

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

С. О. Лузан

**ТЕХНОЛОГІЇ ЗМІЦНЕННЯ ТА ВІДНОВЛЕННЯ  
ДЕТАЛЕЙ МАШИН**

Навчальний посібник  
для студентів спеціальності  
G 8 «Матеріалознавство»

Затверджено  
редакційно-видавничою  
радою університету,  
протокол № 2 від 26.06.2025 р.

Харків  
НТУ «ХПІ»  
2025

УДК 621.793.7:624.81(075.8)

Л 83

Рецензенти:

*О. С. Полянський*, д-р техн. наук, проф.,

Харківський національний автомобільно-дорожній університет;

*О. Н. Хорошилов*, д-р техн. наук, проф.,

ННІ «Українська інженерно-педагогічна академія»

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

**Лузан С. О.**

Л 83 Технології зміцнення та відновлення деталей машин : навчальний посібник для студентів спеціальності G 8 «Матеріалознавство» / С. О. Лузан. – Харків : НТУ «ХП», 2025. – 306 с.

ISBN 978-617-05-0586-6

У навчальному посібнику розглянуто сучасні технології зміцнення та відновлення деталей машин, що найактивніше розвиваються в цей час. До них належать методи газотермічного напилення, модифікування поверхні лазером, електронним променем, обробки плазмою, іонної імплантації. Розглянуто нові матеріали, які застосовуються для зміцнення деталей машин та технології їх одержання, такі як застосування СВС-процесу для синтезу композиційних матеріалів, що використовуються для газотермічних способів напилення покриттів та в процесах дугового наплавлення, наноматеріали та нанотехнології. Матеріал викладено на високому науковому й одночасно доступному для студентів рівні.

Призначено для студентів і магістрів денної та заочної форм навчання спеціальності G 8 «Матеріалознавство».

Іл. 129. Табл. 34. Бібліогр. 23 назви.

УДК 621.793.7:624.81(075.8)

ISBN 978-617-05-0586-6

© Лузан С. О., 2025

© НТУ «ХП», 2025

## ЗМІСТ

Вступ	6
Розділ 1. Загальні відомості про проблеми відновлення і зміцнення деталей машин	8
1.1. Відновлення деталей. Зарубіжний та вітчизняний досвід	8
1.2. Причини порушення працездатності машин	19
1.3. Види та характеристика зношування	20
1.4. Загальні закономірності процесу зношування	23
1.5. Методи визначення зношування	26
1.6. Пошкодження деталей машин і заходи щодо їх запобігання	29
1.7. Способи відновлення. Класифікація способів відновлення	33
Контрольні запитання	33
Розділ 2. Наплавлення	35
2.1. Класифікація методів наплавлення. Переваги та недоліки технології наплавлення	35
2.2. Відновлення деталей машин наплавленням	40
2.3. Ручне дугове наплавлення	41
2.4. Дугове наплавлення під шаром флюсу	46
2.5. Вібродугове наплавлення	51
2.6. Дугове наплавлення в середовищі захисних газів	56
2.7. Електрошлакове наплавлення	58
2.8. Наплавлення струмами високої частоти (індукційне)	61
2.9. Плазмове наплавлення	65
2.10. Лазерне (світлове) наплавлення	68
2.11. Електронно-променеве наплавлення	74
2.12. Електроконтактне наплавлення	77
2.13. Газове зварювання і наплавлення	83
2.14. Матеріали для наплавлення	87
2.15. Техніка механізованого наплавлення	91
Контрольні запитання	93
Розділ 3. Газотермічне напилення	94
3.1. Історія створення способу напилення металу	94
3.2. Джерела енергії	95
3.3. Класифікація газотермічних покриттів	111
3.4. Газополуменеве напилення	113
3.5. Детонаційне напилення	115

3.6. Плазмове напилення	116
3.7. Електродугове напилення	118
3.8. Газотермічні способи напилення	118
3.9. Матеріали для нанесення газотермічних покриттів	119
3.10. Застосування газотермічного напилення	123
Контрольні запитання	125
Розділ 4. Ремонтне зварювання	126
4.1. Поняття про зварюваність	126
4.2. Вплив елементів, що входять до складу сталей на їхню зварюваність	126
4.3. Зварювання сталей	129
4.4. Зварювання чавуну	134
4.5. Зварювання деталей з алюмінію та його сплавів	141
4.6. Зварювання міді, латуні та бронзи	143
Контрольні запитання	146
Розділ 5. Електроіскрова обробка металів	147
5.1. Електроіскрове легування (ЕІЛ)	147
5.2. Електроіскрове нарощування	152
Контрольні запитання	154
Розділ 6. Модифікування поверхні	155
6.1. Модифікування поверхні лазером	155
6.2. Модифікування поверхні електронним променем	159
6.3. Іонна імплантація	162
6.4. Обробка плазмою	165
6.5. Гальванічні процеси	168
6.6. Хімічне осадження	175
6.7. Дифузійне насичення	179
Контрольні запитання	184
Розділ 7. Удосконалення методів газотермічного напилення	185
7.1. Газополуменеве напилення, інтегроване з щіткової обробкою	185
7.2. Високошвидкісне напилення	200
7.3. Газодинамічне напилення покриття	205
7.4. Імпульсно-плазмове зміцнення	207
7.5. Електролітно-плазмове зміцнення	211
7.6. Мікродугове оксидування	217
Контрольні запитання	227

Розділ 8. СВС-процеси в технологіях зміцнення і відновлення деталей машин наплавленням і газотермічними способами напилення покриттів	229
8.1. Історія відкриття і розвитку СВС-процесів	229
8.2. Технології і матеріали, що застосовуються для СВС-процесів	239
8.3. Застосування СВС-процесу для синтезу композиційних матеріалів, що застосовуються в газотермічних покриттях і процесах дугового наплавлення	246
8.4. Властивості покриттів з композиційних механоактивованих СВС-матеріалів, наплавлених електродуговим способом	247
Контрольні запитання	255
Розділ 9. Наноматеріали та нанотехнології	257
9.1. Історія розвитку нанотехнологій	258
9.2. Структура та властивості наноструктурних матеріалів	263
9.3. Фізичні властивості наноматеріалів	267
9.4. Хімічні властивості	268
9.5. Механічні властивості	269
9.6. Класифікації наноматеріалів	272
9.7. Нанопорошки	274
9.8. Вуглецеві наноструктури	279
9.9. Галузі застосування наноматеріалів та нанотехнологій	283
Контрольні запитання	287
Розділ 10. Управління якістю поверхні та вибір технології відновлення деталей	288
10.1. Якість покриття	288
10.2. Методика визначення товщини відновлювальних покриттів, які забезпечують необхідний ресурс	289
10.3. Вибір технології відновлювання деталей	291
Контрольні запитання	295
Розділ 11. Економічна ефективність технологічного процесу відновлення деталей	296
11.1. Критерій вибору способу відновлення деталей з урахуванням їх ресурсу	296
11.2. Оцінка витрат на нанесення покриття	296
Контрольні запитання	298
Розділ 12. Складання маршруту технологічного процесу відновлення деталей. Визначення маршрутів обробки окремих поверхонь	299
Контрольні запитання	302
Список джерел інформації	303

## ВСТУП

Підвищення і забезпечення надійності засобів транспорту є однією з найважливіших передумов їх ефективного використання. Основна властивість, що характеризує надійність засобів транспорту, – довговічність – визначається показниками: термін служби і ресурс. На даний момент ряд засобів транспорту, що експлуатуються в різних галузях промисловості, мають недостатній термін служби, що призводить до величезних збитків. Внаслідок тертя і зношення в машинобудуванні матеріальні втрати розвинених держав досягають 4–5 % національного доходу. Опір тертя поглинає в усьому світі 30–40 % вироблюваної енергії. Витрати на ремонт і технічне обслуговування машин найчастіше в кілька разів перевищують їх вартість.

Рішення завдання підвищення ресурсу деталей машин та обладнання через застосування високоміцних нержавіючих сталей і сплавів призводить до великих витрат як на дорогі матеріали, так і на металорізальний і штамповий інструмент. Причому, незважаючи на те, що зі збільшенням вмісту легуючих елементів міцність, твердість і зносостійкість зростають, у той же час імовірність крихкого руйнування підвищується. Для запобігання цьому необхідне застосування нових конструкційних матеріалів, що поєднують міцну, зносостійку і тверду поверхню з пластичною, вузькою і тріщиностійкою основою. Цим пояснюється дедалі зростаючий сьогодні інтерес до покриттів. Збільшення застосування покриттів обумовлено ще й тим, що оскільки руйнування деталі, як правило, починається з поверхні, з'являється можливість відновлення розмірів і властивостей деталей методами нанесення покриттів.

В умовах ринкової економіки перед авторемонтними підприємствами стоять такі завдання: забезпечення транспортних засобів запасними деталями в необхідній кількості і заданої якості, скорочення часу ремонту автомобіля, зниження матеріальних та енергетичних витрат на ремонт. Ці завдання можливо вирішити при використанні технологій зміцнення і відновлення деталей машин.

У цей час у сфері зміцнення та відновлення зношених поверхонь деталей шляхом нанесення захисних покриттів до напрямів, що найактивніше розвиваються, належать методи газотермічного напилення, модифікування поверхні лазером, електронним променем, обробки плазмою, іонної імплантації.

Створюються нові матеріали та технології їх одержання, наприклад, застосування СВС-процесу для синтезу композиційних матеріалів, що використовуються для газотермічних способів напилення покриттів та в процесах дугового наплавлення, використовуються наноматеріали та нанотехнології.

# 1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ПРОБЛЕМИ ВІДНОВЛЕННЯ І ЗМІЦНЕННЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

## 1.1. Відновлення деталей. Зарубіжний і вітчизняний досвід

Частка відновлюваних деталей у розвинених зарубіжних країнах досягає 30–35 % у загальному обсязі споживання запасних частин. Міжнародною Асоціацією відновлювачів автомобілів та їх агрегатів (*APRA*) видано книгу «Відновлення електроніки і механічних вузлів автомобілів», в якій зазначено, що в цей час у Європі на кожні 200 млн автомобілів щорічно продається 20 млн відновлених, а в США – 60 млн. За даними *APRA*, ринок продажів відновлених автомобілів для Європи до 2015 р. оцінюється в 300 млн шт., повний європейський обсяг ремонту до 2015 р. досягне 30 млн од. Порівняно з 2000 р. цей обсяг ремонту збільшиться в 2 рази. Так зване «автомобільне післяпродажне обслуговування» (бізнес автомобільного ремонту і поставок запасних частин) має великий обсяг. Із продажу цей бізнес становить 600 млрд євро (850 млрд дол.), що становить близько однієї третини розміру автомобільного бізнесу.

Вторинний автомобільний ринок забезпечує в три рази більше прибутку, ніж продаж нових автомобілів у автомобільному бізнесі.

Концерн *VauWa* є одним з найбільших підприємств в Європі, що пропонують старі машини. На складах постійно є в наявності до 3500 різних старих машин. Пропоновані машини проходять перевірку в майстернях. Постачання запасними частинами проводиться через центр запасних частин. Передача машин і інструктаж по них забезпечуються фахівцями концерну. Центральний склад запасних частин у Швайнфурті забезпечує не тільки готовність до постачання підприємствам *VauWa* і клієнтам, але також забезпечує поставку за кордон. Якщо трактор або зернозбиральний комбайн відмовить у гарячу пору, то сервіс виявляється не тільки вдень, але і цілодобово – через систему «нічний експрес».

Збільшення обсягів відновлення деталей – це світова тенденція. Високі обсяги відновлення деталей є у Північній Америці та Європі. У Сполучених Штатах відновлення деталей проводять з 1940 р., в Англії – з 1945 р., в Німеччині –

з 1947 р.

В Європі темпи розвитку відновлення деталей нижчі, проте в останні роки популярність відновлених деталей зростає. Перспективним напрямом є відновлення деталей компресорів, кондиціонерів, автоматичних трансмісій та іншого устаткування, яким оснащують сучасні європейські автомобілі.

Подальше зростання очікується для великовантажного наземного транспорту та спецтранспорту, для відновлення деталей машин, при якому виробам повертаються початкові характеристики надійності, використовуючи перспективні технології. Наприклад, у США ряд компаній відновлює і модернізує зношену техніку військового та цивільного призначення, в тому числі трактори. Модернізації при ремонті переважно підлягають електрообладнання, дизельні двигуни, компресори. У великих обсягах цією роботою займається компанія *Caterpillar* (США). При повній модернізації на заводі максимально використовують відновлені деталі. У вартості нового дизельного двигуна 70 % припадає на комплектуючі та матеріали і 30 % на зарплату робітникам. У відновленому двигуні на частку деталей і матеріалів припадає 40 % вартості, а ціна становить близько половини ціни нового двигуна. Істотний внесок у роботу заводу роблять співробітники створеного при ньому науково-дослідного центру. Ними розроблено процеси напилення алюмінієвого порошку на головку циліндрів і заварювання тріщин блока циліндрів двигуна, а також спосіб відновлення деталей за допомогою лазера і технологія ремонту форсунок паливних насосів, які раніше утилізували.

У США відновлення деталей автомобілів регламентується Директивами Федеральної торговельної комісії (FTC) з відношення виробів автомобільної промисловості. Директиви стосуються всіх компаній з відновлення деталей, а також оптових і роздрібних торговців, які займаються продажем відновлених і старих виробів. У них сформульовано три основні правила.

1. Компанія зобов'язана підтвердити, що виріб старий або має старі деталі. Не можна перекручувати факти, пов'язані зі ступенем амортизації виробу.
2. Необхідна ідентифікація компаній, що займаються модернізацією, ремонтом або відновленням виробів. Неприпустимо перекручування фактів про її

діяльність. Чи не дозволяється продавати деталь, що ідентифікується з первісної фірмою-виробником, не розкриваючи того факту, що вона була відновлена іншою компанією.

3. Обов'язкове інформування покупців щодо стану виробів або обсягу проведеного ремонту.

У США діє Асоціація виробників модернізованих автомобільних деталей (APRA), яка має свій статут. Робота кожного підрозділу асоціації організована відповідно до регламенту, що відображає його діяльність.

Перелік деталей, які відновлюють на підприємствах асоціації, різноманітний. До нього входять деталі механічних і гідравлічних агрегатів, електричних стартерів і генераторів. Після відновлення деталі комплектують, збирають у вузли і ретельно випробовують. Відремонтовані вузли та агрегати поставляються клієнту з гарантією і можливістю подальшого сервісу.

Розширення номенклатури відновлюваних деталей – одна з найважливіших проблем, якою зайняті основні фірми більшості країн, що виробляють дорожньо-будівельну та сільськогосподарську техніку, вантажні автомобілі. Наприклад, на одному з великих підприємств компанії «Катерпіллар» створено спеціалізовану ділянку відновлення наплавленням деталей ходових частин гусеничних тракторів. Щорічно відновлюють понад 1500 полотен гусениць. На ділянці організовано відновлення підтримувальних роликів. Дилер видає гарантію на відновлення деталі, ресурс якої дорівнює ресурсу нової.

У Чикаго працює спеціалізований завод фірми «Інтернейшнл Харвестер» для відновлення деталей і вузлів тракторів. Ресурс вузлів і деталей, відновлених на заводі, не нижчий від ресурсу нових, а вартість відновлення не перевищує 25 % вартості виготовлення. Відпускна ціна відновлених вузлів і деталей становить близько 80 % ціни нових.

Досвід фірми «Інтернейшнл Харвестер» набув поширення, оскільки приносить значний прибуток. Багато фірм створюють потокові лінії відновлення деталей на своїх ремонтних заводах.

У США функціонують невеликі вузькоспеціалізовані майстерні чисельністю

персоналу до 10 осіб. У них відновлюють деталі обмеженої номенклатури з використанням сучасного обладнання і технологічних процесів з високим ступенем механізації й автоматизації, що дозволяє випускати високоякісні і дешеві деталі.

В Англії основний обсяг зношених деталей відновлюють на спеціалізованих агрегатно-ремонтних підприємствах. Наприклад, на заводі «Лондон Транспорт Борд» (підприємство середньої потужності) відновлюють деталі і ремонтують різні агрегати вантажних автомобілів і автобусів. Характерна особливість відновлення: ретельна дефектація зношених деталей і обов'язковий контроль відновлених деталей перед складанням, який проводять із застосуванням сучасних контрольних-вимірювальних засобів. В результаті забезпечується висока якість відремонтованих вузлів і агрегатів.

Подібно організовано відновлення деталей на іншому спеціалізованому авторемонтному заводі, що належить фірмі «Лондон Транспорт Чізуік Уоркс». Вартість відремонтованих двигунів становить 60 %, коробок швидкостей – 25 %, задніх мостів – 30 % вартості нових при 90 %-му ресурсі.

Поточні лінії застосовують на заводах з великим обсягом ремонту вузлів і агрегатів. На мотороремонтному заводі англійської фірми «Бінз Індастріз Лімітед» з річною потужністю близько 60 тис. дизелів і карбюраторних двигунів типу «Форд» на спеціалізованих потокових лініях відновлюють блоки циліндрів, головки блоків, колінчасті і розподільні вали, шатуни, гільзи, маховики й інші дорогі деталі. Аналогічно відновлюють деталі на спеціалізованих заводах компанії «Перкінс» і ін.

Збір зношених деталей проводять так: через широку мережу дилерів, шляхом обміну деталей, що відмовили або потребують ремонту, новими або відремонтованими, шляхом продажу дрібними ремонтними підприємствами великим заводам або спеціалізованим на відновленні деталей фірмам зношених дорогих деталей, придатних до відновлення.

Дилери створюють постачальникам Ремфонд стимул задачі тим, що при продажу нових запасних частин або вузлів знижують ціни на 20–25 %. Така форма збору деталей дуже поширена в США й інших країнах. Зокрема, її використовують американські фірми «Катерпіллар» і «Інтернейшнл Харвестер», німецька фірма

«Даймлер-Бенц» і ін.

У багатьох країнах дедалі ширше застосовують заміну вузлів, агрегатів і машин у разі їх відмови чи потреби в ремонті. При такому методі збору ремонтного фонду фірми зацікавлюють фермерів та інших клієнтів тим, що простої машин і устаткування скорочуються до мінімуму. Весь ремонтний фонд залишається на спеціалізованих підприємствах і використовується для відновлення деталей.

Великі спеціалізовані ремонтні заводи компаній «Лукас» та «Паркінс» (Англія), «Бош» (Німеччина), «Барліет» (Франція) та інші виробництва забезпечуються ремонтним фондом за рахунок вузлів і агрегатів, що ремонтуються на цих заводах.

В Японії питаннями відновлення зношених деталей займається фірма «Марум». Вона розробляє устаткування для відновлення деталей гусеничних тракторів (ланки гусениці, підтримуючі ролики й опорні катки, напрямні колеса).

У Німеччині відновлення деталей широко застосовується на заводі з ремонту дизельних двигунів фірми «Даймлер-Бенц» для вантажних автомобілів (м. Маннгейм). Метод ремонту – поточний, знеособлений, на двох лініях – для рядних двигунів і V-образних. Дизелі надходять у ремонт із середнім пробігом 300–500 тис. км.

Гільзи циліндрів, поршні, поршневі пальці і кільця, вкладиші підшипників, напрямні і сідла клапанів, прокладки не відновлюють і замінюють новими. Блок-картери, колінчасті вали, шатуни, маховики, головки циліндрів дефектують. Порядку 20–30 % названих вище деталей підлягають утилізації, інші відновлюють. У виробництві використовують прогресивні технології відновлення, включаючи різні види наплавлення й електродугову металізацію.

Аналіз технічної інформації показує, що за кордоном намічається тенденція модернізації техніки, що була в експлуатації. Наприклад, повна модернізація застарілої техніки широко практикується на підприємствах американської військової промисловості. За оцінкою професора Н. Насира (Рочестерський технологічний інститут), Пентагон щороку витрачає на повну модернізацію літаків, танків, броньованих машин та іншої військової техніки близько 15 млрд дол.

Зарубіжні експерти вважають, що швидке зростання цін на природні ресурси і їх виснаження, а також прийняття законів з охорони навколишнього середовища сприятимуть подальшому зростанню числа компаній, які будуть займатися модернізацією зношеної техніки.

#### *Порядок модернізації машин*

Зміна конструкції машини з метою поліпшення її якості має здійснюватися в такій послідовності:

1. Формується пропозиція щодо зміни конструкції з метою поліпшення якості функціонування машини (зниження витрати палива, підвищення продуктивності, показників надійності, комфортності).

2. Після обґрунтування пропозиції і доказів його безпеки, технічної, технологічної та економічної ефективності формується бізнес-план на модернізацію машини.

3. При необхідності виконується розробка конструкторської документації на деталі і складові частини машини, необхідні для модернізації.

4. Виготовляють дослідні зразки складових частин або придбають нові комплектуючі частини. Дослідний зразок машини готують до випробування.

В СРСР кожен суб'єкт з розвиненим сільським господарством мав у системі «Союзсільгосптехніка» мережу ремонтних заводів і спеціалізованих майстерень для капітального ремонту тракторів, автомобілів, комбайнів, двигунів, цеху для ремонту агрегатів паливної апаратури, гідросистем, автотранспортного електроустаткування, відновлення зношених деталей. Підприємства були спеціалізовані за марками і типами машин та агрегатів і повністю задовольняли потреби колгоспів і радгоспів та інших сільських підприємств у ремонті техніки. У роки реформування економіки через низьку платоспроможність сільськогосподарські підприємства повністю відмовилися від послуг з капітального ремонту повнокомплектних тракторів, комбайнів і автомобілів, шасі тракторів. Підприємства законсервовані, перепрофільовані або закриті. Замовлення на капітальний ремонт двигунів зменшилися в 5...10 разів, на інші вузли, агрегати – в 2...4 рази, багаторазово зменшилися обсяги відновлення зношених деталей.

У Новосибірській області ремонт складної техніки в спеціалізованих майстернях виконують агрегатним методом, капітальний ремонт повнокомплектних машин у РТП не проводиться. В Омській області ремонт енергонасичених тракторів виконують у двох спеціалізованих підприємствах. У першому ремонтують двигуни ЯМЗ-238, ЯМЗ-240Б і інші моделі, в другому – повнокомплектні трактори К-700 і його модифікації. Сільськогосподарські підприємства власними силами виконують до 70% загального обсягу ремонту сільськогосподарської техніки області. Великі сільськогосподарські підприємства, які мають типові ремонтні майстерні, повністю ремонтують і обслуговують всю свою техніку.

У Ростовській області чотири ремонтних підприємства спеціалізуються на капітальному ремонті повнокомплектних тракторів Володимирського моторотракторного заводу, Кіровського, Харківського, Київського тракторних заводів. У ремонтних майстернях фінансово стійких сільськогосподарських підприємств виконують капітальний і поточний ремонт власної техніки і агрегатів.

У Рязанській області з 25, що діяли раніше ремонтно-технічних підприємств залишилися два: Рибновського і САСІВСЬКЕ РТП. Рибновського РТП виконує капітальний ремонт повнокомплектних тракторів Мінського, Володимирського і Липецького тракторних заводів, Південного машинобудівного заводу, кормозбиральних комбайнів «Полісся» і агрегатів зазначених машин. САСІВСЬКЕ РТП здійснює капітальний ремонт повнокомплектних гусеничних тракторів ДТ-75, колісних Т-150К, К-700, К-701 і агрегатів до них (КПП, мости, рами), двигунів Алтайського, Харківського і Ярославського моторних заводів.

У Кіровській області функціонують всі колишні вісім спеціалізованих ремонтних заводів. Нолінський завод ремонтує всі автомобільні двигуни вітчизняного виробництва, укладає договори з фірмою «Мерседес» та іншими на гарантійне обслуговування нових автомобілів, що надійшли в область. Пасеговський ремонтний завод, Кіровський авторемонтний і Яранський машинобудівний заводи ремонтують тракторні та автомобільні дизельні двигуни, Кірово-Чепецький РМЗ – агрегати тракторів Т-170, Т-130, Т-150К, К-700 та їх модифікації. Слобідська «Агропромтехніка» надає різні послуги господарствам з ремонту та

обслуговування агрегатів і вузлів. Малмишський ремонтний завод перепрофільований на капітальний ремонт двигунів ЯМЗ всіх модифікацій і агрегатів сільгоспмашин. Зерно-, кормозбиральні комбайни та сільськогосподарські машини господарства ремонтують власними силами в своїх ремонтних майстерень.

На Міжнародній спеціалізованій виставці сільгосптехніки в Росії «Агросалон-2009», яка проходила 16-19 листопада 2009 року в МВЦ «Крокус Експо» був представлений передовий досвід з технічного сервісу машин в групі компаній «Підшипник», яка розташована в Краснодарському краї.

У структуру Групи компаній «Підшипник» входять: Торговельний дім «Гомсельмаш-Південь», Підприємство ТВЦ «Сільгосптехніка», Торговий дім «ХТЗ», ТОВ Авторемонтний завод «Підшипник», РТП «УстьЛабінсктехсервіс», ЗАТ ТД «Підшипник». Виробничі підрозділи Групи компаній «Підшипник» здійснюють відновлення і модернізацію комбайнів «Дон», тракторів ХТЗ і «Кіровець», автомобілів КамАЗ. В основі виробництва лежить принцип відновлення дорогих корпусних деталей (рами, каркаси кабіни, корпусу КПП і мостів) і повної заміни на нові деталей і вузлів, схильних до інтенсивного зношування (двигуни, деталі трансмісії, робочі органи, гідравліка, електрообладнання, облицювання, шини). Кожна одиниця техніки проходить повний складальний цикл - від рами до готової машини, який закінчується ретельної обкаткою під наглядом відділу технічного контролю. При відновленні техніки проводиться її модернізація: застарілі моделі двигунів змінюються на сучасні; встановлюється вдосконалена, ефективна система очищення зерна на комбайнах; кабіни теплоізолюючих і комплектуються кондиціонерами. Виробнича діяльність підприємства ліцензована.

На відновлену техніку надається гарантія протягом одного року, а її технічний ресурс становить не менше п'яти років. Групі компаній «Підшипник» дано право на просування продукції наступних підприємств: «Харківський тракторний завод ім. С. Орджонікідзе », «Червона Зірка», *Amazone, Farmet* і багатьох інших.

Група компаній «Підшипник» особливу увагу приділяє гарантійному і післягарантійному сервісу техніки. На закріплених територіях у створених торгових центрах кваліфіковані фахівці проводять обкатку і наладку техніки, усувають

виявлені дефекти, консультують клієнтів із питань правильної експлуатації та обслуговування придбаної техніки. На підприємстві діє система якості, тому споживач отримує повністю підготовлену до експлуатації техніку з фірмовою гарантією. Гарантійне обслуговування і групи компаній за першим зверненням клієнта надає кваліфіковану допомогу, тим самим забезпечуючи постійну експлуатаційну готовність техніки.

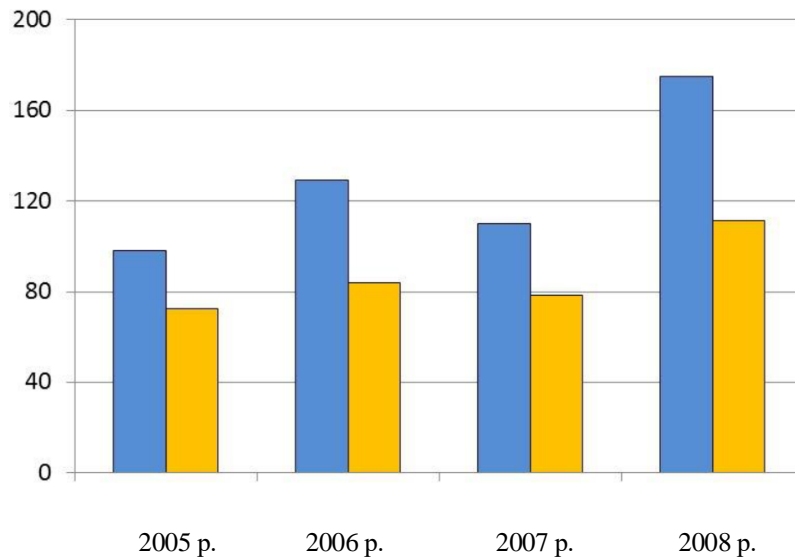
ТОВ Авторемонтний завод «Підшипник» – підприємство, що займається продажем, відновленням і модернізацією автомобілів КамАЗ і МАЗ. В основі виробництва є принцип відновлення дорогих корпусних деталей і повної заміни на нові. При складанні автомобілів використовуються оригінальні комплектуючі, що поставляються безпосередньо з заводів-виробників, що гарантує високу якість техніки, що випускається. Вантажні автомобілі після капітального ремонту забезпечуються гарантією на один рік або 30 тис. км пробігу.

РТП «Усть-Лабінськтехсервіс» – спеціалізоване високотехнологічне підприємство, що виробляє капітальний та поточний ремонт дизельних двигунів, пропонує клієнтам такі послуги: капітальний і поточний ремонт дизельних двигунів усіх марок (гарантія на двигуни – один рік, або 1000 мото-год); продаж двигунів після капітального ремонту; ремонт базисних деталей і вузлів двигунів; ремонт паливної апаратури; продаж запасних частин; купівля б/у двигунів у будь-якій комплектації.

Накопичено багатий позитивний досвід відновлення деталей до зарубіжної техніки в Республіці Башкортостан. Для зниження витрат на їх експлуатацію в республіці у великих обсягах виготовляють і відновлюють деталі (рис. 1.1), в тому числі до зарубіжної техніки.

Для сервісу дорогої паливної апаратури зарубіжної техніки в Башкирії створено ЗАТ «Башдизельпрецізійон», яке виконує технічне обслуговування та ремонт складних агрегатів паливних систем зарубіжної техніки фірм *Bosch, Zexel, Lucas CAV, Motorpal, Mefm* і ін. Витрати власників зарубіжної паливної апаратури на ремонт, проведений ЗАТ «Башдизельпрецізійон», порівняно з послугами іноземних

фірм знизилися до 8 разів. Підприємство виконує технічний сервіс паливної апаратури зарубіжних дизелів крім Башкортостану в Татарстані, Оренбурзькій, Челябінській областях і в інших регіонах.



■ – всього, ■ – в тому числі для зернозбиральних комбайнів

Рис. 1.1. Обсяг споживання запасних частин в МТС Республіки Башкортостан

У Республіці Комі на базі ВАТ «Севертрансекскавація» організовано дільницю відновлення деталей ходової частини гусеничної техніки, на якій відновлюють ведучі колеса тракторів *Komatsu* наплавленням під шаром флюсу із застосуванням нерухомого (лежачого) електрода. Собівартість відновленої деталі в кілька разів нижча від ціни нової.

Підприємство «Рематра» (Тамбовська область) проводить капітально відновлювальний ремонт трубоукладачів і бульдозерів D355 марки *Komatsu*, екскаваторів *Komatsu*, «Катерпиллар», капітальний ремонт вузлів і агрегатів вітчизняної та імпортової техніки, в тому числі: МАЗ, КамАЗ, КрАЗ, «Урал», *Ikarus*, *Claas*, *Libherr*. На підприємстві освоєно повний ремонт ходової частини та двигунів фірми *Komatsu*.

Кількість операцій обробки при відновленні порівняно з виготовленням нових запасних частин скорочується в 3–8 разів. Створення виробництв із

відновлення потребує в 2–2,5 рази менше капітальних вкладень порівняно з аналогічними підприємствами з виготовлення запасних частин. Для відновлення потрібно в 20–30 разів менше металу, ніж для виготовлення нових запасних частин. Виключивши металургійний цикл виробництва при відновленні 1 т сталевих деталей, економиться 180 кВт / год електроенергії, 0,8 т вугілля, 0,5 т вапняку, 175 м<sup>3</sup> природного газу.

Вартість відновлених деталей становить до 30–50 % вартості нової деталі. За даними експертів, проблема ремонту й обслуговування імпоротної техніки буде загострюватися в міру збільшення терміну експлуатації машин. У цих умовах організація виготовлення і відновлення деталей до імпортних машин є основною альтернативою дорогим оригінальним запасним частинам.

За даними дилерської компанії ТОВ «Цепелін Русланд», у калькуляції виїзного ремонту реактивного важеля трактора МТ845 (845В) («Челленджер») у 2008 р. вартість оригінальних запасних частин становила 45,3 тис. грн., або 84,0 % від загальної вартості ремонту, включаючи витрати на проїзд механіка до місця роботи трактора.

Шведська фірма *Skania* поставляє кошик нової муфти зчеплення за 8,6 тис. грн., а відновлену – за 5,7 тис. грн. Американська компанія «Кенсі Трансмашин» поставляє гідромуфти для автоматичної коробки передач, відновлені за 200–300 дол., а нові коштують 1000 дол. Це ще раз підтверджує ефективність відновлення деталей до імпоротної техніки (табл. 1.1).

Нині у розвинених країнах (США, Японія) частка відновлених деталей у поставках нових становить 35–40 %. В СРСР 1986 р. вона становила 19,5 %, в сучасних умовах частка відновлених деталей у поставках нових запасних частин становить 8–9 %.

Таким чином, відновлення зношених деталей, відновлювальний ремонт і модернізація старої автотракторної техніки – це об'єктивна світова потреба і перспективний напрямок у розвитку технічного сервісу техніки.

Таблиця 1.1 – Вартість нових і відновлених запасних частин до двигунів зарубіжного виробництва (в цінах 2008 р.)

Найменування деталей	Вартість деталей, грн.	
	нова (ориг.)	відновлена
Блок циліндрів MB	47384	9684
Головка блока <i>Deutz BFL</i> 413 F (на 1 циліндр)	4201	863
Вал розподільний <i>Cummins</i>	4300	1095
Вал розподільний <i>Deutz</i>	4196	905
Колінчастий вал <i>Deutz</i>	10675	2631
Колінчастий вал <i>Scania</i>	20234	558
Колінвал із шестернею в комплекті <i>Cummins</i>	27798	6737
Колінвал <i>Caterpillar</i>	18427	3853
Клапан впускний <i>Caterpillar</i>	271	76

## 1.2. Причини порушення працездатності машин

Розрізняють три причини порушення працездатності машин: конструктивні, технологічні та експлуатаційні.

Конструктивні причини обумовлені порушенням встановлених правил і норм проектування і конструювання, які призводять при експлуатації машини до появи конструктивної відмови. Причинами є: недостатня захищеність вузлів тертя; наявність концентраторів напружень; помилки в обліку розподілу напружень або розрахунку несучої здатності; неправильний вибір матеріалів; невраховані навантаження й ін.

Технологічні причини викликані недосконалістю або порушенням технології виготовлення або ремонту, що призводить при експлуатації машини до появи виробничої відмови. До таких причин належать дефекти: плавлення і

виготовлення заготовок (пористість, усадочні раковини, неметалеві включення і розшарування); механічної обробки (задири, тріщини, задири та ін.); зварювання (тріщини, залишкові напруги, пропали, недостатня глибина зварного шва; термічної обробки (гартівні тріщини, знеуглецювання, перегрів і ін.); матеріалу (включення, домішки та ін.); збірки (пошкодження поверхонь, внесення абразиву, неспіввісність; невідповідність розмірів та ін.).

Експлуатаційні причини є наслідком порушення встановлених правил і умов експлуатації машини та призводять до виникнення експлуатаційної відмови. Експлуатаційні відмови виникають при порушенні періодичності та змісту технічного обслуговування, навантаженнях, що перевищують допустимі і ін.

### **1.3. Види і характеристики зношування**

Зношування – процес руйнування та відділення матеріалу з поверхні твердого тіла та (або) накопичення його залишкової деформації при терті, що проявляється у поступовій зміні розмірів та (або) форми тіла.

Знос є результатом зношування.

Відповідно до ДСТУ 27674, розрізняють такі види зношування (табл. 1.2).

Механічне зношування – зношування в результаті механічних впливів.

Корозійно-механічне зношування – зношування в результаті механічної дії, супроводжуваної хімічним і (або) електричною взаємодією матеріалу з середовищем.

Зношування при дії електричного струму мається на увазі як електроерозійне зношування, яке в свою чергу є ерозію поверхні тіла в результаті впливу електричних розрядів при проходженні електричного струму (зношування контактів системи запалювання двигунів внутрішнього згорання, колекторів машин постійного струму, цоколів електричних ламп розжарювання).

Механічне зношування включає сім різновидів: абразивне, гідроабразивне (газоабразивне), гідроерозійне (газоерозійне), від утомленості, кавітаційне і зношування при заїданні.

Таблиця 1.2 – Види зношування

Термін	Визначення
Механічне зношування	Зношування в результаті механічних впливів
Корозійно-механічне зношування	Зношування в результаті механічної дії, супроводжуваної хімічною і (або) електричною взаємодією матеріалу з середовищем
Абразивне зношування	Механічне зношування матеріалу в результаті ріжучої або дряпаючої дії твердих тіл або твердих частинок
Гідроабразивне (газоабразивне) зношування	Абразивне зношування внаслідок дії твердих частинок, що захоплюються потоком рідини (газу)
Зношування від утомленості	Механічне зношування внаслідок руйнування від утомленості при повторному деформуванні мікрооб'ємів матеріалу поверхневого шару
Кавітаційне зношування	Механічне зношування під час руху твердого тіла щодо рідини, при якому бульбашки газу захоплюються поблизу поверхні, що створює місцевий високий тиск або високу температуру
Зношування при заїданні	Зношування в результаті захоплювання, глибинного виривання матеріалу, перенесення його з однієї поверхні тертя на іншу і впливу виступів і впадин на нерівностей на сполучену поверхню
Окиснювальне зношування	Корозійно-механічне зношування, при якому переважає хімічна реакція матеріалу з киснем або докислителями, що окиснює
Зношування при фреттінгу	Механічне зношування дотичних тіл при коливному відносному мікрозміщенні
Зношування при фреттінг-корозії	Корозійно-механічне зношування тіл, що стикаються, при малих коливальних відносних переміщеннях
Електроерозійне зношування	Ерозійне зношування поверхні внаслідок впливу розрядів при проходженні електричного струму

Абразивне зношування – механічне зношування матеріалу в результаті ріжучої або дряпаючої дії твердих тіл або твердих частинок (абразивних частинок). Абразивними частинками є частинки піску, тверді частки руди, ґрунту, продукти зносу поверхонь, тертьових деталей. Абразивного зношування зазнають деталі ходової частини гусеничних тракторів і дорожньо-будівельних машин, робочі органи сільськогосподарських машин, відкриті зубчасті передачі. Ступінь агресивності абразивних частинок щодо зношуваної поверхні деталі оцінюють коефіцієнтом твердості:

$$K_H = H/H_a, \quad (1.1)$$

де  $H$  і  $H_a$  – мікротвердість поверхні деталі й абразиву, відповідно.

Професор М. М. Тененбаум встановив, що критичне значення коефіцієнта твердості становить  $K_{H\text{кр}} = 0,5 \dots 0,7$ .

При значеннях коефіцієнта твердості  $K_H < 0,5$  спостерігається інтенсивне абразивне зношування, а при  $K_H > 0,7$  опір абразивного зношування різко зростає.

Гідроабразивне (газоабразивне) зношування – абразивне зношування в результаті дії твердих тіл або твердих частинок, що захоплюються потоком рідини (газу). Гідроабразивного зношування зазнають лопатки водяних насосів, внутрішні поверхні трубопроводів, гідроциліндрів, золотники гідророзподільників, а газоабразивного зношування – лопатки газових турбін, внутрішні поверхні газопроводів, циліндри компресорів і двигунів внутрішнього згорання та ін.

Зношування від утомленості – механічне зношування в результаті руйнування від утомленості при повторному деформуванні мікрооб'ємів матеріалу поверхневого шару. Виявляється при терті кочення у вигляді пітінга (місцевих осередків руйнування) і у відділенні мікрооб'ємів поверхні при терті ковзання через утоми поверхневих шарів.

Характерним прикладом є зношування бігових доріжок кілець підшипників кочення, бічних поверхонь зубів шестерень та ін.

Кавітаційне зношування – механічне зношування при русі твердого тіла щодо рідини, при якому бульбашки газу закриваються поблизу поверхні, що створює місцевий високий ударний тиск або високу температуру. В результаті на поверхні металу утворюються раковини, які місцями зливаються й утворюють наскрізний отвір. До цього зношування схильні трубопроводи, лопатки водяних насосів, зовнішні поверхні циліндрів і водяних сорочок двигунів внутрішнього згорання.

Зношування при заїданні – зношування в результаті захоплення, глибинного виривання матеріалу, перенесення його з однієї поверхні тертя на іншу і впливу виниклих нерівностей на сполучену поверхню. Прикладом є зношування зубів шестерень і підшипників ковзання.

Зношування при фретингу – механічне зношування дотичних тіл при

коливальному відносному мікрозміщенні. Цей вид зношування виникає при ослабленні болтових з'єднань, а також при відсутності великих динамічних і ударних навантажень.

Окиснювальне зношування – корозійно-механічне зношування, при якому переважає хімічна реакція матеріалу з киснем або окислення навколишнім середовищем. Одночасно є перебіг двох процесів – пластична деформація малих обсягів металу поверхневих шарів і проникнення кисню повітря в деформовані шари. На першому етапі відбувається руйнування і видалення дрібних твердих частинок металу з плівок, що безперервно утворюються внаслідок проникнення кисню, на другому етапі – утворення і викришування деформованих крихких оксидів. Окиснювального зношування зазнають шийки колінчастих валів, циліндри, поршневі пальці, болтові і заклепувальні з'єднання, шестерні, муфти, деталі, що знаходяться в рухомому контакті.

Зношування при фретинг-корозії – корозійно-механічне зношування дотичних тіл при малих коливальних відносних переміщеннях. На інтенсивність процесу зношування сильно впливає амплітуда напруги циклічного навантаження.

Характерною ознакою процесу фретинг-корозії в рухомих з'єднаннях є наявність темних смуг по межах сполучення. У з'єднаннях з натягом у місці контакту з'являються продукти окиснення від світло-красно-коричневого до темно-коричневого кольору.

Зношування при фретинг-корозії найбільш часто виникає на посадочних поверхнях напівмуфт, зубчастих коліс, підшипників кочення, в деталях кривошипно-шатунних механізмів.

#### **1.4. Загальні закономірності процесу зношування**

Процес зношування є незворотним монотонним процесом із поступовим нагромадженням зношування, який можна подати у вигляді інтегральної функції:

$$U(t) = \int_v^t v(t)dt \quad (1.2)$$

де  $U(t)$  – нагромаджений знос за час  $t$ ;

$v(t)$  – швидкість процесу зношування, яка у загальному випадку залежить від часу зношування.

На зміну швидкості зношування за часом можуть впливати форма спряжених поверхонь, їх шорсткість, постійне або перервне контактування поверхонь у процесі роботи механізму тощо.

*Динаміка зношування.* На рис. 1.2 наведено варіанти кривих динаміки зношування поверхні пари тертя.

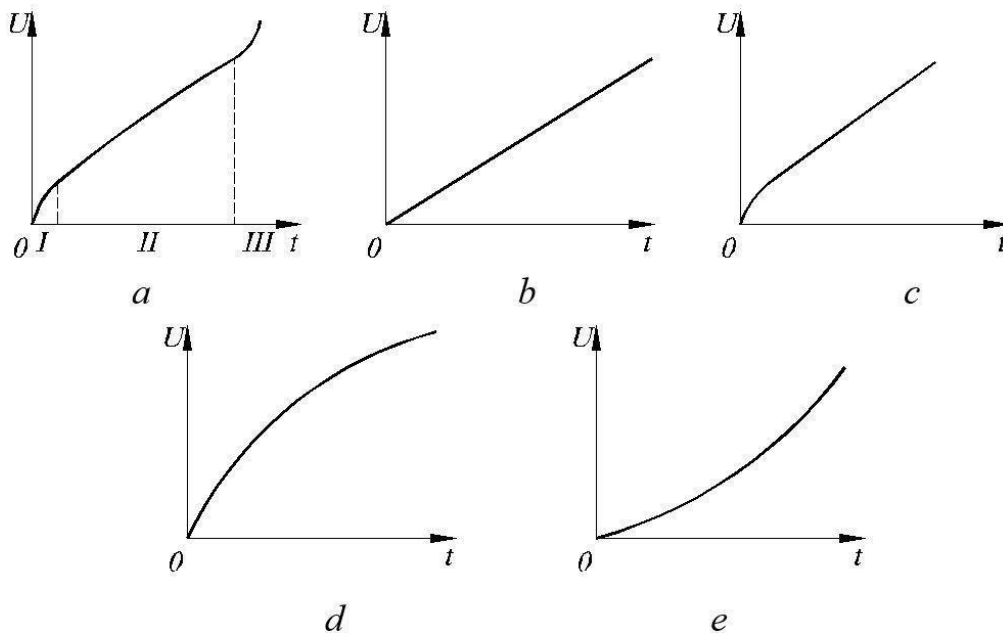


Рис. 1.2. Криві динаміки зношування

Розглянемо найбільш загальний варіант рис. 1.2,  $a$  – типову криву, яка складається з трьох характерних ділянок:

$I$  – характеризує початкову роботу спряження, коли найбільш виразно відбувається процес зміни геометрії (шорсткості) поверхонь тертя і фізико-механічних властивостей поверхневих шарів матеріалу, які проявляються при постійних зовнішніх умовах у зменшенні роботи тертя, температури та інтенсивності зношування. Цей початковий період визначає процес припрацювання пари тертя;

$II$  – характеризує нормальну роботу спряження. У цей період відбувається

поступове нарощування зношування, який має у ряді випадків сталий лінійний характер (швидкість зношування в середньому постійна);

*III* – характеризує інтенсивне, форсоване нарощування зношування. Робота спряження при цьому може супроводжуватися появою різного роду шумів і стуків і навіть призвести до руйнування деталі, тобто при досягненні третього періоду подальша робота спряження не допустима.

Найбільш характерні графіки динаміки зношування наведені на рис. 3, *b*, *c*, *d*, *e*.  
*b* – лінія, характерна для абразивного зношування деталей сільськогосподарських машин (леміш плуга, шарніри ланцюгів транспортера тощо);

*c* – крива, характерна для зношування шийки вала, спряженої із сальником, а також для рухомих спряжень при таких умовах роботи, коли зазор постійно вибраний в один бік (наприклад, ролик штовхача паливного насоса, спряжений з віссю);

*d* – крива, характерна для спряжень, що працюють при великих питомих навантаженнях, які збільшуються із збільшенням зазору (наприклад, колінчастий вал – підшипник);

*e* – крива, характерна для зношування деталей внаслідок руйнувань від утомленості поверхневих шарів металу (бігові доріжки кілець підшипників кочення, зуби шестерень тощо). У початковий період зношування практично не відбувається, оскільки нагромаджуються дефекти втомленості структури металу, які потім призводять до форсування відокремлення частинок, тобто до зношування.

Як відомо, процес зношування належить до категорії випадкових процесів, що призводить до розсіювання часу роботи однакових деталей до їх граничного стану, тобто до розсіювання ресурсу деталей.

Оцінка фактичного ресурсу деталей (вузлів, агрегатів машин) та його ймовірні характеристики (середній ресурс, гамма-процентний ресурс тощо) мають велике значення, оскільки інформація, отримана під час таких досліджень, є вихідною для виявлення резервів підвищення ресурсу виробів.

Оцінка довговічності деталей і спряжень зводиться до пошуку функції розподілу ресурсу, яку знаходять за даними спеціально проведених експлуатаційних або прискорених випробувань.

### 1.5. Методи визначення зношування

*Мікрометражне вимірювання деталей* – найпоширеніший метод, який застосовується для виявлення динаміки зношування деталей, дослідження характеру зношування робочих поверхонь (топографія зношування).

Для мікрометражного вимірювання деталей використовуються універсальні та спеціальні вимірювальні мікрометричні засоби. Величина приросту зношування визначається як різниця розмірів поверхонь деталей до і після зношування. Метод має свої недоліки: потрібно розібрати вузол, важко повторити вимірювання в одних і тих самих точках, неможливо виділити із загальної величини ту частину зношування, яка відбулася внаслідок пластичної деформації. Зменшення і навіть усунення вказаних недоліків у окремих випадках може досягатися проведенням спеціальних статистичних випробувань без проміжного розбирання, застосуванням спеціальних пристроїв для забезпечення повторюваності вимірювань у тих же місцях.

*Профілографування* поверхонь проводять спеціальними приладами – профілографами, які дають можливість графічно записати фактичний рельєф зношеної поверхні.

*Метод штучних баз* застосовується у двох варіантах: за допомогою відбитків і вирізання лунок. У першому випадку на поверхню тертя натисканням наносять заглиблення строго визначеної форми (конус, піраміда). За зменшенням заглиблення, яке окремо вимірюють на відбитку у плані до і після зношування, визначають величину зношування. У другому випадку на поверхні тертя тригранним алмазним обертовим різцем нарізають лунки. У цьому разі, на відміну від попереднього способу, немає напливів від тиснення.

*Визначення зношування за втратою маси* є інтегральним методом, оскільки встановлюється загальне зношування поверхні деталі. Вимірювання проводиться шляхом зважування деталей до і після зношування. Застосовується метод для деталей невеликих розмірів із використанням аналітичних ваг із ціною розподілу  $10^{-4}$  г.

*Визначення зношування за вмістом продуктів зношування* в оливі проводиться

за відібраною пробою спалюваної оливи визначають (наприклад, із картера двигуна). За допомогою хімічного або спектрального аналізу золи спаленої оливи вміст металу. Перевага методу у тому, що він не потребує розбирання вузла чи агрегату, недолік – неможливо визначити кількісне зношування окремих деталей.

*Визначення зношування за допомогою радіоактивних ізотопів* проводять за такою схемою: у досліджуваній зразок (деталь) вводять радіоактивний ізотоп. У процесі зношування оливою виносяться продукти зношування разом із радіоактивним ізотопом, які проходять через лічильник імпульсів, що вимірює радіоактивність оливи, яка збільшується у міру зношування деталі. Цим способом можна визначити динаміку зношування без розбирання, але без даних про розподіл зношування по поверхні. Спосіб потребує спеціального обладнання.

Під час ремонту має бути відновлена не тільки працездатність (або справність) машини, але й її міжремонтний ресурс. Тому у машині залишають для подальшої експлуатації тільки ті деталі і спряження, залишковий ресурс яких дорівнює або перевищує міжремонтний ресурс агрегату або машини. У зв'язку з цим граничний стан деталей і спряжень під час ремонту набуває трохи іншого змісту і визначається як допустиме при ремонті (або просто допустиме) значення параметра стану.

Таким чином, допустимим значенням параметра стану називається таке його значення, при якому залишковий ресурс деталі або спряження дорівнює міжремонтному ресурсу окремого елемента (вузла, агрегату) або машини в цілому.

До параметрів граничного (допустимого) стану деталей і спряжень належать граничні значення зазору у спряженнях, розмірі або зношування елементів деталі, похибки форми (овальність, конусоподібність тощо) і взаємне розміщення осей та поверхонь (неспіввісність, радіальне биття тощо), а також параметри пружності пружин, поршневих кілець тощо.

Граничні і допустимі значення геометричних та інших параметрів можуть бути встановлені шляхом: теоретичних розрахунків; масового мікрометражного вимірювання деталей, які надійшли в ремонт, і відповідного статистичного аналізу даних; спеціальних випробувань (прискорених або експлуатаційних); порівняння з попередньою конструкцією (на першому етапі виробництва нової машини). Граничні параметри встановлюються за технічним, технологічним і економічним критеріями.

Перед розглядом проблем ремонтного виробництва пригадаємо деякі терміни і поняття теорії надійності.

*Надійність* – це властивість об'єкта зберігати за часом у встановлених межах значення всіх параметрів, які характеризують здатність виконувати потрібні функції в заданих режимах і умовах застосування, технічного обслуговування, ремонтів, зберігання і транспортування (ГОСТ 27.002).

*Справний стан* – це стан об'єкта, при якому він відповідає всім вимогам нормативно-технічної і (або) конструкторської документації.

*Працездатний стан* – стан об'єкта, при якому значення всіх параметрів, що характеризують здатність виконувати задані функції, відповідають вимогам нормативно-технічної і (або) конструкторської документації. Працездатний об'єкт може вважатися несправним. Наприклад, трактор зберігає працездатність за наявності вм'ятин на облицюванні, несправного лічильника мотогодин тощо.

Перехід об'єкта з одного стану в інший визначається такими подіями.

*Пошкодження* – подія, яка полягає в порушенні справного стану об'єкта, коли зберігається його працездатність.

*Відмова* – подія, яка полягає у втраті об'єктом здатності виконувати потрібну функцію, тобто у порушенні працездатного стану об'єкта.

Слід відзначити, що найбільший вплив на експлуатаційні якості сільськогосподарської техніки мають такі властивості надійності, як довговічність і безвідмовність.

*Безвідмовність* – властивість об'єкта виконувати потрібні функції в певних умовах протягом заданого інтервалу часу чи напрацювання.

*Довговічність* – властивість об'єкта виконувати потрібні функції до переходу у граничний стан при встановленій системі технічного обслуговування та ремонту.

*Граничний стан* – стан об'єкта, при якому його подальша експлуатація неприпустима чи недоцільна, або відновлення його працездатного стану неможливе чи недоцільне.

Довговічність кількісно оцінюється двома показниками: ресурсом і строком служби.

*Ресурс* – сумарне напрацювання об'єкта від початку його експлуатації чи поновлення після ремонту до переходу в граничний стан (напрацювання – тривалість або обсяг роботи об'єкта).

*Строк служби* – календарна тривалість використання машини від початку експлуатації, або відновлення після ремонту, до переходу в граничний стан.

### **1.6. Пошкодження деталей машин і заходи щодо їх запобігання**

Пошкодження деталей є наслідком розвитку процесів зношування і порушень правил технічної експлуатації (ПТЕ) обладнання.

Пошкодження деталей машин за характером впливів, що призводять до відмови обладнання, підрозділяються на механічні, термічні, корозійні, ерозійні, кавітаційні та зносіві пошкодження.

