вплив основних технологічних факторів на властивості плазмових порошкових покриттів.
7. Поясніть, чому густина плазмових покриттів нижче відповідного компактного матеріалу.
8. Проаналізуйте переваги та недоліки плазмового напилення порошкових покриттів.

Робота № 3. БУДОВА ТА РОБОТА УСТАНОВКИ ДЛЯ ВАКУУМНОГО КОНДЕНСАЦІЙНОГО НАПИЛЕННЯ (ОСАДЖУВАННЯ) ПОКРИТТІВ І ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ НАНЕСЕННЯ НА ВЛАСТИВОСТІ ПОКРИТТІВ

Мета роботи: вивчити будову та принцип роботи установки для вакуумного конденсаційного напилення (ВКН) (осаджування) покриттів і дослідити вплив технологічних параметрів нанесення на міцність зчеплення покриття з основою.

3.1. Теоретичні відомості

3.1.1. Загальні відомості

Покриття у вакуумі одержують осаджуванням і конденсацією напилюваного матеріалу на поверхні виробу. Для цього матеріал покриття випаровують чи піддають розпиленню. Відмінною особливістю процесу є те, що покриття утворюється з атомів чи

У високому вакуумі атоми, які покинули випарник, рухаються по прямим лініям незалежно один від одного без зіткнень аж до конденсації та утворення покриття. Форма покриття і його товщина визначаються формою та щільністю випаровуваних атомів.

У залежності від відхилення від рівності $\lambda = L$ у середньому вакуумі можуть спостерігатися явища, характерні як для низького, так і для високого вакууму.

Електронно-променеве нагрівання при ВКН покриттів одержало найбільше поширення для нагрівання та випаровування розплавленого матеріалу. Відомо багато різних схем випарників і установок ВКН із застосуванням електронно-променевого нагрівання. На рис. 11 наведені схеми, що зустрічаються найчастіше. До катода й анода електронної гармати від джерела живлення підводиться високовольтна напруга. У залежності від типу гармати вона складає 5...60 кВ. Термокатод (прямоканальний чи непрямоканальний) емітує електрони, що прискорюються в напрямку водоохолоджуваного анода. Відхильні та фокусівні електромагнітні системи (котушки) спрямовують сформований промінь відмінь на матеріал, що випаровується. Електронний промінь відхиляється до поверхні джерела нагрівання. Електрони після проходження електричного поля з різницею потенціалів U_0 прискорюються і здобувають кінетичну енергію

$$E_к = 1/2m_0 - v_0^2 = eU_0,$$

де m_0, v_0, e – відповідно маса, швидкість і заряд електрона.

Наприклад, проходячи через з напругою до 1 В, швидкість електрона v_0 складає 595 м/с.

Суттєвість нагрівання полягає в електронному бомбардуванні поверхні розплавленого матеріалу. Кінетична енергія електронів витрачається, в основному, на нагрівання та випаровування матеріалу. Однак значна її частина витрачається на утворення вторинних електронів (15...30 %), рентгенівське випромінювання (близько 0,1 %). Енергія відбитих електронів витрачається на нагрівання стінок камери, напливованого виробу, механізмів, розміщених у камері.

Необхідно враховувати особливості випаровування при нагріванні матеріалу електронним променем. Електрони гальмуються в поверхневому шарі на глибині 1...2 мкм (при U_0 = 5...20 кВ). Основне гальмування відбувається наприкінці пробігу. Теплота виділяється об'ємом тонкого поверхневого шару. Це й обумов-

найбільшого значення. Струмінь стиснутого повітря, що надходить скрізь сопло, відриває краплю розплавленого матеріалу та розпилює на більш дрібні частки (розміром менше 100 мкм). Одночасно струмінь повітря додає їм швидкість і прискорення, необхідне для постачання матеріалу до поверхні напилюваної деталі та формування покриття.

Установка (рис. 22) містить такі головні елементи: електродуговий металізатор (апарат для електродугової металізації), напилюваний матеріал у вигляді дроту, джерело електроживлення.

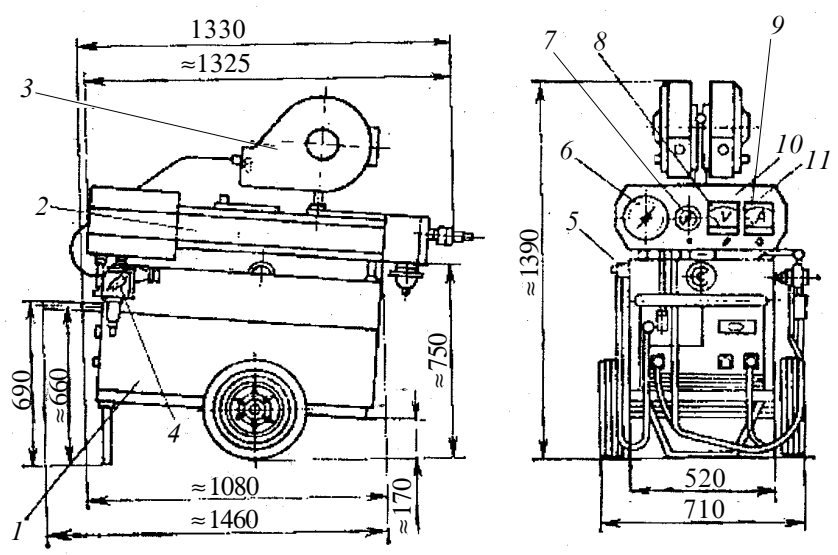


Рис. 22. Комплект для електродугової металізації КДМ-2

Напилюваний матеріал безперервно надходить у металізатор, де між дротами за допомогою джерела живлення збуджується дуга. Джерело живлення може бути змінного або постійного струму. У випадку постійного струму – це випрямляч, а у випадку змінного – знижуючий трансформатор, наділений перемикачем напруги.

Роздивимося головне нестаціонарне теперішнє вітчизняне обладнання для електродугової металізації, що виготовляється та експлуатується у промисловості.

Комплект для електродугової металізації КДМ-2 призначений для нанесення металевих покриттів з цинку, алюмінію, сталі,

7.5. Контрольні питання

1. Дайте характеристику газополуменевому способу нанесення покриття.
2. Назвіть основні технологічні параметри процесу газополуменевого напилення.
3. Які гази можуть використовуватися для газополуменевого напилення? Чим відрізняються їхні властивості?
4. Розповісти, які бувають вид ацетилено-киснево полум'я за складом, на які зони вони розподіляються, яка температура в цих зонах.
5. Назвіть матеріали, що використовуються для напилення.
6. Розповісти, яким чином потрібно запалювати пальник ГН-3 і встановлювати робочий факел полум'я.
7. Як впливає товщина покриття на міцність зчеплення та режим напилювання?
8. Визначте переваги та недоліки газополуменевого способу нанесення покриттів.

Робота № 8. БУДОВА ТА РОБОТА УСТАНОВКИ ДЛЯ ЕЛЕКТРОДУГОВОГО НАНЕСЕННЯ ПОКРИТТІВ І ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ НА ЇХ ВЛАСТИВОСТІ

Мета роботи: вивчити будову та принцип роботи установки для електродугового нанесення покриття і дослідити вплив технологічних параметрів напилення на міцність зчеплення покриття з основою.

8.1. Теоретичні відомості

8.1.1. Загальні відомості

Електродугова металізація отримала широке застосування для нанесення корозійностійких покриттів на різномаїтних будівельних спорудах як на морі, так і на суші. Для цієї мети в основному напилюються покриття із алюмінію та цинку.

В якості зносостійких покриттів напилюють різномаїтні сталі, бронзи та ін. А перспективними є композиційні покриття, наприклад, сталі та міді, міді та олова, а також інших матеріалів.

Киснево-пропускова суміш надходить у канал інжектора, тобто у другий ступінь інжекції і далі в змішувальну камеру наконечника і стволове розширення в каналах торцевого газу пальника, достатнє для всмоктування ацетилену в об'ємі, рівному чи трохи більшому від об'єму поданого кисню.

У трубці *1* наконечника відбувається змішування киснево-пропускової суміші з ацетиленом, яка утворює горючу суміш, що надходить у вихідний канал мундштука *10*, на вихід з якого суміш кисню з ацетиленом згорає, забезпечуючи як нагрівання поверхні, на яку напрямляється до необхідної температури, так і оплавлення гранул порошку.

Пристрій для підсмоктування повітря призначено для подачі кожного всмоктування повітря з атмосфери в суміш, що трохи знижує максимальну температуру ядра полум'я, але одночасно збільшує його довжину, що забезпечує більш тривале перебування порошку в зоні нагрівання і більше теплообладнання в нього. Крім того, інжектування сумішi повітрям підвищує безпеку роботи пальника.

Регулювання витрати порошку здійснюється за допомогою регулювального гвинта, що знаходиться на корпусі вузла подачі порошку.

Перед початком роботи пальника необхідно підготувати поверхню, на яку напилюють одним з наступних способів: струменево-абразивним, механічним (точенням, фрезеруванням), зачищенням металевою щіткою.

На поверхнях, що піддаються напиленню, не допускається наявність слідів мастил, жиру, окалин та інших видів забруднення.

У процесі напилення поверхня завжди повинна бути у горизонтальному положенні. Для цього необхідно передбачити можливість безупинного чи періодичного перемішення (обертання) деталі в процесі напилення.

7.1.3. Порядок роботи на установці для газополуменевого нанесення покриттів

Перевірте правильність приєднання шланга до стовбура.

Перед приєднанням ацетиленового шланга перевірте наявність розрядження (підсмоктування) в ацетиленових каналах пальника. Для цього треба відкрити вентиль регулювання витрат кисню.

температура випаровуваного матеріалу та поверхні випаровування. Ці показники в найбільшій мірі відповідальні за продуктивність процесу. У практиці напилення реалізується потужність джерела електроживлення від 0,5 до 200 кВт.

Параметри розпилюваного матеріалу й умов його введення в зону випровування. Тиск насиченої пари та швидкість випаровування при обраному матеріалі залежать від температури нагрівання. Регулюванням потужності джерела температурою випаровуваного матеріалу до значення, при якому $P_0 > 1{,}33$ Па. Тиск насиченої пари та швидкість випаровування істотно залежать від стану випаровуваної поверхні. Стороннi включення, навантаження оксидної плівки і т. д. ускладнюють протікання процесу випаровування. Неприпустима також висока концентрація газоподібних домішок у випаровуваному матеріалі. Великe значення для стабілізації процесу має форма та розміри поверхні випаровування. Це досягається різними способами, зокрема підживленням при тривалому випаровуванні або подачею матеріалу у вигляді стержня в міру його витрачання. Для підживлення тигля застосовують порошкові чи дротові матеріали. Нерівномірна подача призводить до коливань рівня рідини. Неприємна подача приводить до коливань рівня рідини-металічної ванни. Це впливає на характер розподілу елементів при електронно-променевому напилюванні покриттів. Стабільність рівня ванни досягається за допомогою різних систем стеження, наприклад за допомогою лазерного променя.

Параметри, що характеризують зовнішнє умови напилення. Великий вплив здійснюють наступні параметри: тиск у камері, дистанція напилення, температура поверхні виробу.

Тиск у камері $P_к$ вибирають від 10^{-2} Па і нижче. При вищому тиску ($P_к > 1{,}33 \cdot 10^{-1}$ Па) швидкість випаровування падає. Над поверхнею випаровування утворюється перехідний шар. Тиск у камері впливає на дифузію пари з цього шару. Слід зазначити, що пружність пари практично не залежить від $P_к$. При більш високому тиску насиченої пари ($P_0 = 133$ Па) швидкість випаровування знижується. Це поясюється зменшенням довжини вільного пробігу частинок над випарником.

Дистанцію напилення вибирають у межах 150...250 мм. Для оптимальних значень $P_к$ на відстань значно менша від довжини вільного пробігу напилених частинок. Збільшення дистанції позитивно впливає на рівномірність покриття.

По закінченні робіт натисніть на важіль і притисніть його до стовбура.

7.2. Обладнання, прилади та матеріали

Для виконання роботи використовуються: установка для газополуменевого порошкового напилення покриттів, до складу якої входить пальник ГН-3, з'єднувальні шланги, вузол газопостачання; 3–4 заготовки однакової товщини для напилення покриттів; 6–8 примірників каталогу обладнання та описання установки.

7.3. Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з будовою та принципом роботи установки для газополуменевого напилення покриттів.
2. Ознайомитися з процесом нанесення газополуменевих покриттів.
3. Дослідити вплив режиму напилення та товщини покриття на міцність зчеплення його з основою випробуванням на загин.
4. Виміряти кут загину зразка, при якому покриття починає відшаровуватися.
5. Отримані дані занести в таблицю.

Номер зразка	Тиск		Вид полум'я	Товщина покриття, мм	Кут загину, при якому відшаровується покриття
	кисню	ацетилену			

7.4. Порядок оформлення звіту

1. Коротко описати процес та зарисувати схеми обладнання для газополуменевого порошкового напилювання покриттів, а також схему пальника ГН-3.
2. Описати вплив технологічних параметрів напилювання на міцність зчеплення покриттів з основою випробуванням на загин.
3. Подати висновки щодо впливу технологічних параметрів газополуменевого напилювання.

лює високу ефективність електронно-променевих випарників, особливо при максимальних ступенях фокусування електронного променя.

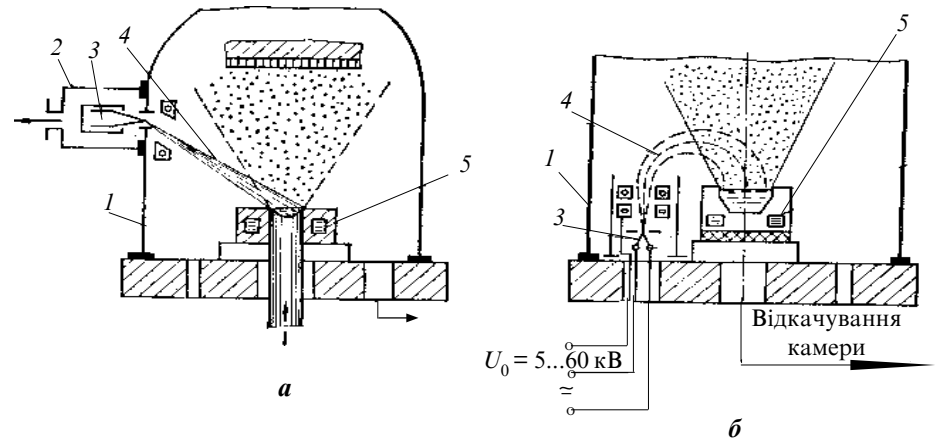


Рис. 11. Схеми електронно-променевих випарників для ВКН:
а – з незалежними вакуумними системами робочої камери та камери електронної гармати; ***б*** – з суміщеною вакуумною системою; *1* – робоча камера; *2* – камера електронної гармати; *3* – електронна гармата; *4* – електронний промінь; *5* – водоохолоджуваний тигель

До основних переваг напилення (осаджування) покриттів електронно-променевим випаровуванням відносяться: висока продуктивність, можливість напилення покриттів зі сплавів і деяких з'єднань, підвищені властивості покриттів та ін.

Недоліки полягають у підвищеній складності установок у виготовленні й експлуатації та наявності жорсткого випромінювання при високих прискорювальних напругах.

3.1.2. Параметри вакуумного конденсаційного напилення покриттів термічним випаровуванням та їх вплив на ефективність процесу

Найбільш значущими показниками ефективності процесу є швидкість випаровування розпилюваного матеріалу. Загалом усі матеріали здатні до випаровування при температурі вищій за абсолютний нуль. Умовно прийнято вважати температуру випаровування такою, при якій тиск насиченого пару складає 1,33 Па.