Механічні ушкодження виникають під впливом зовнішнього навантаження і проявляються у вигляді залишкової деформації (вигин, скручування, зминання), в'язкого і крихкого зламу, а також викришування від утомленості.

Залишкова деформація є наслідком перевантажень, тривалої дії змінних контактних напруг, підвищених температур. Заходи щодо попередження залишкової деформації: зміцнення поверхневого шару деталі, заміна на матеріал з підвищеними механічними характеристиками, зміна конструкції вузла, навчання експлуатаційного персоналу та підвищення вимог щодо дотримання правил технічної експлуатації обладнання.

В'язкий злам виникає під впливом навантажень, що перевищують допустимі значення і є наслідком порушення ПТЕ. Характерною ознакою в'язкого зламу є наявність ділянки плинності у місці зламу.

Заходи щодо попередження в'язкого зламу ті самі, що і в разі залишкової деформації.

Крихкий злам є наслідком значних ударних навантажень, тривалого впливу

знакозмінного навантаження, низької якості матеріалу з підвищеним вмістом фосфору, сірки і водню, неякісної термообробки, наявності концентраторів напружень. Характерною ознакою крихкого зламу є кристалічна структура місця зламу і згладжена поверхня місць зародження тріщини від утомленості.

Заходи щодо попередження крихкого зламу: заміна на матеріал з підвищеною ударною в'язкістю, скорочення до мінімуму концентраторів напружень на поверхні деталі, зміна конструкції вузла, що не допускає появи збільшених зазорів у лінії приводу, що призводять до появи підвищених динамічних навантажень.

Викришування від утомленості (пітінг) виникає при високих контактних напругах і зниженій контактній міцності матеріалу. Виявляється у вигляді одиночних і групових вісеподібних заглиблень. Заходи щодо попередження: зміцнення контактних поверхонь деталі, підвищення класу чистоти обробки поверхні, точний монтаж підшипників і зубчастих передач.

Термічні пошкодження найбільш часто проявляються у вигляді термічної втоми, що є результатом одночасно діючих механічних навантажень і циклічних, з великим перепадом (до 800 °С і більше) температур. Даний вид пошкодження трапляється в робочих валках і роликах рольгангів станів гарячої прокатки, роликах МБЛЗ, палетах агломераційних машин, трактах видачі агломерату та ін. Характерною ознакою пошкодження є так звана «сітка розпалу». Підвищений опір термічної втоми мають такі марки сталі: 60С2, 30ХГСА, Х18Н9Т (гарт із високим відпуском).

Корозійні пошкодження є наслідком атмосферної, газової та електрохімічної корозії. Атмосферна корозія виникає при вологості середовища більше 70 % через конденсації вологи і взаємодії з киснем повітря. Для боротьби з атмосферною корозією застосовують протекторний захист, консерваційні матеріали і лакофарбові покриття.

Сутність протекторного захисту полягає в тому, що поверхня чорного металу покривають менш стійким до корозії металом. Електрони більш активного металу (Zn) перетікають на метал із меншою активністю (Fe) і утримують позитивні катіони останнього від переходу в електроліт. Залізо не буде корродувати доти, доки не буде зруйнований шар цинку в радіусі його дії.

Консерваційні матеріали (сповільнювачі корозії) утворюють на поверхні захисні плівки, ізолюючи метал від навколишнього середовища і руйнують систему гальванічних елементів на його поверхні. Консерваційними матеріалами є пластичні оливи (оливи АМС і ЗЕС), рідкі консерваційні оливи [НГ-203 (А, Б, В) і К-17], плівкоутворювальні інгібовані нафтові склади [НГ-216 (А, Б, В) і Інгібіт- 3], захисні воскові дисперсії (ЗВД-13, ІВВС-706М і ПЕВ-74), малорозчинні інгібітори корозії (МСДА-1, МСДА-2, емульгін і СЖК), леткі інгібітори корозії (Г-2, НДА і ХЦА), інгібований папір (МГБІ 3-40, МГБІ 325 і МГБІ 8-40).

Лакофарбові покриття використовуються для захисту від корозії поверхонь, що не труться, і є найбільш дешевими, тому вони набули найбільшого поширення.

Газова корозія виникає при температурах 300...600 °С. При температурі вище 600 °С спостерігається стрибок у окалиноутворення. Для запобігання газовій корозії застосовують матеріали з підвищеною окалиностійкістю.

Електрохімічна корозія розвивається у водному середовищі з розчиненим киснем за рахунок електрохімічних процесів, пов'язаних із неоднорідністю металу, в тріщинах, в щілинах між металами. Заходи щодо попередження електрохімічної корозії: обмеження доступу кисню до поверхні металу, застосування однорідних матеріалів.

Корозійне розтріскування виникає при дії статичних навантажень і агресивного (щодо цього металу) корозійного середовища. Корозійне розтріскування є наслідком зниженої корозійної стійкості меж зерен та їх насичення воднем, що супроводжується розвитком значних тисків по межах зерен, що веде до зниження міжкристалітної міцності і подальшого руйнування деталі. До цього виду пошкодження схильні посудини з нержавіючої сталі, виготовлені з латуні, дюралюмінію, магнієвих сплавів.

Корозійне розтріскування усувається заміною на матеріал із більш високим опором даного виду руйнування і виключенням можливості його насичення воднем.

Корозійна втома являє собою процес руйнування металів при одночасній дії корозійного середовища і циклічних напружень. Основними факторами, що викликають корозійну втому, є активність корозійного середовища, рівень діючих

циклічних напружень, число циклів навантаження за одиницю часу, міцність і корозійна стійкість сплаву. Корозійна втома запобігається захистом деталей від корозійного середовища і застосуванням низьколегованих марок сталей.

Ерозійні пошкодження виникають при дії на метал із великою швидкістю потоків рідини або газу, причому інтенсивність руйнування поверхні зростає з підвищенням температури потоку і його запиленості.

Заходи щодо попередження ерозійних пошкоджень: підвищення опору металу окиснення в даному середовищі, збільшення поверхневої твердості, наплавлення твердосплавних матеріалів.

Кавітаційні пошкодження виникають на поверхні металу під впливом гідравлічних ударів. Зниження інтенсивності кавітаційних ушкоджень досягається через введення речовин, що знижують поверхневий натяг рідини; застосування високовуглецевої сталі, нікелю і хромвмісної сталі (наприклад, 38ХМЮА), низьколегованого чавуну з кулястим графітом; використання зміцнюючих технологій: поверхневе пластичне деформування (ППД), гартування ТВЧ, азотування, цементація; наплавляння або напилювання твердосплавних матеріалів; застосування полімерних матеріалів.

Пошкодження при заїданні характерні для зубів шестерень і підшипників ковзання. Для запобігання схоплюванню застосовують поверхневе пластичне деформування, поверхневе загартування, сульфідкування, введення в мастильний матеріал присадок, що містять сірку, хлор, фосфор.

Щоб підвищити зносостійкість вузлів тертя в умовах абразивного зношування, застосовують зміцнення поверхні деталей, наплавлення твердосплавними матеріалами.

Пошкодження поверхонь внаслідок фретинг-корозії служать концентраторами напружень і знижують межу витривалості. Для зниження інтенсивності фретинг-корозії використовують зміцнення контактуючих поверхонь, збільшення натягу з'єднання, нанесення на контактуючу поверхню шару міді, кадмію, ПТФЕ (політетрафторетилен).

### **1.7. Способи відновлення. Класифікація способів відновлення**

Способи відновлення деталей машин передбачають компенсацію втрачених у процесі експлуатації поверхневих шарів основного конструкційного матеріалу шляхом нанесення на зношені ділянки нових мас (шарів) матеріалу тієї самої чи іншої марки. У ряді випадків при відновленні використовують метод розточування на наступний ремонтний розмір, при цьому змінюють сполучену деталь. Також потрібне проведення спеціальних обробок – відпалу для зняття напруги, зміцнення для підвищення зносостійкості.

У різних галузях народного господарства, у тому числі і при ремонті транспортних засобів, застосовується велика кількість методів і способів відновлення деталей. Основні з них наведено на рис. 1.3.

#### **Контрольні запитання**

1. У чому суть процесу зношування?
2. Що таке зношування?
3. Які розрізняють види зношування?
4. Які застосовуються методи визначення зношування?
5. Унаслідок чого відбувається пошкодження деталей машин?
6. Які бувають види пошкоджень і заходи щодо їх запобігання?
7. З якою метою використовують способи відновлення?
8. Які способи відновлення і зміцнення використовують для деталей машин?
9. Що являє собою механічне зношування, яких видів воно буває?
10. У чому суть процесу зношування при фретингу?
11. Що являє собою кавітаційне зношування?
12. У чому полягає суть окислювального зношування?

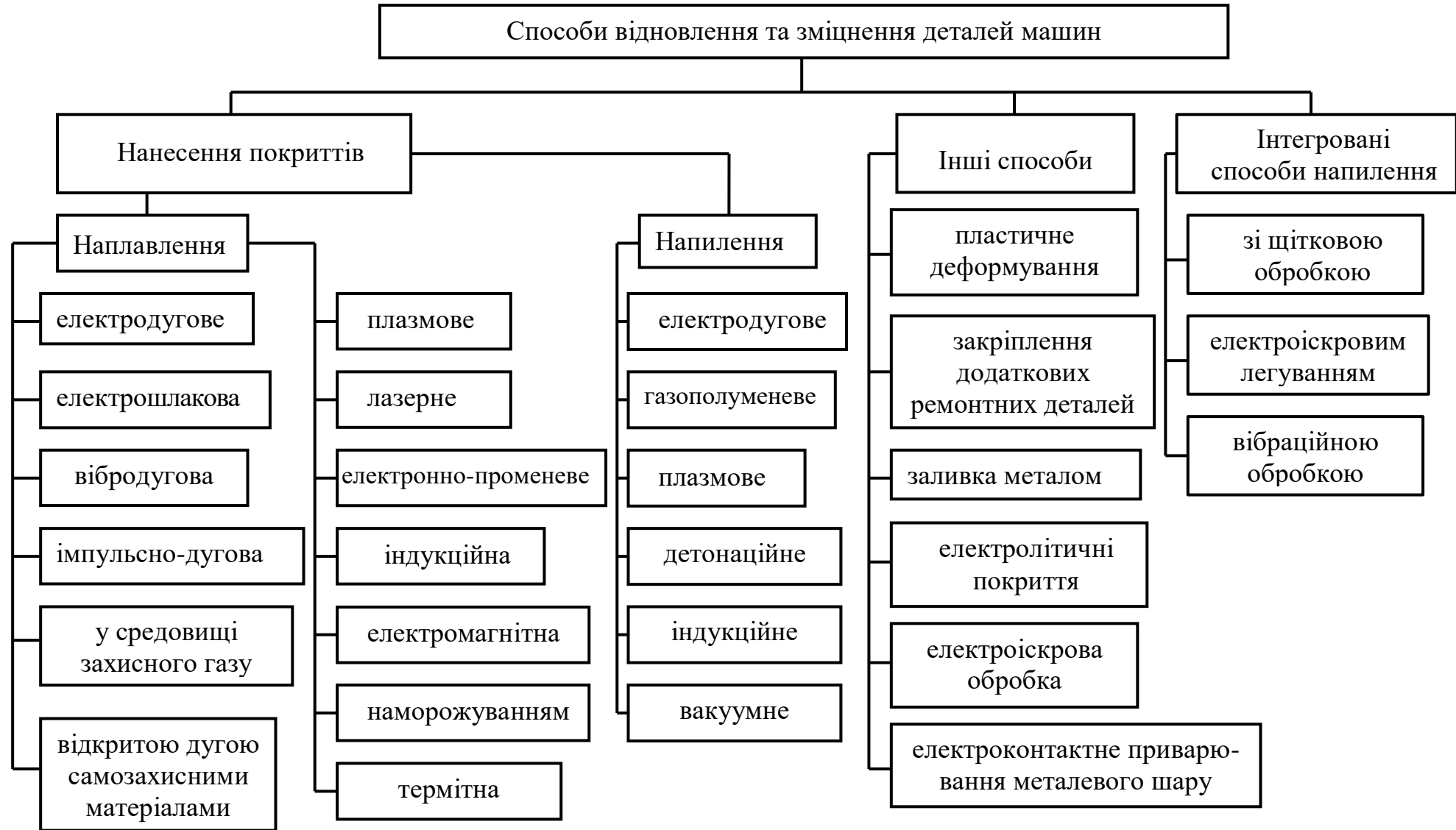


Рис. 1.3. Способи відновлення та зміцнення деталей машин

## 2. НАПЛАВЛЕННЯ

### 2.1. Класифікація методів наплавлення. Переваги та недоліки технології наплавлення

Способи наплавлення, як і способи зварювання, класифікуються за трьома типами ознак (ГОСТ 19621): фізичним, технічним та технологічним. Найбільш поширена і зручна класифікація за фізичною ознакою (джерело нагрівання, що використовується). За ним основні способи наплавлення та наварювання можна розділити на три групи (рис. 2.1):

- термічні (електродугове, електрошлакове, плазмове, електронно-променеве, лазерне (світлове), індукційне, газове, пічне);
- термомеханічні (контактне, прокаткою, екструдкуванням);
- механічні (вибухом, тертям).

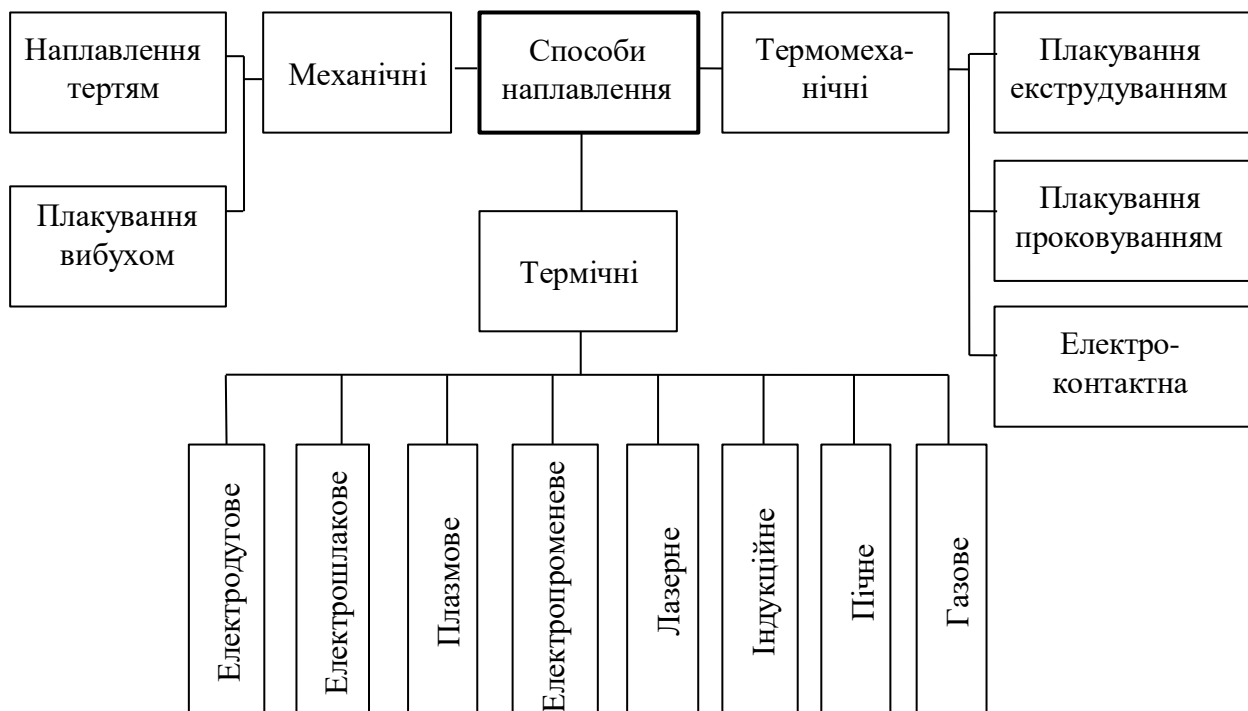


Рис. 2.1. Способи наплавлення

У свою чергу, більшість із цих способів можуть підрозділятися за технічними (спосіб захисту металу в зоні наплавлення, ступінь механізації процесу, безперервність наплавлення) і технологічними (за родом струму, кількістю

електродів, зовнішнього впливу і т. п.) ознаками.

Сутність процесу наплавлення полягає у використанні теплоти для розплавлення присадного матеріалу та його з'єднання з основним металом деталі. Використовуючи можливості дугового наплавлення, на поверхні деталі можна отримати наплавлений шар будь-якої товщини, будь-якого хімічного складу з різноманітними властивостями. Наплавлення може проводитися в один або кілька шарів на різні поверхні:

- плоскі;
- циліндричні;
- конічні;
- сферичні та ін.

Товщина шару наплавлення може змінюватися в широких межах – від часток міліметра до десятків міліметрів. При напавленні поверхневих шарів із заданими властивостями, як правило, хімічний склад напавленого металу суттєво відрізняється від хімічного складу основного металу. Тому при напавленні має виконуватися ряд технологічних вимог.

1. Мінімальне розведення напавленого шару основним металом, що розплавляється при накладанні валиків. Тому в процесі напавлення необхідне отримання напавленого шару з мінімальним проплавленням основного металу, тому що в іншому випадку зростає частка основного металу у формуванні напавленого шару. Це призводить до непотрібного розведення напавленого металу основним розплавлюваним.

2. Забезпечення мінімальної зони термічного впливу та мінімальних напруг і деформацій. Ця вимога забезпечується через зменшення глибини проплавлення, регулювання параметрів режиму, погонної енергії, збільшення вильоту електрода, застосування широкої електродної стрічки та іншими технологічними прийомами.

Технологія напавлення різних поверхонь передбачає низку прийомів нанесення напавленого шару (рис. 2.2):

- нитковими валиками з перекриттям один одного на 0,3...0,4 їх ширини;

– широкими валиками, отриманими через поперечні до напрямку осі валика коливання електрода, електродні стрічки та ін.

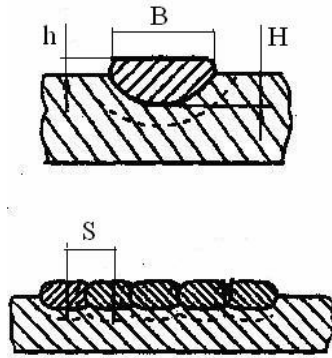


Рис. 2.2. Способи накладання шарів при наплавленні:

$B$  – ширина валика;  $h$  – висота наплавлення;  $H$  – глибина проплавлення;

$S$  – крок наплавлення

Розташування валиків з урахуванням їхнього взаємного перекриття характеризується кроком наплавлення. Наплавлення криволінійних поверхонь тіл обертання виконують трьома способами: наплавленням валиків за твірною тіла обертання; по колах; по гвинтовій лінії (рис. 2.3).

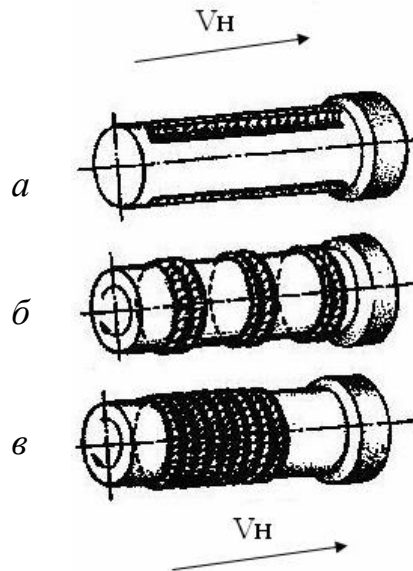


Рис. 2.3. Наплавлення тіл обертання:

$a$  – за твірною;  $b$  – по колу;  $c$  – по гвинтовій лінії;

$V_n$  – швидкість наплавлення

Наплавлення за твірною виконують окремими валиками, як при наплавленні

плоских поверхонь. Наплавлення по колу також здійснюється окремими валиками до повного замикання початкової та кінцевої ділянок зі зміщенням їх на певний крок уздовж твірної.

При гвинтовому наплавленні деталь обертають безперервно, при цьому джерело нагріву переміщається вздовж тіла зі швидкістю, при якій одному оберту деталі відповідає зсув джерела нагріву, що дорівнює кроку наплавлення. При наплавленні тіл обертання необхідно враховувати можливість стікання розплавленого металу у напрямку обертання деталі.

У цьому випадку джерело нагріву зміщують у бік, протилежний напрямку обертання. Попередній підігрів наплавленої деталі до температури 200...250 °С зменшує схильність наплавленого металу до утворення тріщин. Усі дефекти в наплавленому металі можна поділити на зовнішні та внутрішні. До останніх належать непровар (несплавлення наплавленого металу з основним), пористість, тріщини та шлакові включення. Зовнішні дефекти, до яких належать раковини та тріщини, виявляють візуально.

Режими ручного дугового наплавлення характеризуються діаметром електрода, силою, родом і полярністю зварювального струму.

При автоматичному наплавленні технології описують тип електродного матеріалу (дрот, стрічка: суцільного перерізу, порошкова), значення сили струму, напруга дуги, довжину дуги, швидкість наплавлення. При наплавленні у захисному газі додатково вказують захисний газ; при наплавленні під флюсом – марку флюсу.

Порівняно з іншими способами поверхневої обробки металу технологія наплавлення має ряд переваг та недоліків.

Переваги:

1. Можливість нанесення металевого покриття великої товщини. Це приносить великий ефект при відновленні деталей з великою величиною зношування, крім того, дозволяє виготовляти посудини високого тиску зі звичайної сталі з подальшим наплавленням корозійностійкої сталі на внутрішню поверхню, що більш економічно порівняно з технологією виготовлення посудин з плакованої сталі, що застосовувалася раніше та отримувалася прокаткою.

2. Висока продуктивність наплавлення, особливо механізованих та автоматизованих способів.

3. Відносна простота конструкції та транспортабельність обладнання, пристосованого для виконання робіт поза приміщеннями, наприклад, наплавлення деталей землерийних та сільськогосподарських машин у польових умовах.

4. Відсутність обмежень за розмірами наплавлюваних поверхонь виробів; наплавку можна застосовувати для таких великогабаритних об'єктів, як посудини високого тиску атомних реакторів, конуси засипних апаратів доменних печей, тоді як інші способи поверхневої обробки (електролітичне або гаряче металопокриття, цементация тощо) мають істотне обмеження за розмірами оброблюваних виробів.

5. Простота виконання процесу наплавлення, що не потребує високої кваліфікації зварювальника, при автоматичному або напівавтоматичному режимі наплавлення.

6. Можливість нанесення зносостійкого шару на основний метал будь-якого складу.

7. Можливість підвищення ефективності наплавлення шляхом поєднання її з іншими способами поверхневої обробки; наприклад, після наплавлення виріб піддають плазмовому загартуванню або азотуванню.

Недоліки:

1. Погіршення властивостей наплавленого шару через перехід до нього елементів основного металу; наприклад, зниження корозійної стійкості, зносостійкості і т.д.

2. Деформація виробу, що викликається високою погонною енергією наплавлення. Неправильний вибір режиму наплавлення може призвести до надмірної деформації виробу, тому для збереження точності розмірів і форми виробу необхідно вживати особливих заходів, наприклад, наплавлення виробу необхідно проводити в затиснутому стані, що виключає його деформацію, створювати «зворотну» попередню деформацію, здійснювати подальшу механічну обробку.

3. Нерівномірність властивостей наплавлених виробів обумовлена тим, що

наплавлений шар, на відміну від плакованого, має характерні властивості і особливий склад, властивий металу зварного шва. Тому для отримання якісних наплавлених шарів зварювальнику необхідно мати спеціальні відомості в галузі теоретичної підготовки, наприклад, металознавства, термічної обробки, технологічної міцності.

4. Більш обмежений вибір поєднань основного та наплавленого металу ніж, наприклад, при напиленні. Наплавлення допускає різноманітні поєднання основного і наплавлюваного металів, проте на відміну від напилення є певні обмеження, наприклад, при напавленні титаном на сталеву поверхню на межі основного металу і наплавленого шару утворюється крихкий прошарок інтерметалевих з'єднань, що практично виключає можливість застосування методів наплавлення титаном.

5. Складність наплавлення дрібних деталей складної форми. Наплавлення супроводжується оплавленням поверхневого шару основного металу і протікає в умовах безперервного переміщення зварювальної ванни, що складається з суміші основного і металів, що наплавляються. При напавленні дрібних деталей умови формування такої ванни погіршуються, а при складній формі виробу також утруднено її плавне переміщення, що унеможлиблює утворення рівного якісного наплавленого шару. Крім того, дрібні деталі від дії зварювальної дуги швидко нагріваються до температури пластичного перебігу металу, і в результаті може відбуватися зміна форми виробу і навіть його часткове розплавлення.

Викладені вище переваги та недоліки процесу наплавлення слід враховувати при виборі оптимального способу її здійснення, необхідного зварювального обладнання та наплавних матеріалів.

## **2.2. Відновлення деталей машин наплавленням**

Наплавлення – нанесення шару металу на поверхню заготівки за допомогою зварювання плавленням (ГОСТ 2601). При напавленні відбувається сплавлення шару покриття з основним металом, що забезпечує їхнє міцне зчеплення. Найменша товщина наплавленого металу може бути 0,25 мм, найбільша не обмежена.

На ремонтних підприємствах наплавлення становить 77 % від загального

ремонту робіт з нанесення покриттів.

- Наплавлення під шаром флюсу – 41 %
- Наплавлення в середовищі захисних газів – 26 %
- Вібродугове – 15 %
- Наплавлення порошковим дротом – 13 %
- Плазмове наплавлення – 2.4 %
- Електрошлакове – 2 %
- Інші способи – 1 %

### **2.3. Ручне дугове наплавлення**

Дугове наплавлення покритими електродами є найбільш поширеним способом ремонту (відновлення форми та розмірів) деталей автомобілів, тракторів та інших машин і механізмів внаслідок простоти її здійснення та мобільності обладнання. Наплавлення здійснюють зазвичай вручну, тому такий спосіб називають також ручним дуговим наплавленням.

Електродне покриття служить для захисту ванни рідкого металу від кисню та азоту повітря, стабілізації дуги, підвищення технологічності процесу наплавлення та введення легуючих елементів до складу наплавленого металу. Застосовують такі види електродного покриття: ільменітове із вмістом понад 30 % ільменіту ( $\text{FeO} \times \text{TiO}_2$ ); високоцелюлозне із вмістом 20...30 % целюлози; карбонатно-рутилове; основне (фтористо-кальцієве), основними компонентами якого є карбонат кальцію та флюорит; високорутилові з вмістом до 35 % рутила ( $\text{TiO}_2$ ).

Дугове наплавлення покритими електродами відзначається низькою вартістю обладнання, можливістю виконання наплавлення вручну (рис. 2.4).

#### *Вибір електродів для наплавлення*

Вибрані для наплавлення конкретних виробів електроди повинні забезпечувати отримання необхідних властивостей поверхні деталі та давати наплавлений метал високої зносостійкості, необхідної в'язкості, який задовільно оброблятиметься механічним способом. Електроди повинні мати гарні зварювально- технологічні властивості і бути досить дешевими.

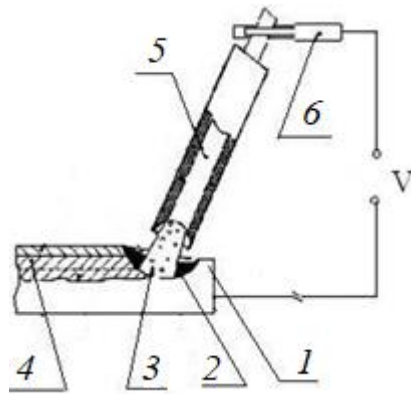


Рис. 2.4. Схема ручного дугового наплавлення покритим електродом:

- 1 – виріб; 2 – зварювальна ванна; 3 – електрична дуга;  
4 – наплавлений валик; 5 – покритий електрод; 6 – електродотримач

Властивості наплавленого металу здебільшого визначаються його хімічним складом та термообробкою. Хімічний склад наплавленого шару змінюється через введення легуючих компонентів. Найбільш дешевими і доступними є вуглець, марганець, хром, кремній, титан і бор. Вони підвищують твердість і зносостійкість металу при стиранні. Марганець і хром при введенні їх у маловуглецеву сталь у кількості від 8 до 27 % підвищують її зносостійкість у 4...5 разів. Високомарганцевиста сталь добре працює при високих ударних навантаженнях. Вуглецева високохромиста сталь (хром більше 12 %) має малу ударну в'язкість, тому її не слід застосовувати при наплавленні деталей, що працюють при ударних навантаженнях. При ручному дуговому наплавленні покритими електродами легування наплавленого валика здійснюється або через електродне покриття, до складу якого входять легуючі компоненти, або за допомогою електродного стрижня, виготовленого з легованого зварювального дроту.

Наплавлення зношених деталей машин, виготовлених із вуглецевих або легованих сталей, які не піддаються після наплавлення термообробці, проводиться електродами будь-якої відповідної основного металу марки, що забезпечують необхідну твердість і зносостійкість наплавленого металу. Якщо ж відновлені деталі піддаються термообробці, то наплавлення їх проводиться такими електродами, наплавлений метал яких допускає цю обробку без зниження твердості та інших механічних властивостей, наприклад, електродами ЦН-2, 03Н-250, 03Н-300. У

наплавленому металі сталевих деталей, що піддаються гартуванню, має бути не менше 0,30 % вуглецю, щоб метал міг сприймати гартування.

Електроди для наплавних робіт залежно від хімічного складу та твердості наплавленого металу поділяються на типи, а залежно від хімічного складу покриття – на марки. Електроди, що застосовуються для наплавних робіт, поділяють на такі групи:

1. Для наплавлення деталей, що працюють на зношування при звичайних температурах, застосовують електроди ОЗН-250, ОЗН-300, ОЗН-350, ОЗН-400, Т-590, ЦН-250. Метал, наплавлений цими електродами, має середню та високу твердість, задовільну пластичність та в'язкість і належить до перлітного класу. Наплавлений метал залежно від хімічного складу може піддаватися або не піддаватися термообробці. Такі електроди застосовують для наплавлення валів, осей, автозчіпок, хрестовин, зубців екскаваторів, лемешів, ножів бульдозерів, ковзанок та зірочок тракторів, коліс рухомого складу тощо.

2. Для наплавлення деталей, що працюють на зношування, при підвищених температурах, застосовують електроди ЦШ-1, ЦШ-2, ЦШ-3, ЦН-4, ЦН-5, ОЗН-І, НЖ-2, ЕН-60М. Ці електроди дають у наплавленому шарі перлітну хромовольфраміву або хромомарганцеву сталь. Застосовується для наплавлення штампів гарячого штампування, деталей ковальсько-пресового обладнання. Як правило, наплавлені вироби перед механічною обробкою відпалюються, а після неї піддаються гартуванню та високому відпуску.

3. Електроди для наплавлення різального інструменту: ЦН-1М, Т-216, Т-268, Т-293, ОЗІ-5, ОЗІ-6. Вони дають наплавлений метал типу швидкорізальної сталі.

4. Електроди, призначені для наплавлення ерозійно-стійких поверхонь деталей, що працюють при високих температурах та в агресивних середовищах: ЦН-2, ЦН-3, ЦН-6, ЦН-8. Застосовуються для наплавлення деталей арматури парових котлів, насосів та турбін парогенераторів. У наплавленому шарі такі електроди дають структуру стелітів чи сормаїтів.

5. Електроди, призначені для зварювальних робіт: ЦМ-7, УОНІ 13/45, МР-3, АНО-4. Вони дають наплавлений метал із високою твердістю, але не можуть суттєво

підвищити зносостійкість деталі та дають можливість лише відновити розміри та форму деталі.

#### *Техніка наплавлення покритими електродами сталевих виробів*

Наплавлення маловуглецевих і низьколегованих сталей проводиться звичайним способом за звичайних умов. Під час наплавлення електрон повинен бути нахилений під кутом  $15\ldots 20^\circ$  до вертикалі, щоб уникнути потрапляння рідкого шлаку на ще не розплавлений основний метал. Наплавлення має здійснюватись кутом назад (рис. 2.5, а).

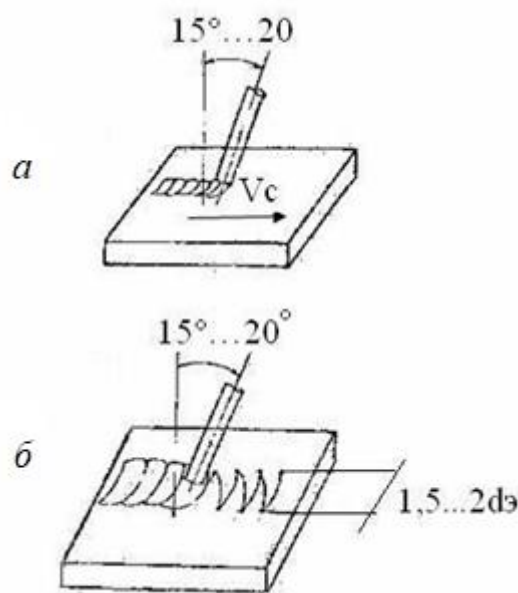


Рис. 2.5. Техніка наплавлення:

а – кутом назад; б – із поперечними коливаннями

Для отримання вузького валика завширшки до 1,5 діаметра електрода електрод при наплавленні переміщують прямолінійно без поперечних коливань. Однак через високу швидкість охолодження в металі наплавлення можуть залишитися гази і шлакові включення, що не встигли виділитися. З метою усунення таких дефектів при наплавленні накладаються ширші валики, які утворюються при поперечному переміщенні кінця електрода (рис. 2.5, б). Такий прийом збільшує прогрівання кромки валика та уповільнює швидкість охолодження зварювальної ванни, що зменшує ймовірність появи дефектів.

Наплавлення ширших шарів та більшої висоти наплавленого шару може здійснюватися пучком електродів. Він являє собою кілька складених разом електродів, скріплених між собою обв'язкою і прихватками. У разі необхідності наплавлення низькими та широкими валиками застосовують пучки з двох або трьох електродів, скомпонованих у ряд. Для наплавлення вужчими, але високими валиками застосовують пучки з трьох електродів, скомпонованих трикутником, чи чотирьох електродів (рис. 2.6).

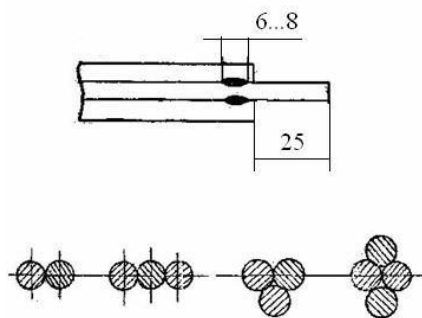


Рис. 2.6. Пучки електродів для наплавлення

Наплавлення має виконуватися короткою дугою, валики накладають так, щоб кожен наступний перекривав попередній на  $1/2$  або  $1/3$  своєї ширини. За висотою шар наплавленого металу встановлюється з розрахунку, щоб припуск на механічну обробку становив 2...3 мм. Значення сили струму при напавленні визначається залежно від діаметра електрода за формулою:

$$J = (30 \dots 50)d_e, \quad (2.1)$$

де  $J$  – сила струму;  $d_e$  – діаметр стрижня електрода.

Між товщиною шару наплавленого металу, діаметром електрода, числом шарів наплавлення та силою струму рекомендується витримувати такі співвідношення (табл. 2.1).

При закінченні наплавлення усадковий кратер необхідно виводити за межі робочої наплавленої поверхні, використовуючи для цієї мети приставні планки. Після накладання кожного валика з поверхні наплавлення видаляються шлак і бризки металу. При напавленні середньо- та високовуглецевих сталей

рекомендується попередній підігрів металу до температури 350 °С. Вироби, піддані раніше термообробці (загартуванню), перед наплавленням відпалюють, після наплавлення рекомендується проводити високий відпуск наплавленого шару.

Таблиця 2.1 – Співвідношення між товщиною шару наплавленого металу, діаметром електрода, числом шарів наплавлення і силою струму

№ з/п	Найменування параметрів	Розмір параметрів		
		до 1,5	до 5	понад 5
1	Товщина шару наплавлення, мм	до 1,5	до 5	понад 5
2	Діаметр електрода, мм	3	4...5	5...6
3	Кількість шарів наплавлення	1	1...2	2 і більше
4	Сила зварювального струму	50...100	130...180	180...240

#### 2.4. Дугове наплавлення під шаром флюсу

При наплавленні деталей під шаром флюсу, на відміну від наплавлення відкритою дугою, електрична дуга горить під шаром розплавленого флюсу, утворюючи на поверхні шва шлакову кірку. При цьому в зоні зварювання створюється надлишковий тиск газів, які разом із розплавленим флюсом перешкоджають доступу повітря до розплавленого металу (рис. 2.7).

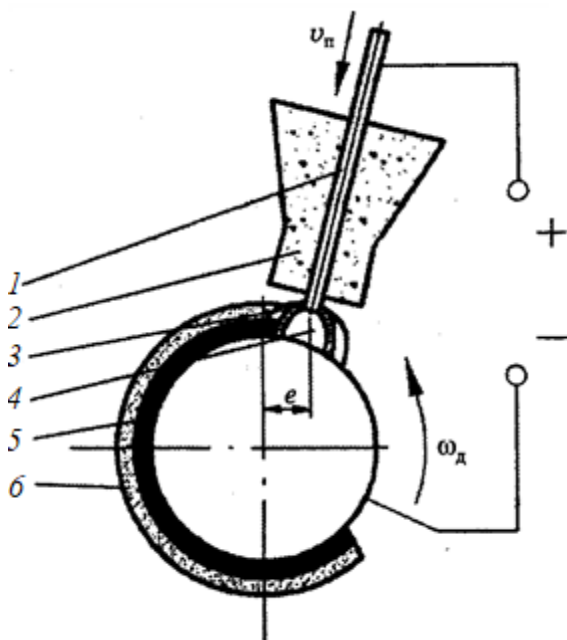


Рис. 2.7. Схема наплавлення підшаром флюсу:

- 1 – електрод;
- 2 – бункер з флюсом;
- 3 – оболонка розплавленого флюсу;
- 4 – газовий пузир;
- 5 – наплавлений метал;
- 6 – шлакова кірка;
- $e$  – зміщення електрода з zenіту;
- $v_{п}$  – швидкість подачі дроту;
- $\omega_{д}$  – кутова частота обертання деталі

Цей спосіб був розроблений у 1938–1939 р. в інституті електрозварювання імені Є.О. Патона. Порівняно з ручним дуговим наплавленням дозволяє збільшити допустиму щільність струму в 10 разів (до 150...200 А/мм<sup>2</sup>) і тим самим підвищити потужність зварювальної дуги без небезпеки перегріву електрода. Продуктивність наплавлення при цьому підвищується до семи разів.

Горіння дуги здійснюється під шаром флюсу, який різко знижує теплообмін із довкіллям і в результаті питома витрата електроенергії при наплавленні металу зменшується з 6...8 до 3...5 кВт·год/кг. Крім того, забезпечується захист зварювальної ванни від азоту та кисню повітря. Вміст кисню в наплавленому шарі більш ніж у 20 разів, а азоту втричі нижчий, ніж при наплавленні штучним електродом.

При наплавленні під шаром флюсу, порівняно з ручним дуговим зварюванням, втрати електродного матеріалу на розбризкування та недогарки скорочуються з 20...30 до 2...4 %.

Зварювальна дуга порушується між деталлю та кінцем електродного дроту 1 (див. рис. 2.7). Під впливом високої температури зварювальної дуги дріт, що надходить з механізму подачі через мундштук, основний метал і флюс, що надходить із бункера з флюсом 2, плавляться. Розплавлений дріт, флюс і основний метал утворюють зварювальну ванну. Флюс у вигляді рідкої плівки покриває зону зварювання, тобто дуга горить у газовому міхурі 4 під розплавленою флюсовою оболонкою 3. Флюсова оболонка зберігає тепло дуги, скорочує втрати металу на чад, захищає розплавлений метал від окиснення і з'єднання з азотом. Крім того, флюс (рідкий і сипкий) чинить тиск на рідкий метал, внаслідок чого шов добре формується. Товщина флюсу на основному металі коливається в межах 20...80 мм, при цьому невикористаний флюс надходить назад у бункер для флюсу. З переміщенням зварювальної ванни наплавлений метал 5 остигає, а поверх нього утворюється шлакова кірка 6, яка потім відокремлюється при легких ударах. Шлак після дроблення повторно використовують у суміші зі свіжим флюсом.

Наплавленням під шаром флюсу відновлюють та зміцнюють деталі з досить великими зносами – до 5 мм. Цей процес застосовують при наплавленні

циліндричних поверхонь (опорні катки, осі, різні вали), плоских деталей (фланці) та виробів криволінійної форми (зубці зірочок, лопаті гідротурбін).

Недоліками способу є невидимість зварювальної ванни, значна витрата і вартість флюсу, а також неможливість наплавлення деталей діаметром менше 50 мм.

Наплавлення здійснюють на постійному струмі, оскільки при цьому забезпечуються більш стійке горіння дуги та висока стабільність і якість процесу. Полярність зворотна, тобто на деталь подається негативний потенціал, а на електрод – позитивний, що зменшує її нагрівання та дозволяє більш раціонально використовувати теплоту.

Установка для наплавлення складається з апарату для наплавлення та обертача, що забезпечує закріплення та обертання деталей під час наплавлення. У свою чергу основними складовими апарату для наплавлення є: механізм подачі дроту, мундштук для підведення дроту до деталі, бункер для подачі та регулювання кількості флюсу.

Найбільшого поширення набуло наплавлення на постійному струмі, що сприяє одержанню більш високої стабільності та якості процесу. Джерелами постійного струму служать зварювальні перетворювачі і випрямлячі, які мають падаючу або жорстку характеристики, розраховані на номінальний струм до 500 А. При наплавленні зазвичай застосовують зворотну полярність, тобто на деталь подається негативний потенціал, а на електрод – позитивний, що зменшує її нагрів і дозволяє більш раціонально використовувати теплоту.

При наплавленні деталей із низьковуглецевих сталей застосовують марганцевисті багатокремнієві флюси (АН-348А, ОСЦ-45 та ін.), які забезпечують якісне розкиснення металу шва. При наплавленні легованих сталей для зниження вигорання легуючих елементів застосовують флюси з малим змістом кремнію (АН-20). Електродний дріт при наплавленні підбирається залежно від матеріалу відновлюваної деталі і вимог до умов експлуатації. Для наплавлення деталей, виготовлених із вуглецевих сталей 30, 40, 45, використовують дріт із вуглецевих сталей Нп-30, Нп-40, Нп-50, Нп-65 або з низьколегованої сталі – Нп-30ХГСА. Наплавлення деталей зі сталей 30Х, 35Х, 40Х та інших низьколегованих сталей

здійснюють дротом Нп-30ХГСА або інших марок. Для наплавлення під шаром флюсу використовують головки для наплавлення А-384, А-409, АВС, які встановлюють на звичайні токарські верстати або спеціалізовані наплавні напівавтомати типів А580М, А1408, А1409 та ін.

Апарат А580М встановлюється на супорті будь-якого токарського верстата, який відповідає габаритам відновлюваних деталей і оснащеного редуктором для зниження частоти їхнього обертання. Подовжнє переміщення головки здійснюється за допомогою супорта верстата. Спеціальні наплавочні верстати, що створені в інституті електрозварювання ім. Е. О. Патона, використовуються для наплавлення деталей типу «вал», плоских поверхонь, шліців валів, а також деталей складного профілю (зубці зірочок і т.п.).

Кількість проходів визначається за формулою:

$$i = \frac{D-d}{2t}, \quad (2.2)$$

де  $D$  – діаметр, до якого наплавляють деталь, мм;

$d$  – діаметр наплавлюваної поверхні, мм;

$t$  – товщина шару, що наплавляється за один прохід, мм.

Сила зварювального струму  $I_{зв}$  визначається за табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Залежність сили струму від діаметра деталі

Діаметр деталі, мм	Сила струму $I_{зв}$ (А) при діаметрі електродного дроту, мм	
	1,2...1,6	2,0...2,5
50...60	120...140	140...160
65...75	150...170	180...220
80...100	180...200	230...280
150...200	130...250	300...350
250...300	270...300	350...380

Напруга  $U$  (В) визначається за формулою:

$$U = 21 + 0,04I_{зв}. \quad (2.3)$$

Коефіцієнт наплавлення  $K_n$  (г/А·ч) – показник, що характеризує питоме значення швидкості наплавлення і визначається за такою формулою:

$$K_H = 2,3 + 0,65 \frac{I_{ЗВ}}{d_{др}}, \quad (2.4)$$

де  $d_{др}$  – діаметр електродного дроту, мм, визначається залежно від товщини наплавлюваного шару.

Швидкість переміщення дуги, або швидкість наплавлення  $V_H$  (м/год) обумовлюється шириною валиків і глибиною проплавлення:

$$V_H = \frac{K_H I_{ЗВ}}{100 F \gamma}, \quad (2.5)$$

де  $F$  – площа поперечного перетину наплавленого валика,  $\text{см}^2$  (при  $d_{др} = 1,2 \dots 2$  мм,  $F = 0,06 \dots 0,2$   $\text{см}^2$ );

$\gamma$  – щільність металу шва,  $\text{г}/\text{см}^3$ .

Швидкість подачі електродного дроту визначається можливістю її повного розплавлювання:

$$V_{nn} = \frac{4 K_H I_{ЗВ}}{\pi d_{др}^2 \gamma} \quad (2.6)$$

При збільшенні вильоту електродного дроту підвищується електричний опір кола, що призводить до зростання коефіцієнта розплавлювання, зниження струму наплавлення, а отже, і глибини проплавлення. Але при збільшенні цього параметра погіршується геометрія наплавлених валиків, тому виліт електрода:

$$H = (10 \dots 15) d_{др}. \quad (2.7)$$

Крок наплавлення визначається перекриттям валиків і впливає на рівномірність наплавленого шару:

$$S = (2 \dots 2,5) d_{др}. \quad (2.8)$$

При зсуві електрода  $l$  із zenіту у бік, протилежний обертанню деталі, з одного боку, погіршуються умови формування наплавленого шару, а з іншого – зменшується глибина проплавлення, тому:

$$l = (0,05 \dots 0,07) d_{др}. \quad (2.9)$$

## 2.5. Вібродугове наплавлення

Процес вібродугового наплавлення являє собою різновид автоматичного наплавлення металу віброуючим електродом у струмені охолодної рідини і вперше був розроблений Г. П. Клековкіним та І. Є. Ульманом у 1950–1952 рр. Заснований на використанні тепла короткочасної дуги, що виникає в момент розриву ланцюга між віброуючим електродом і наплавлюваною поверхнею.

Схему установки для вібродугового наплавлення деталей наведено на рис. 2.8.

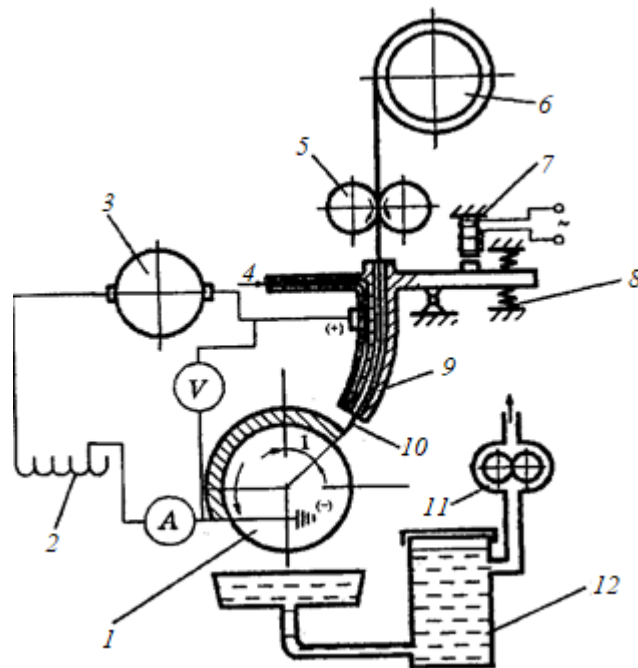


Рис. 2.8. Схема установки для вібродугового наплавлення деталей

Сутність процесу наплавлення полягає в такому. До наплавлюваної поверхні обертової деталі 1 роликми 5 з касети 6 через віброуючий мундштук 9 подається електродний дріт 10. Вібрація мундштука з частотою 50–100 Гц здійснюється за допомогою електромагнітного вібратора 7 і пружини 8. Внаслідок вібрації відбувається замикання і розмикання зварювального ланцюга між електродним дротом і деталлю та холостий хід.

Електричний струм від джерела 3 підводиться до деталі через ковзний контакт. Для підвищення стійкості і тривалості дугового розряду в зварювальний ланцюг включають індуктивний опір 2. В зону наплавлення металу

через канал 4 за допомогою насоса 11 подається охолодна рідина з фільтра-відстійника 12, в результаті чого відбувається загартування наплавленого металу. Як охолодну рідину рекомендується застосовувати 4–6-відсотковий розчин кальцинованої соди або 10–20 відсотковий водний розчин технічного гліцерину.

Це один із найбільш поширених способів відновлення деталей на сільськогосподарських ремонтних підприємствах, що обумовлено його особливостями: високою продуктивністю (до 2,6 кг/год); незначним нагріванням деталі (до 100 °С); відсутністю суттєвих структурних змін поверхні деталі (зони термічного впливу при наплавленні незагартованих деталей 0,6...1,5 мм і загартованих – 1,8...4,0 мм), що дозволяє наплавляти деталі малого діаметра (від 8 мм) без пропалу або короблення.

Товщину шару можна регулювати в межах 0,5–3мм за один прохід.

Недоліки:

- у результаті загартування наплавлений шар має неоднорідну твердість;
- внаслідок високих швидкостей затвердіння рідкого металу гази з нього не встигають виділитися, що призводить до утворення пор;
- значні внутрішні розтягуючі напруження, що призводять до зниження міцності від втоми.

Тому не рекомендується застосовувати цей спосіб для деталей, що працюють при знакозмінних навантаженнях.

Застосування охолодної рідини в поєднанні з різними електродними матеріалами виключає з технологічного процесу наступну термічну обробку, тому що твердість наплавленого металу може досягати 58...60 HRCe. Товщину останнього можна регулювати від 0,3 до 3,0 мм. При необхідності проводять багат шарове наплавлення. Втрати електродного матеріалу на чад і розбризкування не перевищують 6...8 %.

Особливість вібродугового наплавлення полягає у вібрації електрода (50...100 коливань за секунду), що обумовлює наплавлення металу при низькій напрузі джерела струму відносно невеликої потужності в зварювальному ланцюзі, коли

безперервний дуговий процес неможливий. При вібрації поліпшується стабільність наплавлення і розширюється діапазон стійких режимів.

У момент зіткнення електрода з деталлю (період короткого замикання) опір електричного ланцюга джерело струму-електрод-деталь наближається до нуля, що сприяє спаданню напруги при одночасному прагненні струму до нескінченності. Реальна потужність застосовуваних джерел струму обмежує це значення до 1100...1300 А. Це неприпустимо для електрода малого перерізу, оскільки він розплавляється і розприскується під дією електродинамічних сил. Для обмеження струму в період короткого замикання в коло послідовно включають додаткову індуктивність (дросель).

За рахунок вібрації електрод відводиться від деталі, і в розриві виникає електрична дуга (період дугового розряду). Енергія, запасена в індуктивності, починає звільнятися. Електрорушійна сила самоіндукції складається з електрорушійної сили джерела струму, у результаті чого напруга на дуговому розряді виявляється вищою в два рази і більшою, ніж на затискачах джерела струму, причому воно підтримується приблизно постійним, незважаючи на зміну довжини дуги. У цей період виділяється 90...95 % теплової енергії, та кінчик електрода оплавляється.

При достатньому видаленні електрода від деталі, а також із втратою енергії, що була запасена дроселем, дуга гасне. Починається період холостого ходу. Він закінчується тоді, коли електрод знову торкається деталі і крапля розплавленого металу переноситься на її поверхню. Цикл багаторазово повторюється, і на деталі формується валик наплавленого металу.

Тривалість періодів короткого замикання і горіння дуги визначається частотою вібрації електрода, напругою холостого ходу та індуктивністю кола. Зі збільшенням напруги й індуктивності зростають період горіння, кількість виділеної теплоти та продуктивність процесу. Однак надмірне їхнє збільшення порушує стабільність процесу, і виникають великі втрати електродного дроту. Тому у кожному конкретному випадку їх варто підбирати оптимальними.

Установка вібродугового наплавлення містить: головку для наплавлення, закріплену на супорті токарського верстата; джерело живлення; додаткову

індуктивність (дросель); систему подачі охолодної рідини. Найбільшого поширення набули головки для наплавлення ОКС–1252А та ОКС-6569 з механічним вібратором. Для живлення електричної дуги застосовують зварювальні перетворювачі ПСГ-500, ПСЧ-500, випрямлячі і низьковольтний генератор АНД–500/1000.

Головка для наплавлення призначена для подачі електрода в зону горіння дуги, додання йому зворотно-поступального руху (вібрації). Частота коливань 50...100 Гц. Наплавлення проводять на постійному струмі зворотної полярності. Як джерело живлення використовують зварювальні перетворювачі і випрямлячі з жорсткою зовнішньою характеристикою. Як додаткові індуктивності служать зварювальні дроселі. Зварювальні та наплавні дроти мають діаметр 1,2...3,0 мм, стрічки – товщину 0,3...1,0 мм і ширину до 10,0 мм.

Для захисту розплавленого металу застосовується вуглекислий газ, флюс, пар та охолодні рідини (4...6 %-й розчин кальцинованої соди, 10...20 %-й розчин технічного гліцерину у воді або їхня суміш). Вода, випаровуючись, витісняє з зони горіння дуги повітря, знижуючи вміст азоту в наплавленому металі. Кальцинована сода, розкладаючись, з одного боку, стабілізує горіння дуги, з іншого боку – знижує корозію устаткування і відновлюваних деталей. Гліцерин зменшує швидкість охолодження наплавленого металу й, отже, тріщиноутворення при використанні високовуглецевих наплавних дротів.