Розглянемо вплив параметрів ВКН термічним випаровуванням на показники ефективності процесу.

Конструктивні параметри. Великий вплив на швидкість випаровування, ефективний ККД, склад потоку частинок і якість покриттів здійснює конструкція випарника. Насамперед, випарник повинен забезпечувати мінімальні теплові витрати від випаровуванного матеріалу. Завдяки цьому скорочується кількість енергії, необхідної для випаровування матеріалу. Наприклад, застосування керамічних тиглів при електронно-променевому випаровуванні знижує потужність джерела теплоти в 4–6 разів у порівнянні з мідним водоохолоджуваним тиглем. У той же час з мідних водоохолоджуваних тиглів можна випаровувати багато матеріалів і одержувати покриття без зміни вихідного складу. Одночасне застосування декількох випарників (рис. 12) дозволяє одержувати складні багатокомпонентні покриття з високою рівномірністю товщин.

Параметри режиму випарника визначають енергію, яка підводиться до випаровуваного матеріалу, і рівень використання цієї енергії.

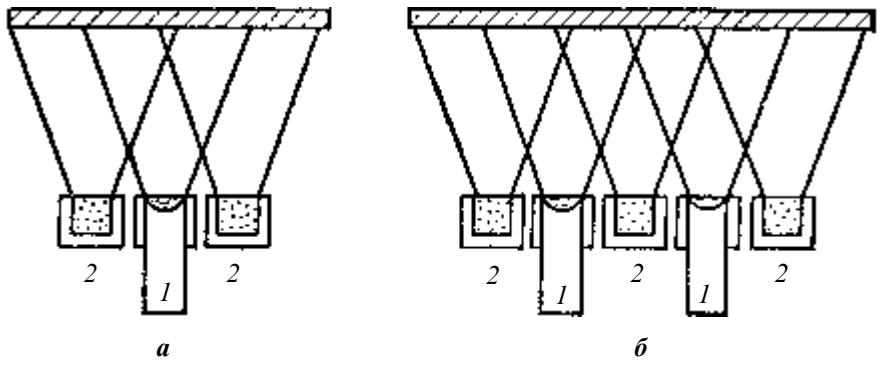


Рис. 12. Схема випаровування металевих *1* і неметалевих *2* матеріалів із трьох (***а***) і п'яти (***б***) джерел

Загальним параметром режиму роботи випарника є електрична потужність, яка підводиться. Зі збільшенням потужності джерела електроживлення зростає і потужність джерела теплоти електронного променя. Регулювання потужності джерела електроживлення здійснюється за рахунок зміни струму напруги. З потужністю джерела теплоти, розподілом її по поверхні нагрівання пов'язана

Запаліть і відрегулюйте полум'я в такій послідовності:

встановіть тиск кисню й ацетилену в робочих камерах редукторів відповідно до технічної характеристики;

повністю відкрийте вентиль кисню та перевірте розрядження в каналі бункера при натиснутому важелі;

заповніть бункер на 2 /3 об′єму порошковим сплавом;

відкрийте на 1/4 оберту кисневий і на 1 оберт ацетиленовий вентилі та запаліть суміш.

Потім, по черзі відкриваючи кисневий і ацетиленовий вентилі пальника, відрегулюйте полум'я заданої потужності та складу. Категорично забороняється встановлювати нормальне полум'я в початковий період регулювання при недостатній потужності, щоб уникнути зворотного удару полум'я в пальник.

При повністю відкритому ацетиленовому вентилі в полум'ї повинен з'явитися помітний надлишок ацетилену. Для напилення можуть бути застосовані сплави, одержувані способом розпилення чи сфероїдизації, з розміром часток 40...100 мкм.

Перед початком напилення натисканням важеля перевірте наявність подачі порошку (за зовнішнім виглядом полум'я), після чого можна робити напилення. Відстань від пальника до напилюваної поверхні повинна складати 200...300 мм. Далі необхідно розігріти поверхню, на яку наплавляється покриття, до температури "відпрівання" без розплавлювання основного металу.

Встановіть полум'я з надлишковим ацетиленом і періодичними натисканнями на важіль у наплавочну ванну подавайте необхідну кількість порошку, рівномірне розплавлювання і розподіл якого по поверхні досягається переміщенням полум'я пальника. У процесі наплавлення ядро полум'я повинне знаходитися на відстані приблизно 10...30 мм від основного металу. Тривала витримка наплавленого шару в рідкому стані не бажана, тому що це призводить до зниження фізико-механічних властивостей наплавленого шару.

Після наплавлення деталей складної конфігурації чи деталей із чавуна доцільне повільне охолодження в піску чи азбестовій шубі.

При гасінні полум'я спочатку закрийте ацетиленовий вентиль, а потім кисневий.

У випадку утворення зворотного удару погасіть пальник, охолодіть наконечник, підтягніть мундштук і накидні гайки.

Температура поверхні напилених виробів найбільше впливає на адгезійну та когезійну міцність покриттів і їхню структуру. Невисока температура (менше 0,3 від температури плавлення розпиленого матеріалу) сприяє формуванню на поверхні виробів слабко зчеплених покриттів з низькою когезійною міцністю. Основна причина формування неміцних покриттів, очевидно, пов'язана з невисоким енергетичним рівнем напилених частинок.

Параметри потоку напилених частинок. Раніше розглянуті параметри забезпечують створення потоку частинок, що характеризується наступними показниками:

швидкість потоку $10^{16}...10^{24}$ ч./(см^2·с);

середня кінетична енергія частинки 0,2...0,5 еВ;

ступінь іонізації 0,01...1,20 %.

Висока швидкість потоку частинок забезпечує підвищену продуктивність процесу. Швидкість росту покриттів досягає 1 мкм/хв і вище.

Установки електронно-променевого напилення покриття являють собою досить складні й енергоємні агрегати, розраховані на безперервну роботу протягом 10...15 год і більше. У нашій країні розроблено ряд промислових й експериментальних установок з електронно-променевими випарниками. З них найбільшого поширення набули установки УЕ-137 і УЕ-175, розроблені в ІЕЗ Патона для напилення захисних покриттів на лопатки газотурбінних двигунів (ГТД) (рис. 13).

Багатотигельний випарник складається з двох циліндричних тиглів *12* для випаровування металевих сплавів і трьох прямокутних тиглів *11* для випаровування хімічних сполук (карбідів, нітридів, оксидів). Захисний екран *14* і заслінка *10* перешкоджають розсіюванню випаровуваних частинок по робочій камері поза напиленими виробами. У мірну випаровування сплавів передбачена злагоджена подача стрижнів спеціальним механізмом *13*. Контроль рівня випаровуваного металу здійснюється телевізійним пристроєм стеження (на схемі не показано). Багатотигельний випарник з лінійним розташуванням джерел дозволяє напилювати композиційні жаростійкі, теплозахисні та інші покриття.

Установка має три камери: робочу *1* (камера випаровування), допоміжну 6 і камеру для електронних гармат *2*. До допоміжної (шлюзової) камери, яка відокремлюється від робочої вакуумним затвором *9*, кріпиться привід *7* для подачі, переміщення

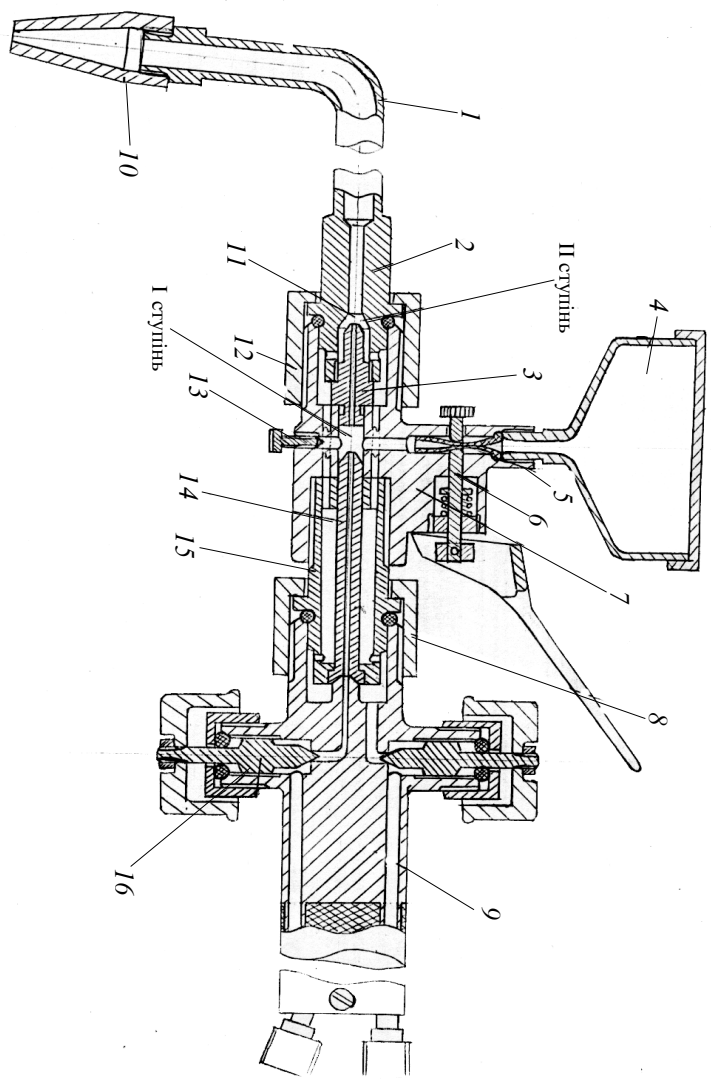


Рис. 21. Схема пальника ГН-3

й обертання через подавальний шток *8* напилених виробів *5*. В установці використовуються стандартизовані електронні гармати для випаровування *3* і нагрівання виробів *4*, передбачена система безконтактного контролю температури напилених виробів. Для цього використаний фотоелектричний пірометр випромінювання. Відкачку камер проводять диференційовано за допомогою високовакуумних насосів *15*.

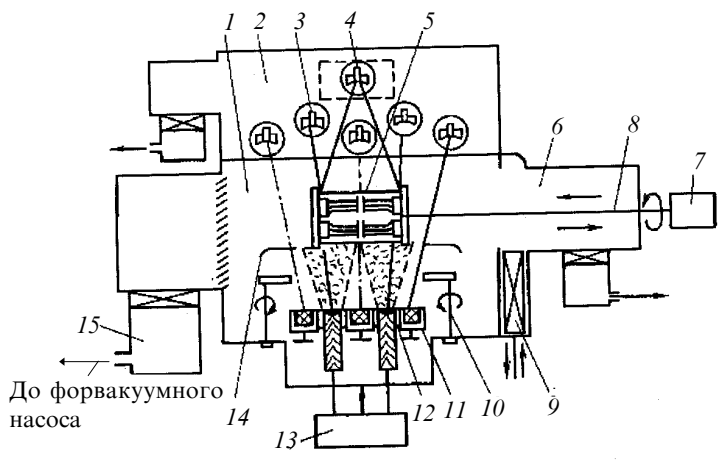


Рис. 13. Схема установки УЕ-137 для ВКН електронно-променевим випаровуванням

Установка УЕ-175 більш досконала. Попереднє електронне нагрівання виробів здійснюється в допоміжних камерах, розташованих по обидва боки від робочої камери. Передбачена автоматична система контролю та керування технологічним процесом випаровування на базі міні-ЕОМ.

3.2. Порядок виконання роботи

Ознайомитися з будовою та принципом роботи установки для вакуумного конденсаційного напилення покриттів на ДП НВКГ "Зоря"–"Машпроект".

3.3. Порядок оформлення звіту

1. Коротко описати процес та принцип роботи установки для вакуумного конденсаційного напилення УЕ-137 та зарисувати схему.

7.1.2. Будова та принцип роботи пальника ГН-3

Пальник наплавочний великої потужності ГН-3, технічна характеристика якого наведена в табл. 4, призначений для ручного наплавлення ацетилено-кисневим полум'ям порошкових гранульованих самофлюсуючих сплавів, що наносяться з метою відновлення зношених і зміцнення нових великогабаритних деталей, виправлення дефектів лиття (рис. 21).

Таблиця 4. **Технічна характеристика пальника ГН-3**

Найменування показника	Норма
Тиск ацетилену, МПа (кгс/см^2)	Не більше 0,02 (0,2)
Тиск кисню, МПа (кгс/см^2)	0,3...0,4 (3...4)
Витрата ацетилену, л/год	1500...1750
Витрата кисню, л/год	1500...1750
Витрата порошку при беззупинній подачі в полум'я, кг/год	Не менше 5
Коефіцієнт використання порошку при наплавленні на сталеву пластину розміром 200×120×10 мм	0,7 ± 0,05
Маса пальника (без порошку в бункері), кг	Не більше 1,1
Габаритні розміри, мм	Не більше 615×225×75

Пальник складається зі стовбура *9*, наконечника *2* і пристрою подачі порошку *7*. До стовбура за допомогою накидної гайки *8* через перехідник *15* приєднується пристрій подачі порошку. У перехіднику між пристроєм подачі порошку та стовбуром встановлений інжектор *14* першого ступеня інжекції.

Пристрій подачі порошку містить у собі бункер *4*, важільний механізм *6*, що забезпечує пуск і припинення подачі порошку, та пристрій подачі повітря в суміш *13*. До пристрою подачі порошку за допомогою накидної гайки *12* кріпиться наконечник, що складається зі змішувальної камери *11* з інжектором *13* другого ступеня інжекції.

Кисень від джерела живлення по гумотканинному рукаві через штуцер з ніпелем надходить до регулювального вентиля *16* і далі по інжектору першого ступеня інжекції. При витіканні кисню через вузький канал інжектора в порожнині каналу створюється розрядження, що сприяє при натисканні на рукоятку важільного механізма *5* надходженню з бункера порошкових гранульованих сплавів.

Таблиця 3. **Вибір абразиву в залежності від матеріалу покриття та його товщини**

Матеріал покриття	Товщина покриття, мм	Абразивний матеріал	Зернистість абразивного матеріалу, мкм
Цинк Алюміній	Менше 0,20 Менше 0,13	Кварцевий пісок Металевий дріб Корунд	370 ... 830 400 ... 700 260 ... 830
Цинк Алюміній	Більше 0,20 Більше 0,13	Кварцевий пісок Металевий дріб Корунд	500 ... 1400 700 ... 1000 430 ... 1400

6.4. Порядок оформлення звіту

1. Коротко описати процес та записувати схеми обладнання для струменево-абразивної обробки поверхонь.

6.2. Обладнання, прилади та матеріали

Установка для струменево-абразивної обробки поверхні; прилад для визначення шорсткості поверхні; зразки (4 шт.) для визначення шорсткості (токарна обробка, обробка наждачним папером, шліфовка, струменево-абразивна обробка).

6.3. Порядок виконання роботи

1. Вивчити будову та принцип роботи установки для струменево-абразивної підготовки поверхні.

2. Ознайомитися з процесом струменево-абразивної обробки та здобути навички роботи на установці.

3. Визначити шорсткість поверхонь оброблених проти різними способами.

4. Визначити міцність зчеплення покриття, напилених на поверхні, підготовленої різними способами, випробуванням на затин.

5. Вимірти кут затину зразка, при якому покриття починає відшаровуватися.

6. Отримані дані занести в таблицю.

Спосіб підготовки поверхні	Кут затину зразка, при якому відшаровується покриття

Рис. 14. Схема процесу ручного напилювання:
1 – шланкова кірка; *2* – напилювальний валик; *3* – основний метал; *4* – електродний стрижень; *5* – покриття електродного стрижня; *6* – газошлаковий захист; *7* – зварювальна ванна

шляхом застосування спеціальних електродних матеріалів, які забезпечують отримання напилюваного шару з заданими фізичними властивостями.