Марку електродних дротів вибирають залежно від необхідної твердості наплавленого металу за табл. 2.3, а режими наплавлення – за табл. 2.4.

Таблиця 2.3 – Марки електродних дротів

Марка електродного дроту	Св-0,8	НП-20	НП-40	НП-60	НП-80	Св-30ХГСА
Твердість, HRC <sub>2</sub>	12...32	13...35	15...45	25...60	25...65	15...50

Таблиця 2.4 – Режимы наплавлення

Показники	Товщина наплавленого металу $h$ , мм		
	0,3...0,9	1,0...1,6	1,8...2,5
Рекомендований діаметр електрода $d$ , мм	1,6	2,0	2,5
Рекомендована напруга джерела живлення $U$ , В	12...15	15...20	20...25

Сила струму визначається за формулою:

$$I = (60 \dots 57)d_{\text{др}} \quad (2.10)$$

Індуктивність дроселя залежить від джерела живлення та довжини з'єднувальних кабелів. Її підбирають експериментально за мінімальним розбризкуванням металу та якістю його сплавлення з основою.

Швидкість подачі електродного дроту визначається за формулою:

$$V_n = \frac{0,1IU}{d_{\text{др}}^2} \quad (2.11)$$

Швидкість наплавлення за формулою:

$$V_H = \frac{0,785d_{\text{др}}^2 V_n \eta}{hSa} \quad (2.12)$$

де  $\eta$  – коефіцієнт переходу електродного матеріалу в наплавлений метал ( $\eta = 0,8 \dots 0,9$ );  $h$  – задана товщина наплавлюваного шару, мм;  $S$  – крок наплавлення, мм/об.;  $a$  – коефіцієнт, що враховує відхилення фактичної площі перетину наплавленого валика ( $a = 0,7 \dots 0,85$ ).

Між швидкістю подачі електродного дроту і швидкістю наплавлення є оптимальне співвідношення, при якому забезпечується гарна якість наплавлення, зазвичай  $V_H = (0,4 \dots 0,8)V_n$ . Зі збільшенням діаметра електродного дроту до 2,5...3,0 мм –  $V_H = (0,7 \dots 0,8)V_n$ .

Крок наплавлення впливає на міцність зчеплення наплавленого металу з основою і хвилястість поверхні:

$$S = (1,6 \dots 2,2)d_{\text{др}} \quad (2.13)$$

Амплітуду коливань  $A$  та виліт електроду  $H$  можна також визначити в залежності від діаметра дроту, за наступними співвідношеннями:

$$A = (0,75 \dots 1,0)d_{\text{др}}, \quad (2.14)$$

$$H = (5 \dots 8)d_{\text{др}} \quad (2.15)$$

Обрані режими уточнюють у процесі пробного наплавлення. Якість останніх можна підвищити застосуванням додаткових захисних середовищ: вуглекислого газу, флюсів, водяної пари, а також порошкових дротів.

## 2.6. Дугове наплавлення в середовищі захисних газів

Сутність способу наплавлення в середовищі захисних газів полягає в тому, що в зону горіння електричної дуги під тиском подається захисний газ, який, відтісняючи повітря, захищає розплавлений метал зварювальної ванни від шкідливого впливу на нього кисню і азоту.

Наплавлення в захисних газах може виконуватися плавким і неплавким електродами (вугільним або вольфрамовим). При зварюванні і наплавленні плавким електродом, електродний дріт подається в зону горіння дуги через спеціальний газоелектричний пальник, до якого підводять електричний струм, захисний газ (аргон, гелій, вуглекислий газ, водень, водяна пара та їх суміші). Як захисні гази найбільшого застосування набули вуглекислий газ ( $\text{CO}_2$ ) і аргон (рис. 2.9).

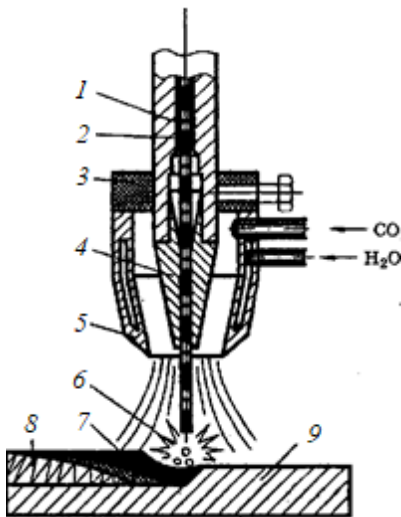


Рис. 2.9. Схема наплавлення в середовищі вуглекислого газу:

- 1 – мундштук;
- 2 – електродний дріт;
- 3 – пальник;
- 4 – наконечник;
- 5 – сопло пальника;
- 6 – електрична дуга;
- 7 – зварювальна ванна;
- 8 – наплавлений метал;
- 9 – відновлювана деталь

Зварювання і наплавлення в середовищі  $\text{CO}_2$ , як правило, проводять на постійному струмі зворотної полярності. Це забезпечує хорошу стійкість процесу. Живлення вуглекислим газом здійснюється за схемою: балон – підігрівач – осушувач – знижувальний редуктор – витратомір – наплавна головка (1 балон вуглекислоти (25 л) дає 10–12 м<sup>3</sup>  $\text{CO}_2$ ; з 1 кг карбїду утворюється 509 л  $\text{CO}_2$ ).

Використовують замість дугового наплавлення під флюсом для виробів складної конфігурації глибоких отворів. Так, наплавку із середовища  $\text{CO}_2$  використовують для відновлення тонкостінних деталей, деталей складної конфігурації.

Для наплавлення поверхонь застосовується дріт діаметром 0,5–2,0 мм

таких марок: Св-08ГС, Св-08Г2СА, Св-10ГС, Св-12ГС, Св-18ХГСА, Св-30ХГСА, Нп-30ХГСА. Крім того, використовується дріт марок ПП-Р18Т, ПП-Р9Т, ПП-Х2В8Т та ін.

Переваги:

- гарне формування шва (наплавлений метал щільний);
- інтенсивне відведення тепла з зони зварювання, що забезпечує наплавлення тонкостінних і нежорстких деталей без деформації;
- висока продуктивність (немає втрат на плавлення флюсу);
- немає шлакової кірки;
- просте устаткування.

Недоліки:

- розбризкування металу;
- порівняно низька твердість і зносостійкість через відсутність легування через флюс;
- окиснювальна дія  $\text{CO}_2$  вимагає застосування спеціальних дротів із вмістом Si і Mn.

Деяких з цих недоліків позбавлена наплавка в середовищі Ar, що застосовується для відповідальних деталей.

Як захисні гази при ремонті деталей зварюванням використовуються переважно вуглекислий газ і аргон. Наплавлення в середовищі  $\text{CO}_2$  поступово витісняє вібродугове наплавлення і частково наплавлення під шаром флюсу. Продуктивність такого процесу на 25...30 % вища, ніж продуктивність наплавлення під шаром флюсу. Зникає необхідність видалення шлаку. При зменшенні зони термічного впливу можна відновлювати деталі малого діаметра (практично починаючи з 10 мм).

У випадку зварювання в захисному газі з плавким електродом за допомогою роликів електродний дріт подається до деталі. Через наконечник пальника струм підводиться до зварювального дроту. Через сопло пальника в дуговий простір надходить захисний газ, що оточує електричну дугу й охороняє зварений шов від впливу повітря. Зварювання і наплавлення плавким електродом здійснюють постій-

ним струмом зворотної полярності. Зварювання неплавким електродом, може бути виконано як постійним, так і перемінним струмами.

Апарати для зварювання і наплавлення у захисних газах забезпечують виконання таких операцій: запалювання дуги на початку зварювання або наплавлення, подачу плавкого електрода в міру його витрати, регулювання заданих параметрів дуги, пересування електричної дуги по поверхні деталі в міру плавлення присаджувального матеріалу, припинення процесу зварювання або наплавлення.

Сила струму і напруга вибирається залежно від діаметра деталі, товщини наплавлюваного шару і діаметра електрода (табл. 2.5).

Таблиця 2.5 – Режими наплавлення

Діаметр деталі $d$ , мм	Діаметр електрода $d_{op}$ , мм	Сила струму $I$ , А	Напруга на дузі $U$ , В
10...20	0,8...1,0	70...95	18...19
20...30	0,8...1,0	90...120	18...19
30...40	0,8...1,0	110...140	18...19
40...50	1,0...1,2	130...160	18...20
50...70	1,2...1,4	140...175	19...20
70...90	1,4...1,6	170...195	20...21
90...120	1,6...2,0	195...225	20...22

Швидкість наплавлення, частота обертання деталі, швидкість подачі електродного дроту, крок наплавлення, зсув електрода визначаються за тими самими формулам, що і при напавленні під шаром флюсу.

Коефіцієнт наплавлення при напавленні на зворотній полярності  $\alpha_n = 10...12$  г/Ач. Виліт електрода для наплавлення 8...15 мм.

Нормування режимів наплавлення в середовищі  $CO_2$  розраховується аналогічно розрахунку наплавлення під шаром флюсу.

## 2.7. Електрошлакове наплавлення

Електрошлакове наплавлення використовують для відновлення і виготовлення біметалічних деталей зі зносостійким шаром значної товщини (до 10 мм). Фізична суть цього технологічного процесу полягає в тому, що присадковий ма-

теріал, який надходить у зону плавлення, розплавляють ні теплом, яке виділяється при горінні електричної дуги, а за рахунок електричної енергії, що безпосередньо переходить в теплову під час проходження електрода через ванну розплавленого електродного флюсу. Цей процес забезпечує значне зменшення теплових втрат, що дозволяє майже вдвічі знизити витрати електроенергії. На рис. 2.10 зображена схема електрошлакового наплавлення, з якої видно, що відновлювану деталь 7 встановлюють на обертач.

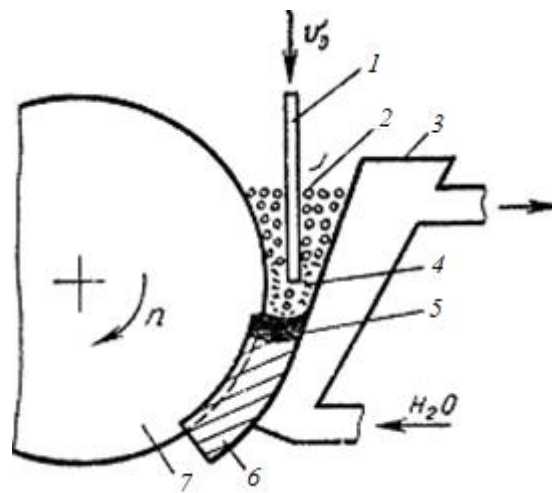


Рис. 2.10. Схема електрошлакового наплавлення

До деталі підводять водоохолоджувальний мідний кристалізатор (повзун) 3, що формує шар наплавленого металу. Між кристалізатором і деталлю встановлюють ванну 4, куди досипають флюс 2 і подають електричний струм на електрод 1. Між електродом і технологічною планкою збуджується електрична дуга. Вона розплавляє флюс та утворює електропровідну шлакову ванну, що згодом шунтує і гасить електричну дугу. Струм проходить через розплавлений шлак і починається електрошлаковий процес. Температура ванни значно вища ( $1700\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), ніж температура плавлення електрода. Внаслідок цього метал електрода розплавляється і під дією сили ваги осідає униз, утворюючи ванну 5 розплавленого металу. Внаслідок його охолодження за допомогою кристалізатора 3 створюють наплавлений шар металу 6.

Установка для електрошлакового наплавлення складається з пристрою, що формує наплавлений метал, і автоматично регулює рівень ванни рідкого металу,

механізмів подачі електродного матеріалу і переміщення деталі.

Як джерело живлення використовують спеціальні трансформатори, що дозволяють одержати зварювальний струм до 1000 А при напрузі 30...45 В.

Флюси, крім значних захисних властивостей, мають високу температуру кипіння й електропровідність у рідкому стані й мінімальне газоутворення. Промисловість для цього випускає спеціальні флюси АН-8, АН-22, АН-348А.

Як електродний матеріал застосовують зварювальний дріт і стрічки. Фізико-механічні властивості наплавленого металу задають хімічним складом електродного матеріалу. Крім того, можна використовувати додаткове легування металу шляхом введення різноманітних металевих порошків до зварювальної ванни.

Режими наплавлення вибирають з умов стійкості процесу, розмірів, форми і якості металу.

Діаметр і кількість електродів визначають, виходячи з товщини і ширини наплавленого шва металу. Діаметр майже завжди беруть як такий, що дорівнює 3 мм, товщину металу – 20...30 мм, ширину шва – 60 мм. Для розширення діапазону вказаних значень застосовують переміщення електрода ванною зі швидкістю 30...40 м/год і багатоелектродний процес.

Силу зварювального струму і напругу встановлюють за кількістю теплоти, необхідної для розплавлення відповідного обсягу металу з урахуванням втрат. Її визначають за формулою:

$$I = A + B \cdot s, \quad (2.16)$$

де  $I$  – сила зварювального струму, А;

$s$  – товщина наплавленого металу, мм;

$A$  і  $B$  – емпіричні коефіцієнти, що знаходяться в межах  $A = 220...280$ ,

$B = 3,2...4,0$ .

Швидкість подачі електрода встановлюють за формулою:

$$V_e = \frac{I}{C}, \quad (2.17)$$

де  $C$  – емпіричний коефіцієнт, що знаходиться в межах  $C = 1,6...2,7$ .

Глибина шлакової ванни суттєво впливає на технологічний процес наплавлення. Недостатнє її значення порушує стійкість процесу, призводить до кипіння і розбризкування шлаку, а надто велике – зменшує наплавлення основного металу деталі. Оптимальною вважають глибину, що дорівнює 40...60 мм. Сухий виліт електрода знаходиться в межах 100...150 мм.

Технологічний процес відновлення відповідальних деталей електрошлаковим наплавленням вперше був розроблений у Запорізькому державному машинобудівельному інституті. Його розпочинають із підготовки деталей до відновлення, зокрема, очищення від мастильних матеріалів та знежирювання. Відновлення виконують за допомогою установки, наприклад, ОКС-7755. Закінчується технологічний процес термічною обробкою.

Перевагою цього способу наплавлення є висока продуктивність порівняно з іншими способами наплавлення, велика якість наплавлення, що не потребує навіть механічної обробки, отримання шару наплавленого металу необхідного хімічного складу, відновлення деталей із значними за величиною зносами, витрата флюсу не перевищує 5 % від маси наплавленого металу, що в 15...30 разів нижче, ніж під час наплавлення під флюсом, зменшення втрат електроенергії через зменшення теплових втрат. Тому електрошлакове наплавлення використовують для відновлення плоских робочих поверхонь деталей, а також робочих поверхонь тіл обертання.

До недоліків способу належать:

- велика погонна енергія, яка викликає перегрів основного металу і ЗТВ;
- неможливість одержання наплавлених шарів малої товщини (min 3–4 мм).

## **2.8. Наплавлення струмами високої частоти (індукційне)**

Сутність методу індукційного наплавлення полягає в нанесенні на поверхню деталі шару спеціального матеріалу з подальшим розплавленням шляхом індукційного нагрівання для відновлення початкової форми деталі або надання поверхні особливих властивостей (рис. 2.11).

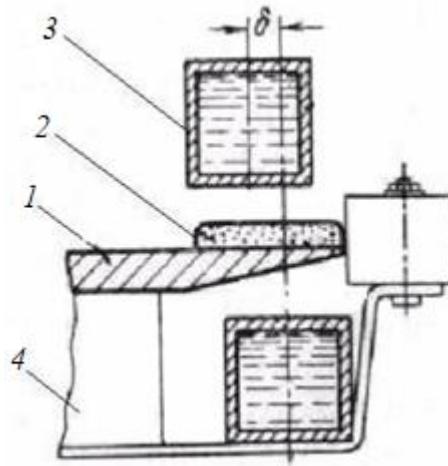


Рис. 2.11. Схема розташування деталі, що наплавляється в індукторі:

1 – деталь; 2 – шар шихти; 3 – індуктор; 4 – опорний пристрій

На поверхню деталі наносять спеціальну шихту, що складається із металевого порошку різного складу та флюсів. Деталь розміщують у полі індуктора високочастотної установки. Струм високої частоти, що проходить через індуктор 3 (див. рис. 2.11), наводить у поверхневому шарі деталі вихрові струми, внаслідок чого деталь 1 нагрівається. Шихта між індуктором і поверхнею нагрівної деталі 1 нагрівається завдяки теплопередачі від поверхні деталі. Флюс розплавляється та взаємодіє з оксидними плівками на поверхні частинок порошку та деталі 1. При цьому утворюються шлаки, які спливають на поверхню рідкого сплаву. Після припинення нагрівання формується наплавлений шар і починається кристалізація металу, що супроводжується активними дифузійними процесами. Температура плавлення шихти повинна бути на 100...150 °С нижчою за температуру плавлення металу, а швидкість нагрівання поверхні деталі – вищою за швидкість тепловідведення в глибину деталі.

Флюси повинні відповідати таким вимогам: температура плавлення флюсу має бути нижчою за температуру плавлення металу шихти, для надійного видалення оксидних плівок до початку плавлення металу; шлак, що утворюється при наплавленні, повинен мати якомога меншу щільність і в'язкість, що забезпечить його гарне видалення зі зварювальної ванни; флюс не

повинен погіршувати властивості наплавленого металу, утворювати та виділяти токсичні речовини, сепаруватися при транспортуванні та зберіганні.

Для індукційного наплавлення використовують порошки твердих сплавів, що забезпечують високі експлуатаційні характеристики наплавлених деталей. До них належать: високолеговані чавуни У30Х28Н4С4 (Сормайт № 1), У45Х35ГЗР2С (ФБХ-6-2), У35Х2Н5 (ніхард), Ж4НДХ-15-7-2 (нірезист); сплави на основі кобальту, вольфраму та нікелю – стеліти В2Кі В3К; композитні матеріали (псевдосплави) на основі карбідів вольфраму (реліти) та хрому (табл. 2.6).

Таблиця 2.6 – Характеристика псевдосплавів для індукційного наплавлення

Сплав	Розмір частинок, мм	Твердість, HRC	Вміст елементів, %	
			С	Cr
ПС-14-80	0,4...1,25	61...64	5,2...7,1	49
ПС-14-60	0,5...1,2	58...63	4...5,7	35,7
ПС-15-30	0,8...1,25	46...50	2,3...3,8	28

Продовження табл. 2.6 (по горизонталі)

Сплав	Вміст елементів, %				
	Ni	Mn	Si	B	Cu
ПС-14-80	0,3...1	0,3	2	0,4...0,18	0,22...0,63
ПС-14-60	0,7...1,8	0,7	2...3	0,1...0,32	0,52...0,13
ПС-15-30	1,3...2	1,3	2,5...4,0	0,2...0,53	0,95...1,88

При індукційному наплавленні застосовують флюси, що містять 43–62 % борної кислоти, 30–42 % кристалічної бури і 5–15 % силікокальцію. Залежно від товщини наплавленого шару в шихті має бути 10...16 % флюсу.

Технологічний процес наплавлення здійснюють у такій послідовності. Деталь очищають від олії, продуктів корозії та інших забруднень. На відновлювану поверхню наносять шар шихти, після чого поверхню поміщають в індуктор і нагрівають до розплавлення шихти. Потім нагрівання припиняють, і наплавлений метал кристалізується.

Залежно від форми, габаритів деталі та потужності генератора ТВЧ застосовують такі способи наплавлення:

- одночасну – наплавлена поверхня повністю вводиться в поле індуктора;
- послідовну – по черзі наплавляють кілька ділянок поверхні;
- безперервно-послідовну – наплавлена поверхня переміщається в поле індуктора;
- відцентрову – наплавляють внутрішню поверхню тіл обертання.

Потужність високочастотної установки, кВт, необхідну для наплавлення, визначають за формулою:

$$P = 2500(K \cdot m_0 + m_n) / \tau_n \eta, \quad (2.18)$$

де  $K$  – коефіцієнт, що враховує теплопередачу в тіло деталі ( $K = 1,1 \dots 1,2$ );

$m_0$  і  $m_n$  – маси основного металу, що нагрівається, в зоні наплавлення і наплавлюваної шихти, кг;

$\tau_n$  – тривалість нагрівання, с;

$\eta$  – ККД нагрівання.

Якщо потрібна потужність більша за потужність установки ТВЧ, то наплавлення виробляють безперервно-послідовним способом.

Тривалість нагрівання визначають за емпіричними формулами: при одночасному напавленні

$$\tau_n = 10 + ah_c, \quad (2.19)$$

при безперервно-послідовній

$$\tau_n = (10 + ah_c) \left( \frac{l}{l_i} + l \right), \quad (2.20)$$

де  $a$  – коефіцієнт, що враховує склад шихти і грануляцію порошку ( $a = 13 \dots 17$ );

$h_c$  – товщина наплавлюваного шару, мм;

$l$  і  $l_i$  – довжини наплавлюваної ділянки й активної частини індуктора, мм.

Наплавлені деталі із середньовуглецевих сталей, що працюють в умовах знакозмінних навантажень, піддають нормалізації.

Індукційне наплавлення широко застосовують для відновлення та зміцнення плоских деталей та внутрішніх циліндричних поверхонь із наплавленням шару завтовшки 0,3...2,5 мм, зовнішніх циліндричних поверхонь – до 1 мм. До таких деталей належать лопатки тягодуттьових вентиляторів, напрямні дуги пісcomedів. Перевагами способу є: висока продуктивність процесу (до 20 кг/год), незначне проплавлення основного металу (10...15 %), структурна однорідність наплавленого шару.

Наплавлений шар відрізняється особливою міцністю, що забезпечує підвищення зносостійкості наплавлюваних елементів, а отже, збільшує їх довговічність.

Отримані цим способом біметалічні вироби дозволяють економити дорогі матеріали, керувати такими властивостями, як коефіцієнт тертя, істотно знижувати собівартість і підвищувати довговічність деталей і вузлів.

До недоліків способу слід віднести високу енергоємність процесу, складність використання способу відновлення ділянок із нерівномірним зношуванням.

## **2.9. Плазмове наплавлення**

При плазмовому напавленні як джерело теплової енергії використовують струмінь плазми, що являє собою потік іонізованих частинок газу. При вільному горінні дуги температура досягає 5000–6000 °С, у випадку примусового стиску – до 18000 °С.

Переваги:

- висока продуктивність, до 14 м/год;
- мала глибина проплавлення основного металу;
- висока якість наплавленого шару і його з'єднання з основним металом;
- можливість нанесення порівняно тонких шарів і ін.

Плазмовий струмінь одержують у спеціальних пристроях, які називають плазмотронами, або плазмовими пальниками. На рис. 2.12 зображена схема

плазмотрону, з якої видно, що останній складається з двох основних складових частин – катодної та анодної, що розділені ізоляційною прокладкою 2.

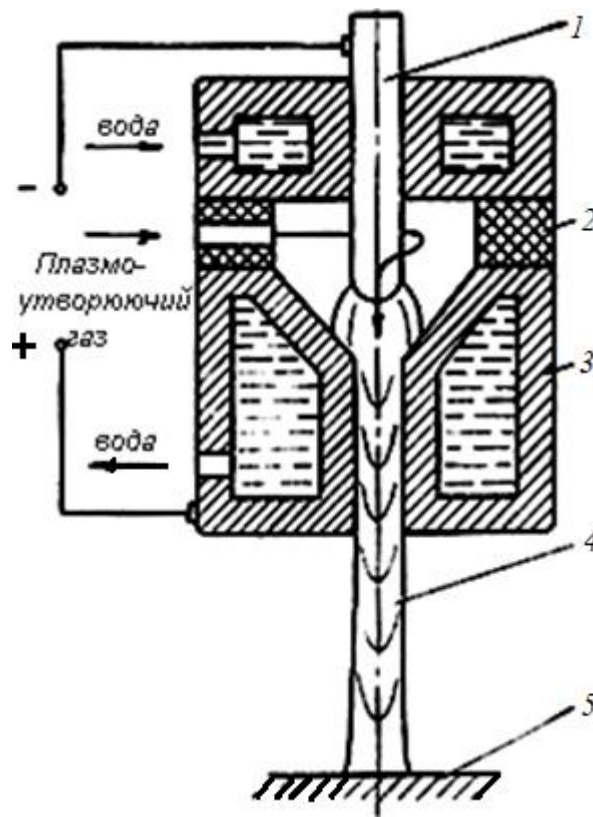


Рис. 2.12. Схема плазмотрона

Катод 1 плазмотрона являє собою стержень діаметром 6...8 мм, виготовлений із лантанового вольфраму. Його (катод) через водяну оболонку охолоджує проточна вода. Анодну частину (сопло) 3, виготовлену з міді, теж охолоджує вода.

Для того щоб одержати плазмовий струмінь 4, між анодом і катодом збуджується електрична дуга, а в зону її горіння вводять плазмоутворюючий газ, який, проходячи через дуговий проміжок, нагрівається до високої температури і іонізується, тобто розпадається на позитивно й негативно заряджені іони.

Під дією електромагнітного поля відбувається обтискування стовпа дуги. Завдяки надмірному тиску газу дуга витягується за напрямком руху струменя. Це сприяє значному збільшенню густини струму і підвищенню температури струменя. Плазмовий струмінь виходить з каналу сопла плазмотрона у вигляді тонкого шнура, довжина видимої частини якого становить 50...60 мм.

Як плазмоутворюючий газ використовують аргон, азот, гелій, водень та їх суміші. Аргоновий плазмовий струмінь має найбільш високу температуру (до 15 000...20 000 °С) і надзвукову швидкість витікання (до 1000...1200 м/с).

Присадковий матеріал під час плазмового наплавлення вводять до зварювальної ванни у вигляді металевго порошку або дроту. Наплавлення з використанням металевго порошку виконують двома методами: подаванням порошку безпосередньо до зварювальної ванни і шляхом вдування його до плазмового струменя.

Для подачі електродного дроту до плазмового струменя можна використовувати механізм подачі дроту від зварювального напівавтомата ПШ-54.

При плазмовому наплавленні як обертач деталі використовують переустаткований токарний верстат. Деталь 5 закріплюють у патроні або центрах переустаткованого токарного верстата, а плазмотрон і механізм подачі дроту – на супорті. Для керування плазмотроном використовують універсальну плазмову установку УПУ-3Д, до складу якої входять: пульт керування, джерело живлення електричним струмом ПН-160/600 і плазмотрон.

Існують різні способи плазмового наплавлення з застосуванням порошку (по шару порошку або з подачею порошку в зварювальну ванну), присаджувального дроту або стрічки та ін.

Найбільшого застосування для плазмового наплавлення набули сормайт, сплави ФБХ-6-2, ВУС-25, ПГ-СР3.

Технічні режими:  $I = 150\text{--}2000$  А,  $V_{xx} = 120\text{--}160$  В,  $V_{роб} = 40\text{--}45$  В;

Витрата плазмоутворювального газу – 1,5–2,5 л/хв;

Витрата транспортуючого газу – 5–7 л/хв;

Витрата захисного газу – 16–20 л/хв;

Швидкість наплавлення – 0,15-0,18 м/хв.

Висока концентрація теплової енергії в плазмовому струмені, стабільність дугового розряду, можливість роздільного регулювання ступеня нагрівання основного і присадкового матеріалів визначають переваги використання плазми при наплавленні робочих поверхонь деталей.

Плазмове наплавлення забезпечує високу якість наплавного металу і за своїми техніко-економічними показниками не поступається, а в деяких випадках навіть перевершує інші способи механізованого наплавлення.

## 2.10. Лазерне (світлове) наплавлення

Лазер або оптичний квантовий генератор – це пристрій, який перетворює світлову енергію в енергію когерентного, монохроматичного потоку випромінювання. Внаслідок надання зовнішньої енергії атоми активної речовини робочого тіла переходять у збуджений стан. Через деякий проміжок часу збуджений атом випромінює одержану енергію у вигляді фотона (рис. 2.13).

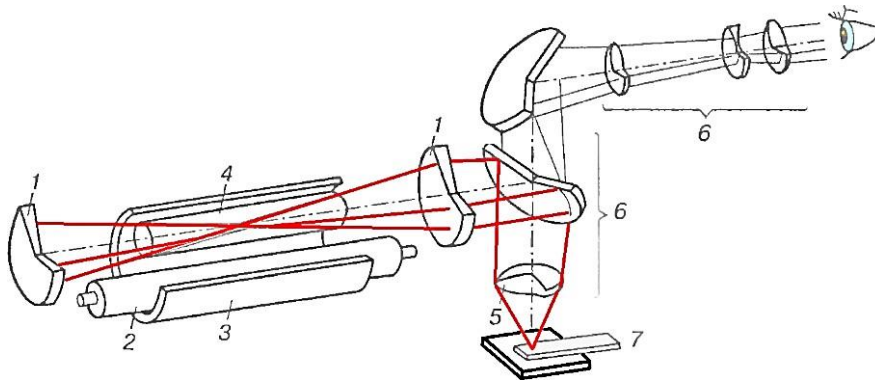


Рис. 2.13. Схема лазерної установки:

- 1 – дзеркало резонатора; 2 – лампа надання зовнішньої енергії;  
 3 – дзеркальна порожнина освітлювача; 4 – робоче тіло;  
 5 – лінза; 6 – мікроскоп; 7 – виріб.

Фотони виникають у процесах переходу атомів, молекул, іонів зі збуджених станів у стабільніші стани з меншою енергією. При певному рівні збудження відбувається лавиноподібний перехід збуджених атомів активної речовини випромінювача у стабільніший стан. Це створює когерентне світлове монохроматичне випромінювання, яке випускається у вигляді вузького спрямованого пучка.

**Властивості зміцнених матеріалів.** Лазерне зміцнення підвищує зносостійкість пар тертя, які працюють в умовах сухого тертя і в абразивно-

мастильному середовищі (рис. 2.14). При цьому спостерігається підвищення зносостійкості не тільки зміцненої поверхні, а й контртіла.

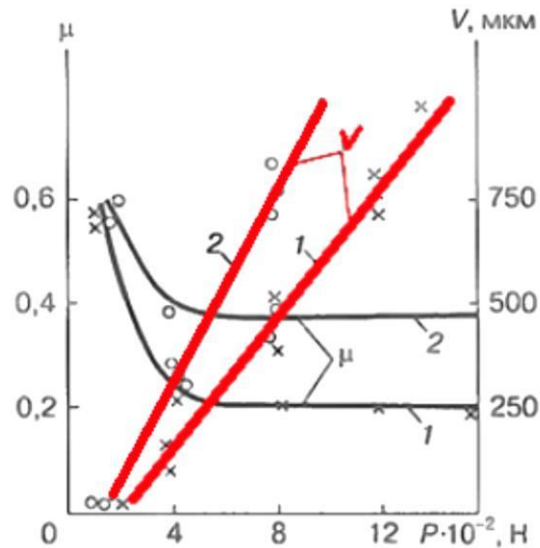


Рис. 2.14. Залежність швидкості зношування  $V$  і коефіцієнта тертя  $\mu$  від тиску  $P$ :

1 – сталь 40X, зміцнена лазерним опроміненням;

2 – сталь 40X, загартована за стандартною методикою

Підвищення зносостійкості спостерігається внаслідок значного зменшення (іноді до 2 разів) коефіцієнта тертя. На рис. 2.14 наведені залежності швидкості зношування  $V$  і коефіцієнта тертя  $\mu$  сталі 40X.

Механічні властивості матеріалів, такі, як границя міцності  $\sigma_b$ , границя плинності  $\sigma_{02}$ , ударна в'язкість  $a_n$ , також змінюються внаслідок лазерного опромінення. Наприклад, для загартованої сталі ударна в'язкість знижується після лазерної обробки від 5 до 1,32 МДж/м<sup>2</sup>.

**Лазерне легування матеріалів.** Лазерне легування полягає в насиченні матеріалу легуючими елементами за рахунок дифузії попередньо нанесеного шару під впливом лазерного пучка. При цьому досягається висока концентрація легуючих компонентів у поверхневих шарах матеріалів (рис. 2.15).

Ступінь зміцнення залежить як від типу легуючого елемента (елементів), так і від властивостей матричного матеріалу. Так, при легуванні заліза сполуками, які містять вуглець, досягається значне підвищення його концентрації в залізі з

утворенням твердого розчину залізо-вуглець.

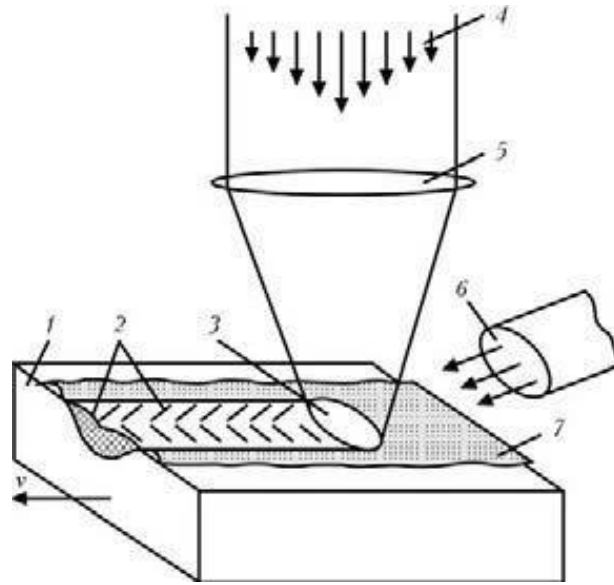


Рис. 2.15. Схема процесу лазерного легування:

1 – зразок, що рухається зі швидкістю  $v$ ; 2 – легована доріжка; 3 – ванна розплаву;  
4 – лазерний пучок; 5 – фокусуюча система; 6 – захисний газ; 7 – легуюча обмазка

Оброблена ділянка поверхні являє собою білий шар із рівномірною мікротвердістю, яка досягає 1400 МПа. За ним йде термооброблений шар із мікротвердістю 1000 МПа.

При легуванні армко-заліза тугоплавкими металами Ni, Mo, V, Nb, Ta в умовах імпульсного опромінення спостерігається значна зміна мікротвердості, однак для різних легуючих елементів закономірності зміни мікротвердості різні (рис. 2.16). У зоні дії лазерного випромінювання наявні тверді розчини на основі заліза.

Кількість легуючого елемента в зоні дії лазерного випромінювання значно перевищує границі розчинності при однакових умовах.

Якщо на чистому залізі існує одна чітко локалізована зона, яка за своїми властивостями відрізняється від матричного матеріалу, то на сталі ШХ15 в зоні дії лазерного випромінювання спостерігається утворення трьох чітко виражених зон.

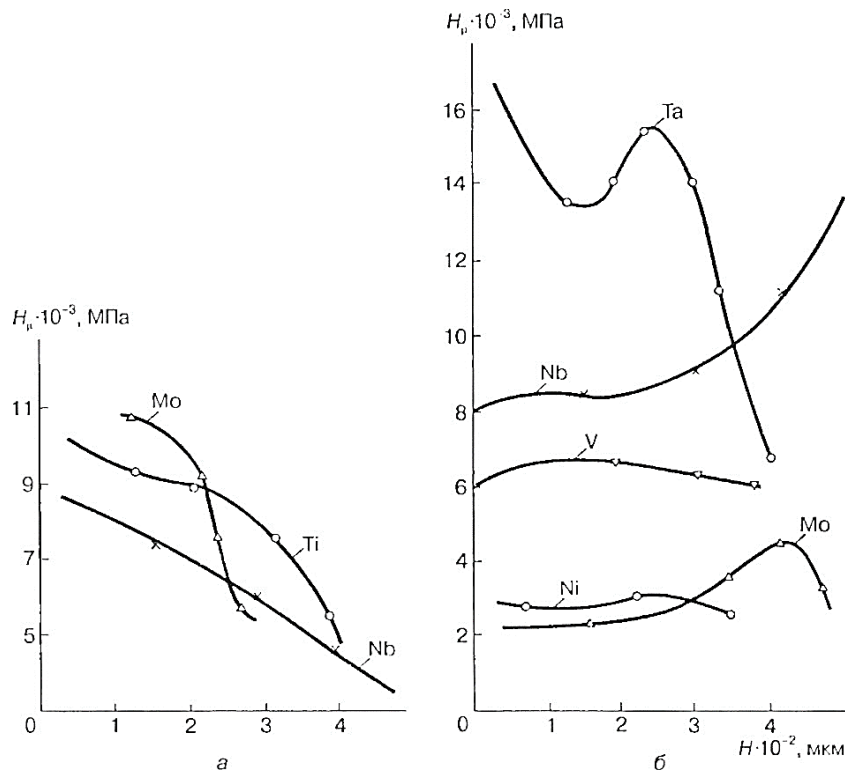


Рис. 2.16. Вплив типу легуючого елемента і матричного матеріалу

на мікротвердість легованого шару:

*a* – матриця сталь ШХ15; *б* – матриця армко-залізо

Одна з цих зон (найбільша за об'ємом) є твердим розчином легуючого елемента на основі заліза, далі послідовно розміщені зона загартування і зона відпуску. Глибина зони легування досягає 300–400 мкм.

Тип легуючого елемента впливає на твердість легованого шару. У зоні лазерної дії вона вища при легуванні молібденом і титаном, ніж при легуванні ніобієм. Якщо легуючими елементами є легкоплавкі метали або сполуки, то ефективність лазерного легування знижується.

В умовах лазерного легування для низки систем пересичених твердих розчинів можна отримати різні метастабільні фази і структурні стани. Так, легування при імпульсному опроміненні технічного заліза молібденом змінює концентрацію легуючого елемента (Mo) за масою від 28 до 36 %. Це в 5–6 разів перевищує рівень концентрації, характерної для рівноважних умов систем залізо-молібден при температурах не вищих, ніж 500 °С.

Розподіл легуючого елемента локалізований межами зони лазерної дії, і легуючі елементи практично не проникають за межі зони, тому можна розрахувати максимальну концентрацію елемента в опроміненій зоні.

Якщо припустити, що контур елементарної розплавленої зони при дії імпульсного випромінювання являє собою параболоїд обертання з твірною, яка відповідає ізотермі плавлення матеріалу, тоді:

$$\frac{K_1}{K_2} = \frac{V_1+V_2}{V_2} \quad (2.21)$$

$$K_2 = \frac{K_1 V_1}{V_1+V_2}, \quad (2.22)$$

де  $K_1$  і  $V_1$  – відповідно концентрація елемента в попередньо нанесеному шарі і об'єм цього шару;

$K_2$  і  $V_2$  – відповідно концентрація легуючого елемента в розплавленому об'ємі матриці і об'єм розплавленого металу.

### *Лазерне відновлення і зміцнення деталей*

Використання лазерної технології для відновлення деталей може забезпечити нарощування металу, заварювання дефектів завглибшки до 0,5 мм, термічну обробку, прошивання отворів, зварювання. Вона ефективна для місцевого наплавлення площею 50–100 мм<sup>2</sup> з товщиною шару 0,8–1,2 мм, термозміцнення відповідальних ділянок плоских поверхонь деталей, а також циліндричних і складно-профільних із радіусом кривизни не більше 25 мм. Зона термічного впливу при лазерному наплавленні залежить від маси деталі і не перевищує 0,4 мм.

Суть лазерної технології полягає в тому, що лазерний промінь створює дуже високі густини світлової потужності – порядку 10<sup>9</sup> Вт/см<sup>2</sup> і вище. При цьому легко регулюється розмір і положення світлового променя за допомогою дзеркал і фокусуємих лінз.

Діаметр фокусованого променя може змінюватись від 0,01 до 10 мм, а сам переміщуватися запрограмованими траєкторіями будь-якої складності. Основними параметрами лазерних технологій є густина потужності ( $P$ ). Якщо  $P < 10^5$  Вт/см<sup>2</sup>,

його використовують для термічної обробки;  $10^5 < P < 10^7$  – для зварювання і наплавлення;  $P > 10^8$  Вт/см<sup>2</sup> – для різання і прошивання отворів. Для зміцнення і нарощування зношених циліндричних поверхонь переважно використовують схему, наведену на рис. 2.17. Обробка циліндричної поверхні більшої довжини, ніж діаметр пучка, здійснюється скануванням за спіраллю, а плоскої – за зигзагом.

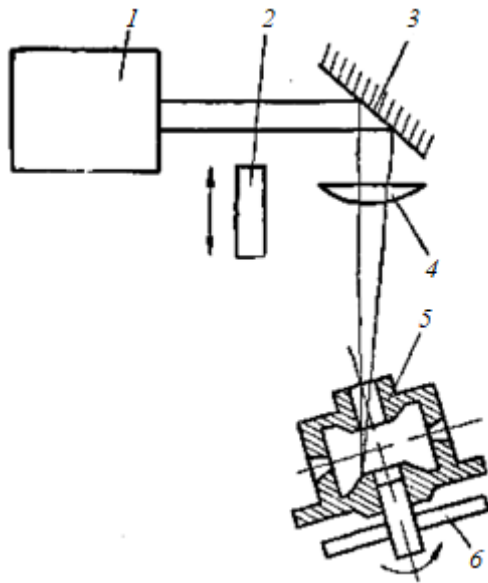


Рис. 2.17. Схема лазерної установки для зміцнення циліндричних поверхонь:

- 1 – лазер;
- 2 – вимірювач потужності;
- 3 – дзеркала;
- 4 – фокусуюча лінза;
- 5 – деталь;
- 6 – пристрій для обертання

Лазерне наплавлення можна здійснювати двома методами: шляхом подачі порошку через дозатор у зону променя і нанесенням порошку потрібного складу на деталь у вигляді обмазки (зв'язувально-клейова сполука – водний розчин осітилцелюлози – ОЕЦ або карбоксиметилцелюлози – КМЦ з розрахунку 8–20 г/л при  $t = 75$  °С). Витрата порошку першим методом у 5–6 разів більша, а рівень фізико-механічних властивостей покриття нижчий, ніж при нарощуванні шару другим методом.

Лазери поділяються на твердотілі і газові – CO<sub>2</sub>. Твердотілі застосовують на допоміжних операціях, а також при обробці малогабаритних деталей. Активним середовищем є тверді тіла: рубіни, спеціальне скло, алюмонатрієвий гранат тощо. Їх ККД не перевищує 3 %. У газових лазерів безперервної дії ККД становить 5–10 %.

Оптична система формування і передачі променя у лазерній установці включає дзеркала і лінзи.

Основними критеріями якості є глибина зміцнення, його однорідність, міцність перехідної зони під час нарощування, рівень і розподіл мікротвердості вздовж перерізу робочого шару. Максимальної глибини загартованого шару досягають тоді, коли температура на поверхні деталі відповідає температурі плавлення. Це забезпечується інтенсивністю теплового джерела, швидкістю обертання та переміщення деталі під час обробки.

Із збільшенням концентрації вуглецю твердість і глибина загартованої зони збільшуються. Підвищення концентрації карбідоутворювальних легуючих елементів (Cr, W, V, Mo) призводить до зростання твердості зміцненої зони, а аустенітоутворювальних елементів (Ni, Mn, Cu) – до її зниження. Термічне зміцнення (загартування) сталевих деталей із вмістом вуглецю від 0,006 до 0,78 % забезпечує глибину загартованого шару без оплавлення поверхні до 0,5–0,6 мм, а з високоміцного чавуну – до 1 мм.

При відновленні деталей лазерним наплавленням твердість робочого шару становить 60–63 HRC, а міцність зчеплення з основним металом – 250 МПа.

### **2.11. Електронно-променеве наплавлення**

Електронний промінь – потік електронів, що випромінюються одним джерелом і рухаються по близьких траєкторіях у певному напрямку. Електронний промінь створюється спеціальним приладом – електронною гарматою (рис. 2.18), за допомогою якої отримують вузькі електронні пучки з великою густиною енергії. Для забезпечення вільного руху електронів від катода до анода і далі до виробу, а також для того, щоб запобігти утворенню дугового розряду між електродами, в установці створюється глибокий вакуум (порядку  $1 \cdot 10^{-2}$  Па) (рис. 2.18).

*Особливості модифікування поверхні.* При електронно-променевої обробці поверхні можливі декілька видів її стану (рис. 2.19). Оплавлення і наступне твердіння з невеликими швидкостями здійснюється для рафінування (рис. 2.19, а) металу поверхні заготовки й усунення поверхневих дефектів.

Загартування сплавів з твердого стану (рис. 2.19, б) здійснюється зі швидкостями нагрівання й охолодження приблизно  $10^2$ – $10^4$  К/с.

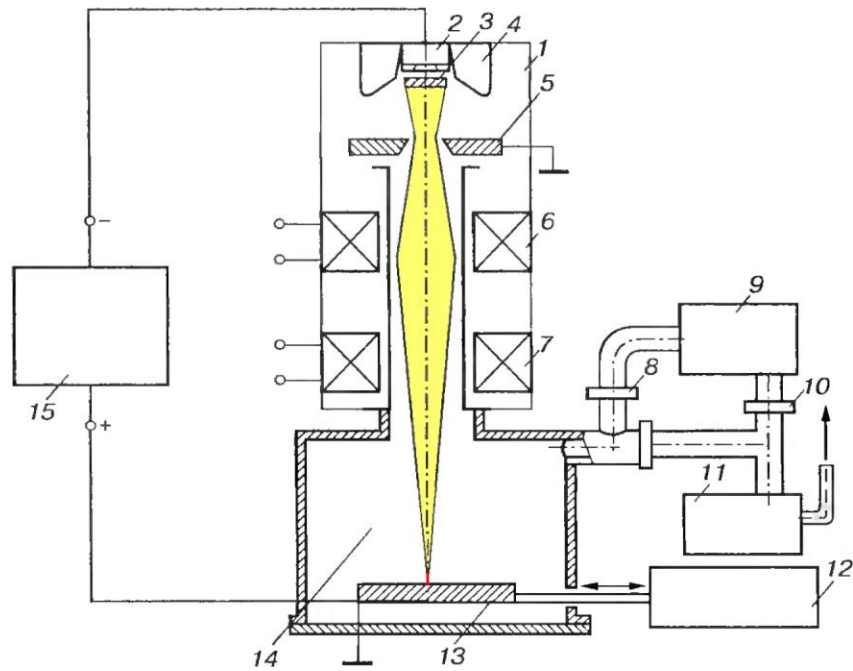


Рис. 2.18. Схема електронно-променевої установки:

- 1 – електронна гармата; 2 – нагрівник; 3 – катод; 4 – додатковий електрод;  
 5 – анод; 6 – магнітна лінза; 7 – система відхилення; 8, 10 – затвори;  
 9 – дифузійний насос; 11 – форвакуумний насос; 12 – привід маніпулятора;  
 13 – виріб; 14 – вакуумний об'єм; 15 – високовольтне джерело постійного струму

Практичне значення мають процеси поверхневого легування (рис. 2.19, *з*), наплавлення матеріалу (рис. 2.19, *е*), обробки попередньо нанесених на метал покриттів (рис. 2.19, *ж*), нагрівання шарів після хіміко-термічної обробки. Ударне зміцнення (рис. 2.16, *з*) відбувається за проміжок часу  $10^{-6}$ – $10^{-8}$  с.

При електронно-променевому оплавленні в режимах рафінування і загартування з рідкого стану переплавлення сталей та сплавів приводить до виділення газів і 30–75 % неметалевих включень. Розподіл включень є більш рівномірним, і вони зменшуються за розмірами. Це покращує комплекс фізико-механічних характеристик матеріалів: підвищуються густина, ударна в'язкість, теплопровідність (рис. 2.20), контактне витримування, зменшується схильність до гарячого тріщиноутворення.

Наприклад, стійкість інструменту зі сталей електронно-променевого переплавлення для холодного і гарячого деформування зростає на 70–155 %.

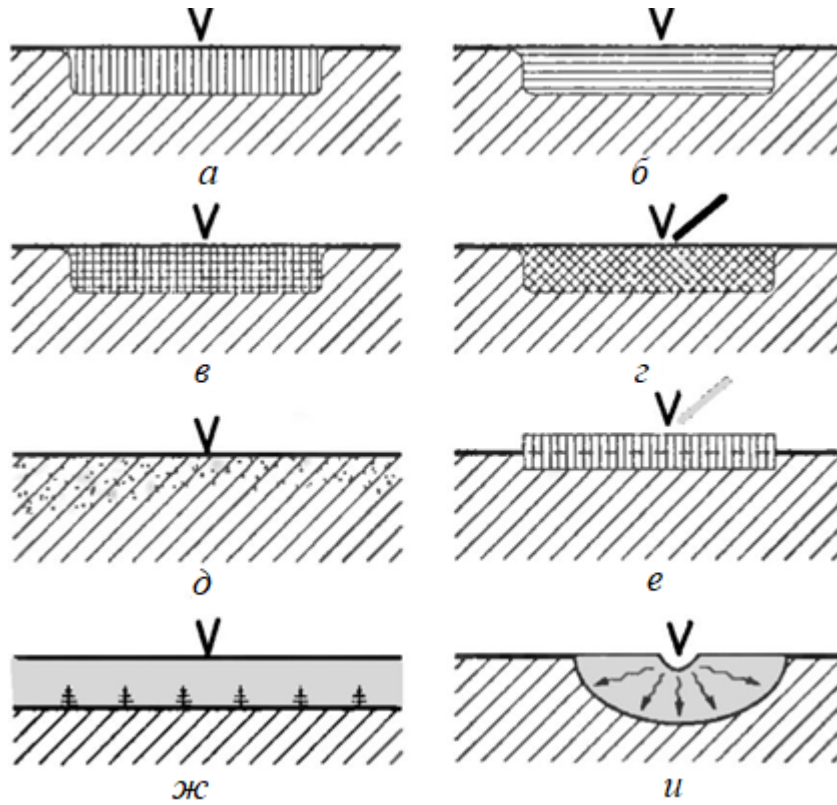


Рис. 2.19. Схеми електронно-променевого модифікування поверхні:

*a* – рафінувальне оплавлення; *б* – загартування з твердого стану; *в* – модифікування за фазовим перетворенням; *г* – легування; *д* – дифузія; *е* – наплавлення; *ж* – обробка попередньо нанесених покриттів; *и* – ударне зміцнення

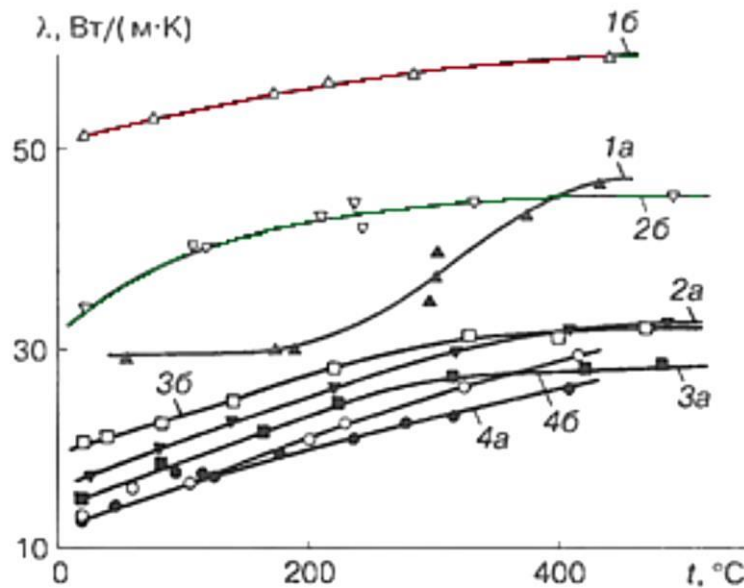


Рис. 2.20. Температурна залежність коефіцієнта теплопровідності сталей:

1 – 5ХНМ; 2 – ШХ15СГ; 3 – 4Х5МФС; 4 – ДІ23 у вихідному стані (*a*) і після електронно-променевого оплавлення (*б*)

## 2.12. Електроконтактне наплавлення

*Способи електроконтактного наплавлення.* Мета способу ЕКН полягає в нагріванні присадного матеріалу і приконтактного об'єму металу відновлюваної деталі імпульсами електричного струму та їх спільної пластичної деформації, який забезпечує утворення фізичного контакту, активацію контактних поверхонь і об'ємну взаємодію покриття і матеріалу основи. Як присадка при ЕКН застосовуються як порошкові матеріали, так і компактні матеріали (суцільні металеві стрічки і дроти, порошкові стрічки і дроти).

Переваги електроконтактного наплавлення:

1. Висока продуктивність і низька енергоємність процесу нарощування шару металу в твердій фазі;
2. Мінімальна зона термічного впливу струму на метал внаслідок надзвичайно малої (до тисячних часток секунди) тривалості імпульсів, що формуються сучасними переривниками струму;
3. Немає необхідності в захисному середовищі, зважаючи на короткочасну термічну дію на присадний метал;
4. Відсутність потужного світлового випромінювання і газовиділення.

У разі використання як присадки порошкових матеріалів процес називається електроконтактним припіканням (ЕКП).

*Припікання* – технологічний процес, що полягає в нанесенні на поверхню відновлюваної деталі порошкового формування або шару порошку з метою отримання двошарового матеріалу шляхом нагріву до температури, що забезпечує спікання порошкового матеріалу і утворення міцного дифузійного зв'язку з деталлю.

Як показано на рис. 2.21, стрічка 2, яку приварюють до деталі 3, притискується до неї роликком 1. Між деталлю і роликком пропускають електричний струм великої щільності від знижувального трансформатора 5. Амплітуду і тривалість імпульсів струму регулюють за допомогою регулятора 6.

Для зменшення нагрівання деталі і покращення властивостей привареної стрічки в зону зварювання подають охолоджену рідину.