Напилювання застосовують для відновлення та зміцнення деталей і конструкцій машин шляхом нанесення на їх робочі поверхні металевих покриттів, які володіють необхідним комплексом властивостей: зносостійкістю, термостійкістю, кислотостійкістю і т. п. За допомогою напилювки утворюють біметалеві вироби, у яких виїдно поєднуються властивості напилюваного й основного металу.

Маса металу, яка наноситься на деталь, невелика і складає 2...6 % маси деталі, що визначає високу економічну ефективність напилювки, особливо при використанні механізованих засобів.

4.1.2. Дугове напилювання

У більшості випадків процеси напилювання базуються на застосуванні дугового зварювання електродом, який плавиться. Відрізняються ці процеси засобами захисту металу, який напилюється, від шкідливого впливу повітря та струнеем механізації, хоча суттєсть їх однакова. Вона полягає у тому, що під впливом високої температури електричної дуги, яка горить, між електродом і виробом, до яких підведено струм, електродний і основний метал розплавляються і створюють на поверхні виробу загальну ванну. З відлаленням електричної дуги розплавлений метал твердіє, утворює напилювений валик.

Ручне напилювання покриттям електродами застосовують у тих випадках, коли використання механізованих засобів неможливе або недоцільне (рис. 14).

2. Коротко описати технологію напилення та головні технологічні параметри, що впливають на властивості покриттів.

3. Подати висновки.

3.4. Контрольні питання

1. Якими процесами визначається утворення покриттів у вакуумі?
2. Назвіть ступені вакууму. Чим вони визначаються?
3. Як працює електронна гармата? У чому полягає сутність нагрівання?
4. Назвіть переваги та недоліки способу напилення електронно-променевим випаровуванням.
5. Дайте характеристику основним конструктивним параметрам?
6. Які параметри режиму роботи випарника в найбільший мірі впливають на продуктивність процесу?
7. Дайте характеристику параметрам розпилюваного матеріалу й умови його введення в зону випаровування.
8. Які параметри, що характеризують зовнішні умови напилення, впливають на якість покриттів?
9. Дайте характеристику параметрам напилених частинок.
10. Які особливості будови установки для електронно-променевого напилення покриттів?

Робота № 4. ВІДНОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ І КОНСТРУКЦІЙ МАШИН ДУГОВИМ НАПЛАВЛЕННЯМ

Мета роботи: ознайомитися з будовою, принципом роботи обладнання та процесом дугової наплавки; дослідити властивості наплавленого шару.

4.1. Короткі теоретичні відомості

4.1.1. Загальні відомості

Наплавка металів – один з найбільш ефективних способів підвищення довговічності деталей машин – дозволяє відновлювати геометричні розміри зношених деталей, а також зміцнювати їх

Для отримання мінімальної глибини проплавлення основного металу електрод нахиляють до сторони, яка протилежна напрямку наплавлення. Ручне наплавлення виконують електродами діаметром 2...6 мм при постійному струмі 80...300 А протилежної полярності (плюс на електроді) з продуктивністю 0,8...3,0 кг/год.

Головні параметри режиму ручного наплавлення: сила струму, напруга на дузі, швидкість наплавлювання. Тип електрода вибирають в залежності від хімічного складу металу, який необхідно наплавити. Діаметр електрода визначають в залежності від товщини та форми виробу, просторового положення поверхні, яка наплавляється.

Масу наплавленого металу приймають

$$m_н = A_н l t,$$

де $A_н$ – коефіцієнт наплавки, г/(А·год), який приймають в межах 7...14 г/(А· год); I – сила струму, А; t – час наплавлення, год.

Загальні втрати при наплавленні покритими електродами з урахуванням втрат на угар та розбризкування складають до 30 %.

Дугова наплавка під флюсом – один з основних видів механізованого наплавлення. Головними перевагами являються безперервність процесу, висока продуктивність, незначні втрати, відсутність відкритого випромінювання дуги, що значно поліпшує умови праці. Електричну дугу 7 збуджують між електродним дротом 6 і основним металом (виробом) *11*, які підключені до джерела струму (рис. 15). Підведення струму до електродного дроту здійснюється за допомогою мундштука *4*. По мірі плавлення електродний дріт подається до зони дуги роликами *3* механізму подачі. Стійкий процес наплавки забезпечується за умови, якщо швидкість подачі електродного дроту рівна швидкості його плавлення. У процесі наплавки флюс з бункера *1* по шлангу *2* за допомогою воронки *5* потрапляє з надлишком до зони горіння дуги *8*. Під дією теплоти дуги електродний і основний метал плавляться та утворюють на поверхні виробу ванну рідкого металу. Дуга частково розплавляє флюс, утворює ізолюючу шлаку навколо себе рідку епітаксіальну оболонку, яка складається з парів флюсу, металу та продуктів хімічних реакцій, які протікають між ними. Епітаксіальна оболонка захищає дугу та рідкий метал від контакту з повітрям, майже зовсім виключає розбризкування та сприяє збереженню

7. Середній термін служби абразивів з різних матеріалів представлений в табл. 2.

Таблиця 2. **Термін служби та втрати абразивів**

Матеріали	Кількість повторних циклів використання	Безповоротні втрати, кг/год
Електрокорунд Металевий дріб	10...30 60...100	3,0...5,0 1,0...1,3

Для забезпечення високої якості підготовки поверхні при струменево-абразивній обробці необхідно здійснювати періодичну заміну металевого дробу та видалення здрібненої частини абразив (табл. 3).

2. Зробити порівняльний аналіз щодо шорсткості зразків.

3. Подати результати дослідження впливу різних способів обробки поверхонь на міцність зчеплення покриття з основою випробуванням на загин.

4. Подати висновки щодо різних способів обробки поверхонь.

6.5. Контрольні питання

1. Дайте характеристику струменево-абразивній обробці поверхонь. Чим вона відрізняється від інших способів підготовки поверхонь?
2. Які показники потрібно враховувати при проведенні струменево-абразивної підготовки поверхні щодо матеріалу деталі?
3. Яку шорсткість поверхонь виробів рекомендується формувати?
4. Як захищають поверхні, що не підлягають струменево-абразивній обробці?
5. У якому режимі рекомендовано проводити струменево-абразивну обробку?
7. Що є ознакою добре підготовленої поверхні?
8. Дайте характеристику поверхонь, що підготовлені різними способами. Визначте переваги та недоліки того чи іншого способу.
9. Як впливає спосіб обробки на міцність зчеплення?

Робота № 7. БУДОВА ТА РОБОТА УСТАНОВКИ ДЛЯ ГАЗОПОЛУМЕНЕВОГО НАНЕСЕННЯ ПОКРИТТІВ І ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ НАПИЛЕННЯ НА ЇХ ВЛАСТИВОСТІ

Мета роботи: вивчити будову та принципи роботи установки для газополуменевого порошкового напилення покриттів. Дослідити вплив технологічних параметрів напилення на міцність зчеплення покриттів з основою.

7.1. Теоретичні відомості

7.1.1. Загальні відомості

Див. п. 1.2 лабораторної роботи № 1.

теплоти дуги. Розплавлений метал твердіє та утворює наплавлений валик *12*, який покритий шлаковою кіркою *9* та флюсом *10*, що не розплавився.

Коефіцієнт наплавлення під флюсом майже рівний коефіцієнту розплавлення, оскільки втрати на розбризкування не перевищують 1,5 %. При застосуванні одного електродного дроту коефіцієнт наплавлення під флюсом складає 14...20 г/(А·год) і може бути підвищений за рахунок збільшення вильоту електрода. Загальні втрати при наплавленні під флюсом не перевищують 3 %. Наплавлення під флюсом здійснюють напівавтоматичними й автоматичними засобами.

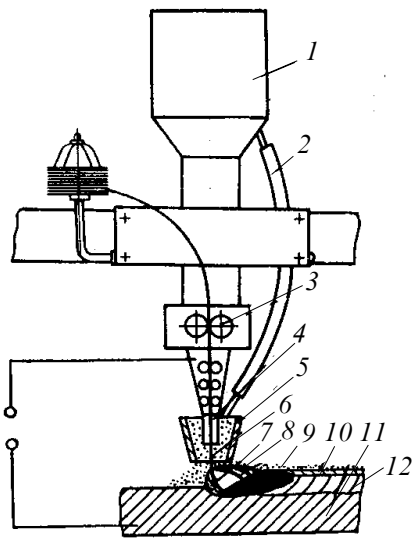


Рис. 15. Схема автоматичної наплавки під флюсом

Наплавлення електродом в захисному газі. В якості захисного середовища замість флюсу використовують інертні або вуглекислий гази.

Захисний газ *2* (рис. 16) під тиском подається із сопла *1*. Найбільш широке розповсюдження як захисний газ отримав аргон.

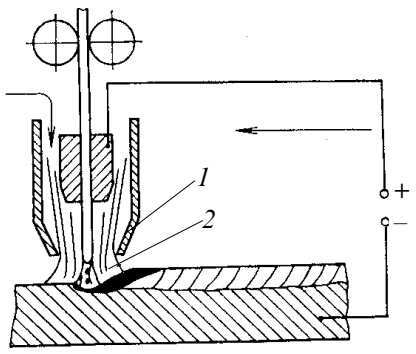


Рис. 16. Схема наплавки електродом, який плавиться в захисному газі

У пістолет (рис. 20) подається стиснуте повітря, витікаючи через сопло в напрямку вихідного отвору ковпака, – створюється спрямований потік. За принципом ежекції в просторі навколо потоку виникає розрядження, яке засмоктує по каналу подачі абразив із бункера; потрапляючи в потік, його частки розганяються і далі летять у бік оброблюваної деталі, вдаряючись об неї, вони очищують та активують поверхню.

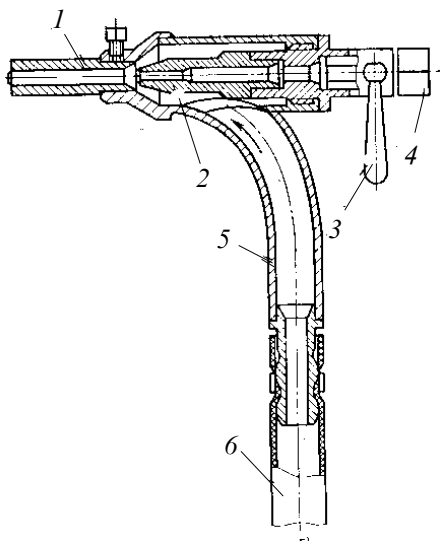


Рис. 20. Пістолет струменево-абразивний:
1 – наконечник; *2* – ежекторний вузол; *3* – вентиль, що перекриває подачу стиснутого повітря; *4* – з'єднувальний фланець; *5* – канал подачі абразиву; *6* – рукав подачі абразиву

6.1.2. Основні вимоги

1. Перед проведенням струменево-абразивної підготовки поверхні з деталей варто видаляти жир, мастило та бруд.

2. При проведенні підготовки поверхні основи необхідно враховувати матеріал деталі (твердість, в'язкість), умови експлуатації їх із покриттями.

3. Як абразив рекомендується використовувати шліфзерно електрокорунда, а також металевий дріб.

4. Металевий абразив повинен бути знежирений, без слідів іржі та зберігатися в умовах, що запобігають його корозії, забрудненню мастилом, жиром, пилом.

5. Не рекомендується застосовувати металевий абразив при підготовці деталей з міді, мідних сплавів та інших матеріалів з високою в'язкістю при нанесенні жаростійких і корозійностійких покриттів.

6. У випадку нанесення корозійно-стійких покриттів із металевих сплавів допускається використовувати для активації основи металевий абразив, виготовлений з матеріалу з масовою часткою силіцію 13...17 %.

5.3. Порядок виконання роботи

1. Приготувати розчини, г: сірчанокислий цинк – 200, сірчанокислий амоній – 50, оцтовокислий натрій – 15, вода – 1000.

2. Повернно зразка очистити шліфуванням і знежирити.

3. Помістити зразок у ванну з електролітом при температурі 18...25 °С і пропустити струм густиною 1,5 А/дм^2. Для наводнювання шару цинку товщиною 1 мкм при густині струму 10 А/дм^2 потрібно 3,5 хв.

4. Опустити зразок з покриттям на 2...3 с у 3%-й розчин азотної кислоти для надання блиску.

5. Вимірити куг загину зразків з різною товщиною шару цинку, при якому покриття починає відшаровуватися. Дані занести у

Мета роботи: вивчити будову та принцип роботи установки для струменево-абразивної підготовки поверхні. Дослідити вплив способу підготовки на шорсткість поверхні та міцність зчеплення.

таблицю.

5.4. Порядок оформлення звіту

1. Коротко описати процеси нанесення гальванічних покриттів. Визначити їх призначення та властивості.

2. Навести схему установки для нанесення гальванічних покриттів.

3. Подати висновки.

5.5. Контрольні питання

1. У чому суть гальванічного методу нанесення покриттів?

2. Які електроліти застосовують?

3. З яких металів отримують покриття і для чого їх застосовують?

Робота № 6. ПІДГОТОВКА ПОВЕРХНІ ДЛЯ НАНЕСЕННЯ ПОКРИТТІВ. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СПОСОБУ ПІДГОТОВКИ НА ШОРСТКІСТЬ ПОВЕРХНІ ТА МІЦНІСТЬ ЗЧЕПЛЕННЯ

Мета роботи: вивчити будову та принцип роботи установки для струменево-абразивної підготовки поверхні. Дослідити вплив способу підготовки на шорсткість поверхні та міцність зчеплення.

складу в ній можна відокремити три області: перша – область, яка характеризується нагріванням до рідкого або твердо-рідкого стану; друга – відповідає температурі нагрівання, достатній для повного або часткового фазового перетворення; третя – область, у якій температура недостатня для протікання цих процесів, але в ній дефорумується метал під дією зовнішніх навантажень. Основний метал не зазнає пластичних деформацій, хоча в сталі й існують зворотні напруження.

Будова та розмір ЗТВ залежать від способу напилювання, хімічного складу й теплофізичних властивостей основного металу. У цій зоні можуть виникати дефекти, які знижують експлуатаційну здатність напилюваного металу, а в деяких випадках можуть викликати аварійний вихід деталі з ладу.

Найбільш розповсюджені при напилюванні трішини. Їх поділяють на гарячі (кристалізаційні), холодні та наводнювані.

Гарячі трішини виникають в процесі первинної кристалізації напилюваного металу, тому їх розтягування сильно залежить з напрямком росту стовбчастих кристалів.

Холодні трішини виникають в напилюваному металі при порівняно невисокій температурі (≈200 °С). Їх характерна риса – утворення розвитих протягом декількох годин і навіть діб.

Мікроструктура напилюваного металу показані на рис. 17.

Відповідно до причин появи дефектів їх розділяють на дві групи. До першої відносяться дефекти, які утворюються у зв'язку з особливостями металургійних і технових процесів напилювання: тріщини, пори, шлакові включення. До другої групи відносять дефекти, які виникають через порушення режиму напилювання, несправність устаткування, низьку кваліфікацію зварювальників (підрізи, напливи, відворотн).