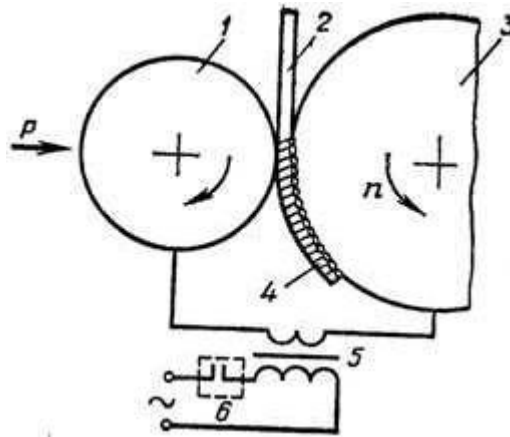


Рис. 2.21. Схема електроконтактного наплавлення

Велика швидкість, з якою відбувається технологічний процес електроконтактного наплавлення, дозволяє обходитись без використання захисних газів і флюсів.

Пристрій для електроконтактного наплавлення складається з обертача, наплавного апарата і системи живлення електричним струмом.

У ремонтному виробництві залежно від відновлюваної поверхні використовують такі марки пристроїв, що виготовляються промисловістю: ОП-1-02М (шийки валів), ОП-1-10 (стакани підшипників), ОП-1-08 (шатуни), 01.11-022 (великогабаритні деталі).

Як наварювальний матеріал використовують металеві стрічки, дріт і порошок. Під час застосування порошку при напавленні відбувається запікання його на поверхні відновлюваної деталі. Схему електроконтактного запікання порошку на поверхні деталі зображено на рис. 2.22.

Від марки сталі, з якої виготовляють стрічки і дріт, залежить твердість напавленою шару. Так, при використанні марок сталі 20 і 45 одержують твердість напавленого шару HRC 30...35 і 45...50.

Високу зносостійкість напавленого металу отримують за рахунок порошоків різноманітного складу.

Після запікання напавлений метал складається з в'язкої залізохромонікелевої матриці, яка армована частинками карбідів, боридів, нітридів хрому, титану, вольфраму та інших металів, які мають високу твердість.

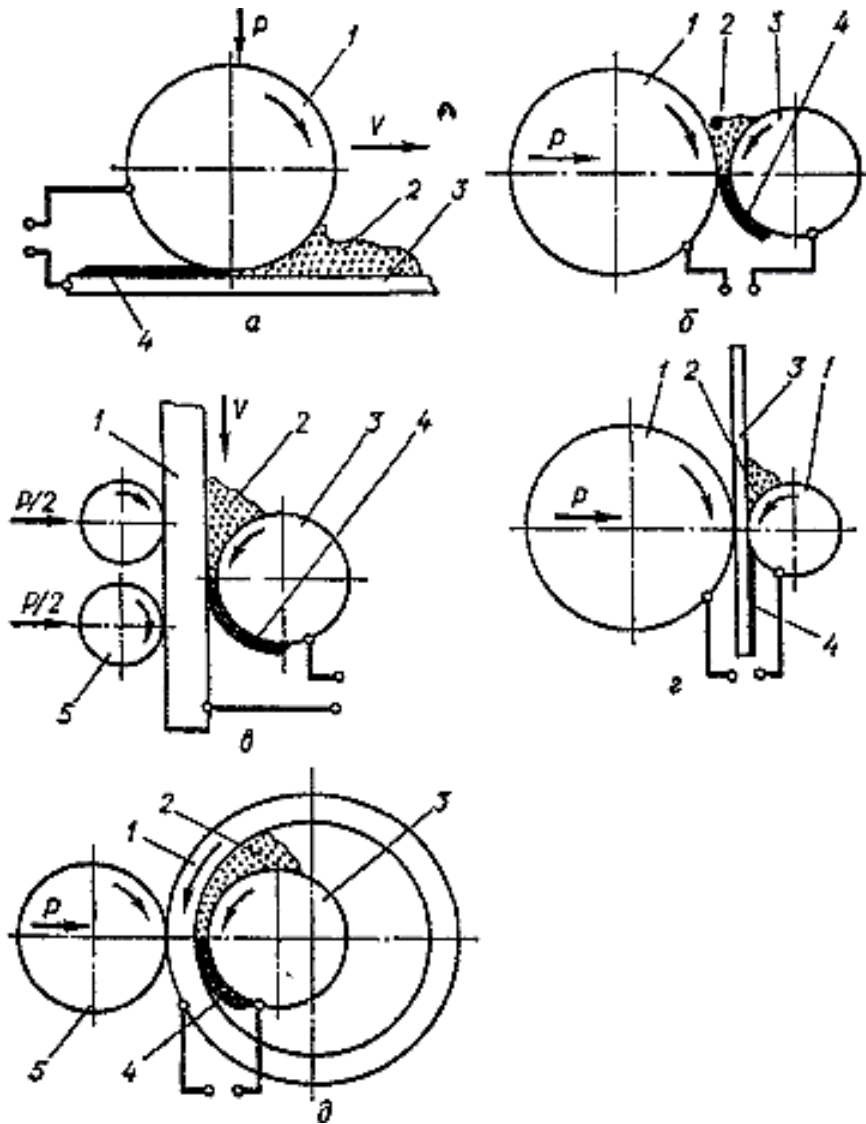


Рис. 2.22. Схема електроконтактного запікання порошку на поверхні деталі:

*a* – на площині; *б* і *в* – на зовнішній поверхні; *г* – на стрічці; *д* – на внутрішній поверхні;  
 1 – контактний ролик (електрод); 2 – металевий порошок; 3 – деталь; 4 – наплавлена куля; 5 – натискний ролик;  $P$  – зусилля;  $V$  – швидкість подачі

*Наварювання сталеві стрічки.* Металева стрічка використовується для відновлення деталей типу тіл обертання (вали, осі, ролики). Для цього використовують відпалену сталеву стрічку (СС). В цьому випадку тепло виділяється переважно на перехідному опорі стрічка – деталь. Наплавлений шар (визначення «наплавлений шар» у принципі не коректне) формується в результаті з'єднання СС із поверхнею деталі. Його товщина практично дорівнює товщині СС. Стрічки майже усіх марок сталі при наварюванні значно зміцнюються

(спостерігали навіть зміцнення шару, наплавленого стрічкою сталі 08). Отримувана твердість пропорційна вмісту вуглецю в сталі.

*Наплавлення зварювальним дротом.* Електроконтактне наплавлення здійснюють на спеціальній установці (рис. 2.23).

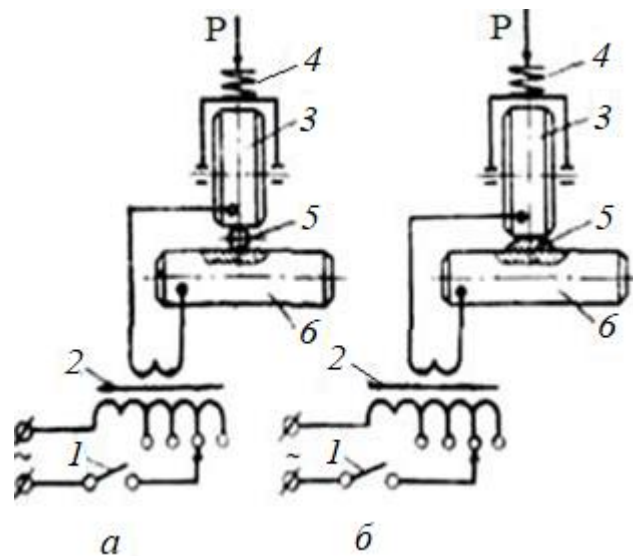


Рис. 2.23. Схема установки електроконтактного наплавлення:

*а* – початковий стан; *б* – кінцевий стан;

*1* – переривник струму; *2* – трансформатор; *3* – наплавляючий ролик;

*4* – амортизатор; *5* – присадковий дріт; *6* – зразок

Електроконтактне наплавлення виконують спільною деформацією наплавлюваного металу і поверхневого шару металу основи, нагрітих у осередку деформації до пластичного стану короткими (0,02–0,04 с) імпульсами струму 10–20 кА.

В результаті кожного з послідовних електромеханічних циклів процесу на поверхні металу основи утворюється одинична ділянка наплавленого металу, що перекриває сусідні.

Деформація наплавленого металу за цикл становить 40–60 %. Наявність пластичної деформації присадного матеріалу дає можливість підвищити міцність зчеплення покриття з основою.

Електроконтактне наплавлення застосовують для ремонту металевих поверхонь і отримання біметалічних виробів.

*Основна технологічна схема наплавлення.* Суцільний шар металу утворюється за цією схемою шляхом наплавлення спіралеподібних валиків металу (рис. 2.24), що перекриваються по ширині.

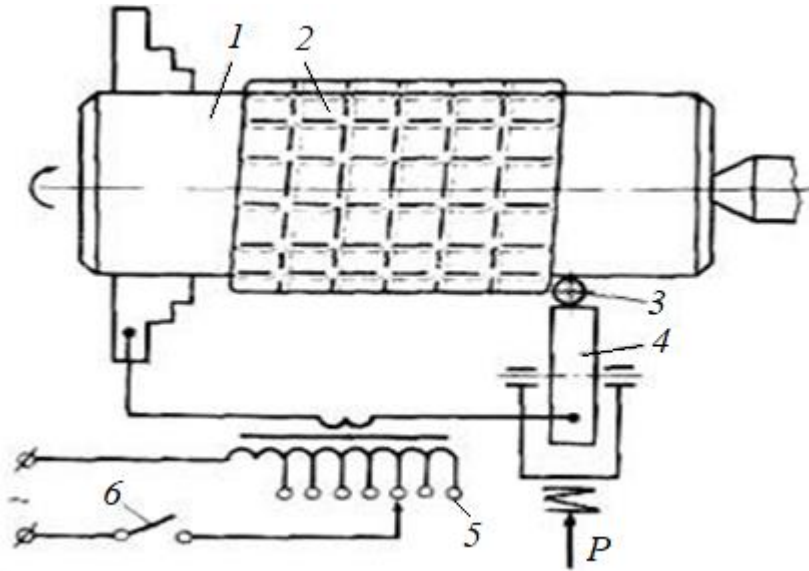


Рис. 2.24. Основна технологічна схема електроконтактного наплавлення:

1 – наплавлена деталь; 2 – наплавлений метал; 3 – присадний дріт;  
4 – наплавляючий ролик; 5 – трансформатор; 6 – переривник струму

Наплавлення виконується одним наплавляючим роликом. Присадний дріт додається в зону наплавлення і фіксується за допомогою напрямної втулки, жорстко закріпленої відносно ролика. Положення кожного витка спіралеподібного валика перекриття, що забезпечує його контакт із сусіднім, визначається тільки швидкістю переміщення ролика відносно деталі.

При напавленні чергового витка присадний дріт внаслідок деформації контактує з раніше напавленим валиком. Присадний дріт і ділянка металу попереднього витка нагріваються струмом напавлення та спільно деформуються, внаслідок чого відбувається їх з'єднання.

Основна технологічна схема напавлення проста, надійна і може вважатися оптимальною для великої групи виробів. Недоліком схеми є підвищене місцеве зношування ролика, при його зачищенні після напавлення чергової ділянки

видаляється частина поверхні ролика, що не брала участь у роботі, тому прийнятніше послідовне використання усієї контактної поверхні ролика. Недоліки цієї схеми не є визначальними.

Режим наплавлення характеризують такими показниками: сила зварювального струму, кА; тривалість імпульсів і пауз, с; зусилля стиснення електродів, кН; швидкість приварювання, м/год.; подача електрода, мм/об; ширина робочої частини електродів, мм; витрата охолоджуючої рідини, л/год.; твердість наплавленого шару HRC. Режим наплавлення (запикання) залежить від питомого опору, питомої маси, температуропровідності, температури плавлення присадкового матеріалу.

Кількість теплоти, необхідної для сплавлення металеві стрічки або запикання порошку до деталі, визначають за законом Джоуля-Ленца:

$$Q = I^2 R t, \quad (2.23)$$

де  $Q$  – кількість теплоти, Дж;

$I$  – сила зварювального струму, А;

$R$  – опір електричного кола, Ом;

$t$  – тривалість циклу, с.

Мала кількість теплоти спричиняє неповне спікання присадкового матеріалу, а надмірна – зумовлює виполіскування металу і погіршення якості наплавленого шару.

Підготовка деталі до наплавлення полягає в усуненні такого дефекту, як зміна геометричної форми і розміру робочої поверхні за допомогою шліфування. Після закінчення шліфування деталей знежирюють.

При електроконтактному наплавленні зварювальні точки треба перекривати на 25...35 % за рахунок таких його параметрів: частота обертання деталі, подача присадкового матеріалу, крок приварювання і частота імпульсів.

Після наплавлення виконують розмірну обробку робочих поверхонь деталі шляхом розточування і шліфування. Припуск на механічну обробку становить 0,1–0,2 мм.

Перевагою цього способу наплавлення є висока продуктивність (до 100 см<sup>2</sup>/хв), мінімальна витрата присадкового матеріалу (до 5 %), мінімальний

припуск на механічну обробку, можливість регулювання товщини наплавленого шару в межах 0,3...1,5 мм як зовнішніх, так і внутрішніх робочих поверхонь деталей, що виготовлені з різноманітних марок сталі, чавуну й кольорових металів і сплавів, можливість отримання наплавленого шару металу із заданими трибологічними властивостями, що в декілька разів підвищують зносостійкість та корозійну стійкість деталі. Міцного зв'язку між присадковим матеріалом і основним металом досягають за рахунок дифузійних явищ та часткового наплавлення дуже тонкого шару основного металу в зоні контакту. Тому електроконтактне наплавлення використовують для відновлення і зміцнення шийок валів, отворів у корпусних та інших деталях. До недоліків способу відносять низьку стійкість роликів електродів і зв'язану з цим нестабільність процесу, високу трудомісткість при підготовці деталі до наплавлення.

### **2.13. Газове зварювання і наплавлення**

Газове зварювання і наплавлення – це один із універсальних способів ремонту деталей, тому що дозволяє обробляти метали завтовшки від десятих часток міліметра до десятків міліметрів. Газозварювальні процеси, розтягнуті у часі, легко контролюються зварником, що дозволяє навіть при відносно низькій його кваліфікації одержувати достатньо високу якість шва. Крім того, відносно низькі швидкості нагрівання і охолодження металу під час зварювання дозволяють зменшити зварювальні напруження і уникнути утворення тріщин.

Газове зварювання найчастіше застосовують для зварювання низько- і середньовуглецевих сталей завтовшки до 3 мм (кабіни, облицювання, кожухи тощо) і під час ремонту деталей з чавуну і кольорових металів.

Джерелом тепла для нагрівання деталей при газовому зварюванні є полум'я, утворене від згорання суміші газу з киснем. Для зварювання найчастіше використовують ацетилен ( $C_2H_2$ ), значно рідше пропан-бутан ( $C_3H_8+C_4H_{10}$ ). В останні роки великих успіхів досягнуто у використанні воднево-кисневих сумішей.

Зварювальне полум'я складається з трьох зон (рис. 2.25).

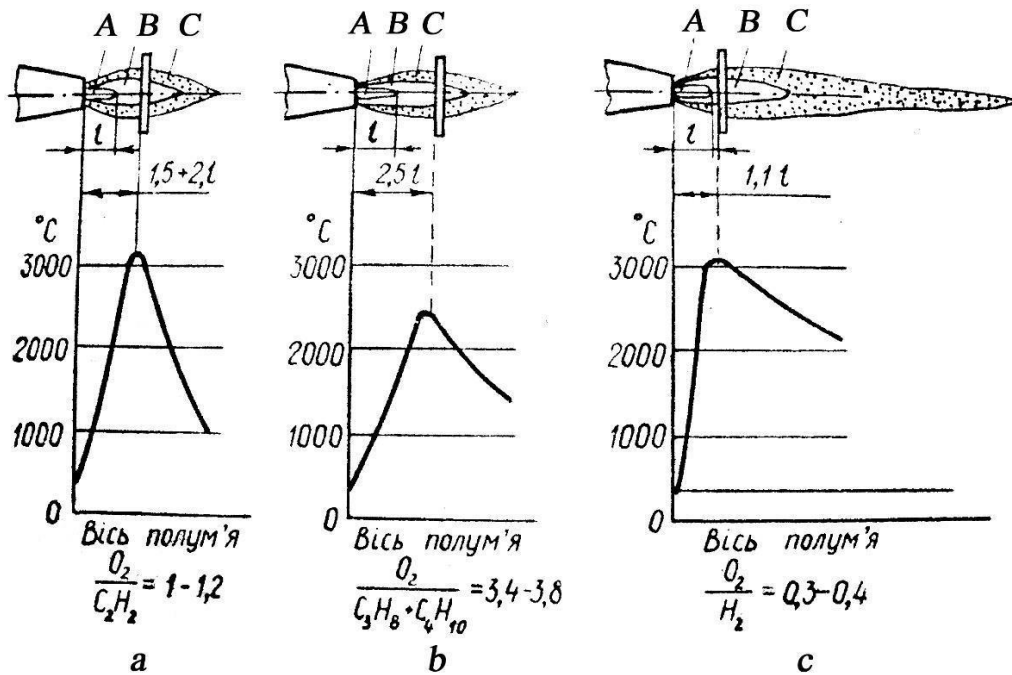


Рис. 2.25. Будова зварювального полум'я:

*a* – ацетилено-кисневого; *b* – пропано-кисневого; *c* – воднево-кисневого; *A* – ядро;  
*B* – зона неповного згорання; *C* – зона повного згорання; *l* – довжина ядра

Зона «А» (ядро полум'я) обмежена світлою оболонкою, у зовнішньому шарі якої згорає вуглець, утворений під час розпаду молекул палива. Зона «В» – відновлювана, або зона неповного згорання. Вона складається з окису вуглецю і водню, утворених на першій стадії горіння газу. Ці продукти згорання розкиснюють розплавлений метал, віднімаючи кисень від його окислів. Зона «С» – повного згорання (або факел). Вона являє собою видимий об'єм газів. У цій зоні відбувається догорання продуктів горіння за рахунок кисню, ежектованого з повітря.

Деяко інша будова воднево-кисневого полум'я, тому для коректування складу полум'я до воднево-кисневої суміші додають пари бензину у незначних кількостях (5–10 %). Такий склад газової суміші призводить до того, що в полум'ї зони «В» практично повністю відсутнє і відповідно, не відбувається розкиснення розплавленого металу.

Максимальна температура ацетилено-кисневого полум'я (3150 °С) значно вища максимальної температури пропан-бутан-кисневого полум'я (2400 °С). Як показують

дослідження, проведені в ХНТУСГ, максимальна температура воднево-кисневого полум'я (3000 °С) близька до температури ацетилено-кисневого.

Від співвідношення газу і кисню у горючій суміші залежить характер полум'я. Нейтральне полум'я характеризується відсутністю вільного кисню і вуглецю у відновлюваній зоні «В». Для різних горючих сумішей нейтральне полум'я досягається таким співвідношенням об'ємів кисню і газу:

$$\text{ацетилено-кисневе полум'я} - \frac{O_2}{C_2H_2} = 1 - 1,2;$$

$$\text{пропан-бутан-кисневе полум'я} - \frac{O_2}{C_3H_8+C_4H_{10}} = 3,4 - 3,8;$$

$$\text{воднево-кисневе полум'я} - \frac{O_2}{H_2} = 0,4 - 0,45.$$

Окисне полум'я отримується за більших значень наведених вище співвідношень. Таке полум'я має вищу температуру, однак надлишок кисню сприяє окисненню заліза. Метал шва отримують пористий і крихкий. Тому в цьому випадку потрібно застосовувати дрiт марок СВ-08ГС і СВ-12ГС, які містять розкиснювачі – марганець і кремній.

Навуглецьовувальне полум'я характеризується надлишком горючого газу, зниженою температурою і сприяє насиченню металу шва вуглецем.

Для зварювання і наплавлення деталей із сталі, яка має менше 0,5 % вуглецю і кольорових металів, використовують нейтральне полум'я; для деталей з високовуглецевих і легованих сталей, чавуну, наплавлення твердих сплавів – навуглецьовувальне полум'я; для різання металу – окиснювальне.

Потрібно враховувати, що при взаємодії розплавленого металу зі зварювальним полум'ям змінюється його склад. Кисень, який потрапив у шов, знижує його міцність, ударну в'язкість, стійкість проти корозії. Водень сприяє утворенню тріщин. Азот, взаємодіючи за високої температури із залізом, утворює нітриди, які надають наплавленому металу підвищеної твердості і крихкості. У процесі зварювання вигорає кремній, марганець, інші легуючі добавки матеріалу зварюваних деталей.

Щоб не змінювався склад наплавленого шару, матеріал присадного дроту за своїми фізико-механічними властивостями і хімічним складом має бути таким, як і

матеріал деталі, але зі збільшеною кількістю легкоокиснювальних компонентів.

Присадним матеріалом для зварювання невідповідальних сталевих деталей є маловуглецевий дріт типу Св-08. Для підвищення механічних властивостей і розкиснення металу шва використовують низьколегований кремній-марганцевистий присадний дріт Св-08ГС, Св-10ГС тощо. Позитивно впливає на якість шва наявність у присадному матеріалі нікелю, хрому тощо.

Під час наплавлення зношених поверхонь деталей використовують електроди Нп-40, Нп-50, Нп-30ХГСА, Нп-50Г, Нп-65Г та інші, які дозволяють одержати наплавлений шар з високою стійкістю проти зношування.

Для захисту розплавленого металу від шкідливого впливу кисню, азоту, водню та інших елементів застосовують флюси. Вони утворюють з окислами металів хімічні сполуки, які спливають у вигляді шлаку на поверхню і захищають рідкий метал від насичення газами. Основними компонентами флюсів для чорних металів є бура  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ , двовуглецева сода  $\text{NaHCO}_3$  і борна кислота  $\text{H}_3\text{BO}_3$ .

Для газового зварювання і наплавлення застосовується відносно просте і недороге обладнання.

Ацетилен одержують безпосередньо на робочому місці зварника в ацетиленовому генераторі шляхом взаємодії карбїду кальцію з водою або зберігають у спеціальних ацетиленових балонах. У сільськогосподарському виробництві найпоширеніші пересувні ацетиленові генератори продуктивністю 0,8–3,2 м<sup>3</sup>/год, тиском 0,1–0,15 МПа, наприклад – АСП-1,25, ГВР-1,25М4, ГНВ-1,25 тощо.

Кисень зберігається в балонах високого тиску (15–20 МПа) об'ємом 10–60 л. Пропан-бутан зберігається у балонах середнього тиску (1,6 МПа) об'ємом 5–50 л.

Зниження і підтримання в необхідних межах робочого тиску газів здійснюється за допомогою газових редукторів (наприклад, КРР-61 тощо).

Газ і кисень подаються шлангами до газового пальника, в якому відбувається їх змішування і дозування. Найпоширеніші пальники малої Г2-04, середньої Г3-04 і великої Г3-05 потужності, а також наплавлювальні пальники, які дозволяють подавати в зону наплавлення гранульовані самофлюсуючі порошки ГН-2, ГН-3 тощо.

## 2.14. Матеріали для наплавлення

*Наплавлювальний дріт.* Для механізованого наплавлення за ГОСТ 10543-82 випускається сталевий дріт діаметрів 0,3...8 мм. Дріт діаметром 6,5 та 8 мм випускають у вигляді гарячекатаного дроту – катанки.

За хімічним складом (ГОСТ 10543) розрізняють 28 марок наплавного дроту, які поділені на три групи:

1. Дротів із вуглецевої сталі восьми марок: Нп-30; Нп-40; Нп-50; Нп-65; Нп-80; Нп-40г; Нп-50г; Нп-65г;

2. Дротів з легованої сталі одинадцяти марок: Нп-10Г3; Нп-30ХГСА; Нп-30Х3ВА; Нп-30Х5; Нп-35Х2Г2В; Нп-40Х3Г2ВФ; Нп-5ХНМ; Нп-5ХНТ; Нп-5ХНВ; Нп-50ХФА; Нп-105Х;

3. Дротів із високолегованої сталі дев'яти марок: Нп-2Х14; Нп-3Х13; Нп-4Х13; Нп-45Х4В3Ф; Нп-45Х2В8Т; Нп-60Х3В10Ф; Нп-Х15Н60; Нп-Х20Н80Т; Нп-Г13А.

Літери Нп у марці дроту позначають, що дріт наплавний. Перші дві цифри показують середній вміст вуглецю у сотих частках відсотка. Наступні літери вказують вміст у дроті головних легуючих елементів. Цифри після букв вказують вміст відповідного елемента у відсотках. Якщо після літери цифра відсутня, це означає, що даного елемента міститься до одного відсотка. Наприклад, у наплавному дроті Нп-5ХНТ у середньому міститься: вуглецю 0,05 %, хрому до 1 %, нікелю до 1 % і титану до 1 %.

Для наплавлення під флюсом може бути використаний стандартний зварювальний дріт (ДСТ 2246). Крім зварювального дроту, для наплавлення можна використовувати високоякісний вуглецевий дріт за ДСТ 9389, призначений для виготовлення пружин.

Поряд із дротом суцільного перерізу для автоматичного наплавлення застосовують порошкові дроти та стрічки з наповненням, що становить зазвичай 10...15 % від маси дроту (стрічки). Розрізняють порошкові дроти самозахисні та з додатковим захистом зони зварювання під флюсом.

Найбільшого поширення для наплавлення отримали самозахисні порошкові

дроти ПП-АН1, ПП-1ДСК, ПП-АН125, ПП-АН122 та інші. ПЛ-АН101, ПЛ-АН171 та інші. У табл. 2.7 наведено характеристики деяких порошкових дротів, які застосовуються для наплавлення.

Великі можливості легування має наплавлення деталей металокерамічними та порошковими стрічками. Застосування таких матеріалів дозволяє практично отримати наплавлений метал будь-якого хімічного складу за більш широкого діапазону режимів.

Металокерамічні стрічки, призначені для високопродуктивного механізованого наплавлення під флюсом теплостійких, зносостійких та корозійностійких сплавів, виготовляють прокаткою порошкоподібної шихти відповідного складу з подальшим її спіканням. Застосування стрічок із пресованих порошків дозволяє отримати для наплавлення електродний матеріал практично будь-якого хімічного складу. Спечена таким чином електродна стрічка має високу міцність і достатню гнучкість.

Застосування металокерамічних стрічок економічно доцільне, особливо для наплавлення важко деформованих та високолегованих сталей та сплавів. Значно підвищується довговічність деталей, що швидко зношуються (прокатних валків, плунжерів гідропресів, деталей вантажних автомобілів і нафтохімічного обладнання).

Хімічний склад наплавленого металу деяких металокерамічних стрічок наведено у табл. 2.8.

Для наплавлення зносостійких сплавів застосовують стрічки 70Х3НМ і 5Х4В3ФС, для антикорозійностійких наплавок сплави монель-метал, інконель-606, інконель-718, хромонікелеву стрічку 03Х21Н9Т, особливостійку до міжкристалітної корозії 06Х21Н9Т, а також сталі 20Х10П0, 10Х10Г10Т, 25Х25Н16Г7Т, 1Х14НЗ, 1Х12Н2В2Ф та інші.

Ширина металокерамічних стрічок, що випускаються промисловістю, 30...80 мм (через 5 мм), товщина 0,8...1,2 мм. Стрічка поставляється у рулонах масою до 50 кг.

Таблиця 2.7 – Характеристики порошкових дротів, що застосовуються для наплавлення

Дріт	Хімічний склад наплавленого металу, %							Твердість наплавленого металу, HRC <sub>E</sub>	Умови експлуатації наплавлених деталей
	C	Cr	Mn	W	Si	V	Ti		
ПП-3XB3Ф-О	0,27...0,32	4,0...5,5	0,1...0,5	3...4,5	0,6	0,3...0,6	–	40...46	Високі питомі навантаження при підвищеній температурі
ПП-У15Х12М-О	1,45...1,7	11...12,5	0,6	–	0,6...0,8	0,4	0,1	40...42	Абразивне зношування та ударні навантаження
ПП-У25Х17Т-О	2,2...2,6	16...18	0,4...0,6	–	0,4...0,6	–	0,7	40...44	Те саме
ПП-1Х14Т-О	0,15	14	0,6	–	0,6	–	0,7	42...46	
ПП-Р18Т	1,1	4,3	0,4	19	0,4	0,5	1,5	61...64	Високі питомі навантаження при підвищеній температурі
ПП-Р9Т	1,4	4,5	0,4	10	0,4	2,5	1,5	61...64	Те саме
ПП-3Х2В8Т	0,65	3	1,2	10	0,35	0,5	1,2	40...44	Великі питомі навантаження
ПП-Х12ВФТ	2,5	15	0,7	1,3	0,6	1,0	1,4	40...44	Те саме

Таблиця 2.8 – Склад наплавленого металу, %

Стрічка	C	Mn	Si	Cr	Ni	Інші елементи
ЛМ-20Х10Г10Т	0,2...0,4	16...18	□ 0,3	11...12	–	1,5...2,0 Ti
ЛМ-70Х3НМ	0,9...1,1	□ 0,4	□ 0,4	4,2...4,8	0,9...1,2	0,8...1,1 Мо
ЛМ-1Х14НЗ	0,2...0,4	0,2...0,4	□ 0,3	16...18	3...4	–
ЛМ-5Х4В3ФС	0,6...0,8	□ 0,3	□ 0,3	3,5...5,5	–	3,5...4,5 W 0,6...0,8 V
ЛМ-3Х2В8	0,65...0,7	1,5...1,7	0,3...0,34	3,2...3,55	–	10,4 W 0,41 V
ЛМ-70Х3М	0,9...1,3	0,76...1	0,74...0,9	4,2...5	–	0,7...0,9 Мо
ЛМ-5Х4В3Ф	0,64...0,8	1,2...1,6	□ 0,3	4,5...5,5	–	3,4...4,5 W 0,6...0,8 V

**Порошкова електродна стрічка.** Для широкошарового наплавлення дедалі більшого застосування набуває порошкова електродна стрічка, що складається з двох або однієї тонких (0,3 ... 0,5 мм) сталевих (сталь 08 кп) стрічок і засипаної між ними шихти. Шихту для стрічки одержують так само, як і для порошкового дроту. Виготовляють порошкову стрічку на спеціальних верстатах.

Порошкова стрічка складається з оболонки з м'якої холоднокатаної стрічки та серцевини із суміші порошків графіту, феросплавів, чистих металів та інших компонентів. Порошкову стрічку виготовляють із окремих секцій завширшки 12...14 мм на спеціальному верстаті, а потім збирають у широку стрічку.

Найбільш часто використовують порошкові стрічки ПЛ-У30Х30ГЗТЮ, ПЛ-АН101 (ПЛ-У300Х25Н3С3), ПЛ-АН102 (ПЛ-30Х25Н4С4) та інші.

Стрічку марки ПЛ-У30Х30ГЗТЮ застосовують для зносостійких наплавок різальних органів землерийних машин, деталей будівельних машин.

Механізована наплавка пояса конуса і чаш засипних апаратів робиться стрічкою ПЛ-У30Х25Н3С3-11, ПЛ-30Х25Н4С4. Цією стрічкою наплавають різальні кромки грейферів, лопатей бетонозмішувальних машин, ковзанок тракторів, зубів і ковшів навантажувачів та інші.

Перевагою цих порошкових стрічок є можливість використання без застосування флюсів або захисних газів. Це досягається через уведення в стрічку крім легуючих елементів речовин, що забезпечують гарне розкиснення зварювальної ванни та зв'язування азоту повітря у стійкі нітриди. При наплавленні стрічкою ПЛ-АН101 досягається мінімальне розбризкування електродного металу і висока однорідність хімічного складу наплавленого металу.

Концентрація шкідливих виділень при наплавленні стрічкою ПЛ-АН101 нижча, ніж при наплавленні іншими порошковими стрічками.

### 2.15. Техніка механізованого наплавлення

Правильний вибір термічних умов (температури попереднього підігріву, температури процесу та швидкості охолодження) сприяє попередженню утворення тріщин (рис. 2.26).

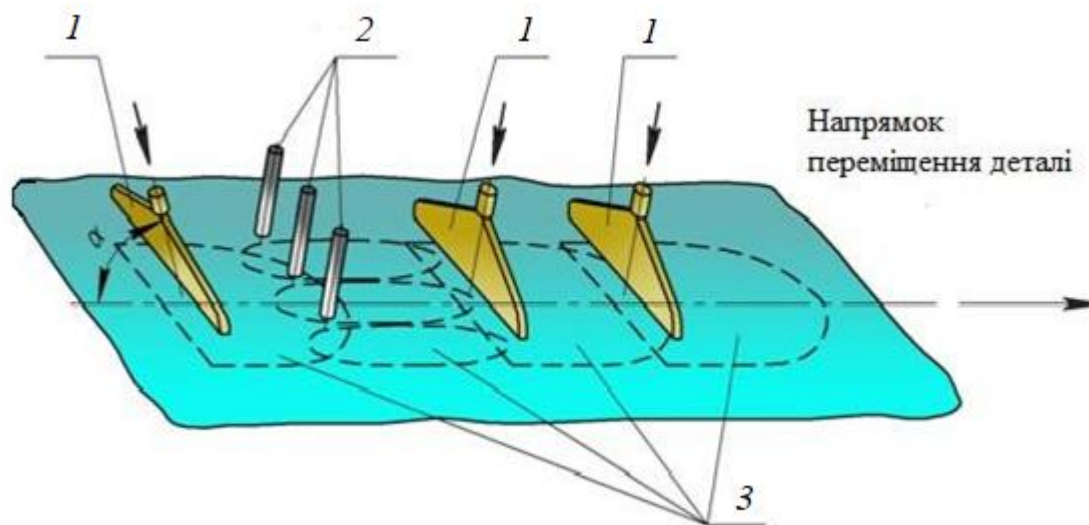


Рис. 2.26. Схема процесу наплавлення твердих сплавів з використанням системи пальник – дуга – пальник:

1 – пальник; 2 – дуга; 3 – ізотерми на поверхні наплавленої деталі

Чим більша схильність наплавленого металу до утворення тріщин, тим вищою має бути температура підігріву і менша швидкість охолодження деталі. Наприклад, перед наплавленням сталі 3Х2В8 останню підігрівають до температури 350...400 °С і забезпечують швидкість охолодження не вище 15...25 °С/с, для сплаву Сормайт-1 –

відповідно, 540...600 °С і 1,5...2,0 °С/с.

Підігрів деталей перед наплавленням здійснюють в електричних або полум'яних печах, газовими пальниками, струмами промислової або високої частоти.

У ряді випадків при наплавленні високолегованих сплавів застосовують місцевий підігрів деталей. За такої схеми забезпечуються попередній підігрів до температури 600 °С швидкість подальшого охолодження не більше 2 °С/с.

При наплавленні сплавів, що допускають великі швидкості охолодження, можливе застосування наплавлення широкими кільцями (з поперечними коливаннями електрода) під шаром флюсу або порошковою стрічкою відкритою дугою з поперечними коливаннями (див. рис. 2.26). Швидкість охолодження знаходиться в межах 10...30 °С/с. При такій швидкості охолодження наплавлений шар охолоджується одночасно з виробом, що запобігає появі тріщин.

Великі вироби після закінчення наплавлення підігрівають і потім охолоджують разом з піччю в сухому піску або утепленому коробі.

**Наплавлення тіл обертання.** Схеми та приклади наплавлення циліндричних деталей наведено на рис. 2.27.

Швидкість подачі дроту, відповідно і силу зварювального струму вибирають залежно від діаметра та форми виробу, що підлягає наплавленню.

Наплавлення циліндричних деталей роблять на спеціальних наплавних установках або на токарних верстатах, пристосованих для цієї мети.

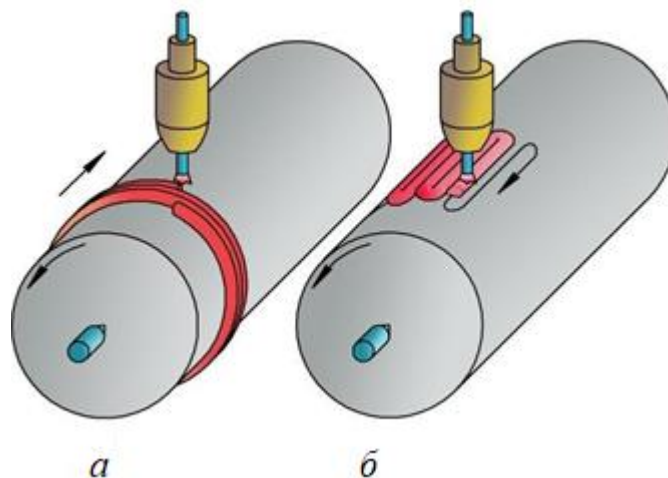


Рис. 2.27. Схеми наплавлення циліндричних поверхонь по гвинтовій лінії (а) та з поперечними коливаннями електрода (б)

У табл. 2.9 наведено рекомендовані режими наплавлення під шаром флюсу циліндричних деталей малого діаметра.

Таблиця 2.9 – Режими наплавлення під флюсом циліндричних деталей малого діаметра

Діаметр деталі, мм	Діаметр електродного дроту, мм	Сила струму, А	Напруга дуги, В	Швидкість наплавлення, м/год
200	2,0	220...260	27...30	28...32
160	2,0	200...240	27...30	24...28
120	2,0	170...200	26...29	20...24
90	1,6	150...180	26...29	16...20
60	1,2	110...130	25...28	14...18

### Контрольні запитання

1. Класифікація методів наплавлення. Переваги та недоліки технології наплавлення.
2. Які застосовуються способи накладання шарів при напавленні?
3. У чому перевага ручного дугового наплавлення?
4. У чому суть дугового наплавлення під шаром флюсу?
5. У чому сутність процесу вібродугового наплавлення?
6. Які переваги у способу дугового наплавлення у середовищі захисних газів?
7. Для відновлення та виготовлення яких деталей використовують електрошлакове наплавлення?
8. У чому полягає сутність методу індукційного наплавлення?
9. У чому переваги плазмового наплавлення?
10. Як змінюються властивості матеріалів після лазерного зміцнення?
11. У чому полягає сутність лазерного легування?
12. Для яких деталей застосовують лазерні технології відновлення та зміцнення?
13. Які особливості електронно-променевої обробки поверхні деталей?
14. Які застосовуються способи електроконтактного наплавлення?

### 3. ГАЗОТЕРМІЧНЕ НАПИЛЕННЯ

#### 3.1. Історія створення способу напильня металу

Найважливішим напрямком сучасної інженерії поверхні є газотермічне напильня покриттів (ГТН), початок історії якого відноситься до 1909 р., коли перший винахідник способу напильня металу на поверхню Макс Ульріх Шооп, розпилюючи свинець за допомогою стаціонарної тигельної установки, отримував покриття на різних матеріалах (рис. 3.1).

На основі його технології в Цюриху в 1909 році був відкритий завод з металізації. У 1913 році М. У. Шооп запатентував конструкцію газополуменевого розпилювача, в якій матеріал для розпильня подавався в полум'я газового пальника у вигляді дроту.

*Газотермічне нанесення покриттів* – отримання покриття з нагрітих і прискорених частинок матеріалу з використанням високотемпературного газового струменя. При співударі частинок з основою або напильним матеріалом відбувається їх сполучення внаслідок зварювання, адгезії та механічного зчеплення.

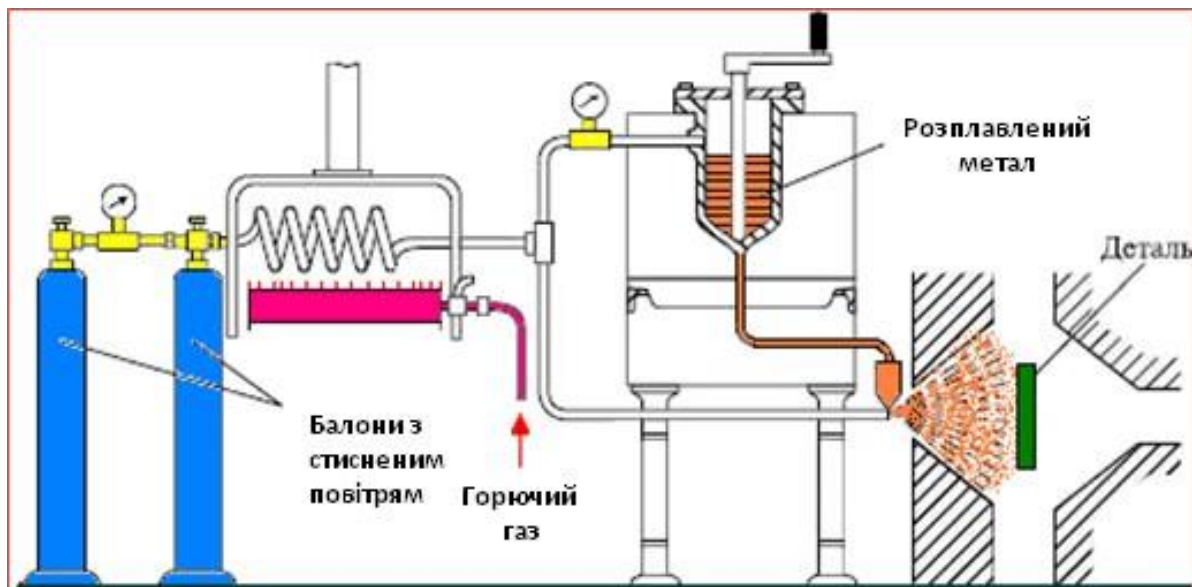


Рис. 3.1. Установа тигельного розпильня

За енергетичною ознакою методи газотермічного нанесення покриттів поділяються на плазмовий, газополуменевий, електродуговий і детонаційний, а також газодинамічний (рис. 3.2). Ці методи розрізняються за типом джерела енергії, яка витрачається на нагрівання та прискорення матеріалу, що створює покриття.

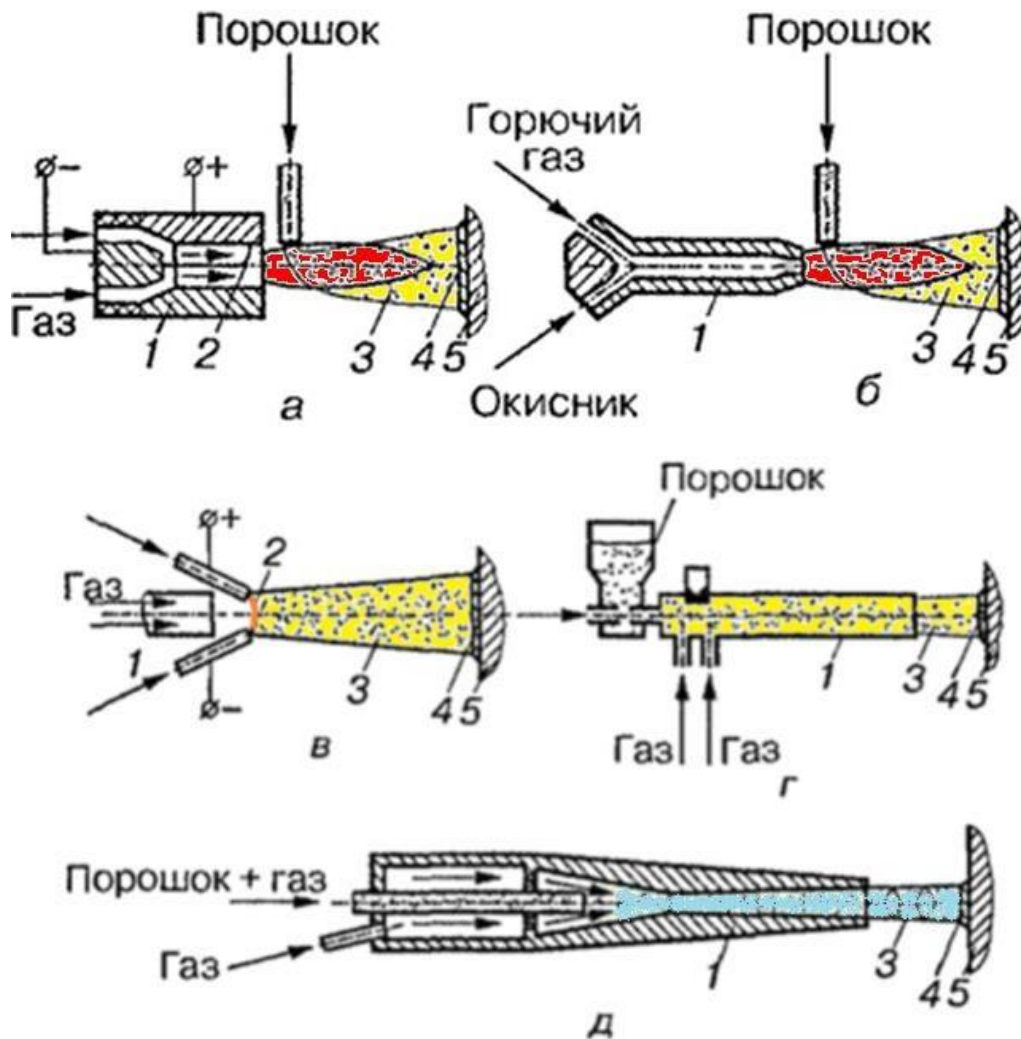


Рис. 3.2. Принципові схеми методів газотермічного нанесення покриття:  
 а – плазмовий; б – газополуменевий; в – електродуговий; г – детонаційний;  
 д – газодинамічний, де 1 – розпилювач; 2 – дуга; 3 – газопорошковий потік;  
 4 – покриття; 5 – основа

### 3.2. Джерела енергії

#### Газополуменевий струмінь

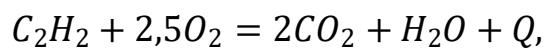
Як джерело енергії для нагрівання та прискорення частинок матеріалу, який

утворює покриття, найчастіше використовується енергія горіння *газів і пари* рідких паливних у суміші з киснем або повітрям.

Переважно застосовуються вуглеводневі гази типу  $C_xH_y$ , або їх суміш, і найбільш поширений серед них – ацетилен ( $C_2H_2$ ).

Ацетилен у суміші з киснем має найвищу температуру полум'я – 3100–3200 °С; технічний пропан – 2700–2800 °С; бутан – 2400–2500 °С; метан – 2400 °С; природний газ – 2000–2200 °С; водень – 2600 °С.

Повне згоряння ацетилену відбувається за реакцією:



де  $C_2H_2$  – ацетилен;  $O_2$  – кисень;  $CO_2$  – вуглекислий газ;  $H_2O$  – вода;

$Q$  – теплота реакції згоряння ацетилену.

Теплота реакції згоряння ацетилену  $Q$  складається з теплоти реакції екзотермічного розпаду ацетилену і суми теплот первинних реакцій згоряння вуглецю і водню.

Форму, будову ацетилено-кисневого полум'я та діаграму розподілу температури в зонах наведено на рис. 3.3.

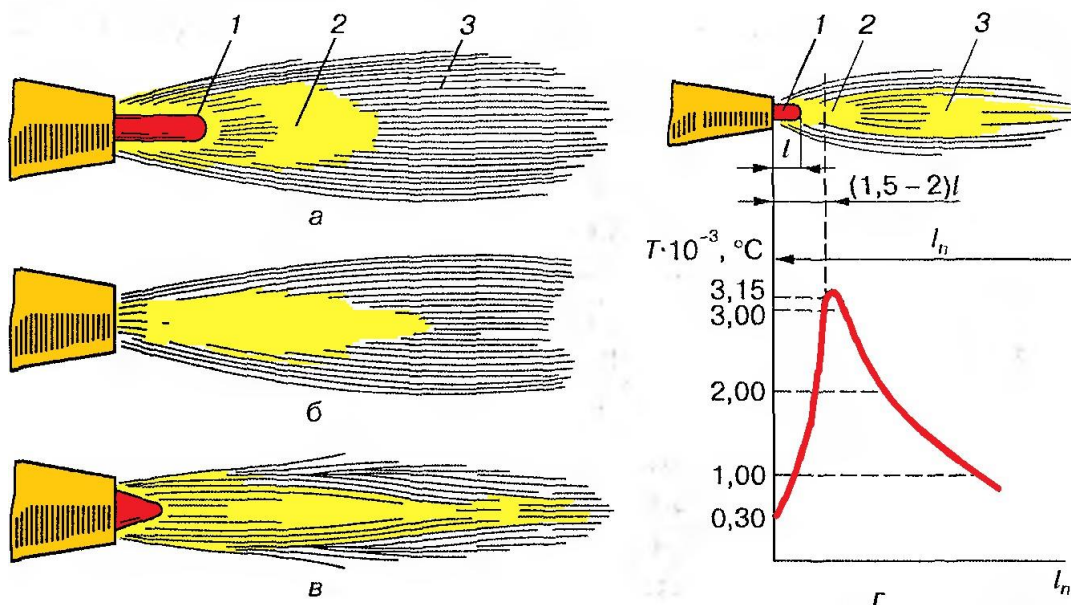


Рис. 3.3. Форма, будова ацетилено-кисневого полум'я та діаграма розподілу

температури в зонах:

*a* – нормальне полум'я; *б* – вуглецеве; *в* – окиснювальне;

*г* – діаграма розподілу температури

Процес горіння ацетилену має кілька стадій:

– стадія підготовки пального до згорання характерна наявністю пірогенного (теплового) розкладення ацетилену в рівновазі з киснем, який протікає в ядрі 1 полум'я;

– пальне розкладається на складові елементи: вуглець і водень ( $C$  і  $H_2$ ). Кінцевим продуктом пірогенного розкладення ацетилену за наявності кисню, який називається первинним, є  $CO$  і  $H_2$ .

Для пірогенного розкладення на один об'єм ацетилену потрібний один об'єм кисню. Полум'я з таким складом газової суміші називається нормальним.

Практично через те, що невелика кількість водню згоряє з утворенням водяної пари внаслідок кисню горючої суміші і через деяку забрудненість кисню, який надходить із пальника, співвідношення між об'ємами кисню і ацетилену практично дещо більше за одиницю:

$$\beta = \frac{V_k}{V_a} = 1,15 - 1,20,$$

де  $V_k$  – об'єм кисню,  $m^3$ ;  $V_a$  – об'єм ацетилену,  $m^3$ .

Стадія займання проходить у середній зоні 2 полум'я і характеризується процесом активного окиснення  $CO$  і  $H_2$  до вуглекислого газу  $CO_2$  і водяної пари  $H_2O$ . Момент переходу процесу в стадію активного окиснення і є процесом горіння.

Стадія догорання проходить у зоні 3 факела полум'я і характеризується процесом окиснення продуктів пірогенного розкладення ацетилену в кінцеві продукти  $CO_2$  і  $H_2O$ . Процес догорання відбувається з вторинним киснем, тобто внаслідок кисню навколишнього середовища.

Стадії процесу горіння характеризуються також зміною температурного стану суміші. На першій стадії, яка проходить в ядрі 1 полум'я, підвищується температура займання. На другій стадії (середня зона 2 полум'я) температура різко підвищується від температури займання до максимальної (приблизно  $3150$  °C) температури полум'я. На третій стадії (факел 3) відбувається зниження температури.

Полум'я суміші ацетилену і кисню прийнято поділяти на такі:

- нормальне полум'я ( $\beta = 1,1 - 1,2$ ) інтенсивно протидіє окисненню;
- окиснювальне;
- вуглецеве (полум'я з надлишком ацетилену) не відновлює метал, а насичує його вуглецем.

### *Детонаційна хвиля*

Детонація – це процес хімічного перетворення горючої суміші при поширенні в ній зони горіння у вигляді детонаційної хвилі. Остання рухається з максимально можливою для даних умов швидкістю, яка перевищує швидкість звуку в даній речовині.

Для ацетилено-кисневих сумішей швидкість детонації становить приблизно 2000–3000 м/с. Детонаційна хвиля являє собою комплекс ударної хвилі та зони хімічної реакції, та її швидкість стала для даних геометричних розмірів ствола і складу газу.

В ударній хвилі газ стискається до кількох десятків атмосфер, температура підвищується до кількох тисяч градусів і стає значно більшою за критичну температуру, при якій газова суміш вступає в реакцію.

За зоною хімічної реакції перебувають продукти детонації, які мають високий тиск і температуру. Вони йдуть слідом за детонаційною хвилею зі швидкістю, яка менша за швидкість детонаційної хвилі на швидкість звуку.

Після досягнення детонаційною хвилею відкритого кінця ствола вона руйнується. Загасаюча ударна хвиля може переміщуватися і поза стволом, але на відстані, більшій, ніж 100 мм, її амплітуда близька до нуля.

Продукти детонації починають витікати зі ствола у вигляді надзвукового нерозрахункового струменя; температура і тиск продуктів детонації у стволі зменшуються. Витікання відбувається, доки тиск продуктів на виході зі ствола не зрівняється з атмосферним (рис. 3.4).

Перед ударною хвилею знаходиться незбурена газова суміш із температурою  $T_1$ . За фронтом ударної хвилі, який має протяжність  $S_1$ , температура набагато вища ( $T_2$ ), а газ дуже стиснутий.

У зоні протяжністю  $S_2$  відбувається релаксація обертальних і коливальних

ступенів вільності, тобто є взаємні переходи енергії степенів вільності поступального руху, обертання і коливання молекул при їх співударі.

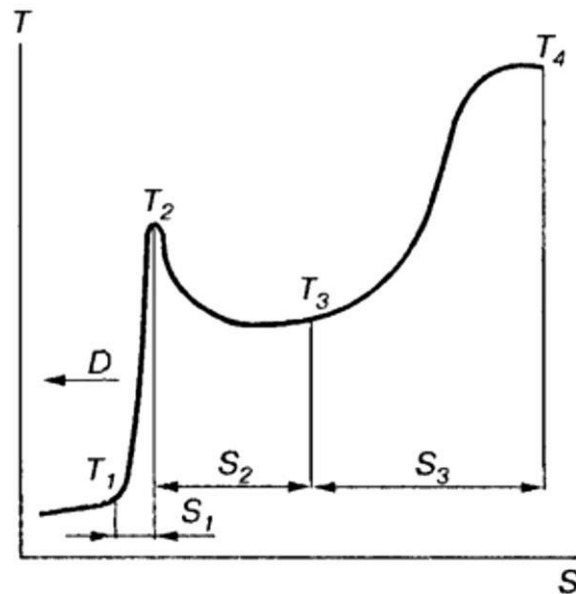


Рис. 3.4. Структура детонаційної хвилі

У зоні релаксації температура знижується до величини  $T_3$  внаслідок зменшення енергії поступального руху, але при цьому значно збільшується енергія коливального руху, що полегшує проходження хімічних реакцій. Потім температура в зоні протяжністю  $S_3$  знову збільшується і досягає максимального значення  $T_4$ .

Після формування детонаційної хвилі швидкість її поширення збільшується доки не досягне значення для даної суміші в даних умовах. Детонаційна хвиля поширюється далі і має фіксовані параметри: тиск, густину, температуру тощо. Швидкість детонаційної хвилі для різних газів дорівнює від 1500 до 3500 м/с.

Швидкість детонації залежить від швидкості звуку в продуктах детонації і теплоти, яка виділяється внаслідок хімічної реакції.

Аналіз властивостей різних сумішей газів показує, що найбільш прийнятною для детонаційного наповнення є суміш ацетилену з киснем. Вона і набула широкого практичного використання. Розподіл температури, тиску, густини і концентрації речовини в зоні реакції подано на рис. 3.5.

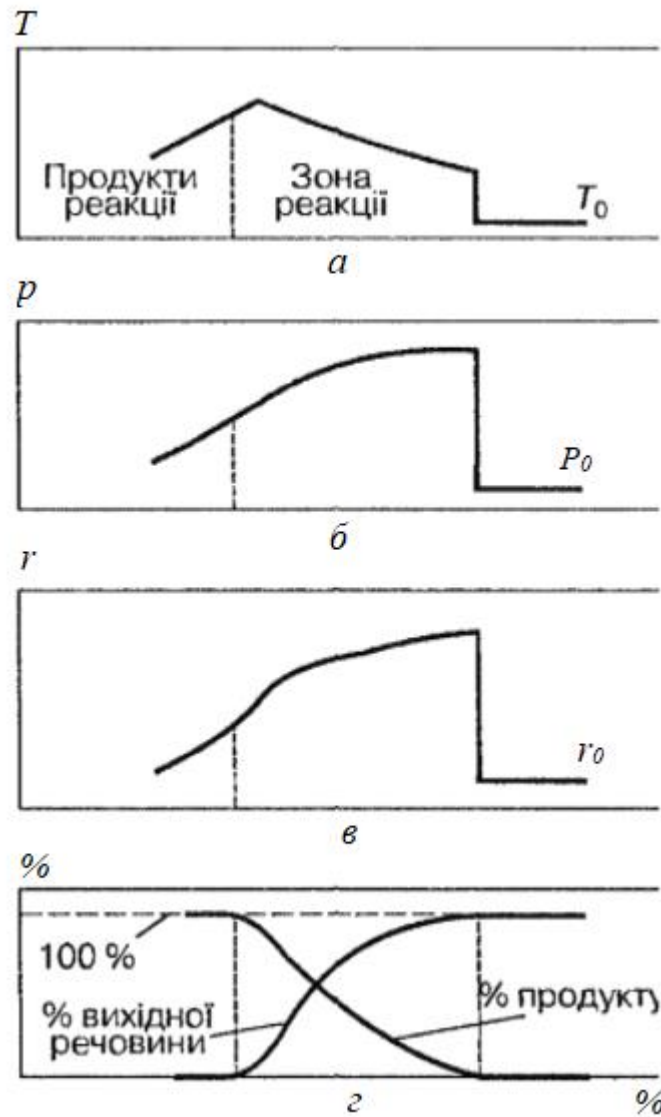


Рис. 3.5. Розподіл у зоні реакції детонаційної хвилі:

*a* – температури; *б* – тиску; *в* – густини; *г* – концентрації вихідної речовини

Ширина зони реакції залежить від тривалості реакції в детонаційній хвилі:

$$b_p = (D - w)t_p,$$

де  $b_p$  – ширина зони реакції;

$D$  – швидкість руху детонаційного фронту хвилі відносно стінок ствола, м/с;

$w$  – швидкість продуктів детонації, м/с;

$t_p$  – середній час реакції, с.

Швидкість продуктів детонації  $w$  безпосередньо за детонаційною хвилею

менша за швидкість детонації на швидкість звуку в даному середовищі.

У таблиці 3.1 наведено значення початкових швидкостей витікання продуктів детонації зі ствола.

Таблиця 3.1 – Початкові швидкості витікання продуктів детонації зі ствола

Склад детонаційної суміші	Швидкість, м/с
$C_2H_2 + O_2$	1280
$C_2H_2 + 2,5O_2$	1050
$C_2H_2 + O_2 + N_2$	1240
Природний газ + $O_2$	600

Зміни швидкості на осі струменя узгоджуються із загальною картиною витікання вільних надзвукових струменів. Розподіл газодинамічних параметрів уздовж надзвукового струменя, а також його структура залежать від ступеня нерозрахунковості  $n_n = p_a / p_n$ , де  $p_a$  – тиск на зрізі ствола;  $p_n$  – тиск навколишнього середовища;  $n_n < 1$  – недорозширений,  $n_n = 1$  – розрахунковий;  $n_n > 1$  – перерозширений струмінь. При детонаційному напilenні  $n_n$  змінюється при витіканні приблизно від 50 до 1.

*Електрична дуга* називається дугою через характерну вигнуту форму, яка виникає завдяки впливу конвекційних потоків нагрітого газу, в якому горить дуга, та від взаємодії заряджених частинок дуги з магнітним полем самої дуги.

Дуговий розряд відрізняється від інших видів електричних розрядів у газах такими параметрами:

- висока температура  $T \approx 40\ 000 \dots 50\ 000$  К;
- значна сила струму  $I \approx 50 \dots 10\ 000$  А;
- низька напруженість електричного поля  $E \approx 10 \dots 60$  В/см.

Залежність величині падіння напруги між електродами від величини струму  $U = f(I)$  називається вольт-амперною характеристикою дугового розряду.

В міжелектродному просторі дуги спостерігається дуже нерівномірний за довжиною розподіл електричного поля (стрибки потенціалу в приелектродних

зонах) і, відповідно, нерівномірне падіння напруги по довжині дуги (рис. 3.6)

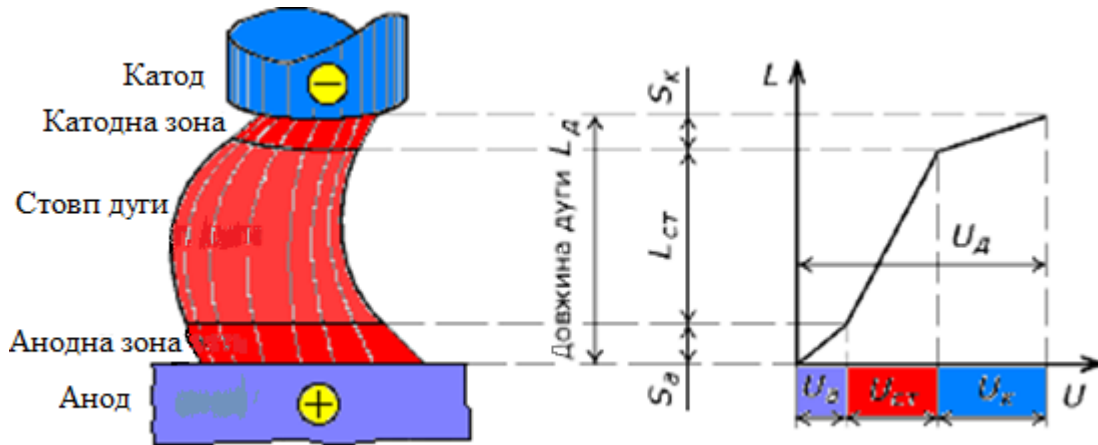


Рис. 3.6. Зони дугового розряду

Стовп дуги займає практично всю довжину дуги, за винятком дуже малих за розмірами приелектродних зон. Приелектродні зони розрізняються насамперед значними величинами напруженості електричного поля:  $E = \Delta U / \Delta l$ , яка може сягати мільйонів вольт на сантиметр.

*Стовпом дуги* називають простір між приелектродними зонами, заповнений електрично-нейтральним іонізованим газом.

Розрізняють:

- катодне падіння напруги ( $U_k$ );
- анодне падіння напруги ( $U_a$ );
- падіння напруги стовпа дуги ( $U_{ст}$ )

З огляду на малу довжину катодної та анодної зон ( $10^{-5} \dots 10^{-4}$  см), падіння напруги стовпа дуги часто подають як функцію повної довжини дуги ( $L_d$ ) і напруженості електричного поля в стовпі дуги ( $E_{ст}$ ):

$$U_{ст} = E_{ст} \cdot L_d$$

Загальне падіння напруги на дузі прийнято подавати як суму трьох складових по зонах дуги:

$$U_d = U_k + U_A + U_{ст.}$$

В загальному вигляді вольт-амперна характеристика дуги має форму (рис. 3.7).

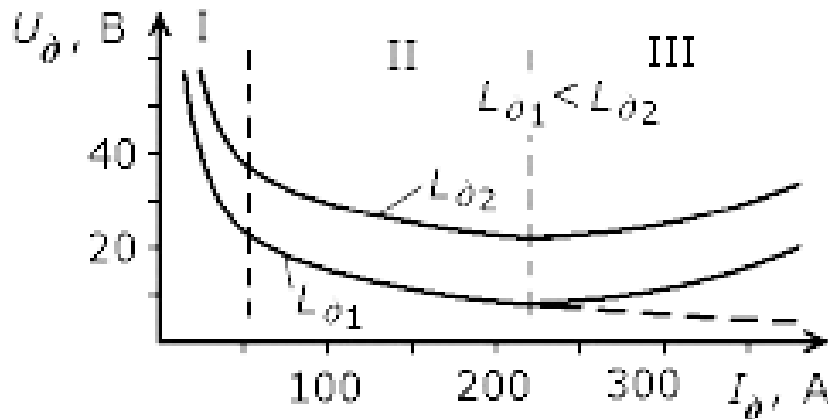


Рис. 3.7. Вольт-амперна характеристика дуги

Отже, залежно від величини струму вольт-амперна характеристика дуги може бути спадною, полого-спадною (або просто: пологою) і зростаючою.

Відповідно до різних кутів нахилу розрізняють три ділянки вольт-амперної характеристики:

I – круто-спадна;

II – полого-спадна;

III – зростаюча.

Пунктирна лінія на ділянці III показує, якою могла б бути амперна характеристика дуги при необмеженому діаметрі електродів, між якими горить дуга.

#### *Фізичні процеси в катодній зоні дуги*

Електрони покидають поверхню катода і рухаються до анода. Шлях, який вони проходять до першого зіткнення з атомами газів стовпа дуги, обмежує катодну зону (становить  $\approx 10^{-5}$  см) (рис. 3.8).

Тому: катодною зоною називають простір вільного пробігу електрона від поверхні катода до першого зіткнення з нейтральним атомом та саму поверхню катода.

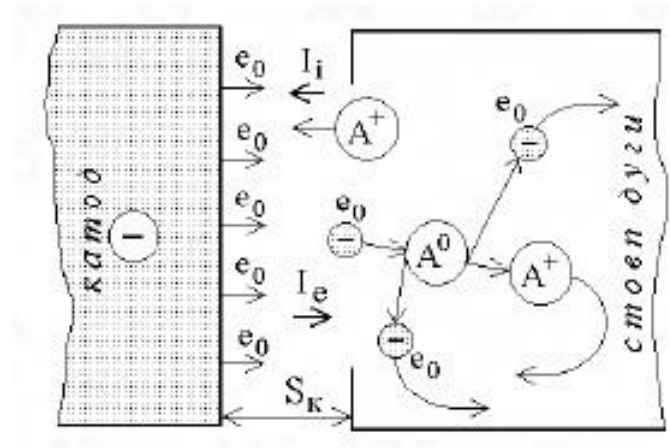


Рис. 3.8. Фізичні процеси в катодній зоні дуги:

$e_0$  – електрони;  $A^0$  – нейтральні атоми;  $A^+$  – позитивні іони;

$S_k$  – довжина катодної зони;  $I_e$  – електронний струм;

$I_i$  – іонний струм

У стовпі дуги головним механізмом іонізації є *термічна іонізація*. Існуюче між електродами дуги електричне поле передає енергію електронам та іонам. Наявність у стовпі дуги важких частинок – атомів і іонів – дає можливість електронам при зіткненнях з ними перетворювати свою кінетичну енергію в енергію хаотичного теплового руху газу.

Термічна іонізація практично стає помітною вже при температурі приблизно 2000 К. Заряджені частинки в стовпі дуги рухаються під дією дифузії та електричного поля. Рухливість заряджених частинок  $b$  визначається відношенням швидкості зарядженої частинки в дузі  $V$  до напруженості поля  $E$ :  $b = V/E$ , звідки  $V = bE$ . Внаслідок різної рухливості, а отже, і коефіцієнтів дифузії ( $\lambda_e > \lambda_i$  і  $V_e \gg V_i$ ) електрони при спільній дифузії з іонами випереджають іони. Іони, зі свого боку, притягують рухливі електрони і гальмують їх рух. Такий вид дифузії називається *амбіполярною дифузією*.

Важливою характеристикою плазми стовпа дуги є електропровідність  $\rho$  (питома провідність дуги)

$$\rho = en_e b_e,$$

де  $e$  – заряд електрона;  $n_e$  – кількість електронів;  $b_e$  – рухливість електронів.

Якщо не враховувати іонну складову струму, то густина струму в стовпі дуги становить:

$$J = n_e b_e E,$$

де  $E$  – напруженість поля.

Температура стовпа дуги тим вища, чим більша потужність  $jE$ , яка підводиться до дуги, і чим менша втрата тепла в навколишнє середовище.

Протяжність зони анодного спаду напруги більша, ніж протяжність катодної зони. Анодний спад менший за катодний і оцінюється в кілька вольтів.

Анодний спад напруги виникає внаслідок того, що металеві аноди не емітують позитивних іонів. Тому біля анода електричний струм утворюється лише електронами. Відсутність позитивних іонів приводить до утворення негативного просторового заряду поблизу анода, що викликає появу анодного спаду потенціалу.

В зоні анодного спаду напруги відбувається перехід від високої температури стовпа дуги до порівняно низької температури металевого анода. У цій ділянці утворюються позитивні іони матеріалу анода, які прискорюються анодним спадом потенціалу і потім під дією електричного поля дифундують крізь стовп дуги до катода.

Електрична дуга як джерело енергії використовується при електродуговому нанесенні покриттів (застарілий термін «металізація»). Дуга плавить електроди, а розплавлений метал видаляється і розпилюється із зони плавлення потоком газу (рис. 3.9).

Дроти подаються назустріч один одному спеціальними механізмами подачі і, таким чином, компенсується збільшення завдяки плавленню відстані між ними. Швидкість подавання дроту визначається режимом горіння дуги.

Фронт плавлення близький за формою до площини, нормаль до якої перетинається з віссю електрода під деяким кутом  $\varphi$ . Цей кут може змінюватися від  $0^\circ$  до  $\varphi_{\max} = 90^\circ - \omega/2$ , де  $\omega$  – кут перетину осей електродів.

Тому катодною зоною називають простір вільного пробігу електрона від поверхні катода до першого зіткнення з нейтральним атомом та саму поверхню катода.

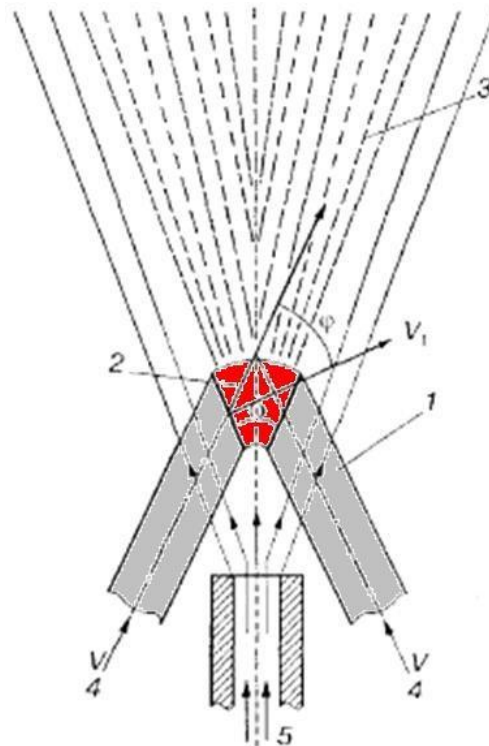


Рис. 3.9. Схема плавлення електродів при електродуговому розпиленні:

1 – електроди; 2 – дуга; 3 – двофазний потік; 4 – напрямок подавання електродів зі швидкістю  $V$ ; 5 – розпилювальний газ;  $V_1$  – перпендикуляр до площини плавлення електрода

Зміна режиму розпилення веде до зміни кута нахилу фронту плавлення: збільшення напруги дуги веде до зменшення кута  $\varphi$ ; при збільшенні швидкості подавання електродів кут  $\varphi$  збільшується.

Якщо між середньою швидкістю переміщення фронту плавлення і швидкістю подавання електродів існує динамічна рівновага, то спостерігається стабільне горіння дуги без коротких замикань і зривів.

Ступінь диспергування рідкого металу з електродів багато в чому залежить від властивостей розплавленого металу частинки, в тому числі від ступеня його перегрівання.

Середня швидкість плавлення електродів  $w_{\text{п}}$  зв'язана зі швидкістю їх подавання  $v$  залежністю  $v = w_{\text{п}} / \cos\varphi$ , а продуктивність процесу  $G$  – залежністю:

$$G = 2\pi r^2 \rho w_{\text{п}} / \cos\varphi,$$

де  $\rho$  – густина матеріалу електродів,  $\text{кг/м}^3$ ;  $r$  – радіус електродів, м.

Із виразу видно, що продуктивність процесу можна підвищувати або збільшенням діаметра електродів, або організацією процесу таким чином, щоб середня швидкість плавлення електродів і кут  $\varphi$  були максимальні.

На рис. 3.10 зображено особливості течії надзвукового потоку розпилювального газу в електродугових розпилювачах.

Між електродами розміщене центральне сопло діаметром  $D$ , вісь якого перетинається з точкою стику осей електродів. Газодинамічна сила визначається умовами витікання газу із сопла і відстанню  $x$  від зрізу сопла до точки перетину електродів.

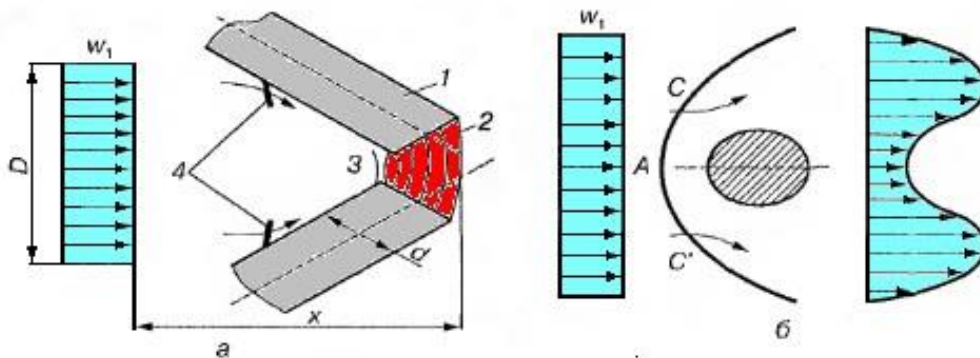


Рис. 3.10. Схема течії надзвукового потоку розпилювального газу в електродугових розпилювачах:

1 – електродний дріт; 2 – дуга; 3 – криволінійна головна хвиля;  
4 – косі стрибки згущення;  $w_1$  – швидкість газу, що витікає із сопла

Швидкість струменя, який витікає із сопла, може бути дозвуковою і надзвуковою. Відношення швидкості потоку до швидкості звуку в потоці називають *числом Маха* і позначають буквою  $M$ .

При дозвуковій швидкості  $M < 1$ , а при надзвуковій –  $M > 1$ . В обох випадках при взаємодії газового струменя з електродами, які, з точки зору аеродинаміки, є погано обтічними тілами, утворюються застійні зони.

У цих зонах за електродами осьова складова швидкості незначна і параметри потоку близькі до параметрів гальмування. Внаслідок цього евакуація

розплавленого металу із застійних зон утруднюється, а це веде до накопичення рідкого металу в цих областях.

Внаслідок натікання газового потоку на розплав діє аеродинамічна сила  $F$ , яка бере участь в евакуації з електродів рідкого металу.

Якщо вважати, що розплав обмежений циліндричною поверхнею і площиною, яка паралельна фронту плавлення, силу можна розглядати як сукупність двох сил – сили лобового опору  $F_1$ , яка діє на циліндричну поверхню, і сили тертя  $F_2$  на плоскій поверхні.

$$F_1 = \frac{C_{ц} \rho_2 w_2^2 S_1}{2}$$

$$F_2 = \frac{C_{п} \rho_2 w_2^2 S}{2}$$

де  $C_n$ ,  $C_u$  – коефіцієнти динамічного опору відповідно плоскої та циліндричної поверхонь;  $S = \pi d^2 / (4 \sin [\omega / 2])$  – площа перерізу електрода в площині, яка відповідає фронту плавлення;  $S_1 = \delta d$  – площа медіанного перерізу рідкого прошарку (перерізу з максимальною площею);  $w_2$ ,  $\rho_2$  – відповідно швидкість і густина газу, який евакуує розплавлений метал;  $\delta$  – товщина прошарку.

Із збільшенням числа Маха динамічний напір  $\rho_1 w_1^2$  зростає (індекс «1» належить до параметрів газу, що витікає із сопла). Збільшення швидкості дозвукового потоку до  $M \approx 0,9$  веде до зростання газодинамічної сили, яка евакуує розплавлений метал з електродів, а відповідно – до зменшення питомих енерговитрат і збільшення продуктивності.

У випадку застосування надзвукового газового струменя режим обтікання електродів і дуги істотно змінюється. Внаслідок взаємодії центральної частини потоку, який надходить безпосередньо на зону перетину електродів, з дугою формується криволінійна головна хвиля 3 (див. рис. 3.10, а). В евакуації і диспергуванні розплавленого металу бере участь газ, який пройшов крізь прямий стрибок згущення і має параметри  $w_2$ ,  $\rho_2$ ,  $p_2$ ,  $T_2$ . При взаємодії периферійних ділянок надзвукового струменя з електродами виникають скісні стрибки згущення 4, які спричиняють відхилення струменів газу, які пройшли крізь стрибок, в обидва

боки від площини розміщення електродів (рис. 3.10, б).

*Струмінь низькотемпературної плазми.* Струмінь плазми утворюється нагріванням за допомогою електричної дуги плазмо-утворювального газу, який, обдуваючи дугу і проходячи крізь неї, підвищує свою температуру, змінює склад, дисоціює й іонізує.

Для нанесення покриттів використовується *низькотемпературна плазма*, яка формується, зазвичай, при атмосферному тиску і є високонагрітим газом із відносно невисоким ступенем іонізації (рис. 3.11)

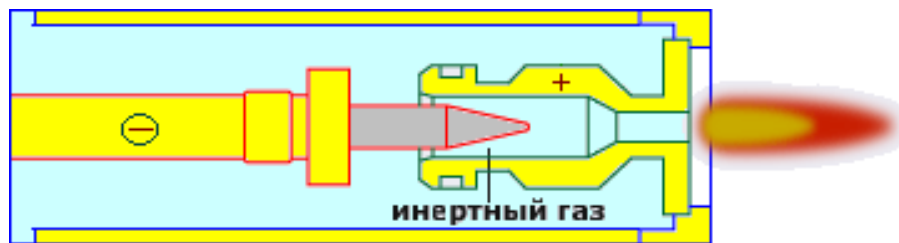


Рис. 3.11. Схема плазмотрона

До низькотемпературної плазми відносять речовину з температурою  $T = 10^3 - 10^5$  К, тобто кілька електрон-вольтів (1 еВ еквівалентно 11,600 К), і ступенем іонізації 2–20 %.

Найбільш поширеними плазмоутворювальними газами при напиленні покриттів є аргон, азот, водень, гелій та їх суміші, хоча для створення потоку плазми використовуються й інші гази та газові суміші, зокрема аміак, повітря, суміш аміаку з азотом, водяна пара тощо.

Температура плазми залежить від природи плазмоутворювальної речовини та енергії, яка в неї внесена

$$\varepsilon = \frac{H - H_0}{3600V_0}$$

де  $H$  – ентальпія плазмового струменя, кДж/кг;  $H_0$  – ентальпія вихідних плазмоутворювальних газів за стандартних умов, кДж/кг;  $V_0$  – питомий об'єм плазмоутворювального газу, м<sup>3</sup>/кг.

Співвідношення середньомасової температури плазмового струменя і питомої енергії показано на рис. 3.12.

Формально, з точки зору передачі тепла дисперсному матеріалу, висока температура плазми більш вигідна, оскільки тепловий потік до частинок матеріалу істотно залежить від температурного перепаду в примежовому шарі:

$$q = \alpha_T (T_{\text{п}} - T_{\text{пов}}),$$

де  $T_{\text{п}}$  – температура плазми;

$T_{\text{пов}}$  – температура поверхні частинки;

$\alpha_T$  – коефіцієнт тепловіддачі від газу до частинки, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

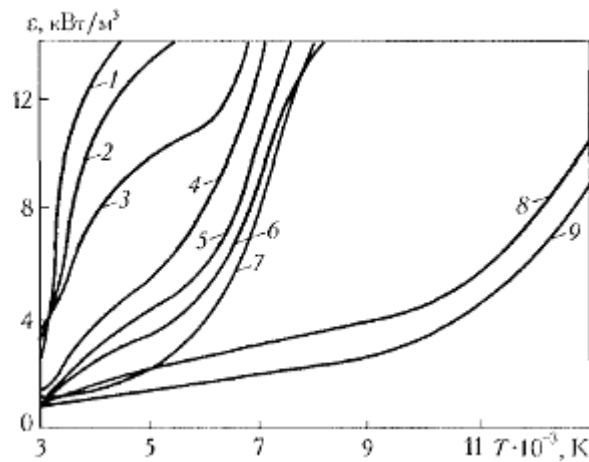


Рис. 3.12. Співвідношення середньомасової температури плазмового струменя

і питомої енергії для різних складів плазмоутворювального газу:

1 – H<sub>2</sub>O; 2 – NH<sub>3</sub>; 3 – CO<sub>2</sub>; 4 – 20 % CH<sub>4</sub> + 80 % повітря; 5 – 9 % CH<sub>4</sub> +  
повітря 91 %; 6 – повітря; 7 – N<sub>2</sub>; 8 – 85 % Ar + 15 % H<sub>2</sub>; 9 – Ar

Однак оскільки передача тепла внаслідок великих втрат тепла випромінюванням при підвищенні температури погіршується, то для підвищення коефіцієнта теплопередачі доцільно використовувати газу, які мають більшу ентальпію при нижчих температурах.

Таким чином, температура плазмового струменя є важливим, але не

домінуючим фактором, оскільки використання будь-якого з перерахованих вище газів дає можливість отримувати температуру, яка значно перевищує температуру плавлення оброблюваного матеріалу.

Струмінь, який генерується плазмотронами, дуже неоднорідний і має складну структуру. У загальному випадку всі існуючі потоки реального газу або рідини поділяються на ламінарні і турбулентні.

Якщо рух частинок газу має упорядкований шаровий характер, то такий рух називається *ламінарним*. Коли рух частинок газу стає хаотичним, виникають нерівномірні пульсації швидкості в поздовжньому та поперечному напрямках, така течія має назву *турбулентна*. Величиною, що визначає зміну структури потоку, є *число Рейнольдса*:

$$Re = wd/\nu,$$

де  $w$  – швидкість потоку газу;  $d$  – розмір, характерний для даного руху (діаметр сопла розпилювача);  $\nu$  – кінематична в'язкість речовини.

На зрізі сопла плазмотрона течія може бути ламінарною ( $Re < 100-250$ ) і турбулентною ( $Re > 300-800$ ). Однак на дистанціях від зрізу сопла, які становлять інтерес, з точки зору напилення (100–300 мм), потоки дуже часто виявляються турбулентними.

### 3.3. Класифікація газотермічних покриттів

Класифікуються газотермічні покриття по наступним ознаками:

1. Функціональне (службове) призначення;
2. Склад;
3. Макроструктура (конструкція) покриття;
4. Макрогеометрія (спеціальний макрорельєф) покриття;
5. Спосіб газотермічного напилення, яким отримано покриття;
6. Вид вихідного матеріалу для напилення покриття;
7. Група покриття по товщині;
8. Група покриття по пористості;

9. Група покриття по міцності зчеплення з основою;
10. Технологічні ознаки, що характеризують обробку покриття;
11. Додаткові ознаки.

В даний час переважна увага надається класифікації газотермічних покриттів по функціональному призначенню.

Така класифікація ГТП необхідна не тільки інженерно-технічним і науковцям, але і для організації процесу управління маркетингом газотермічних покриттів.

Вперше подібна класифікація розроблена фірмою МЕТКО .

Відповідно до ДСТ 28076, класифікація газотермічних покриттів за функціональним призначенням така:

1. Ущільнювальне покриття;
2. Термостійке покриття;
3. Коркове покриття;
4. Захисне покриття;
  - 4.1. Зносостійке;
  - 4.2. Ерозійностійке;
  - 4.3. Корозійностійке;
5. Терморегулююче покриття;
  - 5.1. Теплозахисне покриття.

Класифікація газотермічних покриттів з енергетичною ознакою (ДСТ 28076)

1. Газополуменеве напилення;
2. Детонаційне напилення;
3. Електродугове напилення;
4. Плазмове напилення;
  - 4.1. Плазмово-дугове напилення;
  - 4.2. Високочастотне плазмове напилення.

Загальна схема процесів газотермічного напилення наведена на рис. 3.13. Сутність процесів газотермічного напилення покриттів полягає в утворенні спрямованого потоку дисперсних частинок напилюваного матеріалу, що забезпечує перенесення їх на поверхню оброблюваного виробу при оптимальних для формування шару покриття значеннях температури і швидкості (рис. 3.13).

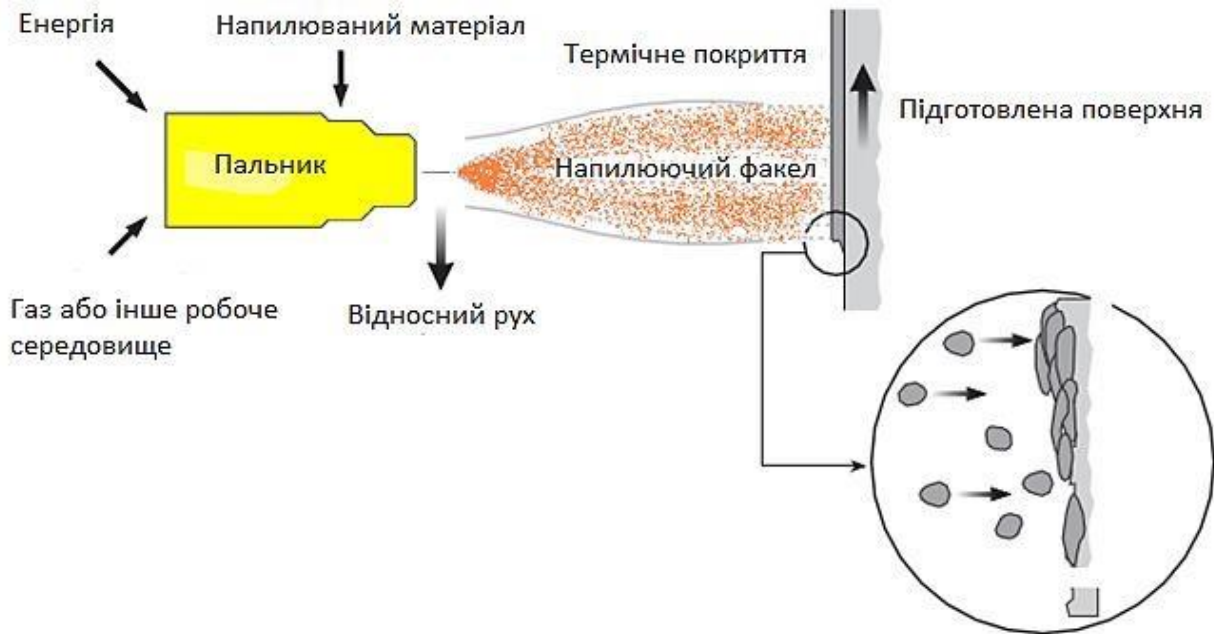


Рис. 3.13. Схема процесів газотермічного напилення покриттів

перенесення їх на поверхню оброблюваного виробу при оптимальних для формування шару покриття значеннях температури і швидкості (рис. 3.13).

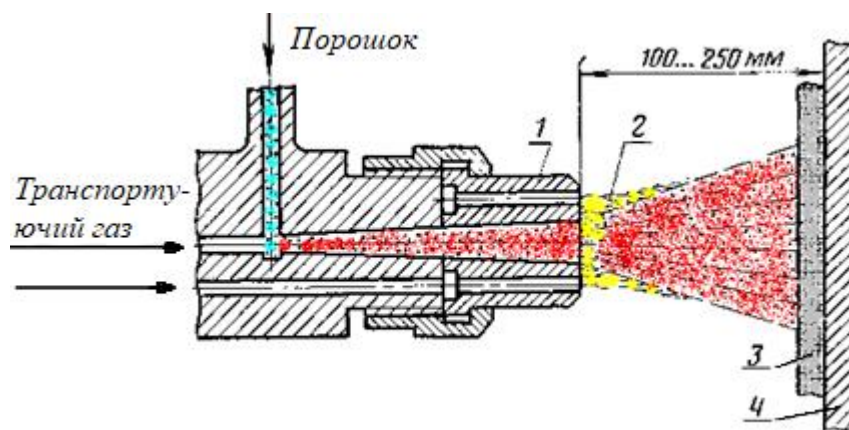
### 3.4. Газополуменеве напилення

Спосіб газополуменевого напилення покриттів відрізняється компактністю, простотою використовуваного устаткування і його мобільністю, що дозволяє проводити роботи по відновленню деталей безпосередньо у замовника.

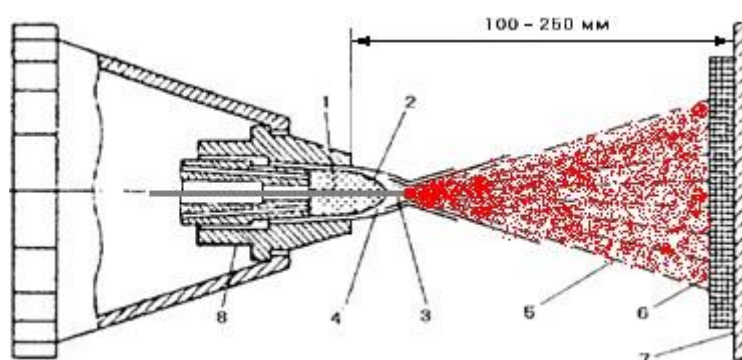
Він рекомендується для напилення порошкових матеріалів: металів, сплавів, композицій і оксидів (рис. 3.14, а), а також покриттів з металевого дроту, гнучких шнурів (рис. 3.14, б).

При газополуменевому напиленні покриттів ацетилен і його замінники: пропан, водень, а також рідке пальне можуть використовуватися в якості пального газу (табл. 3.2). Окиснювачем є кисень або повітря.

Швидкість частинок напилюваного матеріалу залежить від співвідношення кисню і горючого газу в суміші, кількості газу, який обдуває полум'я, відстані від зрізу сопла, кількості порошку, що вдувається в полум'я, його щільності, гранулометричного складу та інших компонентів, і знаходиться в межах 20–80 м/с.



а



б

Рис. 3.14. Газополуменеве напилення

Таблиця 3.2 – Основні властивості горючих газів, що застосовуються для газополуменевого напилення покриттів

Газ	Густина, кг/м <sup>3</sup>	Температура, °С			Нижча теплота згорання, МДж/м <sup>3</sup>	Температура полум'я в суміші з киснем, °С
		плавлення	кипіння	критична		
Ацетилен	1,09	-81	-83,6	35,7	100,8	3100–3200
Н-бутан	2,54	-139	-0,6	152	111,2	2700–2900
Водород	0,084	-259,2	-252,8	-239,9	19,2	2400–2600
Метан	0,67	-182,5	-161,7	82,1	32,0	2400–2700
Оксид вуглецю	1,16	-205	-191,5	-140,2	12,2	2600–2800
Пропан	1,88	-189,9	-42,6	96,8	83,2	2700–2850
МАПП (метил-аце-тилен-пропадиен)	1,78	–	–	120	83,2	2800–2900

### 3.5. Детонаційне напылення

Метод детонаційного напылення покриттів використовують енергію вибуху газових сумішей (рис. 3.15). Цим способом можна наносити покриття будь-якого типу з низькою пористістю.

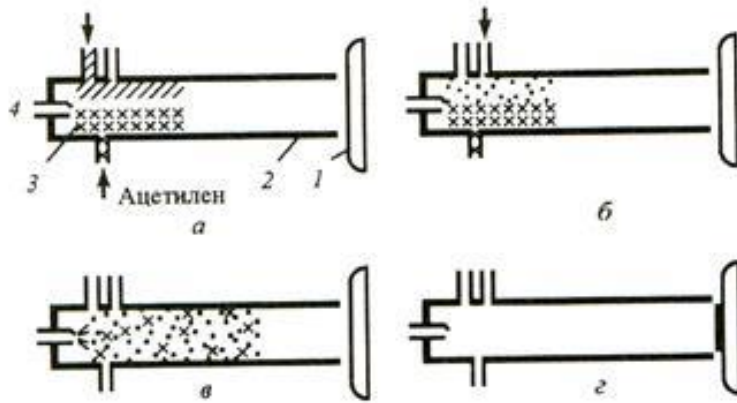


Рис. 3.15. Схема детонаційного напылення

В камеру 3 водоохолоджуваного стовбура 2 діаметром 25 мм подають кисень і ацетилен у строго певних кількостях; стовбур направляють на оброблювану деталь 1 (рис. 3.15, а). Потім через отвір в камері подають порошок напылюваного матеріалу (рис. 3.15, б). Газову суміш підпалюють електричною іскрою від запалу 4 (рис. 3.15, в). В результаті вибуху суміші відбувається виділення теплоти і утворюється ударна хвиля, яка розігріває і розганяє частинки порошку. Їх швидкість на відстані 75 мм від зрізу ствола може досягати 820 м/с. При попаданні на деталь частинок виділяється велика кількість теплової енергії, і температура напылюваного порошку збільшується до 4000 °С. В результаті цього на деталі 1 утворюється покриття (рис. 3.15, г).

Після вибуху суміші горючих газів для видалення продуктів горіння здійснюють продувку стовбура азотом. Процес відрегульований таким чином, що він повторюється з частотою 3–4 рази в секунду.

Установка працює до досягнення необхідної товщини покриття, яка на практиці зазвичай дорівнює 0,25–0,3 мм. Покриття, отримані детонаційним

напиленням, відрізняються великою щільністю і високою міцністю зчеплення з основою.

Детонаційне напилення використовують в основному для одержання твердих зносостійких покриттів з карбідів, що містять невеликі кількості металевих ланцюжках, а також різних оксидів і їх сумішей (рис. 3.16).



Рис. 3.16. Шнек пульпонасоса

### 3.6. Плазмове напилення

Останнім часом цей метод, що відрізняється високими техніко-економічними показниками, використовується в машинобудуванні, енергетиці, хімічній, нафтогазовій, дорожньо-будівельній, сільськогосподарській техніки, а також на підприємствах міського та комунального господарства.

Процес плазмового напилення здійснюють за схемою, представленої на рис. 3.17, де  $h_1$  – відстань від зрізу сопла до напилюваної поверхні;  $T_{\text{ч}}$  – температура частинки;  $T_{\text{п}}$  – температура підкладки;  $q$  – тепловий потік, що надходить в підкладку.

Плазмовий розпилювач був розроблений у 1956 р. фірмами *Gianini Corp.* і *UC* на основі робіт Сміта (пат. 2157498, 1939 р.), запропонував пристрій для нанесення покриттів, що містить катод у формі стрижня і анод у формі сопла.

Плазмове напилення здійснюється за допомогою плазмового струменя. Температура плазми в ядрі – 20 000–30 000 К, швидкість струменя – 300–2000 м/с. Між водоохолоджуваними катодом і анодом від джерела електроживлення запалюється

електрична потужнострумова дуга. Величину струму можна регулювати від 80 до 600 А.

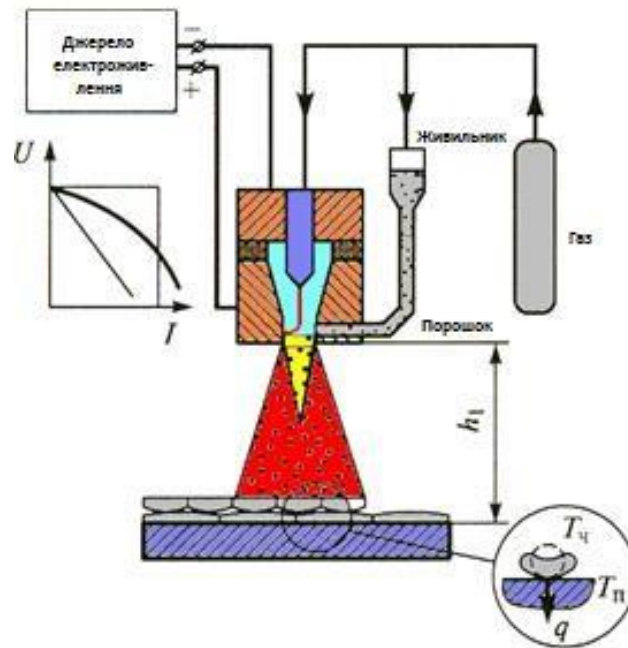


Рис. 3.17. Схема процесу плазмового напилення

У дуговий проміжок подають плазмоутворюючий газ (аргон, азот, суміш Аг- $N_2$ , повітря тощо). При контакті з дугою газ нагрівається і, прискорюючись, виходить з сопла у вигляді струменя низькотемпературної плазми. Температура струменя від  $2 \cdot 10^3$  до  $15 \cdot 10^3$  К. Швидкість струменя від 200 до  $2-3 \cdot 10^3$  м/с.

На рис. 3.18 представлена схема плазмового розпилювача. В струмінь від спеціального живильника подають порошок, який прискорюється, розплавляється і осідає на підкладці, утворюючи покриття.

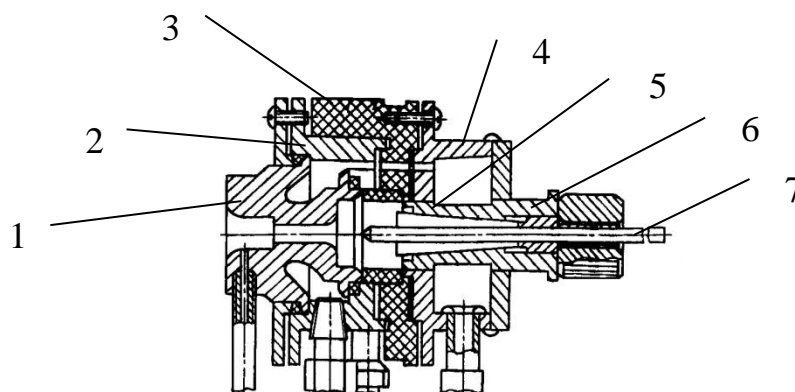


Рис. 3.18. Схема плазмового розпилювача:

1 – сопло; 2 – стакан; 3 – корпус; 4 – кришка; 5 – цанга;  
6 – втулка; 7 – катод

### 3.7. Електродугове наплення

При електродуговій металізації освіта потоку напилюваних частинок відбувається за рахунок плавлення матеріалу, що розпилюється много-амперної дугою, і диспергування його швидкісний струменем газу (рис. 3.19)

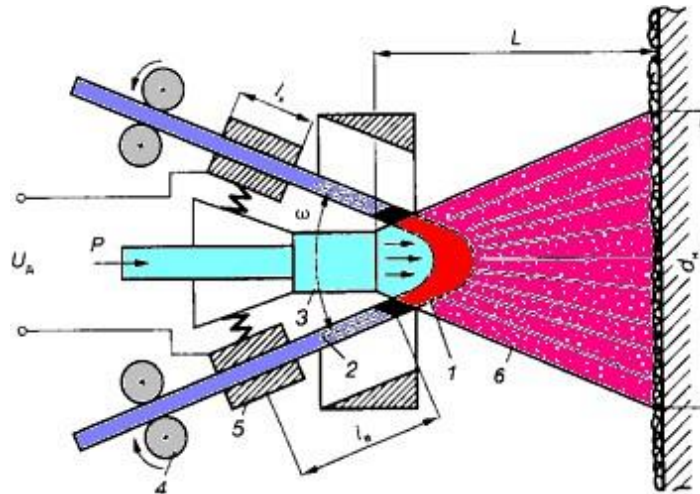


Рис. 3.19. Схема електродугового напилення:

- 1 – електрична дуга; 2 – дріт; 3 – сопло; 4 – механізм подачі дроту;  
 5 – контактні пристрої; 6 – струмінь напилюваного матеріалу;  
 $l_v$  – довжина вильоту дроту;  $U_d$  – електрична напруга

Основними характеристиками електродугового напилення є висока продуктивність процесу, яка може досягати 50 кг/год і високий енергетичний ККД розпилення, який може бути 0,7–0,9. До недоліків можна віднести необхідність використання для напилення тільки дрітоті матеріали.

### 3.8. Газотермічні способи напилення

На рис. 3.20–3.23 показано газотермічні способи напилення покриттів.



Рис. 3.20. Газополуменевий



Рис. 3.21. Плазмовий

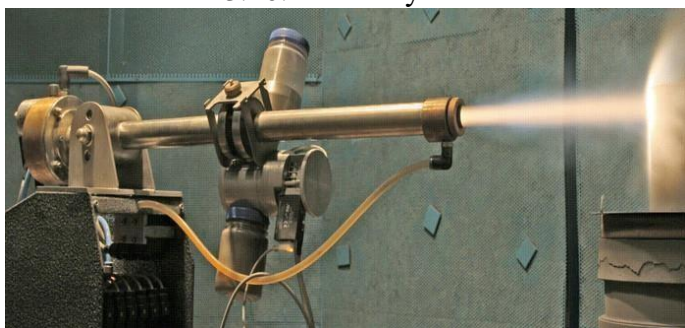


Рис. 3.22. Детонаційний



Рис. 3.23. Електродугова металізація

### 3.9. Матеріали для нанесення газотермічних покриттів

Для напилення покриттів використовують порошки як загальнопромислового призначення, так і спеціалізовані з розміром частинок від 5 до 200 мкм (рис. 3.24).

Спеціалізовані порошки часто випускають трьох класів: ОМ – особливо дрібні; М – дрібні і С – середні. Фракційний склад часток у межах одного класу для різних матеріалів не однаковий. Як правило, клас ОМ включає в себе частинки діаметром 40–100 мкм, клас М – 100–280 мкм, клас С – 280–630 мкм.

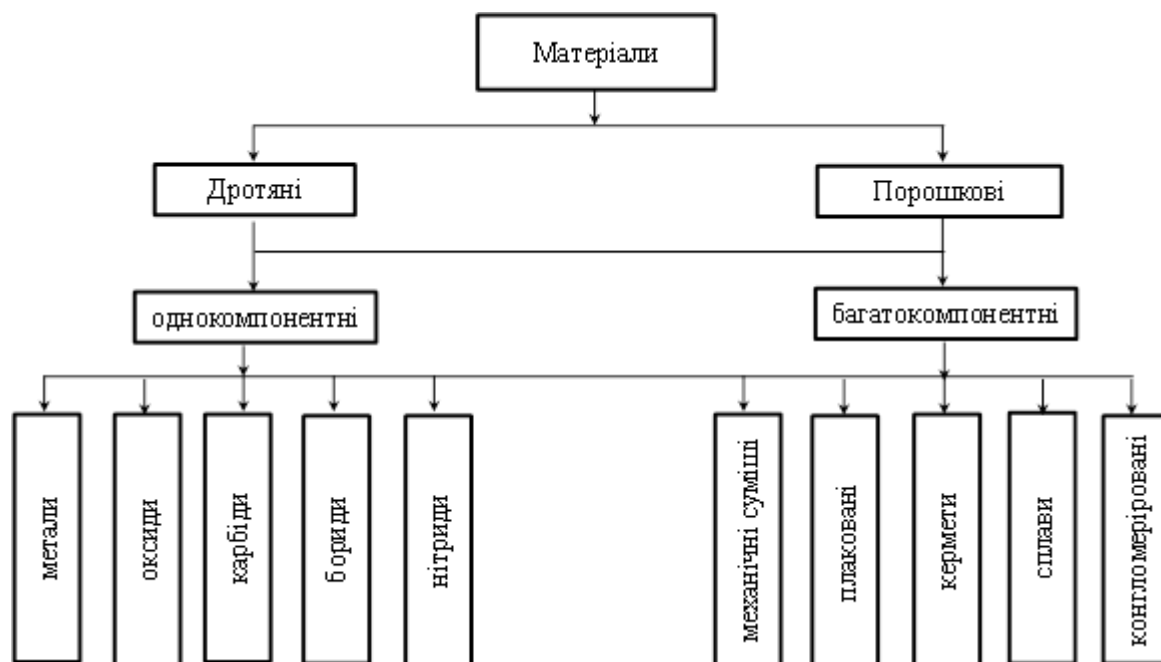


Рис. 3.24. Матеріали для нанесення газотермічних покриттів

Як однокомпонентних порошків використовують метали (алюміній, цинк, вольфрам і ін), оксиди ( $Al_2O_3$ , рис. 3.25 ;  $ZrO_2$  та ін), карбіди ( $WC$ ,  $SiC$  та ін), бориди ( $WB$ ,  $ZrB_2$ ,  $CrB_2$  і ін), нітриди ( $AlN$ ,  $ZrN$ ,  $TiN$ ,  $HfN$  та ін) і силіциди ( $MoSi_2$ ,  $Cr_3Si$ ,  $TaSi_2$  та ін).



Рис. 3.25. Оксид алюмінію  $Al_2O_3$

Зазвичай однокомпонентні порошки одержують розпилюванням розплавів або їх відновленням. При газотермічному напиленні, головним чином, застосовують

однокомпонентні порошки, основна перевага використання яких полягає в отриманні покриттів з однорідним хімічним складом і структурою.

В якості багатокомпонентних порошоків можуть бути використані механічні суміші металів, оксидів, сплавів, карбідів, боридів, графіт (алмаз), тверді мастила і т. д. Широке застосування знайшли такі сплави елементів, як Fe-C, Ni-Al, Ni-Cr (рис. 3.26), Ni-Al (рис. 3.27), Cu-Sn та ін. Структура часток може бути як гомогенної, так і гетерогенної.



Рис. 3.26. Ніхром X20H80



Рис. 3.27. Алюмінід нікелю Ni-Al

В останні роки активний розвиток отримали методи виготовлення порошоків, що забезпечують наявність у кожній частці комплексу всіх вихідних компонентів. При цьому всі частинки порошку мають однакові масу, хімічний склад, щільність, теплопровідність і т. д. Для досягнення цього розроблені технології отримання

порошків плакованого і конгломератного будови. Такі порошки називають композиційними.

Композиційні порошки складаються з двох або більше різних за властивостями компонентів, розділених між собою чіткою межею. Структура композиційних порошкових матеріалів, що набули найбільшого поширення (рис. 3.28).

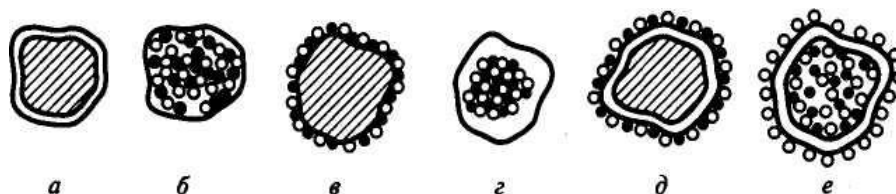


Рис. 3.28. Структура композиційних порошкових матеріалів

Композиційні порошки розділяють на дві групи: такі, що екзотермічно реагують і термонеутральні.

Для підвищення зносостійкості деталей застосовують порошки на основі нікелю і кобальту, які мають властивості самофлюсування.

Таблиця 3.3 – Хімічний склад порошкових матеріалів виробництва ВАТ «Торезтврдосплав»

Марка порошку	Склад компонентів, % за масою									
	Cr	B	Si	Fe	C	Ni	Co	Cu	W	Al
ПГ-10Н-01	14,0– 20,0	2,8– 4,2	4,0– 4,5	3,0– 7,0	0,6– 1,0	Ост.	–	–	–	–
ПГ-10Н-04	–	1,2– 1,8	2,3– 2,8	До 2,0	До 0,2	Ост.	–	–	–	–
ПГ-10К-01	21,0– 25,0	1,2– 1,8	0,8– 1,3	До 2,0	1,3– 1,7	28,0– 32,0	Ост.	–	3,5– 4,5	–
ПГ-12Н-01	8,0– 14,0	1,7– 2,8	1,2– 3,2	2,0– 5,0	0,3– 0,6	Ост.	–	–	–	–
ПГ-10Н-02	10,0– 16,0	2,0– 4,0	3,0– 5,0	3,0– 6,0	0,4– 0,8	Ост.	–	–	–	–

Продовження табл. 3.3

ПГ-19М-01	–	–	–	До 4,0	–	–	–	Ост.	–	8,5– 10,5
ПТ-НА-01	–	–	–	–	–	Ост.	–	–	–	4,0– 5,5
ПТ-19Н-01	8,0– 14,0	1,7– 2,8	1,2– 3,2	2,0– 5,0	0,3– 0,6	Ост.	–	–	–	0,8– 1,3

В Україні ці сплави були розроблені в інституті електрозварювання імені Є. О. Патона і ВНИИТС, а також організовано виробництво ряду порошків по ліцензії фірми *Castolin* (Швейцарія) на ВАТ «Торезтвердосплав» (рис. 3.29).