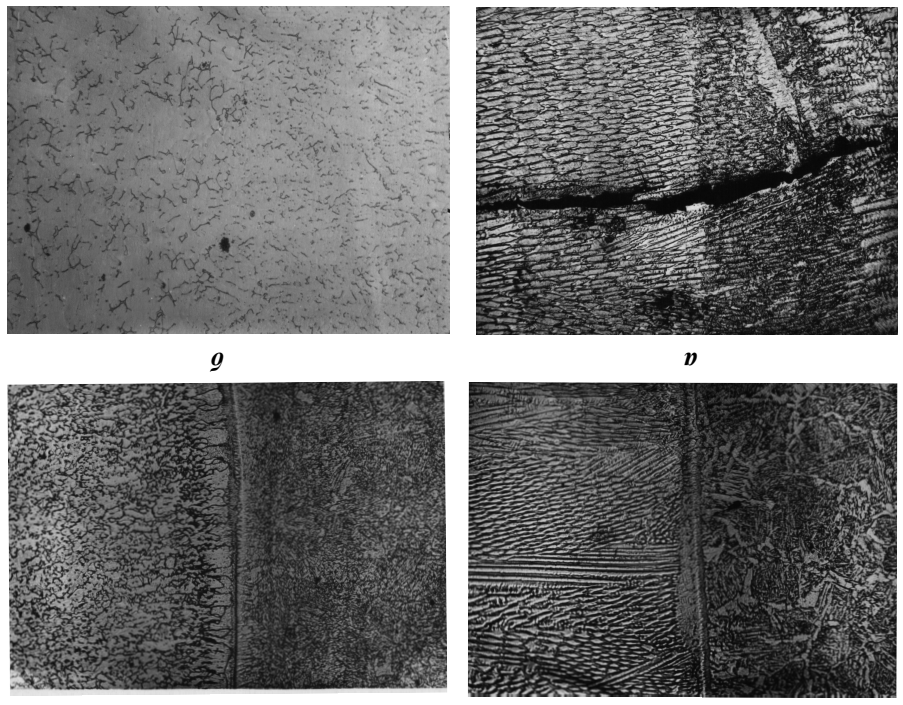
4.2. Установка, прилади та матеріали

Для проведення роботи використовується установка для дугового напилювання, металографічні мікроскопи МІМ-7, набір макро- та мікрошліфів, твердомір типу Бікерса або Роквелла.

4.3. Порядок виконання робіт

1. Ознайомитися з процесом дугової напилювання.

2. Ознайомитися з будовою та принципом роботи установки для дугової напилювання.



а *б* *г* *д*

Рис. 17. Мікроструктури ×330:
а – основний метал – низьковуглецева сталь, наплавлений метал – сталь аустенітного класу; *б* – перехід від першого шару до другого; *в* – гарячa тріщина при переході від першого шару до другого; *г* – ЗТВ – бініт; *г* – основний метал – низьковуглецева сталь, наплавлений метал – сталь 40Х; *д* – після високого відпуску: в ЗТВ – безвуглецева лінка, на границі сплавлення – карбідна фаза

на дорівнює НВ 120...150, а в сірчаноокислих – 60...80. Виділяє осаджування товстих шарів міді відбувається в бортпористовідневих електролітах, які мають дещо кращу розсіювальну здатність, ніж сірчанокислі.

Недоліком сірчанокислих і борфтористовіднев електролітів, крім крупнозернистості покриття і низької розсіювальної здатності, є погане зчеплення міді, яка осаджується, з поверхнею сталевих деталей. Для забезпечення міцного зчеплення попередньо наносять підшар міді товщиною 3...5 мкм з цианистого розчину або підшар нікелю 1...3 мкм, а потім наполуют мідне покриття в сірчанокислому або борфтористовідневому розчині.

Для отримання покриття дрібнодисперсної будови і прискорення процесу міднення застосовують реверсивний спосіб, періодично змінюючи напрямок струму. Реверсивне міднення можна проводити в кислих і цианистих електролітах.

Покриття нікелем мають срібястий колір з жовтуватим відтінком, вони добре полируються і надають дзеркального блиску. Цей блиск постійно втрачається, якщо повітря забруднене сірчаними газами.

Покриття мають дрібнокристалічну будову, але в шарах товщиною до 25 мкм – пористі. Оскільки шар нікелю є по відношенню до сталі катодним покриттям, намагаються уникнути утворення наскрізних пор шляхом потовщення шару нікелю або нанесенням підшару міді.

На мідні та латунні деталі нікель осаджують без підшарів. Твердість звичайних нікелевих покриттів дорівнює 250...270 кг/мм^2. Покриття нікелем дозволяють дещо зрадити мікропористості поверхні. Вони дуже стійкі до лугів, в органічних кислотах не розчиняються. Руйнуються в сірчаній, соляній, а особливо швидко в азотній кислоті.

Покриття добре витримують нагрівання, за виключенням підігрівання газовими пальниками.

Нікелеві покриття широко застосовують як захисно-декоративні для оздоблення деталей і арматури ванн, автомашин, велосипедів, приладів, а також виробів широкого вжитку.

5.2. Прилади та матеріали

Генератор постійного струму, електродвигун, амперметр, вольтметр, катод, анод, ванна, пластини вуглецевої сталі.

4.1.3. Вибір хімічного складу наплавленого металу

Для відновлювання та зміцнення деталей застосовують різні наплавні матеріали, які можуть піддаватися різним видам зносу. Наплавні матеріали класифікують за видом і загальною кількістю легуючих елементів.

Низьковуглецеві низьколеговані сталі використовують для відновлення різних роликів, валів та інших деталей, а також для створення підшарку при наплавці зносостійких сплавів.

Вуглецеві низьколеговані сталі, які містять більше 0,4 % вуглецю і до 5 % легуючих домішок, застосовують для зносостійкого наплавлення штампів холодного та гарячого штампування, ножів бульдозерів.

Високомарганцеві аустенітні сталі, які містять до 13 % Mn, мають високу стійкість проти ударів і здатність загартовуватися при деформації, в результаті чого твердість їх зростає до НВ 450...500, при цьому серцевина залишається пластичною. Цими сталями наплавляють деталі дробильно-размелювального устаткування, залізничні хрестовини та інші вироби, які працюють в умовах абразивного зносу з ударним навантаженням.

Хромисті сталі мають високу стійкість проти корозії та високу міцність при підвищених температурах. Застосовують при наплавленні плунжерів гідропресів, штампів.

Нікелеві сплави мають високий опір зносу, а також жаростійкість і стійкість проти корозії.

Хромокобальтові сплави (стеліти) мають високу жароміцність, опір стиранню при температурі до 1000 °С. Їх застосовують для наплавки клапанів авіаційних двигунів, бурових доліт, матриць штампів.

4.1.4. Структура наплавленого металу та його дефекти

Під впливом джерела теплоти присаджувальний метал плавиться, змішується з основним, утворює загальну ванну рідкого металу. По мірі віддалення джерела нагрівання рідка ванна кристалізується, утворює наплавлений метал. Між наплавленим металом та основним знаходиться зона термічного впливу (ЗТВ) – нерозплавлена ділянка основного металу, структура та властивості якої змінилися під впливом нагрівання. Структура ЗТВ неоднорідна, оскільки її ділянки нагріваються до різних температур, починаючи від температури плавлення і до ≈100 °С. ЗТВ при всіх способах наплавки неминуча, і незалежно від хімічного

6.1. Теоретичні відомості

6.1.1. Загальні відомості

Попередня обробка поверхні основи є важливим чинником для забезпечення міцного зчеплення напиленого покриття з нею, тому що в більшості випадків з'єднання напиленого покриття з основою відбувається в результаті механічного зчеплення. Отже, для того, щоб напилювані частинки, що співударяються та деформуються, міцно зчеплювалися з нерівностями поверхні, основа повинна бути досить шорсткою. Збільшення міцності механічного зчеплення пов'язано зі збільшенням площі поверхні основи і підвищенням її активності. Тому створення розвиненої шорсткості на поверхні основи є важливою вимогою.

Установка для струменево-абразивної обробки поверхні (рис. 19) являє собою металеву шафу, що обладнана витяжною вентиляцією *3* та освітленням внутрішнього простору *1*. У верхній частині шафи розташоване оглядове вікно *2*. Під вікном розташовані дверцята *13*, через які здійснюється доступ у середину шафи. В нижній частині шафи знаходиться абразив *10* із забірником *9*, через який він надходить до пістолета під час проведення робіт. У середній частині знаходиться робочий столик *12* і пістолет *4* з рукавами, що підводять до нього абразив *7* та стиснуте повітря *6*, яке подається за допомогою вентилів стиснутого повітря: головного *8* та робочого *5*. Робочий простір і нижню частину, в якій знаходиться абразив, розділяє сітка *11*, що запобігає випадковому падінню оброблюваних деталей до абразиву.