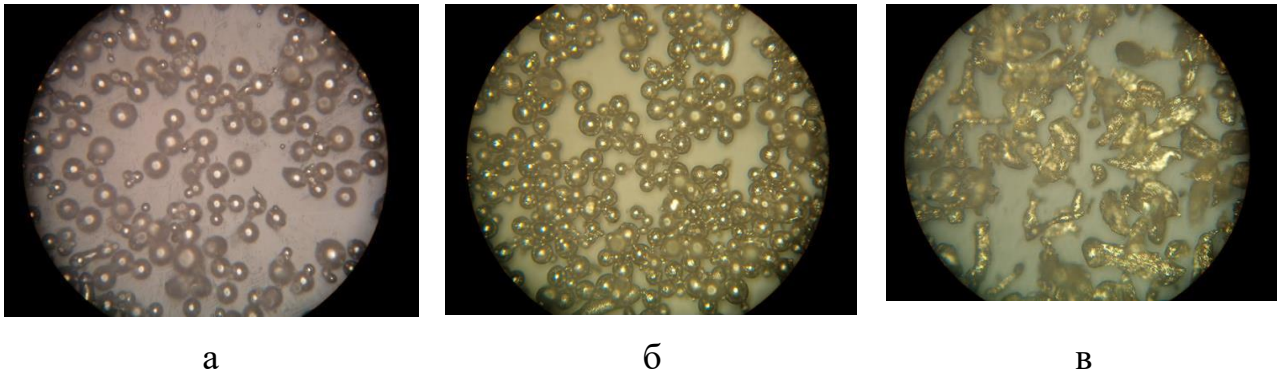


Рис. 3.29. Порошок, х 360:

а – ПГ-10Н-01; б – ПТ-НА-01; в – ПГ-19М-01

### 3.10. Застосування газотермічного напилення

Для плазмового напилення первинних валів коробки передач тракторів типу Т-150 було на АТ «ХТЗ» організовано ділянку газотермічного напилення. На ділянці встановлено обладнання для плазмового напилення НВО «Комплекс» м. Черкаси, рис. 3.30. Також на рис. 3.31–3.36 представлена номенклатура деталей тракторів та паливного насоса з плазмовими покриттями.



Рис. 3.30. Ділянка газотермічного напылення на АТ «ХТЗ»



Рис. 3.31. Вал приводу переднього моста трактора Т-155



Рис. 3.32. Вал колісного редуктора трактора Т-150К



Рис. 3.33. Вал приводу роздавальної коробки трактора Т-150К



Рис. 3.34. Болти штовхачів паливного насоса



Рис. 3.35. Втулка коробки передач трактора Т-150К



Рис. 3.36. Вісь вертикального шарніра рами трактора Т-150К

### Контрольні запитання

1. Які існують методи газотермічного нанесення покриття?
2. Які джерела енергії використовуються у методах газотермічного напилення?
3. Охарактеризуйте способи газополуменевого, детонаційного, плазмового і електродугового напилення?
4. Які використовують матеріали для нанесення газотермічних покриттів?
5. Яка структура композиційних порошкових матеріалів?
6. Область застосування методів газотермічного напилення?
7. Які основні властивості горючих газів, що застосовуються для газополуменевого напилення?

## **4. РЕМОНТНЕ ЗВАРЮВАННЯ**

### **4.1. Поняття про зварюваність**

Зварюваністю називається властивість металу (або іншого матеріалу) утворювати при встановленій технології зварювання з'єднання, що відповідає вимогам, зумовленим конструкцією та експлуатацією виробу (ГОСТ 2601).

Зварюваність різних металів та їх сплавів суттєво відрізняється.

Ступінь зварюваності оцінюють зміною властивостей зварного з'єднання по відношенню до основного металу. Ступінь зварюваності сплаву тим вищий, чим більше способів зварювання та режимів при кожному способі можна застосувати. Прикладом гарної зварюваності є маловуглецева сталь.

Під технологічною зварюваністю розуміють ставлення металу до конкретного способу зварювання та режиму.

Фізична зварюваність визначається процесами, що протікають у зоні сплавлення металів, що зварюються, по завершенні яких утворюється нероз'ємне зварне з'єднання. Всі однорідні метали мають фізичну зварюваність. Властивості різнорідних металів найчастіше перешкоджають перебігу необхідних фізико-механічних процесів у зоні сплавлення. У цьому випадку метали не мають фізичної зварюваності.

### **4.2. Вплив елементів, що входять до складу сталей на їхню зварюваність**

Вуглець. Маловуглецеві сталі добре зварюються всіма видами зварювання. Зі збільшенням вмісту вуглецю сталі підвищується твердість і знижується пластичність. Метал у зварному з'єднанні загартовується, і утворюються тріщини. В результаті інтенсивного окислення вуглецю при зварюванні утворюється значна кількість газових пор.

Марганець. У кількості 0,3...0,8 % марганець не погіршує зварюваність сталі. Є хорошим розкислювачем та сприяє зменшенню вмісту кисню у сталі. При вмісті марганцю 1,5...2,5 % зварюваність погіршується і можлива поява тріщин через збільшення твердості сталі та утворення гартових структур.

Кремній. Вміст кремнію у вуглецевих сталях незначний (0,03...0,35 %). Кремній вводять як розкиснювач і при вмісті до 1% він не впливає на зварюваність. Зі збільшенням вмісту кремнію більше 1 % зварюваність погіршується, оскільки утворюються тугоплавкі оксиди, що призводять до появи шлакових включень. Метал зварного шва має підвищені міцність, твердість та крихкість.

Хром. У вуглецевих сталях вміст хрому не перевищує 0,25 % і його вплив на зварюваність незначно. Конструкційні сталі типу 15X, 20X, 30X, 40X містять від 0,7 до 1,1 % хрому. За такого вмісту хрому твердість збільшується, а зварюваність погіршується, особливо зі збільшенням вмісту вуглецю. Сталі, що містять значну кількість хрому (X5, 1X13, X17) мають найгіршу зварюваність. При зварюванні утворюються тугоплавкі оксиди, знижується хімічна стійкість сталі та утворюються загартовані структури.

Нікель. Нікель підвищує міцність та пластичність металу зварного з'єднання і не погіршує зварюваність.

Молибден. У теплостійких сталях вміст молибдену становить 0,2...0,8 %, а спеціальних сталях, призначених до роботи за високих температур, збільшується до 2...3 %. Молибден значно підвищує міцність і ударну в'язкість сталі, але викликає схильність до утворення тріщин, як у шві, так і в перехідній зоні.

Ванадій. Ванадій підвищує міцність сталей. Зміст його в інструментальних та штампових сталях досягає 1,5 %. Ванадій погіршує зварюваність, тому що здатний сильно окислюватися і при зварюванні необхідно вводити в зону плавлення активні розкислювачі.

Вольфрам. Зміст вольфраму у спеціальних (інструментальних та штампових) сталях становить до 2 %. Сталі із вмістом вольфраму мають значну твердість та міцність при високих температурах. Вольфрам погіршує зварюваність, сильно окислюється і тому зварювання потребує особливих прийомів.

Титан та ніобій. Титан та ніобій покращують зварюваність сталі. При зварюванні високолегованих хромистих та хромонікелевих сталей вуглець взаємодіє з хромом та утворюються карбіди хрому. Це призводить до зменшення вмісту хрому

за межами зерен, утворення міжкристалітної корозії та руйнування зварних швів.

При введенні в сталі титану або ніобію в кількості 0,5...1 % відбувається їх взаємодія з вуглецем, що перешкоджає утворенню хрому карбідів.

Мідь. У сталях, які використовуються у відповідальних конструкціях, вміст міді становить 0,3...0,8 %. Мідь покращує зварюваність, підвищує міцність, пластичні властивості, ударну в'язкість та корозійну стійкість сталей.

Сірка. Підвищений вміст сірки призводить до зварювання до утворення гарячих тріщин. Найбільше допустиме вміст сірки до 0,06 %.

Фосфор. Підвищений вміст фосфору погіршує зварюваність, оскільки викликає появу холодних тріщин. Допускається вміст фосфору у вуглецевих сталях трохи більше 0,08 %.

Кисень. Кисень погіршує зварюваність сталі, знижуючи її механічні властивості – міцність, пластичність, ударну в'язкість.

Азот. Азот з навколишнього повітря при охолодженні зварювальної ванни утворює нітриди заліза, які підвищують міцність та твердість сталі та значно знижують пластичність.

Водень. Водень потрапляє у зварювальну ванну з вологи та корозії на поверхні металу, накопичується в окремих місцях зварного шва, утворює газові бульбашки, викликає появу пористості та дрібних тріщин.

**Класифікація сталей за зварюваністю.** Зварюваність сталей оцінюється такими ознаками як схильність до утворення тріщин та механічні властивості зварної сполуки.

Кількісною характеристикою зварюваності сталі є еквівалентний вміст вуглецю  $C_{ек}$ , який визначають за формулою:

$$C_{ек} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15},$$

де  $C$  – вміст вуглецю, %;

$Mn, Cr, Mo, V, Ni, Cu$  – вміст легуючих елементів (марганець, хром, молібден, ванадій, нікель, мідь), %.

Найбільший вплив на зварюваність сталі надає кількість вуглецю, що міститься в ній, і легуючих компонентів.

Сталі по зварюваності ділять на чотири групи: сталі, що добре зварюються, задовільно зварюються, обмежено зварюються і погано зварюються сталі.

До першої групи належать сталі, зварювання яких виконують за звичайною технологією без підігріву. Можливе застосування термообробки для зняття внутрішніх напруг.

До другої групи відносяться сталі, у яких при зварюванні в нормальних умовах, як правило, тріщин не утворюється. Для зварювання сталей цієї групи є обмеження по товщині виробу, що зварюється, і температурі навколишнього середовища.

До третьої групи відносяться сталі, схильні у звичайних умовах зварювання до утворення тріщин. При зварюванні їх попередньо піддають термообробці та підігривають. Крім того, більшість сталей, що входять до цієї групи, піддають термообробці після зварювання.

До четвертої групи належать сталі, що найбільш важко піддаються зварюванню і схильні до утворення тріщин. Ці сталі зварюються обмежено, тому зварювання їх виконують з обов'язковою попередньою термообробкою, з підігрівом у процесі зварювання та наступною термообробкою.

У табл. 4.1 наведено зварюваність та умови зварювання сталей різних видів та марок.

### **4.3. Зварювання сталей**

**Зварювання маловуглецевих сталей.** Маловуглецеві сталі з вмістом вуглецю до 0,25 % добре зварюються і не вимагають нагрівання до, протягом та після зварювання. Для підвищення продуктивності зварювання ведуть на максимально допустимих режимах. Зварні з'єднання легко обробляються різальним інструментом.

**Зварювання вуглецевих сталей.** При зварюванні середньовуглецевих сталей можливе утворення тріщин як в основному, так і наплавленому металі. Необхідне

попереднє підігрів виробу перед зварюванням до температури 200...350 °С. Після зварювання виріб поміщають у піч, нагрівають його до 675...700 °С і повільно охолоджують разом із піччю до 100...150 °С. Завершують охолодженням виробу на повітрі.

Таблиця 4.1 – Зварюваність сталей та умови зварювання

Група зварюваності	Еквівалентний вміст вуглецю, С	Вуглецеві сталі	Леговані сталі	Високолеговані сталі	Високолеговані сталі
1	2	3	4	5	6
I Гарна	До 0,25	ВСт1, ВСт2, ВСт3, ВСт4, Сталі 08, 10, 15, 20, 25	15Г, 20Г, 15Х, 20Х, 15ХМ, 20ХГСА, 10ХСНД, 10ХГСНД, 15ХСНД	08Х20Н14С2, 20Х23Н18, 08Х18Н10, 12Х18Н9Т, 15Х5	Без обмежень, у широкому діапазоні режимів зварювання незалежно від товщини металу, жорсткості конструкції, температури навколишнього середовища
II Задовольняє	Понад 0,25 і до 0,35	ВСт5, Сталі 30, 35	12ХН2, 12ХН3А, 20ХН, 20ХН3А, 30Х, 30ХМ, 25ХГСА	30Х13, 25Х13Н2, 9Х14А, 12Х14А	Зварювання при температурі навколишнього середовища не нижче + 5 °С та товщині металу до 20 мм за відсутності вітру
III Обмежена	Понад 0,35 і до 0,45	ВСт6 Сталі 40, 45	35Г, 40Г, 45Г, 40Г2, 35Х, 40Х, 45Х, 40ХМФА, 40ХН, 30ХГС, 30ХГСА, 35ХМ, 20Х2Н4МА	17Х18Н9Т, 12Х18Н9, 36Х18Н25С2, 40Х9С2	Зварювання з попереднім або супутнім підігрівом до 250 °С у жорсткому діапазоні режимів зварювання
IV Погана	Понад 0,45	Сталі 50, 55, 60, 65, 70, 75, 80, 85	50Г, 50Г2, 50Х, 50ХН, 45ХН3МФА, 6ХС, 7ХЗ	40Х10С2М, 40Х13, 95Х18, 40Х14Н14В2М, 40Х10С2М, Р18, Р9	Зварювання з попереднім та супутнім підігрівом, термообробкою після зварювання

Для зварювання використовують електроди марок УОНІ-13/45, УОНІ-13/55, К-5А, УП-1/45, ОЗС-2, УП-2/45, ВСП-1, МР-1, ОСЗ-4 та ін. Зварювання електродами УОНІ-13, ОЗС-2, ВСП-3 виконують на постійному струмі зворотної полярності. Використовуючи електроди ВСП-1, МР-1, ОЗС-4, К-5А, можна зварювати як на постійному, так і змінному струмах.

Технологія зварювання високовуглецевих сталей включає обов'язковий попередній підігрів до 350...400 °С, іноді супутній підігрів і подальшу термічну обробку. Зварювання виробляють вузькими валиками та невеликими ділянками. Зварювання при температурі навколишнього середовища нижче плюс 5 °С і на протягах робити не можна.

**Зварювання легованих сталей.** Леговані сталі класифікують на три групи: низьколеговані – із вмістом легуючих елементів до 2,5 %; леговані – від 2,5 до 10 % легуючих елементів; високолеговані – понад 10% легуючих елементів.

Перед зварюванням легованих сталей кромки ретельно очищають від окалини, пилу, бруду, шлаку, а також видаляють вологу з поверхні металу, підігриваючи кромки газовим пальником до температури 110...120 °С.

Перед зварюванням для попередження появи тріщин необхідний попередній підігрів виробу до температури 100...350 °С.

Для виключення загартування основного металу застосовують багато прохідне зварювання швами однакового перерізу, а також метод валиків, що відпалюють.

**Низьколеговані сталі.** Сталі типу 15ХСНД при зварюванні схильні утворювати загартовані структури. Для попередження перегріву та утворення гартових структур застосовують багат шарове зварювання з великим інтервалом часу між накладенням шарів. Зварювання виробів товщиною понад 2 мм виробляють електродами УОНІ-13/55, УОНІ-13/65 на постійному струмі зворотної полярності.

Вироби товщиною понад 15 мм після зварювання піддають високотемпературній відпустці при температурі 550–650 °С.

Хромокремнемарганцеві сталі 20ХГСА, 25ХГСА, 30ХГСА і 35ХГСА відносяться до низьколегованих конструкційних сталей підвищеної міцності. При зварюванні вони утворюють гартувальні структури. Залежно від товщини металу застосовують одношарове та багат шарове зварювання з малими інтервалами часу між накладенням шарів. Для зварювання застосовують електроди зі стрижнями Св-18ХГС, Св-18ХМА або низьковуглецевий дріт Св-08А. Марки покриттів

електродів: НДАТ-3М, ЦЛ-18-63, ЦЛ-30-63, ЦЛ-14, УОНІ-13/85. Після зварювання виробу зі сталі 25ХГСА, нагрівають до температури 650...880 °С витримкою з розрахунку 1 год на кожні 25 мм товщини, після чого охолоджують на повітрі або в гарячій воді.

**Середньо леговані сталі.** Сталі 12М, 12ХМ, 15ХМ, 20ХМ призначені для виготовлення деталей, що працюють в умовах високих температур (400...600 °С) та при тиску газу або пари до 30,0 МПа (трубчасті елементи парових котлів, елементи нафтоперегінної та хімічної апаратури т. п.). Ці сталі мають схильність до утворення тріщин у зоні термічного впливу. Перед зварюванням необхідне попереднє підігрів до температури 200...300 °С. Після зварювання проводять відпустку (нагрівання виробу до 710 °С, витримка при цій температурі з розрахунку 5 хв на кожен міліметр товщини металу з подальшим повільним охолодженням).

Для зварювання застосовують електроди ЦУ-2МХ, ЦЛ-38, ЗІО-20, УОНІ-13ХМ. Зварювання роблять на постійному струмі зворотної полярності.

**Високолеговані сталі.** Сталі типу Х18Н9, Х18Н9Т, застосовують у хімічному та харчовому машинобудуванні. Ці сталі мають високу міцність, в'язкість та пластичність. Через знижену електропровідність і теплопровідність можливі значні короблення і міжкристалітна корозія. Для зварювання застосовують електроди ЗІО-3, ОЗЛ-8, ЦЛ-11, ЦТ-1 та ін. Зварювання ведуть на постійному струмі зворотної полярності, застосовуючи мідні підкладки або прискорене охолодження швів водою або стисненим повітрям.

Сталі типу Х25Н12 та Х25Н20 відносяться до окалино стійких сталей, що застосовуються при виготовленні трубопроводів, деталей турбін, котлів високого тиску, хімічної апаратури та ін. Вони мають підвищений опір корозії та витримують тривалі навантаження за високих температур. Ці сталі мають схильність до утворення гарячих тріщин. Зварювання ведуть на постійному струмі зворотної полярності електродами ЦЛ-25, ОЗЛ-4, ОЗЛ-9А, ГС-1, ОЗЛ-5 та ЦТ-17.

Після зварювання для зняття напруги проводять високотемпературний відпуск при температурі 650 °С.

Хромисті сталі Х6СМ, 4Х9С2, 15Х5М, Х5МФ, 12Х13 із вмістом хрому 4...14 % застосовують виготовлення конструкцій підвищеної міцності, що працюють у агресивному середовищі (апаратура нафтопереробної промисловості). Сталі 15Х28, 1Х17Ю5 із вмістом хрому 18...30 % добре опираються окисленню за високих температур.

Сталі мають схильність до гартування на повітрі з утворенням мартенситної структури та зростання зерен у зоні термічного впливу, що становить основні труднощі при зварюванні.

Перед зварюванням роблять попередній підігрів до температури 200...400 °С. Після зварювання виріб охолоджують на повітрі до температури 150...200 °С. На завершення виробляють високотемпературну відпустку: нагрівання в печі до 720...750 °С мінімальною витримкою 1 год або з розрахунку 5 хв на 1 мм товщини металу, з подальшим охолодженням на спокійному повітрі.

Сталі із вмістом хрому 7...10 % витримують у печі з розрахунку 10 хв на 1 мм товщини металу. Зварювання виробляють на постійному струмі зворотної полярності електродами ЦЛ-17-63, СЛ-16, УОНІ-13/85 та ін.

**Високо марганцеві сталі** типу 110Г13Л, містять 11...16 % марганцю. Сталі мають високу зносостійкість та призначені для виготовлення залізничних хрестовин, зубів екскаватора, ковшів землечерпалок та інших деталей. Для зварювання застосовують нікелемарганцеві електроди: що містять 4...4,5 % нікелю, 11...13 % марганцю та 0,6...1,0 % вуглецю. Стрижні мають покриття основного типу: корозійностійкі, низьковуглецеві та покриття з вмістом до 60...65 % ферохрому. Зварювання сталі виробляють у загартованому стані на постійному струмі зворотної полярності.

**Інструментальні сталі** Р18, Р9 та їх замітники ХВГ, 9ХВГ, 9ХС призначені для виготовлення різального інструменту. Електродугове зварювання застосовують при виготовленні ріжучого інструменту для приварювання пластин швидкорізальної сталі до державок зі звичайної сталі, а також для наплавлення швидкорізальної сталі або її заміників на заготівлю з вуглецевої сталі.

Наплавлення ведуть в один прийом, не перериваючи в міру оплавлення. Після наплавлення інструмент відпалюють, потім піддають механічній обробці, подальшому загартуванню і триразової відпустки. Після завершення твердість наплавленого металу досягає HRC 61...64.

#### **4.4. Зварювання чавуну**

Зварюванням виправляють чавунне лиття до процесу та в процесі механічної обробки. При відновленні деталей з чавуну зварювання застосовують для усунення тріщин, пробоїв та зламів.

За зварюваністю чавун відноситься до групи металів, що погано зварюються. Це пов'язано з високим вмістом у ньому понад 2 % вуглецю, 1,6...2,0 % кремнію, 0,5...1,2 % марганцю, до 0,12 % сірки, до 0,8 % фосфору та швидкої швидкістю охолодження.

Причини, що ускладнюють зварювання чавуну:

1) утворення карбідів заліза (відбілювання чавуну) у місці зварювання, що відрізняються високою твердістю і не піддаються механічній обробці звичайним різальним інструментом;

2) низька пластичність, що викликає при нерівномірному нагріванні тріщини у зоні зварювання;

3) відсутність пластичного стану при переході з твердого стану в рідке, внаслідок чого неможливе виконання горизонтальних, вертикальних та стельових швів;

4) утворення пористості за рахунок великої кількості оксиду вуглецю та швидкого затвердіння розплавленого металу;

5) утворення плівки оксидів кремнію на поверхні ванни, що мають високу температуру плавлення.

Чавунні деталі після експлуатації в умовах високих температур погано зварюються, оскільки вуглець і кремній окислюються і чавун стає крихким. Погано зварюються чавунні деталі, які тривалий час контактували з маслом і гасом. При

зварюванні масло і гас згоряють і гази, що утворилися, є причиною суцільної пористості зварювального шва.

**Способи зварювання чавуну.** Розрізняють три способи зварювання чавуну: холодний, напівгарячий та гарячий. Холодне зварювання чавуну ведуть без підігріву виробу, напівгаряче – з повним або місцевим підігрівом до температури 300...400°C, гаряче – з повним нагріванням до температури 600...800 °C.

**Холодне зварювання.** Якість зварного з'єднання залежить від технологічних та металургійних факторів. Технологічними факторами є: сила зварювального струму, напруга дуги та швидкість зварювання, металургійними – графітизація, видалення вуглецю та карбідоутворення. Не допускається відбілювання чавуну та загартування зварювального шва.

Зварювання проводять на щадних режимах при силі струму 90...120 А, електродами малого діаметра (3 мм), короткими валиками (довжиною 40...50 мм) з охолодженням кожного валика до температури 330...340 °C. Це призводить до зниження частки основного металу в металі шва і зварювальних напруг, які додатково знижують проковування валиків шва відразу після закінчення зварювання.

До складу зварювальних матеріалів вводять вуглець, кремній, алюміній, титан, нікель, мідь, які сприяють повнішому процесу графітизації, тобто щоб вуглецю у зв'язаному стані залишилася мінімальна кількість. В результаті одержують м'якшу перлітно-феритну структуру.

При введенні вольфраму, хрому, ванадію, молібдену останні пов'язують вуглець у важкорозчинні карбіди.

Холодне зварювання ведуть електродами: сталевими, сталевими зі спеціальними покриттями (з карбідоутворюючими елементами в покритті, із захисно легуючими покриттями, з окислювальними покриттями), сталевими із застосуванням шпильок, чавунними, комбінованими, мідними, з монель-металу, із нікелевого аустенітного чавуну.

### Зварювання сталевими електродами без особливих покриттів.

Застосовується при ремонті невідповідальних чавунних деталей невеликих розмірів із малим обсягом наплавлення. Зварне з'єднання має неоднорідну структуру, недостатню щільність та низьку міцність.

Тріщини в чавунній деталі заварюють багат шаровим наплавленням – методом відпалювальних валиків, що дозволяє уникнути утворення тріщин у зварювальному шві. Метод відпалювальних валиків був запропонований наприкінці 50-х років минулого століття винахідником Л. І. Вітігловим, що дозволило суттєво розширити сферу використання сталевих електродів.

Уздовж тріщини роблять V-подібну обробку кромки (рис. 4.1, а). Спочатку на одну з кромки врозкид наносять короткими ділянками завдовжки 15...25 мм (рис. 4.1, б) підготовчі 1...3 і валики, що відпалюють 4 і 5 (рис. 4.1 б, в), потім на іншу кромку - відповідно валики 6...10, не з'єднуючи їх.

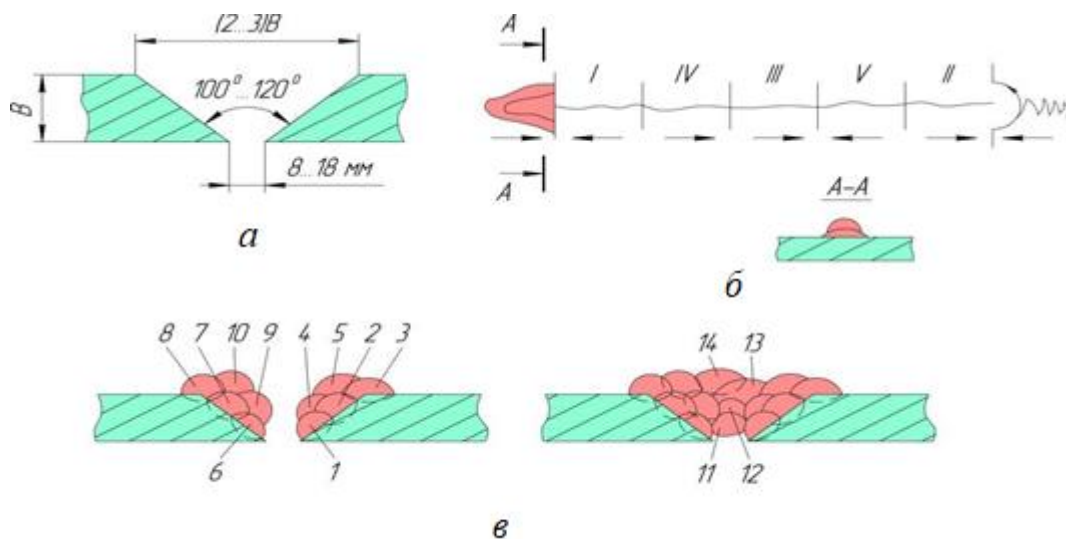


Рис. 4.1. Схема методу відпалювальних валиків:

1...3, 6...8 – підготовчі валики; 4, 5, 9 та 10 – відпалювальні валики;

11...14 – сполучні валики

При накладенні валика на підготовчий, останній більше прогрівається і згодом остигає з меншою швидкістю. Значна частка цементиту розпадається, виділяється графіт, а в загартованій частині шва відбувається частковий відпуск і нормалізація. Завдяки попередньому валику відпалюючий валик менше схильний до загартування, в результаті значно знижується твердість всього шва та частково знімаються залишкові напруги.

Валики наплавляють заввишки 4...5 мм, покриваючи попередній на 60...70 %. Після накладання валиків по всій довжині тріщини, деталь охолоджують до температури 70...80 °С, після чого заварюють врозкид проміжки між ними сполучними валиками 11...14.

Метод дозволяє знизити твердість зварювального шва на HRC 20...25, порівняно зі зварюванням без відпалювальних валиків, що дозволяє обробляти його механічною обробкою різанням. Міцність та щільність шва при цьому задовільні.

**Зварювання електродами із захисно-легуючими покриттями.** Перед зварюванням виконують V- або X-подібну обробку кромки. Для рівномірного розігріву деталі зварюють окремими ділянками врозбивку. Довжина окремих ділянок наплавленого зварного шва трохи більше 100...120 мм. Після наплавлення кожної ділянки шов остуджують до температури 60–80 °С. Найкращі результати отримують при зварюванні електродами з покриттями УОНІ-13/45 на постійному струмі зворотної полярності. Зварювання електродами з покриттями ОММ-5 та К-5 виконують як на постійному, так і на змінному струмі.

Зварювання з використанням шпильок і скоб. Застосовується при відновленні відповідальних деталей (гідравлічні та пневматичні циліндри, станини пресів, верстатів та ін.), що працюють при значних навантаженнях та вимагають після зварювання обробки.

Потрібна спеціальна підготовка виробів під зварювання. При товщині деталей більше 5 мм роблять обробку кромки під кутом 45°. У підготовлених кромках просвердлюють отвори, нарізають різьблення та ввертають сталеві шпильки. Шпильки розташовують у шаховому порядку (рис. 4.2).

При товщині деталей до 10 мм діаметр шпильок трохи більше 6 мм. При більшій товщині деталей, що зварюються, діаметр шпильок вибирають за табл. 4.2.

Зварювання виробляють електродами типів Е42, Е42А, Е50 та Е50А на постійному або змінному струмі. Спочатку обварюють шпильки кільцевими швами, потім заплавляють всю обробку.

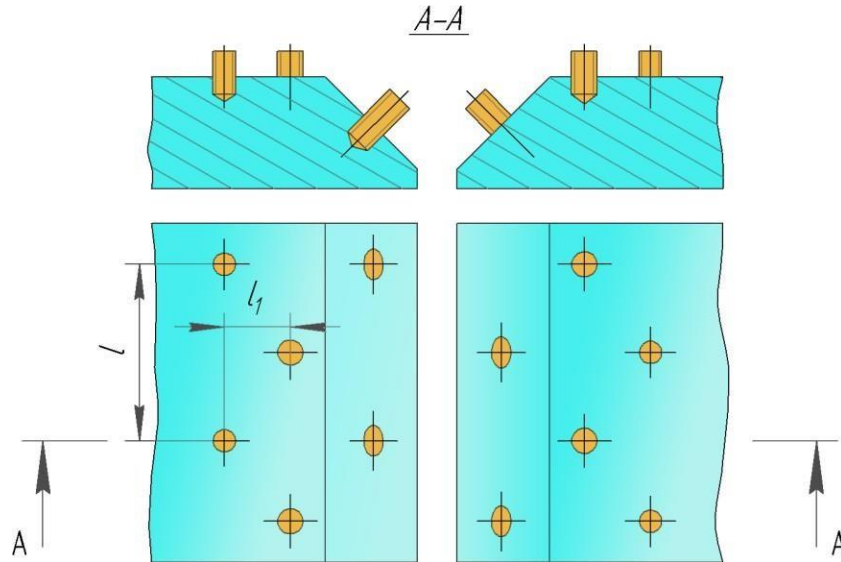


Рис. 4.2. Підготовка чавунних деталей під зварювання за допомогою шпильок

Таблиця 4.2 – Діаметр шпильок залежно від товщини чавунних виробів, що зварюються.

Товщина виробу, мм	Діаметр шпильки, мм	Відстань між шпильками, мм	
		поперек деталі, $l$	вздовж деталі, $l_1$
10...20	10	40...60	5...10
20...25	12	48...50	10...12
25...30	14	50...56	12...15
$\geq 30$	16	50...80	15...20

Зварювання ведуть короткими ділянками по 100...150 мм. У табл. 4.3 наведено режими зварювання.

Таблиця 4.3. – Режимы зварювання за різної товщини чавунного виробу

Товщина металу, мм	Діаметр електроду, мм	Сила стуму, А
До 5	3	90...100
5	4	130...160
до 10	5	180...200

**Зварювання чавунними електродами.** Застосовується для виправлення дефектів у вигляді раковин та тріщин. Електродугове зварювання ведуть прутками, виготовленими з чавуну марки Б. До складу покриттів входить графіт, феросиліцій, алюмінієвий порошок, вуглекислий барій, графіт та крейда. Усі компоненти змішані на рідкому склі.

Метал зварного шва близький за хімічним складом до основного металу, однак у шві та прилеглих до нього зонах відбувається відбіль, що ускладнює подальшу механічну обробку. Режими холодного зварювання чавунними електродами наведено у табл. 4.4.

Таблиця 4.4 – Режими електродугового зварювання чавунними електродами

Товщина зварюваного металу, мм	Діаметр електроду, мм	Сила струму, А
до 15	6	270...300
от 15 до 30	8	300...400
от 30 до 40	10	450...500
понад 40	12	500...650

**Зварювання мідними електродами.** Застосовується для ремонту малогабаритних деталей, що працюють за незначних статичних навантажень.

Електроди виготовляють із мідних стрижнів діаметром 3...6 мм, які потім обгортають низьковуглецевою стрічкою або дротом. На підготовлений стрижень наносять крейдове покриття (80 % крейди, 20 % рідкого скла). Зварювання ведуть на змінному та постійному струмі зворотної полярності. Зварний шов виходить щільним, але недостатньо міцним.

**Зварювання чавуну монель-металом.** Електроди з монель-металу – це мідно-нікелевий сплав (мідь 30 %, нікель 65 %, марганець 1,5...2 % та залізо 3...3,5 %). Спосіб зварювання застосовують, коли від зварного з'єднання не потрібно великої міцності. Зварювання ведуть як електричною дугою, і газовим полум'ям. Електродугове зварювання виробляють на постійному струмі зворотної полярності короткими ділянками довжиною 60...70 мм, врозкид, з проміжним охолодженням та проковуванням кожного валика. Щільність шва виходить задовільною. Зварний шов добре обробляється різальним інструментом.

**Зварювання дротом ПАНЧ-11.** Застосовують під час ремонту базисних деталей машин. Зварювання ведуть відкритою дугою на постійному струмі зворотної полярності без додаткового захисту та підігріву деталі. Метал шва має високу міцність та щільність (межа міцності до 550 МПа).

Рекомендуються такі режими зварювання дротом діаметром 1,2 мм:  
 $I_{св} = 100...140$  А;  $U_{св} = 14...18$  В;  $V_{св} = 0,15...0,25$  см/с.

Для зварювання дротом ПАНЧ-11 застосовують шлангові напівавтомати, призначені для подачі дроту діаметром 1,0...1,2 мм: А-547Р, А-547У, А-825М, серії ПДГ та ін.

**Холодне газове зварювання.** Використовується для зварювання невідповідних деталей із малим обсягом наплавлення. Зварювання ведуть ацетилено-кисневим полум'ям. Як присадковий матеріал використовують сталевий зварювальний дріт Св-08, Св-08А або чавунні прутки марки А. Склад флюсу: технічна бура (прожарена) або суміш із бури (56 %), кухонної солі (22 %) та вуглекислого калію (22 %).

**Напівгаряче зварювання чавуну.** Перед зварюванням деталь підігрівають до температури 300...400 °С, що забезпечує уповільнене охолодження металу шва і запобігає утворенню вибілених зон. Нагрів виробляють у термічних печах, горнах або за допомогою газових пальників ацетиленокисневим полум'ям.

Зварювання ведуть низьковуглецевими сталевими електродами із захисно-легуєчими покриттями типу ОММ-5, МР-3, К-5 та УОНІ-13, сталевими електродами зі спеціальним покриттям, чавунними електродами та ацетиленокисневим полум'ям із застосуванням чавунних присадкових прутків швидкості охолодження - деталі засипають дрібним деревним вугіллям або сухим піском.

**Гаряче зварювання чавуну.** Попередній підігрів дрібних деталей до температури 500...700 °С, а великогабаритних (товщина стінок понад 30 мм) – до 700...800 °С. Нагрівання виробляють у печах, нагрівальних колодязях, горнах або за допомогою індукційних нагрівачів. Зварювання ведуть електродами ЗМЧ-1 та УЗТМ-74 (чавунний пруток Б з покриттям). Через значні обсяги наплавленого металу при гарячому зварюванні застосовують електроди великих діаметрів (8...16 мм). У табл. 4.5 наведено режими зварювання чавунними електродами.

Таблиця 4.5 – Режими зварювання чавунними електродами

Діаметр електроду, мм	8	10	12	16
Сила струму, А	600...700	750...800	1000...1200	1500...1800

Щоб метал постійно перебував у розплавленому стані, зварювання ведуть безперервно. Після зварювання деталь повільно охолоджують разом із нагрівальною піччю. Великогабаритні деталі засипають дрібним деревним вугіллям або накривають азбестовими листами і витримують протягом кількох діб до повного остигання.

При газовому зварюванні як присадковий матеріал використовують чавунні прутки марки А, а для захисту зварювальної ванни застосовують флюси ФСЧ-1 і ФСЧ-2.

Напівгаряче та гаряче зварювання чавунних деталей застосовується на спеціалізованих ремонтних підприємствах.

#### **4.5. Зварювання деталей з алюмінію та його сплавів**

Технічно чистий алюміній має обмежене застосування через низьку міцність і високу пластичність. Більше широке застосування отримали його сплави: дюралюмін (дюраль), що містить 4...5 % міді; АМц – 1...1,5 % марганцю; АМг – 1,5...7 % магнію; силумін, що містить 6...13 % кремнію. Сплави мають значну міцність, що дозволяє їх використовувати для конструкцій, що працюють під навантаженням.

Основні причини, що ускладнюють зварювання алюмінію та його сплавів:

- 1) на поверхні розплавленого металу постійно утворюється тугоплавка плівка оксиду алюмінію  $Al_2O_3$ , яка перешкоджає сплаву між собою частинок металу;
- 2) висока температура плавлення оксиду алюмінію (2050 °С) і низька температура плавлення алюмінію (658 °С) ускладнює управління процесом зварювання;
- 3) коефіцієнт лінійного розширення вдвічі, а теплопровідність втричі більша ніж у сталі, що призводить до появи значних деформацій у деталях, що зварюються;
- 4) метал не має пластичного стану і при нагріванні відразу переходить з твердого стану в рідкий, тому можливе зварювання тільки в нижньому положенні.
- 5) коефіцієнт лінійного розширення вдвічі, а теплопровідність втричі більша ніж у сталі, що призводить до появи значних деформацій у деталях, що зварюються;
- 6) метал не має пластичного стану і при нагріванні відразу переходить з твердого стану в рідкий, тому можливе зварювання тільки в нижньому положенні.

Алюміній та його сплави зварюють за допомогою електродугового, аргонно-дугового та газового зварювання. Перед зварюванням алюмінієві вироби проходять спеціальну обробку: знежирюють поверхню та видаляють плівку окису алюмінію, зачищаючи поверхню сталеву щіткою до блиску.

Попередній підігрів перед зварюванням до 300...400 °С виготовляють для деталей товщиною понад 20 мм.

**Дугове зварювання вугільним електродом.** При товщині листа понад 10 мм роблять обробку кромки під загальним кутом 60...70°. Зварювання ведуть на графітових або сталевих підкладках вугільними або графітовими електродами діаметром 8...15 мм. Зварювальний струм 150...500 А (при товщині деталі, що зварюється, більше 25 мм – 700...900 А). Зварювання ведеться постійним струмом прямої полярності. При зварюванні на основний та присадковий метал наносять флюс. Склади флюсів для зварювання алюмінію наведено у табл. 4.6.

Таблиця 4.6 – Деякі марки флюси для дугового зварювання алюмінію та його сплавів (вміст, %)

Марка флюсу	Криолит	Хлористий калій	Хлористий натрій	Хлористий літій	Фтористий натрій
АФ-А	–	50	28	14	8
АН-1	30	50	20	–	–
АН-4	30	50	–	20	–
ВАМИ	20	50	30	–	–

**Дугове зварювання металевим електродом.** Зварювання проводять електродами ОЗА-1 (технічний алюміній) та ОЗА-2 (сплав алюмінію) на постійному струмі зворотної полярності. Сила зварювального струму 25...32 А на 1 мм діаметра електрода. Після зварювання шов негайно промивають гарячою водою та очищають сталеву щіткою від залишків шлаку.

**Аргонно-дугове зварювання.** Широке застосування в ремонтному виробництві отримало електродугове зварювання неплавким (вольфрамовим) електродом у середовищі аргону. Присадочні алюмінієві прутки вводять у дугу, що горить між деталлю та вольфрамовим електродом. Зварювання ведуть на змінному

або постійному струмі зворотної полярності.

Діаметри електрода *дел* і прутка присадки *дпр* приймають рівним товщині деталі *S*. Силу зварювального струму визначають за формулою:

$$I_{св} = (40...50) \text{ дел, при } S = 1...8 \text{ мм,}$$

$$I_{св} = (50...60) \text{ дел, при } S = 6...12 \text{ мм.}$$

Для аргонодугового зварювання промисловість випускає установки УДАР-300-1, УДАР-500-1 та УДГ-301, УДГ-501.

#### 4.6. Зварювання міді, латуні та бронзи

Труднощі при зварюванні міді та її сплавів:

- 1) велика теплопровідність (у шість разів більша за теплопровідність сталі), інтенсивне відведення тепла від зони зварювання;
- 2) низька температура плавлення та кипіння, велика рідка плинність;
- 3) мала міцність і велика крихкість за високої температури;
- 4) велика теплоємність та необхідність застосування високих теплових режимів;
- 5) хороша розчинність у рідкому металі шкідливих газів (кисень, водень, азот).

**Зварювання вугільним електродом.** Технологія включає попередній підігрів до температури 250–350 °С. Деталі завтовшки до 3 мм зварюють по отбортовці без присадочного металу, більше 3 мм - з прутками присадочними діаметром 2 ... 8 мм з міді марки М1, фосфористої або кремнистої бронзи. Для захисту зварювальної ванни використовують суміш із прожареної бури (94 %) та магнію металевого (6 %). Зварювання ведуть постійним струмом зворотної полярності і лише у нижньому положенні. У табл. 4.7 наведено режими зварювання.

Таблиця 4.7 – Режими ручного зварювання міді вугільним електродом

Товщина металу, мм	1	2	4	6	12
Діаметр електроду, мм	4	6	6	8	10
Сила струму, А	135...180	195...260	250...330	315...430	420...550

**Зварювання металевим електродом.** Зварювання ведуть постійним струмом зворотної полярності, використовуючи електроди з покриттям марок «Комсомолец-100» або ЗТ. Режим зварювання наведено у табл. 4.8.

Таблиця 4.8 – Режими ручного зварювання міді металевим електродом

Діаметр електроду, мм	3	4	5
Сила стуму, А	90...110	120...140	170...190

Для зварювання також використовують прутки з міді М1, М2, М3 або кремнистої бронзи та флюсу ММЗ-2.

**Зварювання серед захисних газів.** Як захисні гази використовують аргон або азот. Зварювання ведуть неплавким вольфрамовим електродом або електродами, що плавляться для виробів товщиною 1,5–20 мм.

Найбільшого поширення набула зварювання неплавким вольфрамовим електродом серед аргону. Як присадковий матеріал використовують прутки з міді М1, М2 і М3. Струм постійний прямої полярності. У табл. 4.9 наведено режими зварювання.

Таблиця 4.9 – Режими ручного аргонодугового зварювання міді вольфрамовим електродом

Товщина виробу, мм	1,6	3,2	6,4	10	12	16
Діаметр присадочного прутка, мм	2,4	3,2	4,8	4,8	6,4	6,4
Діаметр електроду, мм	2,4	3,2	4,8	4,8	4,8	4,8
Сила струму, А	80–110	200	300	350	400	400
Витрата аргону, л/хв	2,8–3,3	6,0	7,0	7,0	8	8

Зварювання міді електродами, що плавляться, ведуть на постійному струмі зворотної полярності. Електродами є дріт із міді марки М1, кремнемарганцевої бронзи БрКМц3-1 або олов'яно-цинкової бронзи БрОЦ4-3.

**Газове зварювання міді.** Цей спосіб зварювання набув найбільшого поширення. Присадочний матеріал – прутки з міді М1, М2 та М3. Як флюс використовують буру, борну кислоту або суміш з прожареної бури (50 %) і борної кислоти (50 %).

Після зварювання будь-яким способом зварні шви піддають проковування. Для поліпшення пластичних властивостей зварної сполуки застосовують відпал при температурі 500...600 °С.

**Зварювання латуні.** Зварювання латуні супроводжується випаровуванням цинку, що призводить до пористості шва. Пари цинку токсичні. Вищевказані причини ускладнюють зварювання латуні. Зварювання ведуть вугільним або металевим електродом, а також газовим зварюванням.

При зварюванні вугільним електродом режими зварювання аналогічні режимам зварювання міді. Присадковий метал – прутки з латуні ЛК62-05, ЛК80-3, ЛМц58-2, ЛМцЖ55-3-1 або бронзи БрОМЦА8-0,7-0,7. Флюс – прожарена бура або 50 % бури та 50 % борного шлаку.

Зварювання латуні металевими електродами застосовують для листів завтовшки понад 5 мм. Електродні стрижні мають такий самий хімічний склад як для зварювання вугільним електродом. Покриття електродів двошарове: перший шар завтовшки 0,2...0,3 мм складу: 30 % марганцевої руди, 30 % титанового концентрату, 15 % феромарганцю, 5 % сірчанокислого калію, 20 % крейди; другий шар завтовшки 0,8...1,1 мм складу: борний шлак на рідкому склі.

Режими зварювання: при діаметрі електрода 5 мм величина зварювального струму повинна бути 250...280 А, при діаметрі електрода 6 мм величина зварювального струму – 280...320 А, при діаметрі електрода 8 мм величина зварювального струму – 350...400 А.

Газове зварювання латуні набуло широкого застосування. Режими зварювання та флюси аналогічні тим, що для зварювання міді. Зварювання, для зменшення випаровування цинку, ведуть окислювальним полум'ям з надлишком кисню до 30...40 %.

Деталі завтовшки понад 10 мм перед зварюванням підігрівають до температури 300...500 °С. Після зварювання шви піддають проковуванню і подальшому відпалу при 600 ... 700 °С з повільним охолодженням.

**Зварювання бронзи.** Зварювання бронзи ведуть вугільним або металевим електродом, а також газовим полум'ям. Найбільш поширені бронзи: олов'яниста, алюмінієва, марганцевиста, фосфориста, свинцева.

**Зварювання вугільним електродом.** Присадковий метал - литі прутки того ж складу, що й основний метал. Як флюс використовують буру або суміш з бури (50 %) і борної кислоти (50 %). Зварювання ведуть постійним струмом прямої полярності. Масивні деталі перед зварюванням підігрівають до температури 350...450 °С.

**Зварювання металевим електродом.** При зварюванні олов'янистої бронзи використовують електроди, стрижні яких мають склад: 8 % цинку, 6 % свинцю, 3 % олова, 0,2 % фосфору, 0,3 % заліза, 0,3 % нікелю, решта – мідь. Склад покриття: 1 % алюмінію, 70 % мармуру, 15 % графіту. Товщина покриття – 1,2...1,5 мм набік. Зварювання ведуть постійним струмом зворотної полярності. Попереднє підігрів до 250...300 °С. При зварюванні безолов'янистих бронз склад стрижня електрода має бути таким самим, як і склад основного металу.

**Аргонно-дугове зварювання** вольфрамовим електродом, що не плавиться, ведеться постійним струмом прямої полярності. Як присадковий матеріал використовують прутки того ж складу, що і основного металу.

**Газове зварювання.** Зварювання ведуть нормальним полум'ям. Як присадковий матеріал використовують прутки хімічного складу, близького до основного металу. При зварюванні алюмінієвих бронз використовують флюси для зварювання алюмінію, а інших бронз – флюси, призначені для зварювання міді. Рекомендується попередній підігрів до 350...450 °С.

### **Контрольні запитання**

1. Что означает зварюваність?
2. Як впливають на зварюваність елементи, що входять до складу сталей?
3. Які особливості зварювання вуглецевих і легованих сталей?
4. Як зварюють марганцеві сталі?
5. Як зварюють інструментальні сталі?
6. Які причини, що ускладнюють зварювання чавуну?
7. Які розрізняють способи зварювання чавуну?
8. Які використовують способи газового зварювання чавуну?
9. Якими способами зварюють алюміній і його сплави?

## 5. ЕЛЕКТРОІСКРОВА ОБРОБКА МЕТАЛІВ

До видатних відкриттів ХХ століття належить винахід вчених Лазоренко Бориса Романовича і Наталії Йосафівни, принципово нового способу обробки металів, сплавів та інших струмопровідних матеріалів, а саме електроіскрової обробки.

Цей спосіб, як відомо, заснований на використанні висококонцентрованих електричних розрядів для знімання з заготовки, що обробляється, або нанесення на неї матеріалу. Цей спосіб справді відкрив нову еру в промислових технологіях, забезпечивши використання електричної енергії безпосередньо для формоутворення деталей з будь-яких струмопровідних та напівпровідникових матеріалів, незалежно від їх фізико-хімічних та механічних властивостей, а також зміцнення та легування їх поверхонь.

### 5.1. Електроіскрове легування (ЕІЛ)

*Закономірності легування.* При зближенні анода і катода зростає напруженість електричного поля, і при певній відстані між ними виникає іскровий електричний розряд (рис. 5.1, а). Через утворений канал провідності пучок електронів сфокусовано вдаряється об поверхню анода і нагріває її до оплавлення. Від анода відокремлюється крапля розплавленого матеріалу і рухається до катода, ви- переджаючи анод (рис. 5.1, б).

ю

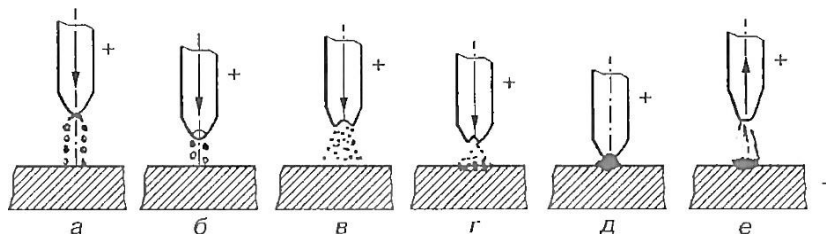


Рис. 5.1. Схема процесу електроіскрового легування

Крапля нагрівається до високої температури, закипає і «вибухає». Електричне коло розривається, зусилля стиснення електромагнітного поля зникають, й утворені

частинки вилітають широким пучком (рис. 5.1, в). Розплавлені частинки, потрапивши на катод, зварюються з ним і частково проникають у його поверхню (рис. 5.1, з). За частинками рухається анод і крізь розігріті частинки, які розташовані на катоді, проходить другий імпульс струму, який супроводжується механічним ударом анода (рис. 5.1, д).

При механічному контакті електродів частинки зварюються між собою, тонкий шар поверхні катода нагрівається. При цьому, крім дифузійних процесів, можуть відбуватися хімічні реакції між частинками і матеріалом катода. Механічний удар анода по покриттю збільшує його щільність, однорідність, міцність зчеплення з основою. Далі анод рухається вгору (рис. 6.20, е), а на поверхні катода залишається покриття, яке складається з матеріалу анода і продуктів його взаємодії з матеріалом катода, а також з навколишнім середовищем.

На рис. 5.2 наведено основні схеми утворення легованого шару при ЕІЛ.

Електроерозійна стійкість матеріалів у процесі ЕІЛ визначається насамперед енергією зв'язку між атомами. Важливою характеристикою міцності таких зв'язків є характеристична температура, яка визначається за рівнянням Ліндемана:

$$\theta = 137 \sqrt{\frac{T_{\text{пл}} \rho^{2/3}}{M^{5/3}}} \quad (5.1)$$

де  $T_{\text{пл}}$  – температура плавлення, К;  $\rho$  – густина, г/см<sup>3</sup>;  $M$  – молекулярна маса матеріалу.

Зі зростанням величини  $\theta$  збільшується ерозійна стійкість матеріалу. Ерозійна стійкість великою мірою визначається комплексом теплофізичних властивостей матеріалів.

Для кількісної оцінки ерозійної стійкості запропоновано формулу:

$$K = c \rho \lambda T_{\text{пл}}^2 \quad (5.2)$$

де  $K$  – коефіцієнт ерозійної стійкості матеріалу (чим більше значення  $K$ , тим вища стійкість);  $c$  – теплоємність, Дж/(кг моль К);  $\rho$  – густина, кг/м<sup>3</sup>;  $\lambda$  – теплопровідність, Вт/(м К);  $T_{\text{пл}}$  – температура плавлення, К.

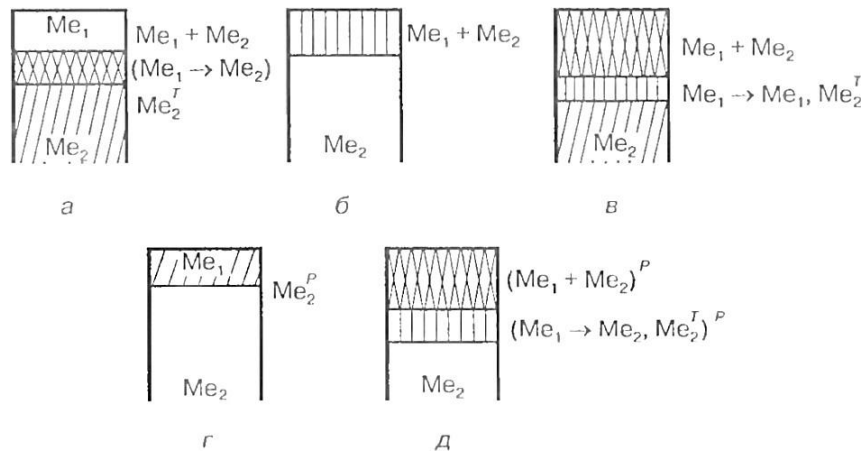


Рис. 5.2. Основні схеми утворення легованого шару при ЕІЛ:

$Me_1$  – матеріал анода,  $Me_2$  – матеріал катода;  $Me_1 - Me_2$  – дифузія матеріалу анода в катод;  $Me_2$  – термомеханічна обробка матеріалу катода;  $Me_1 + Me_2$  – утворення сполучень розчинів;  $(Me_1 + Me_2)^P$  – імпульсна дія механічних навантажень на матеріалах покриття

Згідно з формулою (5.2) за розрахунковими значеннями коефіцієнта  $K$  можна скласти ряд металів у міру збільшення їх ерозійної стійкості:

$$Ti - Zr - V - Ni - Fe - Co - Cr - Nb - Cu - Ta - Mo - W.$$

Для тугоплавких матеріалів з великим модулем пружності і малою пластичністю в ефекті ерозії разом із процесами плавлення, випаровування і гідродинамічного викиду значну роль відіграє крихке руйнування поверхні внаслідок термічних напружень. При цьому частка руйнування в електроерозійному ефекті зростає зі збільшенням модуля пружності і температури плавлення матеріалів.

Критерій ерозійної стійкості  $S$  :

$$S = 42,68 \frac{T_{пл} \lambda}{E \alpha} (1 - \mu), \quad (5.3)$$

де  $T_{пл}$  – температура плавлення, К;  $\lambda$  – теплопровідність, Вт/(м К);  $E$  – модуль нормальної пружності, кг/м<sup>2</sup>;  $\alpha$  – коефіцієнт термічного розширення;  $\mu$  – коефіцієнт Пуассона.

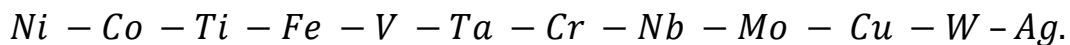
Характеристики відносної ерозійної стійкості металів (за критерієм

Альбінські), розраховані за формулою (5.3), наведені в табл. 5.1.

Таблиця 5.1. Характеристики відносної ерозійної стійкості металів

Метал	$E \cdot 10^6$ , кг/см <sup>2</sup>	$\alpha \cdot 10^6$ , К <sup>-1</sup>	$T_{пл}$ , °С	$\lambda \cdot 10^3$ , Вт/м · К · с	Коефіцієнт Пуасона, $\mu$	Критерій, $S$
Ti	0.961	9.2	1665	52	0.36	270
Zn	0.684	9.9	1855	68	0.35	870
V	1.470	6.15	1917	72	0.35	427
Nb	1.000	7.9	2497	105	0.39	870
Ta	1.770	7.5	2997	105	0.35	650
Cr	2.450	6.25	1903	200	0.35	690
Mo	3.290	6.6	2617	300	0.31	1156
W	4.070	5.5	3377	310	0.30	1370
Fe	2.110	10.7	1529	170	0.28	360
Co	2.090	13.5	1495	162	0.31	263
Ni	1.960	13.2	1455	155	0.32	254
Cu	1.290	16.61	1083	950	0.35	1310
Ag	0.800	18.62	961	1050	0.37	1800

За збільшенням критерію  $S$  метали можна розмістити в такий ряд:



Формування і властивості покриттів. Процес формування покриттів при ЕІЛ залежить від таких основних факторів: природи матеріалів анода і катода, їх поведінки при електроіскровому розряді, електричних параметрів процесу, складу навколишнього середовища, часу обробки.

Характерним є явище, коли при формуванні шару збільшення часу обробки приводить не до зростання товщини, а навпаки, починаючи з певного моменту, – до її зменшення. Це пояснюється тим, що в процесі ЕІЛ змінюються хімічний склад катода і його фізико-механічні властивості, характер тепло- і масообміну між матеріалами анода і катода.

Процес легування в часі можна поділити на два етапи: протягом першого етапу спостерігається безперервне збільшення маси катода, протягом другого – відбувається періодичне зменшення і збільшення його маси.

За характером взаємодії із залізом і вуглецевими сталями (катодом) тугоплавкі метали (анод) можна умовно поділити на дві основні групи: метали, що утворюють необмежені тверді розчини – V, Cr, Co, Ni і метали, які утворюють обмежені розчини – Ti, Zr, Nb, Ta, Mo, W, Hf.

У табл. 5.2 наведені результати взаємодії анода (тугоплавких металів) і катода (сталі 3) залежно від режимів легування.

Таблиця 5.2 – Зміни характеристик поверхонь електродів після електроіскрового легування

Матеріал анода	Питомний час обробки, хв/см <sup>2</sup>	Глибина проникнення матеріалу катода в анод, мкм	Максимальний вміст матеріалу катода в аноді, %	Глибина проникнення матеріалу анода в катод, мкм	Максимальний вміст матеріалу анода в катоді, %
Ti	2	24	6	10	30
Ti	5	72	11	20	55
Zr	2	20	4	15	63
Zr	5	22	5	15	90
Hf	2	-	-	18	70
Hf	5	-	-	24	78
Nb	2	12	9	17	73
Nb	5	15	11	30	85
Ta	2	9	4	18	70
Ta	5	21	7	24	80
Mo	2	24	2	20	98
Mo	5	32	6	50	100
W	2	12	2	35	100
W	5	15	10	66	93

Як бачимо, від природи матеріалу анода істотно залежить його взаємодія з матеріалом катода, тобто від його електронного стану, структури, фізико-хімічних властивостей. Практично в усіх випадках максимальний вміст матеріалу анода в катоді значно вищий, ніж катода в аноді. Особливо чітко це спостерігається при легуванні сталі 3 (катода) такими металами, як цирконій, тантал, молібден, вольфрам.

Як правило, на аноді існують дві зони. Перша зона створена сумісною кристалізацією матеріалів анода і катода і простягається від робочої поверхні анода

до тієї ділянки, в якій вміст заліза (матеріалу катода) мінімальний. У цій зоні внаслідок інтенсивного перемішування в мікріванні спостерігається різка зміна вмісту тугоплавкого металу на глибині шару.

Друга зона на аноді характеризується значними включеннями заліза на великій глибині. Це пояснюється більш високою температурою анода, ніж катода, і значним прискоренням процесів дифузії.

## **5.2. Електроіскрове нарощування**

При електроіскровій обробці металевих поверхонь використовують енергію імпульсних іскрових розрядів між електродами в газовому або рідкому середовищі. Сутність нанесення покриттів і зміцнення поверхонь полягає в тому, що іскровий розряд руйнує матеріал інструменту (катода), а продукти його ерозії переносяться в газовому середовищі на заготовку (анод). Перенесення металу на поверхню заготовки формує покриття хімічного складу, близького до складу матеріалу електрода. Покриття має міцне зчеплення з основою, оскільки його утворення супроводжується дифузійними процесами при високій температурі.

Покриття складається з трьох шарів. Перший шар – це термодифузійна зона покриття і основного металу. В шарі утворюються складні хімічні сполуки, нітриди і карбонітриди. Другий, що не трапляється (білий) шар являє собою твердий розчин легуючих або карбідоутворюючих елементів, що входять до складу електродного матеріалу. Третій – зовнішній шар сформований з фрагментів застиглого металу і оксидів.

Нанесення твердих зносостійких покриттів товщиною до 0,1 мм відносять до зміцнення, а нанесення будь-яких покриттів більшої товщини – до наплавлення. При відновленні поверхонь, що беруть участь у терті, можна наносити покриття товщиною до 0,25 мм, а на поверхні нерухомих з'єднань – до 1,5 мм.

За допомогою електроіскрової обробки відновлюють зношені деталі і зміцнюють різальні кромки інструментів (різців, фрез, штампів та ін) нанесенням

твердих сплавів, а також змінюють властивості поверхонь деталей шляхом надання їм протикорозійних, жаростійких, фрикційних і антифрикційних якостей. Відновлюють шийки валів і осей, поверхні отворів під підшипники, зміцнюють тертьові поверхні замість термообробки. Спосіб одержав поширення при відновленні деталей паливної апаратури дизелів і золотників гідророзподільників, виготовлених із сталі 15X і мають твердість 56-63 HRC. Стійкість ріжучої частини інструментів в результаті зміцнення збільшується до двох разів. Зносостійкість деталей після електроіскрового зміцнення підвищується в 3–8 разів.

Для електроіскрового зміцнення застосовують матеріали (електроди): метало-керамічні тверді сплави ВК6-ОМ, ВК-8, Т15К6, ТТ15К10-МУ, Т30К4, Т60К4, ТН-20 круглого і прямокутного пере-різу; мідний дріт; бронзу Бр.АЖ10-3, Бр.АЖМц10-3-1,5, Бр.АЖН10-4-4, ВБр.5М та ін.; аналог реліта ДКВ; алюмінієво-оло в'янисто-мідний сплав АОМ; сплави ВЖЛ-2, ВЖЛ-2М, ВЖЛ-13, ВЖЛ-17, В56, ЖСН-Л; сталі 65Г, 20Х13, 95Х18, ШХ-15 і ін. Застосовують також сормайт, стеллит і вольфрам.

Покриття наносять конденсаторними установками, наприклад «Елітрон-344» з електромагнітними вібраторами, що забезпечують періодичний контакт інструменту і заготовки (рис. 5.3).

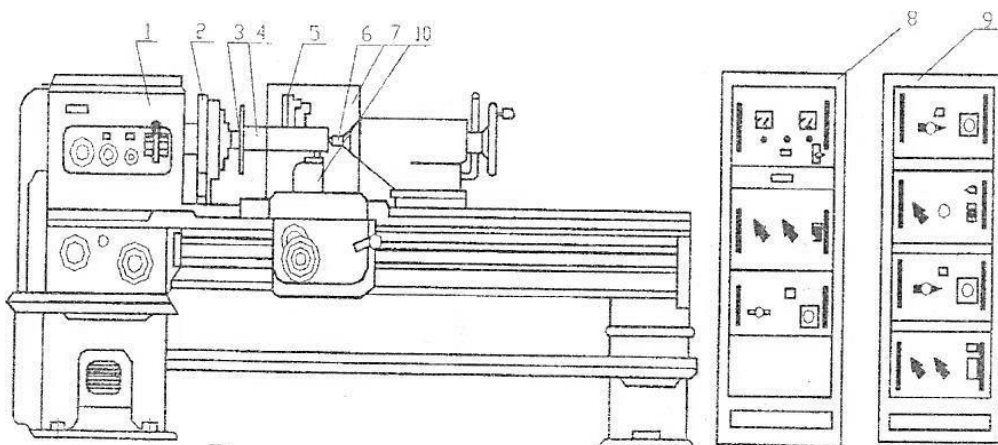


Рис. 5.3. Схема установки «Елітрон-344»:

1 – токарний верстат 1К62; 2 – трикулачковий патрон зі струмознімачем; 3 – оправка; 4 – оброблювана деталь; 5 – обробна головка; 6 – центр; 7 – екран; 8, 9 – генератори; 10 – обкатник

Режими нанесення покриттів наведено в табл. 5.3.

Таблиця 5.3. Режими електроіскрової обробки

Режим	Сила робочого струму, А	Сила струму короткого замикання, А	Напруга, В
Чистовий	0,5-0,7	2,5	15
	0,8-1,2	3,0	25
Середній	1,2-1,5	3,5	45
	1,6-2,0	4,5	75
Чорновий	2,0-2,5	4,8	140
	2,6-3,0	5,0	200

Найбільше поширення отримали установки моделей ЕФІ-46А, -23М, -25М, -54А. Застосовуються модернізовані мобільні прилади типу «Елітрон»: «Елітрон-22А», «Елітрон-22Б», «Елітрон-22БМ», «Елітрон-52БМ» і дві моделі установок «Вестрон»: «Вестрон-005» і «Вестрон-006».

Технологічні переміщення інструменту виконують як вручну, так і з застосуванням засобів механізації. В обох випадках, переміщення електрода, тривалість обробки, режими по струму, амплітуді і частоті вібрації електрода вибирають так, щоб покриття мало максимальну суцільність, рівномірну товщину і рівну поверхню, що відбиває світло.

### Контрольні запитання

1. Які закономірності електроіскрового легування?
2. Охарактеризуйте способ електроіскрової обробці?
3. Які матеріали використовують для електроіскрового зміцнення?
4. Які етапи у процесі електроіскрового легування?
5. Сутність нанесення покриттів і зміцнення поверхонь способом електроіскрової обробки?
6. Від яких факторів залежить процес формування покриттів?

## 6. МОДИФІКУВАННЯ ПОВЕРХНІ

### 6.1. Модифікування поверхні лазером

**Лазер** або **оптичний квантовий генератор** – це пристрій, який перетворює світлову енергію в енергію когерентного, монохроматичного потоку випромінювання. Внаслідок надання зовнішньої енергії атоми активної речовини робочого тіла переходять у збуджений стан. Через деякий проміжок часу збуджений атом випромінює одержану енергію у вигляді фотона (рис. 6.1).

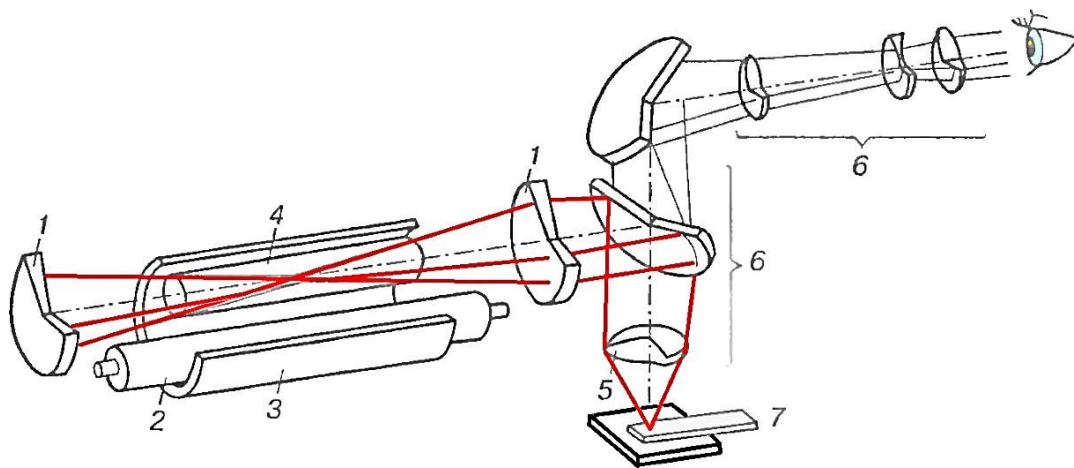


Рис. 6.1. Схема лазерної установки:

1 – дзеркало резонатора; 2 – лампа надання зовнішньої енергії; 3 – дзеркальна порожнина освітлювача; 4 – робоче тіло; 5 – лінза; 6 – мікроскоп; 7 – виріб

Фотони виникають у процесах переходу атомів, молекул, іонів і зі збуджених станів у стабільніші стани з меншою енергією. При певному рівні збудження відбувається лавиноподібний перехід збуджених атомів активної речовини випромінювача у стабільніший стан. Це створює когерентне світлове монохроматичне випромінювання, яке випускається у вигляді вузького спрямованого пучка.

### Властивості зміцнених матеріалів

Лазерне зміцнення підвищує зносостійкість пар тертя, які працюють в умовах

сухого тертя і в абразивно-мастильному середовищі. При цьому спостерігається підвищення зносостійкості не тільки зміцненої поверхні, а й контртіла.

Підвищення зносостійкості спостерігається внаслідок значного зменшення (іноді до 2 разів) коефіцієнта тертя. На рис. 6.2 наведено залежності швидкості зношування  $V$  і коефіцієнта тертя  $\mu$  сталі 40Х.

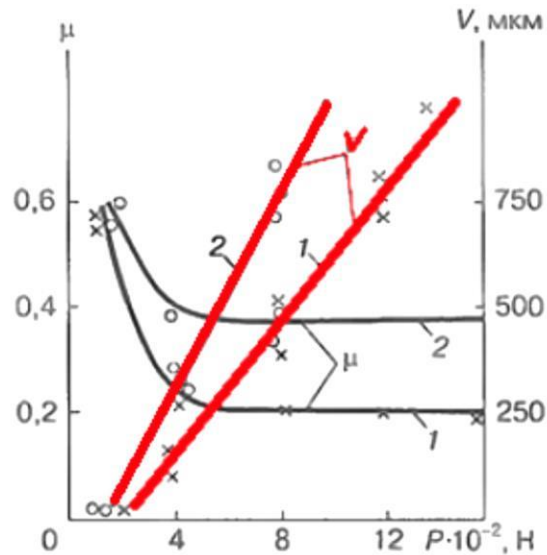


Рис. 6.2. Залежність швидкості зношування  $V$  і коефіцієнта тертя  $\mu$  від тиску:

- 1 – сталь 40Х, яка зміцнена лазерним опроміненням;
- 2 – сталь 40Х, загартована за стандартною методикою

Механічні властивості матеріалів, такі, як границя міцності  $\sigma_b$ , границя плинності  $\sigma_{0.2}$ , ударна в'язкість  $a_n$ , також змінюються внаслідок лазерного опромінення. Наприклад, для загартованої сталі ударна в'язкість знижується після лазерної обробки від 5 до 1,32 МДж/м<sup>2</sup>.

### Лазерне легування матеріалів

Лазерне легування полягає в насиченні матеріалу легуючими елементами допомогою дифузії попередньо нанесеного шару під впливом лазерного пучка. При цьому досягається висока концентрація легуючих компонентів у поверхневих шарах матеріалів (рис. 6.3).

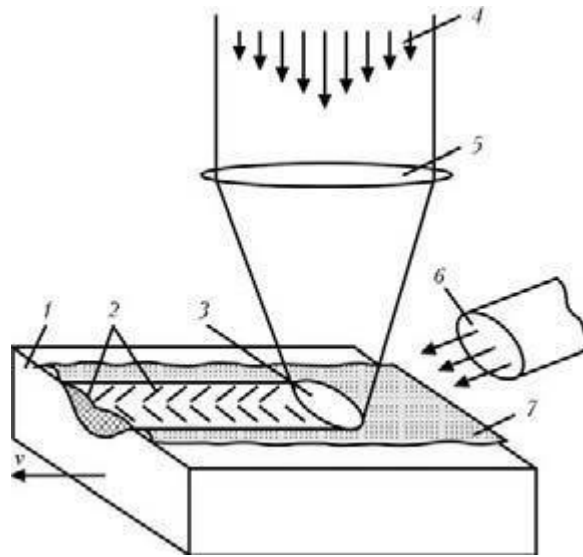


Рис. 6.3. Схема процесу лазерного легирования:

- 1 – образец, движущийся со скоростью  $v$ ; 2 – легированная дорожка;  
 3 – ванна расплава; 4 – лазерный пучок; 5 – фокусирующая система;  
 6 – защитный газ; 7 – легующая обмазка

Ступінь зміцнення залежить як від типу легуючого елемента (елементів), так і від властивостей матричного матеріалу. Так, при легуванні заліза сполуками, які містять вуглець, досягається значне підвищення його концентрації в залізі з утворенням твердого розчину залізо-вуглець.

Оброблена ділянка поверхні являє собою білий шар із рівномірною мікротвердістю, яка досягає 1400 МПа. За ним йде термооброблений шар із мікротвердістю 1000 МПа.

При легуванні армко-заліза тугоплавкими металами Ni, Mo, V, Nb, Ta в умовах імпульсного опромінення спостерігається значна зміна мікротвердості, однак для різних легуючих елементів закономірності зміни мікротвердості різні (рис. 6.4). У зоні дії лазерного випромінювання наявні тверді розчини на основі заліза.

Кількість легуючого елемента в зоні дії лазерного випромінювання значно перевищує границі розчинності при однакових умовах.

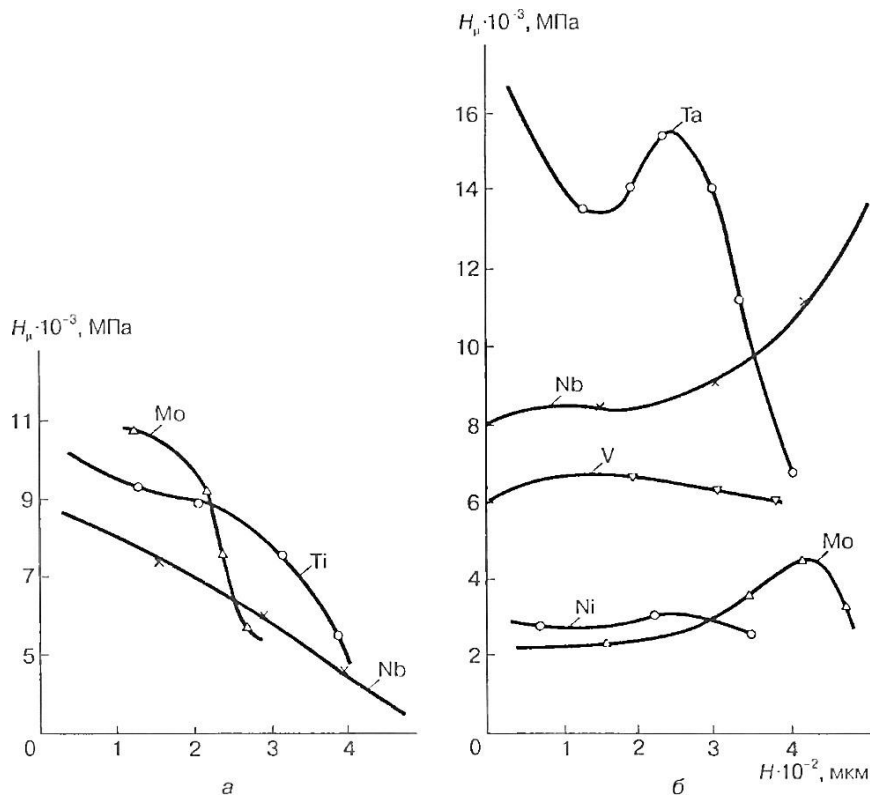


Рис. 6.4. Вплив типу легуючого елемента і матричного матеріалу на мікротвердість легованого шару:

*a* – матриця сталь ШХ15; *б* – матриця армко-залізо

Якщо на чистому залізі існує одна чітко локалізована зона, яка за своїми властивостями відрізняється від матричного матеріалу, то на сталі ШХ15 в зоні дії лазерного випромінювання спостерігається утворення трьох чітко виражених зон.

Одна з цих зон (найбільша за об'ємом) є твердим розчином легуючого елемента на основі заліза, далі послідовно розміщені зона загартування і зона відпуску. Глибина зони легування досягає 300–400 мкм.

Тип легуючого елемента впливає на твердість легованого шару. У зоні лазерної дії вона вища при легуванні молібденом і титаном, ніж при легуванні ніобієм. Якщо легуючими елементами є легкоплавкі метали або сполуки, то ефективність лазерного легування знижується.

В умовах лазерного легування для низки систем пересичених твердих розчинів можна отримати різні метастабільні фази і структурні стани. Так,

легування при імпульсному опроміненні технічного заліза молібденом змінює концентрацію легуючого елемента (Mo) за масою від 28 до 36 %. Це в 5–6 разів перевищує рівень концентрації, характерної для рівноважних умов систем залізо-молібден при температурах не вищих, ніж 500 °С.

Розподіл легуючого елемента локалізований межами зони лазерної дії, і легуючі елементи практично не проникають за межі зони, тому можна розрахувати максимальну концентрацію елемента в зоні, що опромінюється.

Якщо припустити, що контур елементарної розплавленої зони при дії імпульсного випромінювання являє собою параболоїд обертання з твірною, яка відповідає ізотермі плавлення матеріалу, то

$$\frac{K_1}{K_2} = \frac{V_1 + V_2}{V_2}$$

$$K_2 = \frac{K_1 V_1}{V_1 + V_2}$$

де  $K_1$  і  $V_1$  – відповідно концентрація елемента в попередньо нанесеному шарі і об'єм цього шару;  $K_2$  і  $V_2$  – відповідно концентрація легуючого елемента в розплавленому об'ємі матриці і об'єм розплавленого металу.

## 6.2. Модифікування поверхні електронним променем

Електронний промінь – потік електронів, що випромінюються одним джерелом і рухаються по близьких траєкторіях у певному напрямку. Електронний промінь створюється спеціальним приладом – електронною гарматою (рис. 6.5, поз. 1), за допомогою якої отримують вузькі електронні пучки з великою густиною енергії. Для забезпечення вільного руху електронів від катода до анода і далі до виробу, а також для того, щоб запобігти утворенню дугового розряду між електродами, в установці створюється глибокий вакуум (порядку  $1 \cdot 10^{-2}$  Па) (рис. 6.5).

### Особливості модифікування поверхні

При електронно-променевої обробці поверхні можливі декілька видів її стану (рис. 6.6). Оплавлення і наступне твердіння з невеликими швидкостями здійснюєть-

ся для рафінування (рис. 6.6, а). металу поверхні заготовки і усунення поверхневих дефектів.

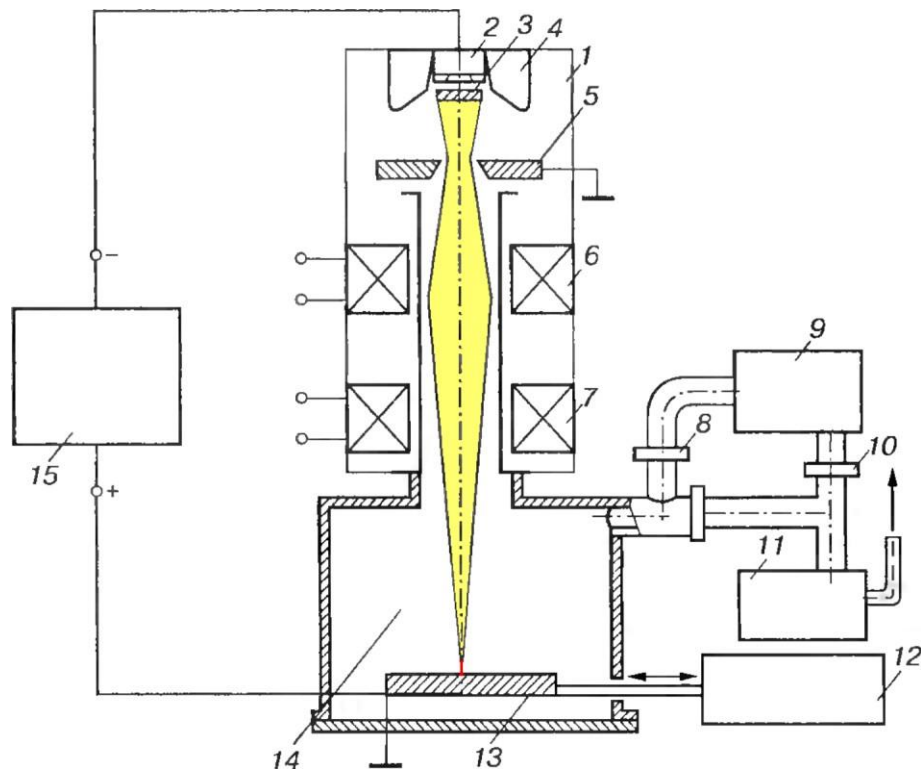


Рисунок 6.5 Схема електронно-променевої установки:

- 1 – електронна гармата; 2 – нагрівник; 3 – катод; 4 – додатковий електрод;  
 5 – анод; 6 – магнітна лінза; 7 – система відхилення; 8, 10 – затвори;  
 9 – дифузійний насос; 11 – форвакуумний насос; 12 – привід маніпулятора; 13 – виріб; 14 – вакуумний об'єм; 15 – високовольтне джерело постійного струму

Загартування сплавів з твердого стану (рис. 6.6, б) здійснюється зі швидкостями нагрівання й охолодження приблизно  $10^2$ – $10^4$  К/с. Практичне значення мають процеси поверхневого легування (рис. 6.6, г), наплавлення матеріалу (рис. 6.6, е), обробки попередньо нанесених на метал покриттів (рис. 6.6, ж), нагрівання шарів після хіміко-термічної обробки. Ударне зміцнення (рис. 6.6, и) відбувається за проміжок часу  $10^{-6}$ – $10^{-8}$  с.

При електронно-променевому оплавленні в режимах рафінування і загартування з рідкого стану переплавлення сталей та сплавів приводить до виділення газів і 30–75 % неметалевих включень.

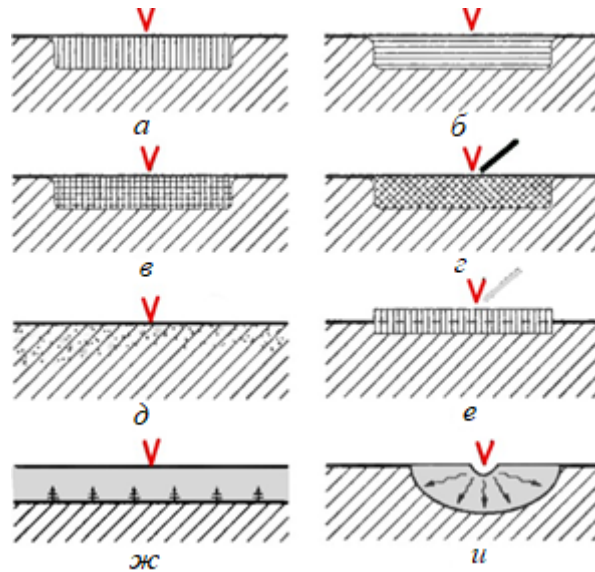


Рис. 6.6. Схеми електронно-променевого модифікування поверхні:

*а* – рафінувальне оплавлення; *б* – загартування з твердого стану;  
*в* – модифікування за фазовим перетворенням; *г* – легування; *д* – дифузія;  
*е* – наплавлення; *жс* – обробка попередньо нанесених покриттів; *и* – ударне зміцнення

Розподіл включень є більш рівномірними і вони зменшуються за розмірами. Це покращує комплекс фізико-механічних характеристик матеріалів: підвищуються густина, ударна в'язкість, теплопровідність (рис. 6.7), контактне витримування, зменшується схильність до гарячого тріщино-утворення. Наприклад, стійкість інструменту зі сталей електронно-променевого переплавлення для холодного і гарячого деформування зростає на 70–155 %.

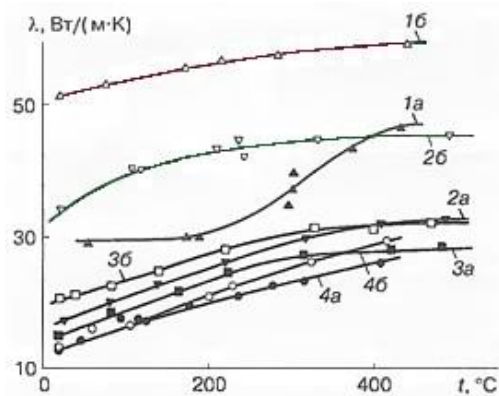


Рис. 6.7. Температурна залежність коефіцієнта теплопровідності сталей:

1 – 5ХНМ; 2 - ШХ15СГ; 3 – 4Х5МФС; 4 – ДИ23 у вихідному стані (*а*)  
і після електронно-променевого оплавлення (*б*)

### 6.3. Іонна імплантація

Іонна імплантація – процес, коли практично кожен елемент може бути вкорінений у приповерхневу область будь-якого твердого тіла - мішені, яку розміщено у вакуумній камері, за допомогою пучка високошвидкісних іонів, що мають енергію кілька мегаелектрон-вольт. Іони вкорінюються в матеріал мішені на глибину від 0,01 до 1 мкм, втрачаючи енергію в процесі зіткнень з атомами основи.

Найбільшого поширення отримали установки малих і середніх доз (рис. 6.8) (інтенсивність пучка 500–800 мкА), в яких приймальна камера заземлена, що дуже зручно в роботі.

Оптимальним у вакуумних системах для іонного легування вважають вакуум приблизно 10–4 Па.

Складну гамму взаємодій можна звести до двох незалежних механізмів - пружного розсіювання на ядрах і непружної взаємодії з електронними оболонками. Основний внесок у розсіювання на електронах дають зовнішні оболонки.

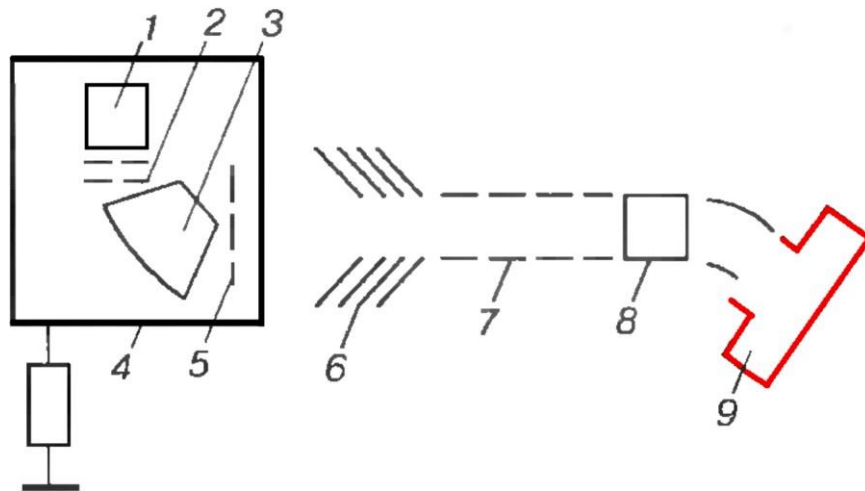


Рис. 6.8. Схеми установок малих і середніх доз іонної імплантації:

- 1 – джерело іонів; 2 – система витягування і первинного формування пучка;
- 3 – мас-сепаратор; 4 – високовольтний модуль; 5 – регульована діафрагма;
- 6 – система прискорення; 7 – фокусувальна лінза;
- 8 – пластини скапування пучка; 9 – приймальна камера

Типові залежності електронного і ядерного гальмування від енергії іона наведено на рис. 6.9.

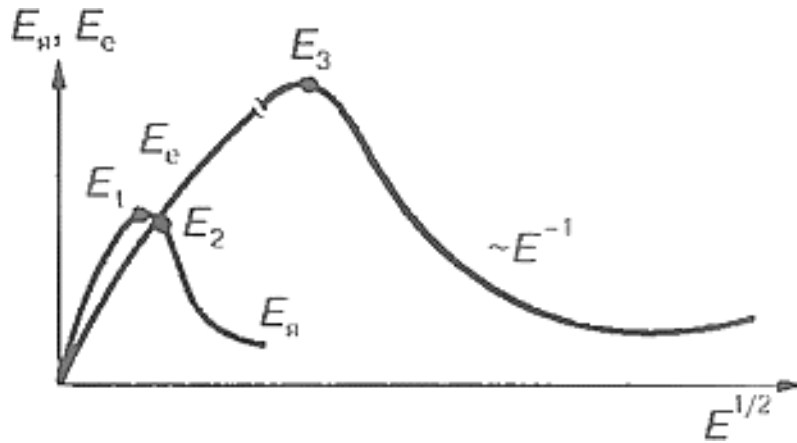


Рис. 6.9 Залежність утрат енергії при ядерних  $E_я$  і електронних  $E_e$  взаємодіях від енергії первинного іона

При легуванні металів характерні значення енергії  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$ , які змінюються в такому діапазоні:  $E_1$  – від кількох кілоелектрон-вольт (при легуванні легкими іонами) до сотень (при використанні важких іонів);  $E_2$  – від кількох кілоелектровольт до одиниць мегаелектрон-вольт;  $E_3$  – десятки мегаелектрон-вольт.

На початковій стадії проходження високоенергетичного іона крізь речовину переважає розсіювання на електронних оболонках атомів мішені. Зі зниженням енергії іона домінуючим виявляється внесок ядерного гальмування.

Важкий іон із початковою кінетичною енергією – 100 кеВ, потрапляючи в тверде тіло, може зупинитися за час  $\sim 10^{-13}$  с. На початку руху у твердому тілі іон уповільнюється внаслідок утрат енергії на взаємодію з електронами і атомами мішені. Гальмування викликається переважно ефектами пружного атомного розсіювання, і це спостерігається наприкінці періоду гальмування при малих енергіях іона. Наприкінці іонного шляху існує імовірність заміщення іоном атома мішені. Такий процес називають *заміщенням при зіткненні*. Особливості заміщення випадкового іона з енергією  $E_1$  і масою  $m_1$ , при зіткненні ілюструють рис. 6.10, а, б.

Іонне опромінення може призводити до перебудови ґратки. Якщо опромінювати метал з ОЦК-ґраткою, можливий перехід до більш щільно-упакованих ґраток – ГЦК або ГЦУ. Спостерігались також переходи ГЦК→ГЦУ, ГЦУ→ГЦК.

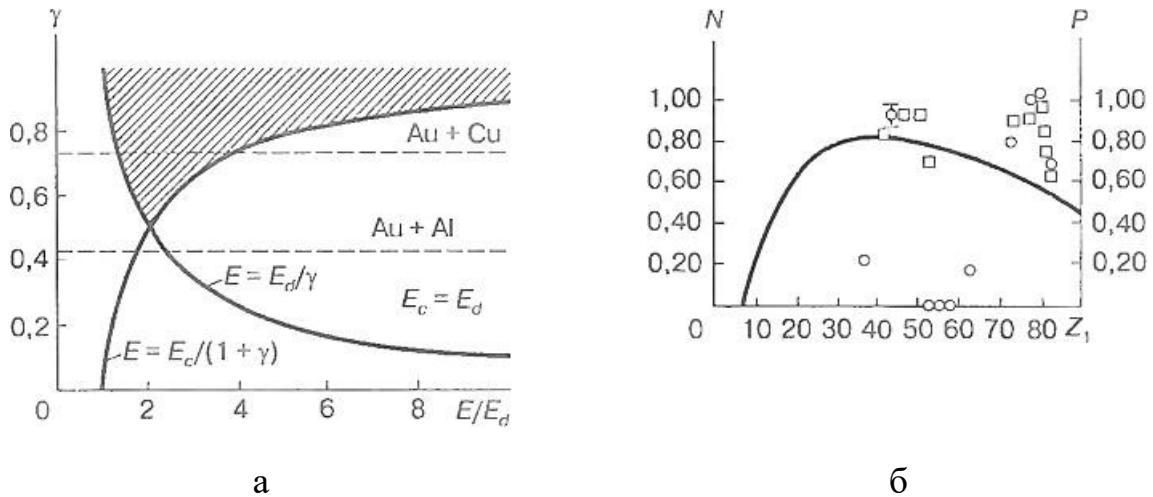


Рис. 6.10. Особливості заміщення випадкового іона з енергією  $E_I$  і масою  $m_1$ , при зіткненні:

*a* – частина діаграми  $\gamma$ - $E$ , яка вказує ділянки, де можливе заміщення при зіткненні (заштрихована ділянка); *б* – крива залежності імовірності  $P$  заміщення при зіткненні і вимірної частини  $N$  різних іонів, якими заміщені атоми міді, від  $Z_1$  – порядкового номера рухливої частинки

Іонним опроміненням можна отримати гексагональні залізо і нікель, гранецентро-вані кобальт, титан, ванадій, чого не вдається досягти при нормальних тисках і температурах іншими методами. Отримані таким способом кристали є метастабільними, а їх нагрівання до 400-500 °С приводить до відновлення вихідної структури.

Для деяких комбінацій іон-метал при імплантації великих кількостей домішок (5–10 %) утворюються некристалічні сплави, для яких характерна аморфна, склоподібна структура. Прикладами таких систем є: W-Cu, Ta-Cu, B-Ni, P-Ni (першими вказані імплантовані іони). Такі метастабільні сплави можуть бути досить стійкими. Оскільки при іонному бомбардуванні змінюється хімічний склад приповерхневого шару, відповідно змінюється і поверхневий натяг, а отже, і коефіцієнт тертя. При іонному бомбардуванні коефіцієнт тертя може як зменшуватися, так і збільшуватися, що визначається типом іонів.

Суттєво підвищується (у 10–30 разів) зносостійкість сталі, алюмінію та інших

матеріалів (табл. 6.1).

Таблиця 6.1. Зносостійкість матеріалів

Матеріал	Тип легуючих іонів	Енергія іонів, кеВ	Зносостійкість
Сталь SAE3135	N <sup>+</sup>	180	Зростає на порядок
Сталь AISI52100	Ar <sup>+</sup> , N <sup>+</sup> , Fe <sup>+</sup> , Ti <sup>+</sup> , C <sup>+</sup>	35; 55; 300	Зростає
Сталь 4140	N <sup>+</sup>	40	Зростає в 3 рази
Корозієстійкі сталі 304, 416	N <sup>+</sup> , N <sub>2</sub> <sup>+</sup> , C <sup>+</sup> , Ti <sup>+</sup>	60; 100	Зростає на 2 порядки
Сталь 17-4PH	N <sup>+</sup>	–	Зростає в 100 разів
Ст2	C <sup>+</sup>	100	Зростає
Сталь AISI9310	Ti <sup>+</sup> , Mo <sup>+</sup> , Ta <sup>+</sup>	–	Зростає
Сталь	N <sup>+</sup>	100	Зростає
Сталь	N <sup>+</sup>	100	Зростає на порядок
Сталь	N <sup>+</sup>	100	Зростає на 2 порядки
Титановий сплав BT1-0	C <sup>+</sup>	100	Зростає в 3–5 разів
Ti-6Al-4V	N <sup>+</sup> , C <sup>+</sup> , Au <sup>+</sup> , Pt <sup>+</sup>	40; 100; 200	Зростає
Be	B <sup>+</sup>	25–200	Зростає
Al	Cu <sup>+</sup>	300	Зростає в 3 рази

Однак значне підвищення зносостійкості спостерігається лише при порівняно високих дозах опромінення ( $10^{16}$ – $10^{17}$  см<sup>-2</sup>).

#### 6.4. Обробка плазмою

Суть методу полягає у термічних фазових і структурних перетвореннях, які здійснюються плазмовим струменем (дугою) при швидкому концентрованому нагріванні робочої поверхні деталі та відведенні тепла в матеріал виробу.

Існує кілька варіантів плазмового зміцнення: 1) зміцнення без оплавлення і з оплавленням поверхні деталі; 2) зміцнення із зазором між зонами термічного впливу (ЗТВ), без перекривання ЗТВ і з перекриванням ЗТВ; 3) хіміко-термічна плазмова обробка; 4) зміцнення в поєднанні з іншими способами об'ємної або поверхневої термічної обробки.

Плазмове зміцнення без оплавлення поверхні є найбільш поширеним для

сталевих виробів, оскільки забезпечує збереження якості (шорсткості) поверхні, яка досягнута внаслідок відповідної механічної обробки.

Розміри зміцненої зони та значення мікротвердості, які досягаються в її межах, залежать від характеристик джерела нагрівання і швидкості його переміщення відносно поверхні. На рис. 6.11 показаний типовий характер розподілу мікротвердості у зоні термічного впливу плазмового струменя.

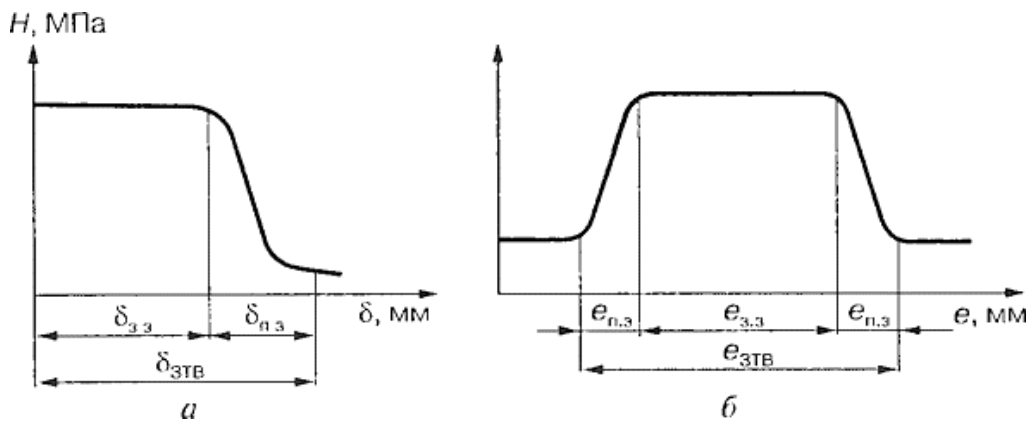


Рис. 6.11. Характер розподілу мікротвердості за глибиною (а) і шириною (б) ЗТВ плазмового струменя при обробці без оплавлення

Зона термічного впливу плазмового струменя має форму сегмента і за своєю будовою аналогічна ЗТВ електронного і лазерного променів (рис. 6.12).

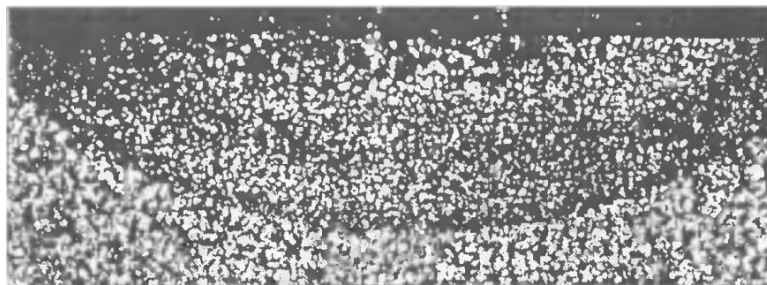


Рис. 6.12. Макроструктура ЗТВ плазмового струменя на сталі 45, x8

При обробці без оплавлення вона складається із загартованої зони, в якій відбулися мартенситні перетворення, і примежової (перехідної до вихідного матеріалу). При обробці з оплавленням виникає додаткова поверхнева зона

оплавлення (загартування із рідкого стану).

На рис. 6.13 як приклад показана мікроструктура сталей 45, 9ХФ і 150ХНМ до і після плазмового зміцнення.

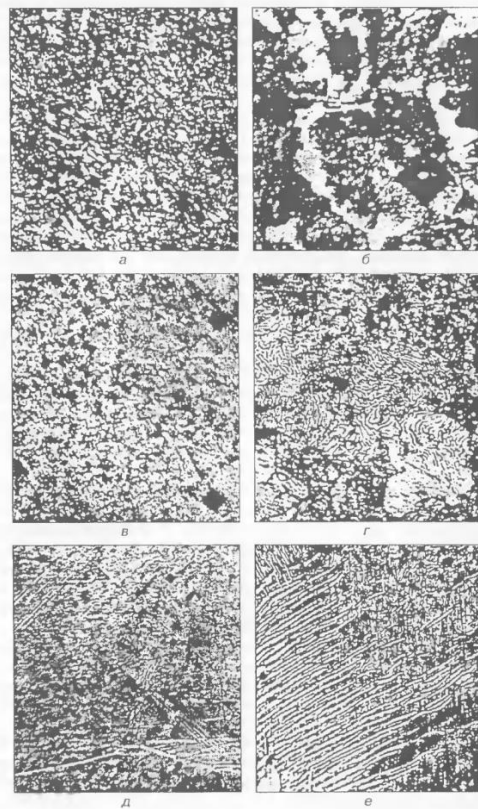


Рис. 6.13. Мікроструктура сталей:  
*a, б* – сталь 45, відповідно загартована зона і вихідна структура;  
*в, з* – сталь 9ХФ, відповідно загартована зона і вихідна структура;  
*д, е* – сталь 150ХНМ, відповідно загартована зона і вихідна структура

Як видно із рисунка, незалежно від складу сталі мікроструктура загартованої зони є досить однорідним високодисперсним мартенситом разом із залишковим аустенітом та карбідом. Формування такої структури зумовлене малими розмірами аустенітних зерен, які утворилися при високошвидкісному плазмовому нагріванні.

### **Властивості зміцнених матеріалів**

Структура зміцненого шару, яка характеризується великою твердістю і високою дисперсністю, впливає на зміну експлуатаційних характеристик зміцнених матеріалів – стійкість до зношування, механічні властивості (міцність, пластичність, тріщиностійкість, витривалість), тепло- і корозієстійкість. Зі збільшенням мікротвердості стійкість до зношування підвищується у всіх типах сталі, але ступінь збільшення мікротвердості залежить від вихідної зносостійкості і морфологічних особливостей загартованої структури (рис. 6.14).

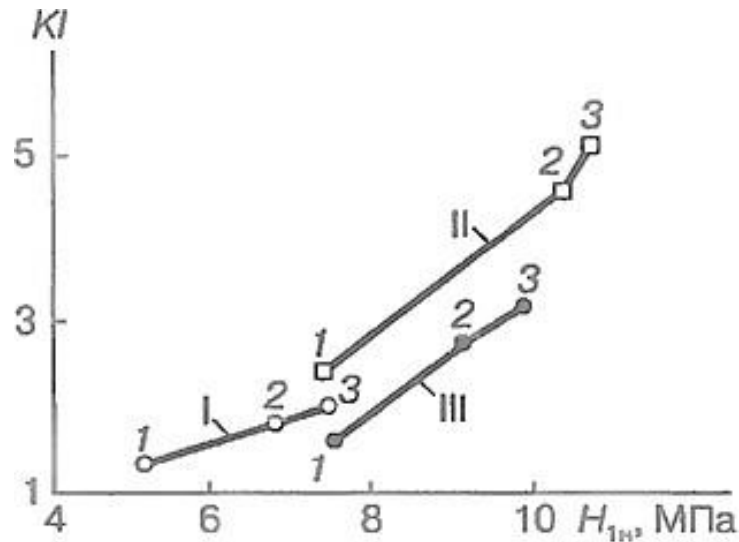


Рисунок 6.14 Зміна коефіцієнта зносостійкості залежно від мікротвердості після зміцнення:  
I – сталь 45, II – сталь 9ХФ; III – сталь 150ХНМ

### 6.5. Гальванічні процеси

Гальванічні покриття отримують електроосадженням на поверхні основи, яка є провідником. Метал, на який наноситься покриття, занурюється в електропровідний розчин, що містить у собі солі цього металу. Катодом є основний метал (виріб), а анодом – стрижень або лист металу, який буде покриттям. Гальванічні покриття можуть бути з чистих металів, сумішей металів, сплавів або металів, які змішані з неметалевими речовинами, їх називають композиційними електрохімічними покриттями (КЕП) (рис. 6.15).

Електроосадження металів відбувається за законами Фарадея: маса металу, що утворюється при електролізі, прямо пропорційна кількості електрики, яка пропускається крізь розчин, і хімічному еквіваленту металу. Таким чином, середню товщину покриття, що осаджується, можна легко розрахувати, знаючи силу струму, час нанесення покриття, площу поверхні, яка обробляється, і хімічний еквівалент металу, який використовується для покриття.

Існує ще один додатковий фактор, який впливає на результати розрахунку:

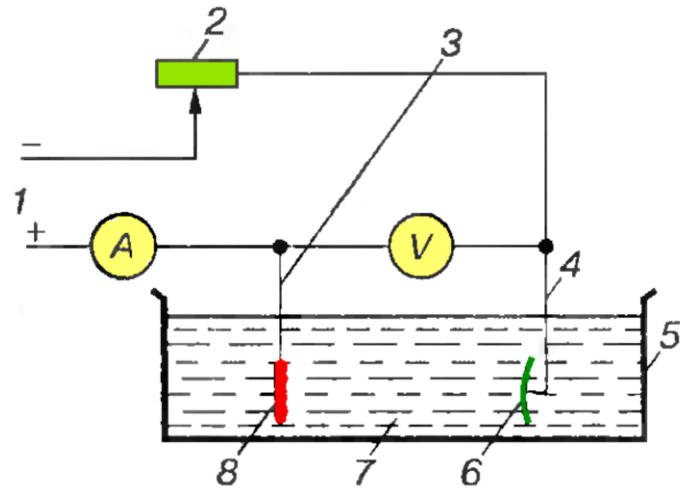


Рис. 6.15. Схема отримання металевого покриття методом електролітичного осадження:

- 1 – подавання постійного струму низької напруги; 2 – регулятор струму;  
 3 – анодна шина; 4 – катодна шина; 5 – посудина для електролітичного осадження;  
 6 – виріб, на який наноситься покриття; 7 – електроліт; 8 – анод

ККД катода під час електроосадження. Наприклад, для міді значення ККД приблизно дорівнює 100 %, якщо осадження здійснюється з кислотного розчину сульфату міді. Однак для іншого розчину чи металу ККД може значно зменшуватись і досягати, наприклад, для хрому 8–18 %.

Крім того, товщина осаду залежить від відстані між анодом і катодом. Здатність розчину електроліту при нанесенні гальванічних покриттів долати цю залежність називається його розсіювальною здатністю. Наприклад, мідь – метал із доброю розсіювальною здатністю, хром – з поганою. На цю властивість може впливати також склад ванни і режим її роботи.

Перспективним напрямом розвитку технологій гальванічних покриттів є композиційні електро-хімічні покриття (КЕП), які складаються з металеві матриці і тонкодисперсних частинок іншої фази, розподілених в її об'ємі. Розмір таких частинок становить 0,01–50 мкм, об'ємна частка – 1–50 % (рис. 6.16).

Як дисперсну фазу використовують порошки окремих елементів, але найчастіше застосовують хімічні сполуки на органічній чи неорганічній основі – безкисневі тугоплавкі сполуки, оксиди, полімери та ін.

Тонкодисперсні частинки в необхідній кількості вводять в електрохімічні ванни, які в процесі електролізу осаджуються на катоді і зарощуються іонами металів, що виділяються на ньому (рис. 6.16).

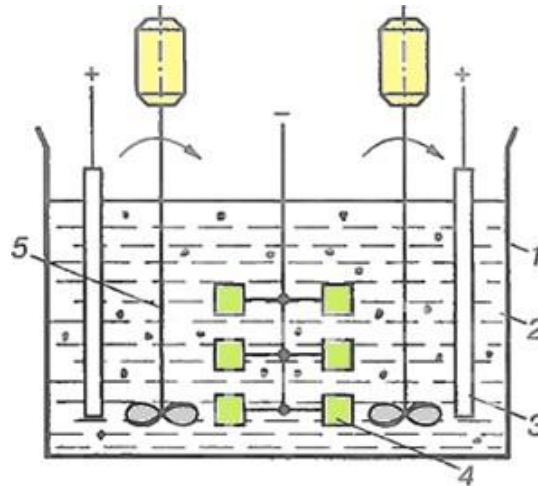


Рис. 6.16. Схема отримання композиційних електрохімічних покриттів:

1 – ванна; 2 – електроліт із неметалевими включеннями; 3 – анод;

4 – виріб; 5 – мішалка

Залежно від властивостей і кількості дисперсної фази КЕП можуть мати високі твердість і зносостійкість, жароміцність, жаро- і корозійну стійкість, анти- і фрикційні властивості та інші необхідні експлуатаційні характеристики (рис. 6.17).