Струменево-абразивна обробка здійснюється пістолетом при зачинених дверцятах шафи. Доступ до пістолета здійснюється через отвір у дверцятах з рукавицями, що захищають руки працівника від дії абразивних частинок та пилу.

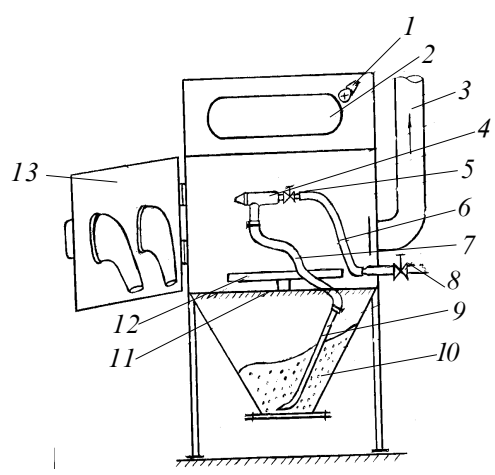


Рис. 19. Схема установки струменево-абразивної обробки

3. Дослідити особливості макро- та мікроструктури наплавленних покриттів.

4. Визначити твердість покриттів.

4.4. Порядок оформлення звіту

1. Коротко описати процес та зарисувати схеми ручного наплавлення, автоматичного під флюсом та в середовищі захисних газів.

2. Зарисувати схеми та описати особливості мікроструктури досліджених зразків.

3. Подати висновки.

4.5. Контрольні питання

1. Охарактеризуйте процес дугового наплавлення.

2. Проаналізуйте основні особливості таких способів наплавлення: ручне наплавлення покритими електродами, дугове наплавлення під флюсом, наплавлення плавким електродом в захисному газі.

3. Дайте класифікацію наплавним матеріалам і області їх застосування.

4. Як утворюється наплавлений метал? Назвіть особливості його структури.

5. Які дефекти можуть бути в наплавленому металі?

Робота № 5. ГАЛЬВАНІЧНІ ПОКРИТТЯ

Мета роботи: ознайомитися з процесом нанесення гальванічних покриттів та дослідити їх структури.

5.1. Теоретичні відомості

5.1.1. Електролітичне осаджування металів і сплавів

Спосіб електролітичного осаджування найбільш розповсюджений в машинобудуванні, оскільки дозволяє отримувати при незначних витратах металу різні покриття, які міцно утримуються на поверхні. Узагальнена схема нанесення покриттів представлена на рис. 18. Осаджування відбувається у ваннах з розчином електроліту, який містить іони металу, що осаджуються. Деталі,

які покривають, завантажують на катод у коло постійного струму, що живить ванну.

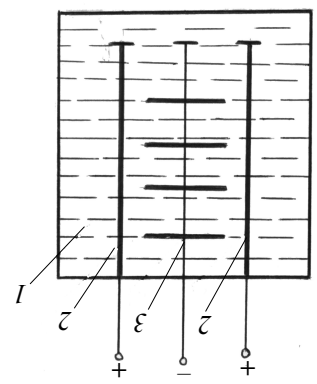


Рис. 18. Узагальнена схема електролітичного нанесення покриттів:
1 – ванна з електролітом; *2* – анод;
3 – катод з виробами

Анодом у більшості випадків служать пластини металу, з якого отримують покриття. На аноді він розчиняється, а на катоді осаджується з розчину. Завдяки цьому в розчині зберігається постійна концентрація іонів металу.

При наявності в покритті пор або пошкоджень на поверхні утворюються мікропори з покриття та металу, який захищається. В мікропорах рушиться дійки з більш електропозитивним потенціалом (анодн). Таким чином, якщо пористе покриття анодне, то воно руйнується, перешкоджаючи тим самим руйнуванню

металу. Пористі катодні покриття не руйнуються, а прискорюють руйнування металу, на який вони нанесені, тим більше, чим більша різниця потенціалів між покриттям і основним металом і чим більше електропровідне навколишнє середовище. Тому катодні покриття можна застосовувати тільки за відсутності в них наскрізних пор.

Металеві покриття не тільки захищають від корозії, але й надають поверхні гарного зовнішнього вигляду, твердості, зносостійкості, електропровідність, відбивальної здатності та інших властивостей.

Покриття цинком є найбільш розповсюдженими, оскільки анодні покриття добре захищають метал від атмосферної корозії. Їх наносять переважно на сталь, також на мідь, латунь, а іноді на алюмінії. Покриття мають сірий колір. Для блискучого цинкування використовують блискоутворювачі (натрієві солі, сірчаний натрій, гліцерин та ін.). Блискучі покриття мають рівну гладку поверхню, яка захищає його від подальшого руйнування. У воді при температурі 65 °С захисні властивості цинку різко погіршуються. Цинк взаємодіє з сірководнем і сірчаними сполуками, в кислотах і лугах він руйнується.

Цинкові покриття застосовують для захисту арматури, деталей для кріплення та пробільованих деталей; для попередження небезпечних контактів сталевих і мідних деталей з деталями з інших металів; для захисту труб, резервуарів від дії води, бензину, гасу. Товщина покриття – від 3 до 50 мкм.

Після цинкування деталі освітлюють шляхом занурення на 2–3 с в розчин азотної або хромової кислоти з додаванням сірчаної.

Для підвищення міцності цинкового покриття промиті й висушені деталі проходять термічну обробку при температурі 230...250 °С протягом 2 год з метою видалення водню. Для збільшення захисної здатності цинкові покриття підлягають ароматній пасивації з занурюванням у розчин біхромату натрію або калію. При цьому покриття набувають золотистого або райдужного переливчастого жовто-зеленого забарвлення.

При нагріванні вище 100 °С пасивувальна плівка руйнується.

Якщо цинкові покриття мають тьмяний блиск, роблять хімічне полірування. Поверхня стає блискучою з трохи синюватим відтінком, який нагадує хром. Інтенсивність блиску залежить від якості підготовки поверхні сталі після полірування. Оцинкована поверхня не забруднюється і має високу корозійну стійкість. Статичний коефіцієнт тертя її знижується.

Покриття міддю мають красивий рожевий колір і легко полірується, набуваючи інтенсивного блиску. Однак на повітрі вони порівняно швидко темніють, тому як декоративні покриття їх не застосовують. Мідні покриття непридатні також для захисту сталі та інших металів від корозії, бо вони окислюються. Під дією сірчаних сполук мідь забарвлюється в темний колір. У лугах мідь стійка, за виключенням аміаку. У кислотах руйнується, особливо швидко в азотній і хромовій. Мідні покриття витримують вигинання, розвальцьовування, глибоку витяжку, добре піддаються лудінню, паянню, зварюванню.

Мідні покриття застосовують в основному як підшар під нікелеві, хромові, срібні та інші види покриттів. Завдяки здатності добре поліруватися, такий підшар широко використовується для отримання покриття з високими відбивальними властивостями і дозволяє зменшувати наскрізну пористість покриття. Крім того, мідні покриття застосовують для захисту від навуглецьовування окремих ділянок поверхні деталі в процесі цементації, для притирання поверхонь деталей верстатів, механізмів, для зменшення шуму при терті, для наступного оксидування покриття та хімічного пофарбування при отриманні декоративного покриття.

Добра електропровідність міді дозволяє застосовувати її як підшар під срібло для струмопровідних жил при виготовленні друкарських схем і біметалічних провідників.

Товщина мідних покриттів залежить від їх призначення. Підшар міді, який наносять під яке-небудь покриття, має товщину 5...30 мкм, шар міді для захисту від навуглецьовування – 20...40 мкм.

Для отримання мідних покриттів частіше за все застосовують сірчанокислі або ціанисті електроліти з додаванням, якщо це потрібно, блискоутворювача. Твердість покриття в ціанистих ван-