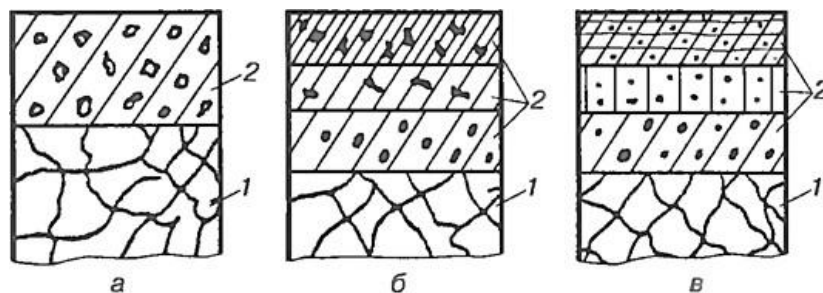


Рис. 6.17. Композиційне комбіноване електролітичне покриття:

а – одношарове покриття; б, в – багатшарове покриття; 1 – матеріал основи;

2 – композиційне покриття.

Композиційні комбіновані електролітичні покриття поділяються на

одношарові (рис. 6.17 а) і багатшарові (рис. 6.17 б, в).

За характерними ознаками і призначенням КЕП поділяють на:

- моно- і поліметалеві;
- моно- і полікомпозиційні;
- тонко- і товстошарові;
- моно- і поліфункціональні.

КЕП отримують із суспензій у вигляді електропровідних рідких розчинів із додаванням високодисперсних твердих частинок чи з емульсій, які утворюються при введенні в електроліти гідрофобних рідин або середовищ, які утворюють піни.

Електроліти можуть бути слабкокислими, слабколужними або близькими до нейтрального (тобто значення рН коливається в діапазоні 6,5–7,5) середовища. Однією з основних умов забезпечення можливості застосування дисперсних частинок є їх індиферентність, нечутливість до електроліту, а також відсутність на їх поверхні шкідливих домішок.

З метою перевірки придатності частинок до співосадження з металом їх кип'ятять у відповідному електроліті протягом 0,5–1,0 год. Якщо після такої операції електроліт зберігає свою активність і дає якісне покриття, то частинки вважаються чистими і можуть бути застосовані в процесі осаження КЕП.

Механізм утворення КЕП визначається двома основними факторами: складом і властивостями електроліту-суспензії (ЕС) та умовами електролізу. До таких параметрів належать: для ЕС – склад електроліту, значення рН середовища, температура, концентрація дисперсних частинок в об'ємі ЕС, і форма; для умов електролізу – вид електричного струму (постійний, нестационарний – реверсивний, імпульсний, асиметричний), його густина, спосіб перемішування ЕС та ін.

За певних умов електролізу можливе отримання покриттів, що містять у собі частинки від мінімального розміру до частинок, розмір яких близький до товщини осаду.

Зарощування великих частинок із низькою електропровідністю спочатку відбувається в основі, а потім поширюється далі (рис. 6.18, а, б). Зарощування

великих частинок з високою електропровідністю відбувається по всьому їх периметру (рис. 6.18, в, г).

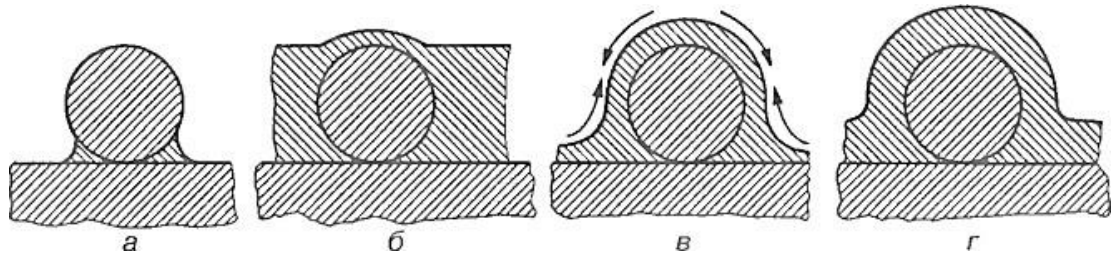


Рис. 6.18. Схема зарощування частинок з низькою (а, б) та високою (в, г) електропровідністю

За товщиною матриці частинки розміщуються нерівномірно: найбільша їх кількість осаджується ближче до основного металу в місцях з високою густиною силових ліній струму. Збільшення розміру частинок супроводжується зменшенням їх кількості в осаді.

### Структура і властивості покриттів

При КЕП електролітичні осади без включень і з включеннями дрібнодисперсних частинок мають чотири характерні типи структур (рис. 6.19).

1. У структурі є видовжені (6.19, а), інколи перехрещені тріщини як сліди релаксації внутрішніх напружень. 2. За наявності в осаді дрібнодисперсних частинок з міцністю, меншою, ніж міцність матриці, релаксація внутрішніх напружень відбувається внаслідок утворення тріщин (6.19, б). 3. При значеннях міцності матриці, близьких до значень міцності частинок, можливі два випадки: 1) частинки не є перешкодою для тріщин; 2) частинки є перешкодою для утворення тріщин у матриці (6.19, в). 4. Велика міцність дрібнодисперсних включень порівняно з міцністю матеріалу матриці зумовлює релаксацію напружень між близькоприлеглими включеннями (6.19, г). Крім того, навколо включень утворюється значна кількість мікротріщин розмірами на кілька порядків меншими, ніж у першому випадку. При цьому захисна здатність покриття поліпшується.

Властивості КЕП визначаються переважно фізико-хімічними і механічними властивостями металевої матриці в КЕП. Загалом властивості КЕП залежать як від

співвідношення компонентів (матриці і дисперсних включень, їх характеристик), так і від розподілу в об'ємі покриття, умов осадження і наступної (за потреби) обробки – термічної, лазерної, дифузійного легування.

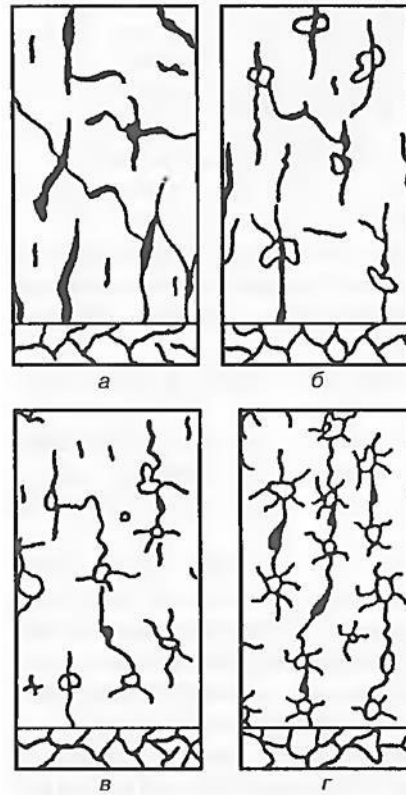


Рис. 6.19. Моделі структури КЕП, отриманих з електролітів без включень (а) і з уведенням в їх склад частинок різної міцності (б-г)

Для отримання відповідних властивостей покриття рекомендовані такі метали матриць КЕП:

- твердість і зносостійкість: Fe, Ni, Co, Cr;
- жаростійкість: Cr, Ni, Co;
- захист від корозії: Zn, Cd, Sn, Cu, Ag, Cr, Ni, Au, Pt;
- відновлення розмірів: Fe, Cr, Ni, Cu;
- антифрикційність: Fe, Ni, Cr, Cu, Pb, Sn;
- надання поверхні притиральних властивостей: Cu, Sn, Cd, Ag.

Дисперсні матеріали, які поліпшують властивості КЕП:

- твердість і зносостійкість:  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $TiO_2$ , WC, TiC,

SiC, B<sub>4</sub>C, TiB<sub>2</sub>, CrB<sub>2</sub>, алмаз, В, Si, С;

– зносостійкість при сухому терті і підвищених температурах: SiC, B<sub>4</sub>C, BN, TiB<sub>2</sub>, CrB<sub>2</sub>;

– термостійкість: оксиди, карбіди, нітриди;

– самозмащення: графіт;

– теплопровідність: політетрафторетен;

– ерозійна стійкість: оксиди, карбіди.

Розмір частинок вибирають залежно від товщини КЕП і чистоти (шпаруватості) поверхні катода за формулою:

$$d = l = \frac{\delta}{n}$$

де  $d$  (чи  $l$ ) – діаметр (чи довжина) частинки;  $\delta$  – товщина покриття;  $n$  – кількість частинок.

КЕП для більшості електроосаджених матеріалів характеризуються надзвичайно значним зчепленням включень із матеріалом матриці. Це пояснюється положеннями теорії пластичної деформації і абразивного руйнування твердих тіл з урахуванням особливостей формування структури електролітичних осадів. Відповідно до цього навколо дрібнодисперсних частинок можлива поява зворотних мікропластичних деформацій, які спричинюють зміцнення осаду і відповідно поліпшення фізико-механічних властивостей КЕП.

У формуванні механічних властивостей КЕП значну роль відіграють дефекти дислокаційного типу. Під час переміщення дислокацій при стиканні з частинками вони огинають ці перешкоди, залишаючи після себе замкнені петлі. Збільшення кількості частинок в осаді та зменшення відстані між ними спричинюють підвищення опірності переміщенню, оскільки зростає кількість бар'єрів, які мають подолати дислокації. Це викликає збільшення кількості дислокаційних петель, їх накопичення навколо твердих включень, що зумовлює додаткове активне напруження і зміцнення матриці.

## 6.6. Хімічне осадження

### Закономірності осадження

При газофазному осадженні покриття утворюються внаслідок перебігу хімічних реакцій поблизу поверхні, на поверхні чи в приповерхневому шарі основи. Вихідними продуктами є газоподібні галогеніди, карбоніли чи металоорганічні сполуки, при розкладанні чи взаємодії яких з іншими газоподібними складовими суміш (воднем, аміаком, вуглеводнями, оксидом вуглецю та ін.) можуть утворюватись і осаджуватись на оброблюваній поверхні потрібні матеріали (рис. 6.20).

При термічному розкладанні основу нагрівають до температури розкладання газоподібних робочих сполук з осадженням їхніх нелетких компонентів на поверхні основи. Процес здійснюється у вакуумі  $1 \cdot 10^{-1}$  Па, а також у нейтральному чи іншому підбраному середовищі газів-носіїв. Осадження простих речовин відбувається за реакціями:

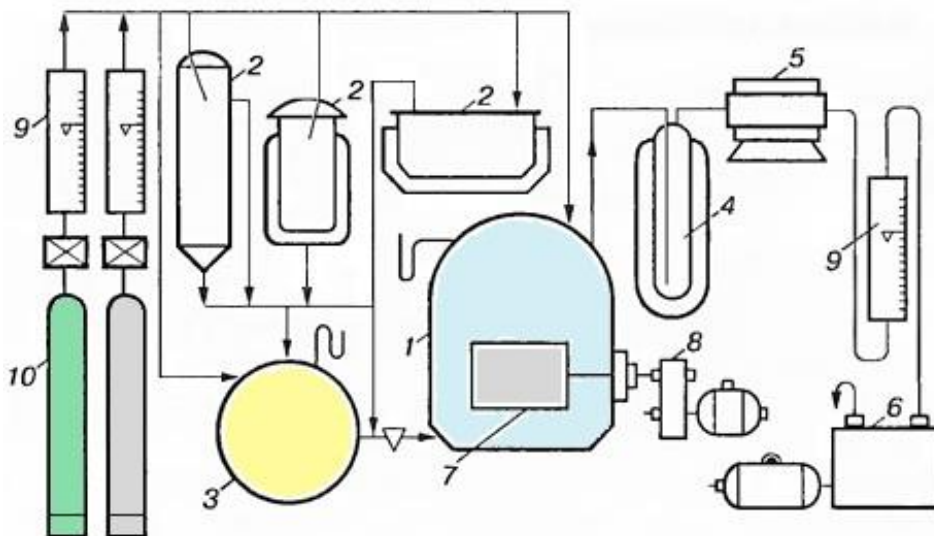
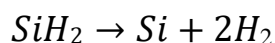
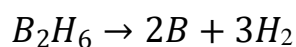
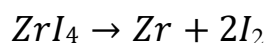
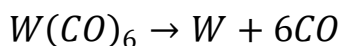
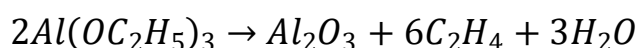
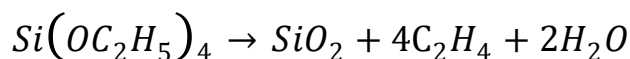


Рис. 6.20. Універсальна схема установки для газофазного осадження покриттів:

- 1 – реактор; 2 – резервуари з рідкими і кристалічними карбонілами;  
 3 – змішувач газів; 4 – морозильний уловлювач; 5 – піч дорозкладання;  
 6 – вакуумний насос; 7 – основа; 8 – система обертання основи;  
 9 – ротаметри; 10 – балони з воднем і азотом



оксидів:

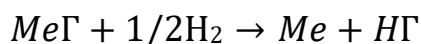
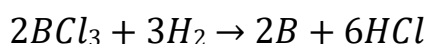
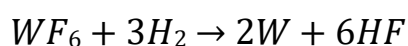
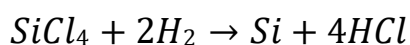


боридів:

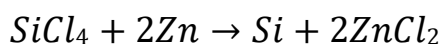


Температури розкладання для різних робочих сполук коливаються у межах від 300 до 2300 °С і вище.

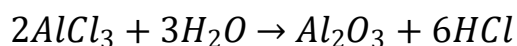
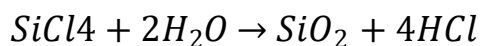
Леткі сполуки відновлюються воднем, аміаком та іншими речовинами, які містять у собі водень, а також парами металів. Осадження простих речовин відбувається за реакціями



Пари металів (*K*, *Na*, *Mg*, *Zn*, *Cd*) осаджуються аналогічно, наприклад

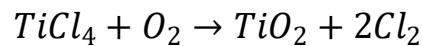
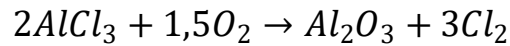


Гідроліз газоподібних галогенідів водяною парою ( $H_2O$ ) чи парою  $H_2 + CO_2$  використовується для отримання покриттів оксидів.





Високотемпературне пряме окиснення киснем газоподібних галогенідів чи металоорганічних безкисневих сполук використовується для отримання покриттів з оксидів:



Аналогічно осаджується більшість інших елементів (*Fe, Ni, Be, Al, Cr, Ti, Hf, Th, V, Nb, Mo, Ta*) та їхніх боридів, нітридів, карбідів і оксидів.

Газофазне нанесення покриттів умовно можна подати як послідовність елементарних процесів:

- 1) хімічне випаровування, пов'язане з отриманням металовмісних сполук;
- 2) перенесення газоподібної металовмісної речовини;
- 3) взаємодія газоподібної металовмісної речовини з поверхнею основи;
- 4) формування покриття.

### Структура і властивості газофазних покриттів

Структура газофазних покриттів може бути трьох типів, які є наслідком отримання покриттів при певному температурному режимі (низько-, середньо- і високотемпературному) (рис. 6.21). Інтервал кожного з режимів залежить від природи осаджених матеріалів і в більшості випадків відповідає приблизно 0,1; 0,2; 0,3 температури їх плавлення.

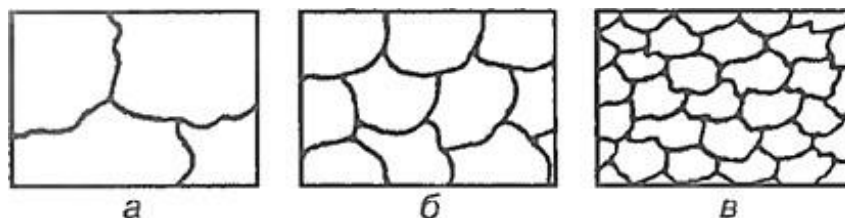


Рис. 6.21. Морфологія поверхні газофазних покриттів, отриманих при низькотемпературному (а), середньотемпературному (б) і високотемпературному (в) режимах

Поверхня покриттів, отриманих у низькотемпературній ділянці, цілком складається з великих сфероїдів. У середньотемпературній ділянці сфероїди другого типу з розмірами в 5–10 разів меншими. А у високотемпературній ділянці поверхня складається з малих кристалів, розміри яких у 10–15 разів менші, ніж розміри сфероїдів другого типу.

Внутрішня будова покриттів, одержаних у низько-, середньо- і високотемпературних ділянках, має також три типи структури (рис. 6.22).

Внутрішня структура покриттів, отриманих у низькотемпературній ділянці, має горизонтально-шаровий характер будови. Покриття складаються лише з поперечних шарів з темними включеннями. Домішки концентруються переважно по межах зерен (рис. 6.22, *а*).

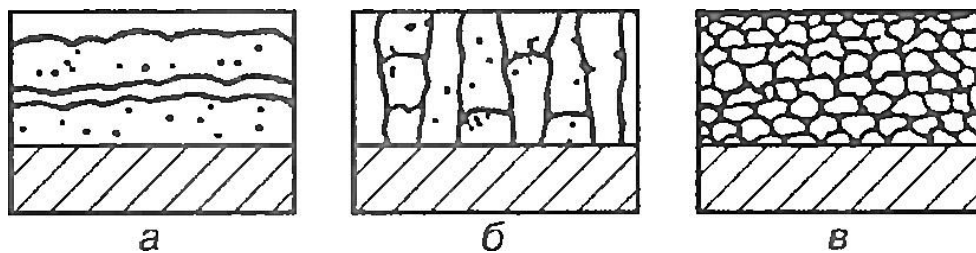


Рис. 6.22. Внутрішня будова покриттів, отриманих в низько-температурній (*а*), середньотемпературній (*б*) і високотемпературній (*в*) ділянках

Другий тип структури утворюється за середнього інтервалу температур і складається з характерних вертикально-стовпчастих утворів, іноді – з горизонтальними примежовими шарами (рис. 6.22, *б*). У високотемпературній ділянці утворюються покриття з дрібнокристалічною структурою (рис. 6.22, *в*).

Залежність швидкості наростання газофазних покриттів від температури основи характеризується кривою з максимумом (рис. 6.23).

Початкову ділянку визначають кінетичні фактори реакції термічного розкладання. Максимум швидкості зростання покриття досягається за умови рівності потоків – металовмісної речовини до основи і продуктів розпаду від неї.

Вона сприяє утворенню стовпчастих кристалів.

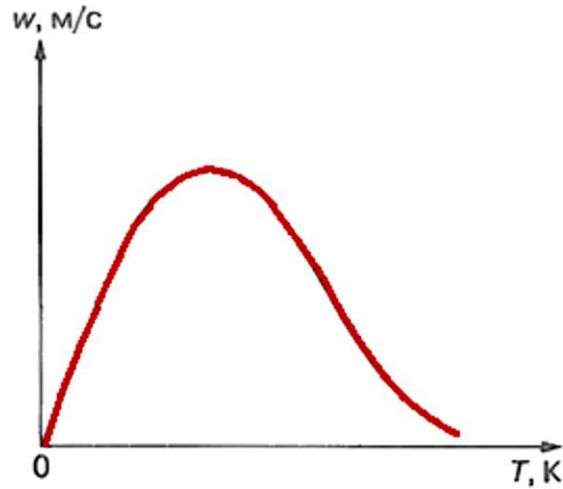


Рис. 6.23. Залежність швидкості наростання газофазного покриття від температури

Кінцеву ділянку визначає процес розкладання частини металовмісної сполуки, який збільшується при високих температурах реакційного газу.

Властивості газофазних покриттів оцінюються насамперед отриманням на основному металі поверхневого шару за умови найекономнішого легування.

## 6.7. Дифузійне насичення

### Закономірності дифузійного насичення

Механізм дифузії є основою утворення дифузійних покриттів. Його схему можна розглянути на прикладі утворення покриттів із парогазової фази (рис. 6.24).

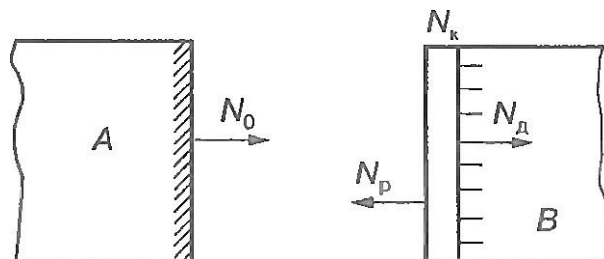


Рис. 6.24. Схема утворення покриттів із парогазової фази

Із загальної кількості частинок  $N_0$  речовини А, які досягають поверхні тіла В

за одиницю часу, одна частина  $N_p$  реєвипаровується (відбивається), друга  $N_k$  – конденсується і залишається в чистому вигляді на поверхні третя,  $N_d$  – поглинається тілом В. Поглинання відбувається внаслідок як дифузії А і В, так і зворотної дифузії – В в А.

Швидкість зворотного процесу іноді може на два-три порядки перевищувати швидкість прямого процесу.

Результуючу всіх процесів можна записати у вигляді рівняння:

$$N_0 - N_p \rightarrow N_k + N_d$$

Від швидкості кожного з цих потоків залежать товщина і характер покриття, яке утворюється (нашароване, дифузійне, комбіноване) (рис. 6.25).

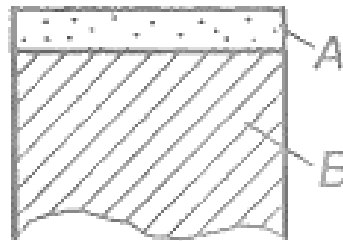


Рис. 6.25. Схема утворення нашарованого покриття

Якщо речовина А конденсується (осаджується) на холодній поверхні тіла В, і дифузія практично відсутня ( $N_d = 0$ ), то утворюється нашароване покриття з чітко вираженою межею поділу з основою (рис. 6.25).

Якщо поверхня тіла В достатньо нагріта та активна і дифузійний потік дорівнює потоку речовини (7.1), яка конденсується, або випереджує його, то утворюється типове дифузійне покриття (рис. 6.26)

$$N_0 - N_p = N_d \quad (6.1)$$

Якщо поверхня тіла В недостатньо нагріта і дифузійний потік відстає від потоку речовини, яка конденсується (6.2), то утворюється покриття комбінованого типу (рис. 6.27), де верхній шар складається з чистої речовини А, а нижній – із різного поєднання речовин А і В.

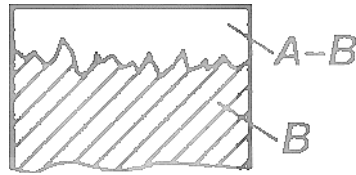


Рис. 6.26. Схема утворення дифузійного покриття

$$N_0 - N_p > N_d \quad (6.2)$$

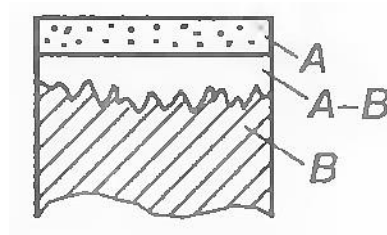


Рис. 6.27. Схема утворення комбінованого покриття

Таким чином, для отримання дифузійних покриттів необхідно, щоб основа добре розчиняла матеріал покриття, який наноситься, і температура основи була достатньою для інтенсивного проходження дифузійних процесів.

У практиці дифузійного насичення розраховують ефективний коефіцієнт дифузії, як правило, для багатоконпонентного сплаву. При цьому використовують феноменологічне рівняння Фіка. Згідно з першим законом Фіка, потік елемента в часі крізь одиницю площі поверхні можна подати так (6.3):

$$\frac{dm}{dt} = -D \frac{\partial c}{\partial x} \quad (6.3)$$

де  $dm/dt$  – кількість елемента  $dm$ , що продифундував за час  $dt$  через одиницю площі;  $D$  – коефіцієнт дифузії;  $\partial c / \partial x$  – градієнт концентрації в напрямку дифузії;  $x$  – координата в напрямку потоку.

Зміна концентрації в часі в певній точці по глибині дифузійного шару описується за другим законом Фіка (6.4):

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial c}{\partial x} \right) \quad (6.4)$$

де  $\partial C/\partial t$  – швидкість зміни концентрації в часі на певній площі дифузійної зони, перпендикулярної до потоку.

### Структура і властивості

В процесі дифузійного насичення при триманні покриттів важливо знати характер утворення і росту шарів, а також кінетичні параметри, які характеризують зміну концентрації елемента насичення за глибиною покриття в часі. Схема формування двокомпонентного покриття з фазовим переходом представлена на рис. 6.28.

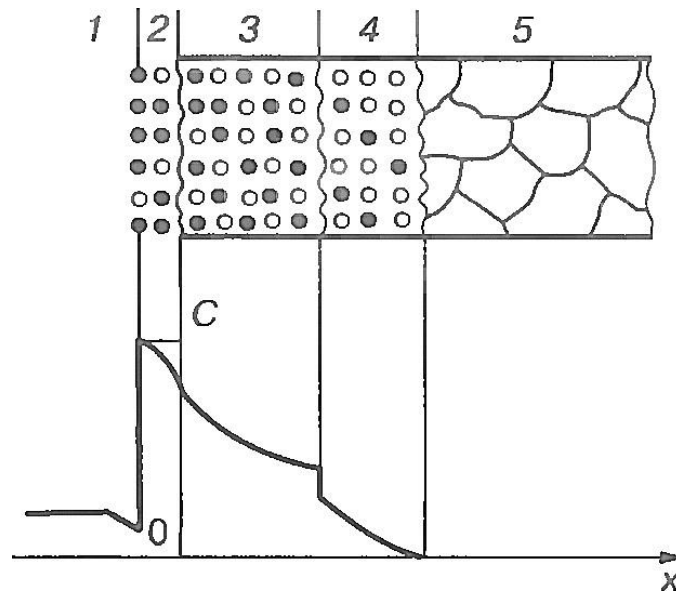


Рис. 6.28. Схема формування двокомпонентного покриття з фазовим переходом:

1 – насичене середовище; 2 – адсорбований шар; 3 – з'єднання; 4 – твердий розчин;  
5 – основний метал

Можливість створення дифузійних покриттів визначається насамперед різницею діаметрів атомів металу основи.

Наприклад, при дифузії в залізо елементів з великим діаметром атомів така різниця не повинна перевищувати 15–16 %, інакше напруження, які виникають у кристалічній ґратці заліза, будуть перевищувати границю її пружної стійкості.

Гратка стає нестійкою і виключає можливість дифузійного проникнення таких великих атомів у гратку заліза. Крім цього, елемент, який наноситься, має розчинитися в металі основи при кімнатній і підвищеній температурах.

Для підвищення зносостійкості використовують різні способи насичення, які поділяють на дві групи: насичення хімічними елементами (однокомпонентні, двокомпонентні і багатоконпонентні покриття); насичення хімічними сполуками (карбідами, нітридами, оксидами) (рис. 6.29).

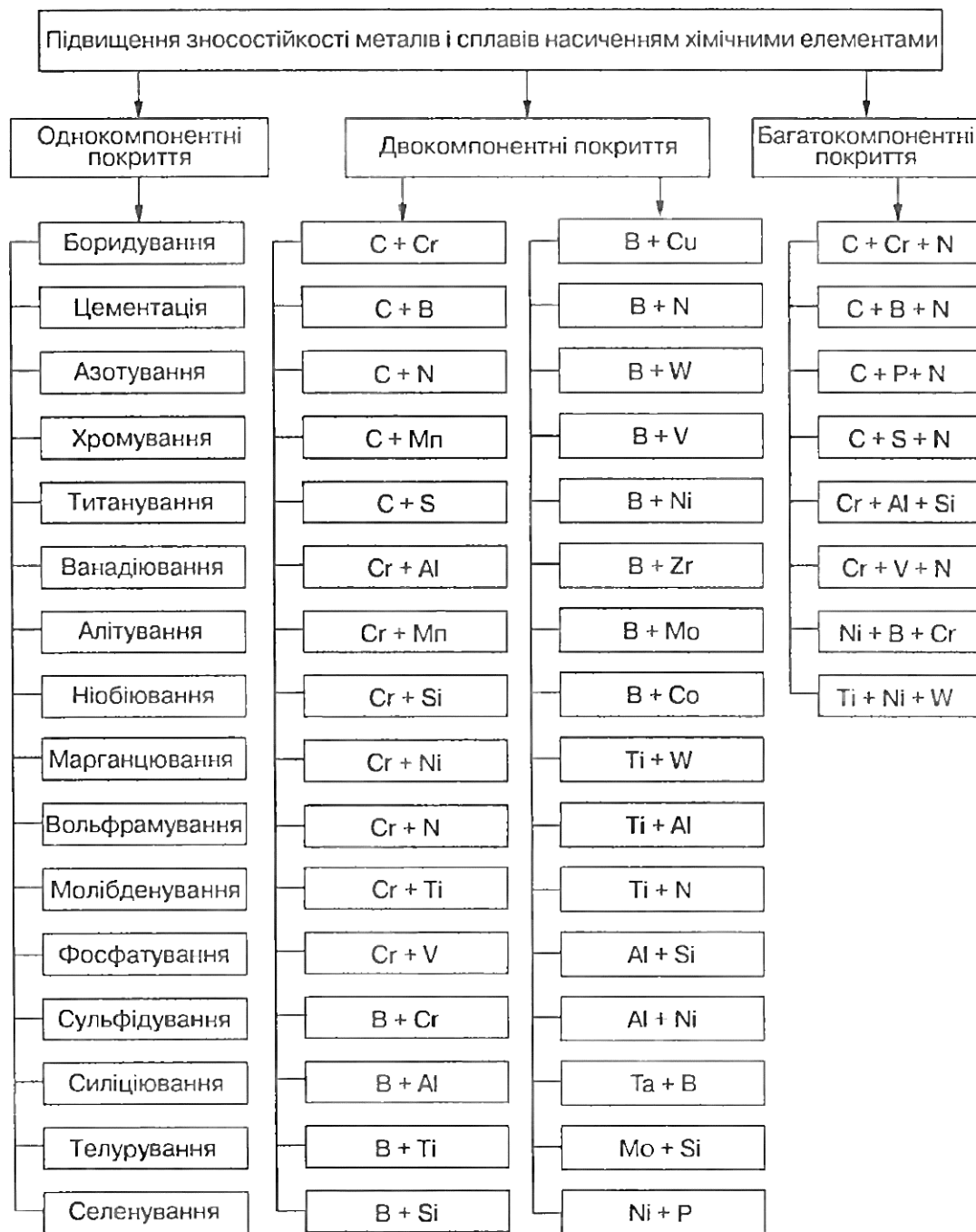


Рис. 6.29. Схема видів покриттів чорних металів і сплавів насиченням хімічними елементами

### Контрольні запитання

1. Дайте визначення лазеру?
2. Які властивості у зміцнених матеріалів?
3. У чому полягає суть лазерного легування?
4. Від чого залежить ступінь зміцнення?
5. Особливості модифікування поверхні електронним променем?
6. У чому полягає суть іонної імплантації?
7. Суть методу плазмового зміцнення?
8. Яку форму має зона термічного впливу плазмового струменя?
9. Властивості зміцнених матеріалів плазмовим методом?
10. Схема отримання композиційних електрохімічних покриттів?

## 7. УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ГАЗОТЕРМІЧНОГО НАПИЛЕННЯ

### 7.1. Газополуменеве напилення, інтегроване з щіткової обробкою

Зменшити або усунути недоліки газотермічних методів напилення (недостатня міцність зчеплення покриття з основою, пористість покриття, зниження втомної міцності виробів та ін.) Можна як технологічними заходами - застосуванням дискретних покриттів, створенням нових композиційних матеріалів і ін. Так і інтеграцією газотермічного напилення з іншими методами обробки поверхні: металевими щітками, електроерозійної обробкою, накладенням коливань на заготовку, СВС процесом, лазерною обробкою, епіламіруванням і ін. (рис. 7.1).

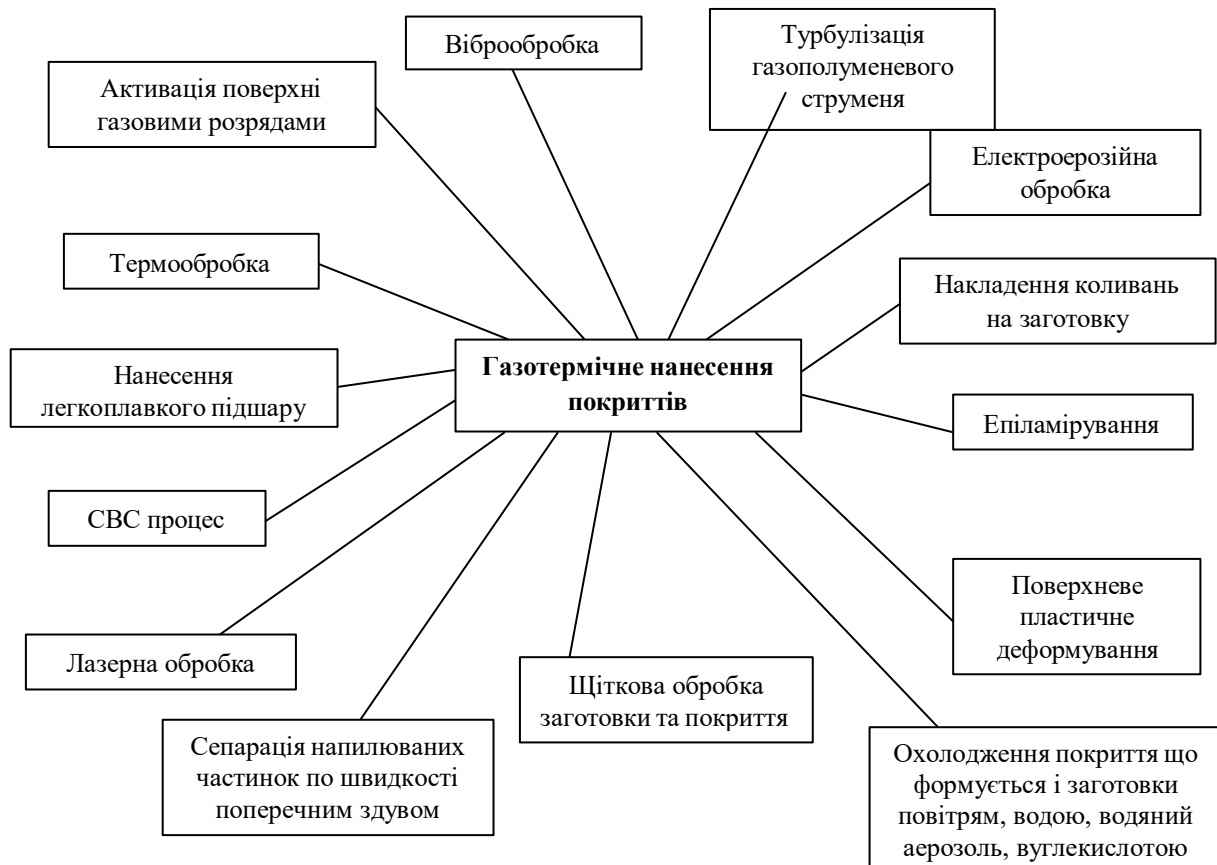


Рис. 7.1. Схема інтегрування газотермічного напилення покриттів з іншими методами обробки поверхні

Одним із перспективних методів, є процес обробки поверхні металевими щітками, який пропонується застосовувати замість струменево-абразивної обробки

напилюваної поверхні і в процесі напилення для активування напилюються шарів відновного покриття. Щіткову обробку можна розглядати як суму елементарних процесів дряпання. У свою чергу процес дряпання можна вважати подібним процесу різання з негативним переднім кутом.

Металева щітка являє собою дротяний інструментом з високою щільністю (70–80 %) набивання ворсу. Ворсинки виготовляються з кордної дроту по ГОСТ 3875-83 або сталевому пружинному дроту з вмістом вуглецю не більше 0,7 % і міцністю близько 2 ГПа. Діаметр ворсинок вибирається залежно від необхідної шорсткості поверхні.

Шорсткість оцінювалася параметрами  $R_a$ ,  $R_{\max}$ ,  $S_m$ ,  $S$ ,  $t_p$  (ГОСТ 2789-73), а також  $R_p$ ,  $R_{\text{вист}}$ ,  $R_{\text{вп}}$ ,  $\theta$ ,  $V$ ,  $y_1$ . Параметри  $R_a$ ,  $R_{\max}$ ,  $t_p$  визначаються за допомогою профілографа-профілометра, параметри  $S_m$ ,  $S$  оцінюються по профілограми поверхні, параметри  $R_p$ ,  $R_{\text{вист}}$ ,  $R_{\text{вп}}$ ,  $\theta$ ,  $V$ ,  $y_1$  обчислюються за методиками.

Висота згладжування  $R_p$  визначається як відстань від лінії виступів до середньої лінії. Середні радіуси виступів  $R_{\text{вист}}$  і впадин  $R_{\text{вп}}$  визначаються за формулами:

$$R_{\text{вист}} = \frac{9R_a^2 S_m^2}{128(R_p - 0,5R_a)^3}, \quad (7.1)$$

$$R_{\text{вп}} = \frac{9R_a^2 S_m^2}{128(5,5R_a - R_p)^3}, \quad (7.2)$$

де  $R_a$  – середнє арифметичне відхилення від профілю;

$S_m$  – середній крок нерівностей профілю.

Середній кут нахилу бічної стінки профілю можна вирахувати за формулою:

$$\theta = \arctan \frac{2R_{\max}}{S}, \quad (7.3)$$

де  $R_{\max}$  – найбільша висота профілю;

$S$  – середній крок виступів профілю щодо опорної довжини.

Параметри опорної кривої  $V$ ,  $b_1$  обчислюються за формулами:

$$V = 2t_{cp} \frac{R_p}{R_a} - 1; \quad b_1 = t_{cp} \left( \frac{R_{max}}{R_p} \right)^V, \quad (7.4)$$

де  $t_{cp}$  – відносна опорна довжина профілю на рівні середньої лінії.

Експериментальні дослідження можливості застосування щеточної обробки в якості підготовки поверхні під напилення покриттів здійснювалися на зразках зі сталі 10, на поверхні яких була окалина після прокатки. Як інструмент застосовували циліндричну металеву щітку зовнішнім діаметром 160 мм, шириною робочої частини 60 мм, з діаметром ворсинок 0,45 мм і вільної їх довжиною 30 мм. Шорсткість поверхні Rz становила 5–22 мкм залежно від режимів щеточної обробки. Результати визначення міцності зчеплення випробуванням на відрив алюмінієвого покриття, нанесеного за допомогою металізатора ЕМ-12М, показали збільшення міцності зчеплення на 20–32 % при щітковій обробці порівняно з дробеструменевою.

На основі вищевикладеного можна припустити, що інтегрування щеточної обробки з газополум'яним напиленням забезпечить отримання необхідної шорсткості оброблюваної поверхні в широких межах і дозволить підвищити міцність зчеплення покриття з основою, знизити його пористість і рівень залишкових напружень.

Застосування технології щеточної обробки напилюваної поверхні і наносяться шарів дозволяє істотно скоротити час надходження обробленої ділянки в зону напилення шляхом поєднання процесів щеточної обробки і напилення. При діаметральному розташуванні щітки і газополум'яної пальника зазначений час можна розрахувати за виразом

$$t = \frac{30}{n_d}, \quad (7.5)$$

де  $t$  – час, через який оброблений щіткою ділянку надійде в зону напилення, с;

$n_d$  – кількість обертів напилюваної деталі в хв.

При напиленні, наприклад, деталей діаметром від 20 до 200 мм  $n_d$  повинні складати 287–29 об / хв, для забезпечення швидкості поверхні в зоні напилення

300 мм/с. Тоді час, через який оброблена поверхня надійде в зону напилення, розраховане за формулою (7.5), становитиме лише 0,1–1,0 с. Відомо, що товщина оксидної плівки на залозі і його сплавах становить 50–100Å, час утворення оксидної плівки становить  $2,4 \cdot 10^{-9}$  секунди при тиску 760 мм рт. ст.

Застосування щеточної обробки замість традиційної струменевої обробки абразивом дозволяє висунути гіпотезу про зменшення товщини окисної плівки на поверхні основи через короткого проміжку часу між обробкою і надходженням її в зону напилення, що в свою чергу полегшує процес очищення поверхні за рахунок ударного тиску  $p_u$  напилюваних частинок і покращує фізичний контакт матеріалів частинки і основи. В результаті цього міцність зчеплення напилюваного покриття з основою повинна підвищитися.

Різання металів є складним процесом, що включає ряд фізико-хімічних явищ: механічних, теплових, адгезійних, дифузійних і ін., які супроводжують взаємодію інструменту з матеріалом оброблюваної деталі в умовах великих контактних тисків і температур.

В енергетичному балансі процесу різання 90% і більше доводиться на роботу пластичної деформації матеріалу оброблюваної деталі. Тому прийнято вважати процес різання це процес превалює пластичного деформування. Від характеру протікання пластичної деформації і механізму деформаційного зміцнення залежать точність, шорсткість і якість поверхневого шару оброблюваної деталі.

Тому основним теоретичним напрямком, що визначає рішення задачі вибору оптимальних умов взаємодії ріжучого інструменту і матеріалу оброблюваної деталі, є механіка процесу різання матеріалів.

Відомо, що додаток до металу зовнішніх сил викликає рух дислокацій. Причому, першими починають рухатися дислокації тієї системи ковзання, в якій дотичні напруження максимальні. Пластичне протягом відбувається, коли дотичні напруження досягають критичного сдвигового напруги близької до межі плинності.

Теоретично напруга, необхідне для руху дислокацій в ідеальній решітці, яке називають напругою Пайерлса, в залежності від ширини дислокації  $W$  обчислюється

за формулою

$$\tau_0 = G \frac{2b}{W} e^{-2\pi \frac{W}{b}} \quad (7.6)$$

де  $G$  – модуль зсуву;  $b$  – вектор Бюргерса.

Розрахунки і експерименти показали, що для чистих металів з гранецентрованою кубічною (ГЦК) ґратами напруга Пайерлса дуже мало. Отже, рух дислокацій не обмежуватимуть тертям об ґрати, а взаємодією з полями пружних напружень інших дислокацій і дефектів кристалічної будови.

Різання являє собою пластичну деформацію з високою швидкістю ( $10^3$ – $10^6$  с<sup>-1</sup>) і великими тисками на поверхню оброблюваного металу (до 200 кгс/мм<sup>2</sup>), високою температурою, градієнтом напружень і деформацій в зоні обробки.

Механізм гальмування дислокацій залежить від швидкості їх руху і чинного напруги. При низьких швидкостях (до  $10^2$ – $10^3$  см/с) рух дислокацій має термічно активований характер. Напруга пластичної течії визначається взаємодією дислокацій зі стопорами - перешкодами їх руху, наприклад, за механізмом Орована. При більш високих швидкостях руху дислокацій їх гальмування, а отже, і зміцнення деформованого матеріалу визначається взаємодією рухомих дислокацій з кристалічною решіткою.

Процес обробки поверхні металевими щітками можна розглядати як суму елементарних процесів дряпання. У свою чергу процес дряпання можна вважати подібним процесу різання з негативним переднім кутом.

До початку обертання щітки ворсинка знаходиться під дією натягу  $\Delta$ , рівень якого залежить від величини переміщення щітки до оброблюваної поверхні, рис. 7.2.

При обертання з'являється сила  $P$ , яка є рівнодіюча сил, що виникають в результаті контакту бічної (утворює) поверхні ворсинки з мікрориступів. Далі ця сила зростає до величини сили тертя  $F_{тр}$  ворсинки о мікрориступ, після чого починає ковзати по напрямку до вершини, рис. 7.3.

Просування кінця ворсинки уздовж оброблюваної поверхні деталі стане

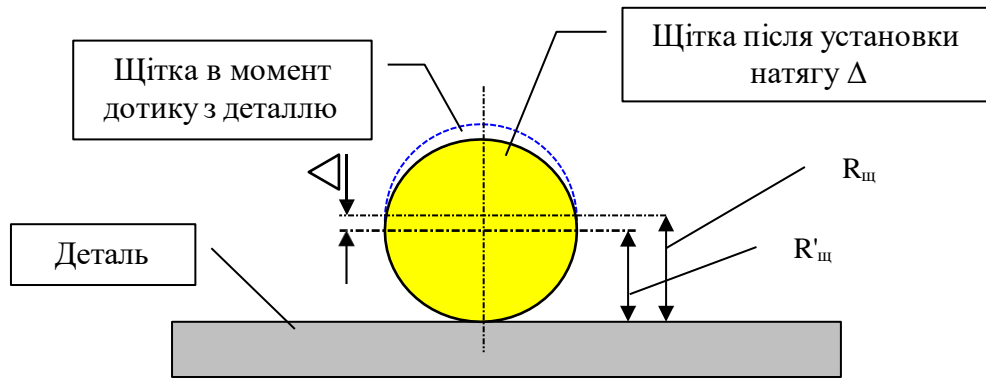


Рис. 7.2. Схема установки щітки з натягом  $\Delta$ :  
 $R_{щ}$  – радіус щітки;  $R'_{щ}$  – радіус щітки в місці  
 контакту з деталлю після установки натягу  $\Delta$

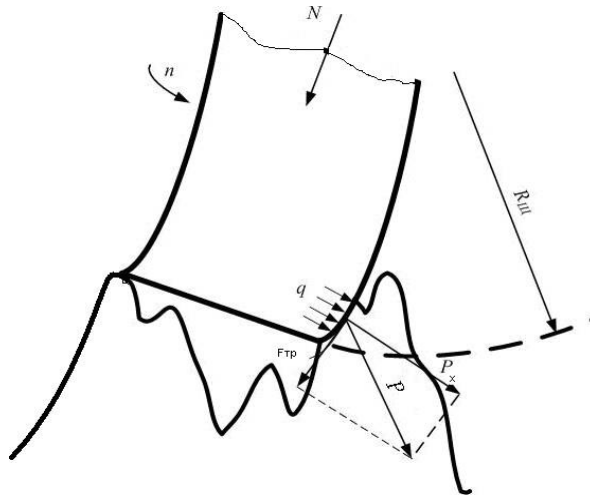


Рис. 7.3. Схема утворення подряпини:

$N$  – навантаження, яке діє на голку;  $R_{щ}$  – радіус щітки;  $n$  – обороти щітки;  
 $q$  – питоме навантаження, що діє в зоні контакту голки і мікрорівнеступа;  
 $F_{тр}$  – сила тертя ворсинки о мікрорівнеступ;  $P_x$  – сколююча напруга

можливим, коли сколювальні напруги  $P_x$  досягнуть межі міцності металу, і тоді ворсинка почне свою дряпаючу дію. Одночасно з підняттям вгору ворсинка переміщається вперед, пластично деформує метал і витісняючи його вгору, вперед і в сторони. Її підняття вгору обумовлено зростанням опору деформованого об'єму внаслідок зміцнення. Ворсинка перестане підніматися і почне наносити подряпину, коли в деформується обсязі буде досягнута максимальна ступінь

деформації. В процесі дряпання може виникнути на кінці ворсинки нарост. Від наросту режим дряпання змінюється, глибина подряпини різко зменшується. Потім в подряпину потрапляє наступна ворсинка металевої щітки і процес повторюється.

Теоретичне обґрунтування обробки (активізації) поверхні металу металевими щітками підтверджується дислокаційними уявленнями про різанні металів. Навантаження, що діє на деталь, досягає найбільшої величини на поверхнях в місцях контакту з ріжучим інструментом. Отже, можна припустити, що перші дислокації почнуть зароджуватися з поверхневих джерел типу Франка-Ріда або Фішера, оскільки на поверхневих джерелах дислокації зароджуються набагато легше, ніж на джерелах, розташованих в об'ємі деформованого матеріалу. Наприклад, при дряпанні кременистого заліза смуги ковзання починаються від поверхні подряпини і мають велику протяжність вглиб металу. Іншим експериментальним підтвердженням переважаючого впливу поверхневих джерел може служити картина розподілу смуг ковзання в жароміцних сплавах *XH55BMTФКЮ*, *XH56BМКЮ*, ЖС6КП і електротехнічної сталі 3414 після їх обробки різанням. У цих матеріалах розміри зерен рівні 0,32–0,45 мм і більше глибини зміцнення, тобто глибини проникнення дислокацій в поверхневий шар. Отже, межі зерен, які також є потенційними джерелами дислокацій в об'ємі деформованого металу, що не беруть активної участі в генеруванні нових дислокацій.

Утворилися нові дислокації зміцнюють матеріал і змінюють його фізико-механічні характеристики. Збільшення щільності дислокацій в металі приводить до збільшення його твердості, а твердість деформованого тіла пропорційна середньому напрузі, що діяв в процесі деформації. У свою чергу, з теорії дислокацій слід, що напруга деформування при різних механізмах зміцнення пропорційно квадратному кореню з щільності дислокацій:

$$\sigma = \frac{Gb}{k} \sqrt{\rho}, \quad (7.7)$$

де  $G$  – модуль зсуву;  $b$  – вектор Бюргерса;  $k = 3-5$  – числовий множник;

$\rho$  – щільність дислокацій.

Відповідно твердість зміцненого металу  $HV$  і ступінь наклепу  $N$  можуть бути безпосередньо пов'язані з щільністю дислокацій

$$HV = \frac{Gb}{K} \sqrt{\rho}, \quad (7.8)$$

$$N = \frac{HV - HV_{исх}}{HV_{исх}} = \frac{K_{исх}}{K} \sqrt{\frac{\rho}{\rho_{исх}}} - 1, \quad (7.9)$$

де  $K$  – коефіцієнт, що залежить від модулів пружності і зсуву, характеристика розподілу зсувів форми ліній і величини кристалів.

Експериментальні вимірювання підтвердили існування параболічної зв'язку між щільністю дислокацій і мікротвердістю, близькою до вираження (7.8), для міді та алюмінію, оброблених різанням. Від щільності та характеру розподілу дислокацій залежить рівень залишкових напружень, величина прихованої енергії в обробленому матеріалі і інші характеристики якості поверхневого шару.

На рис. 7.4 представлена залежність міцності зчеплення газополуменевого покриття ПГ-10Н-01, напиляного на основу зі сталі 45, від швидкості обертання металевої щітки.

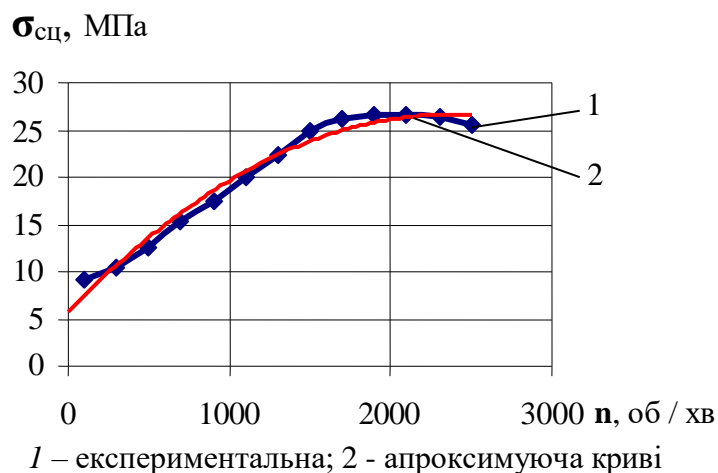


Рис. 7.4. Залежність міцності зчеплення газополуменевого покриття ПГ-10Н-01 з основою зі сталі 45 від швидкості обертання щітки

Зі збільшенням швидкості обертання щітки міцність зчеплення збільшується,

причому в інтервалі швидкостей обертання від 200 до 1500 об/хв інтенсивніше і при оборотах 1900–2000 об/хв досягає максимуму, після чого починає незначно знижуватися. В результаті апроксимації експериментальної залежності отримуємо поліноміальну функцію

$$\sigma_{ci} = 4 \cdot 10^{-6} \cdot n^2 + 0,018n + 5,73 \quad (7.10)$$

і коефіцієнт кореляції  $R = 0,9793$ . Отриману залежність (7.10) назвемо рівнянням прогнозування міцності зчеплення напиляного покриття з основою в залежності від оборотів металевої щітки.

У свою чергу шорсткість поверхні також залежить від швидкості обертання щітки. Результати експериментальних досліджень представлені на рис. 7.5.

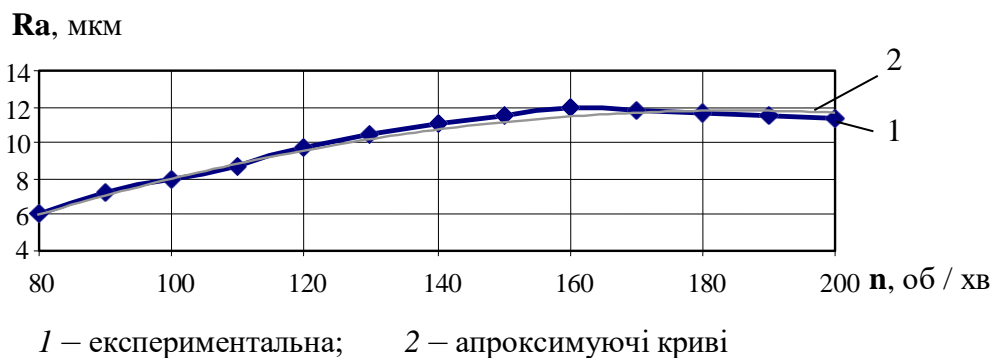


Рис. 7.5. Залежність шорсткості напилюваної поверхні сталь 45 від швидкості обертання металевої щітки

З аналізу експериментальної кривої видно, що зі збільшенням швидкості обертання щітки шорсткість оброблюваної поверхні підвищується до  $R_a = 10\text{--}12$  мкм (при струменево-абразивній обробці  $R_a = 6\text{--}8$  мкм) при оборотах 150–160 об/хв і встановленому натязі  $N = 3$  мм. Потім знижується, що можна пояснити зменшенням глибини проникнення голок. Апроксимуємо експериментальну криву, і отримуємо рівняння 2-го ступеня:

$$R_a = -7 \cdot 10^{-4} \cdot n^2 + 0,2287n - 8,2308. \quad (7.11)$$

Коефіцієнт кореляції дорівнює  $R = 0,9934$ .

На рис. 7.6 представлена залежність міцності зчеплення напиляного покриття від шорсткості поверхні основи.

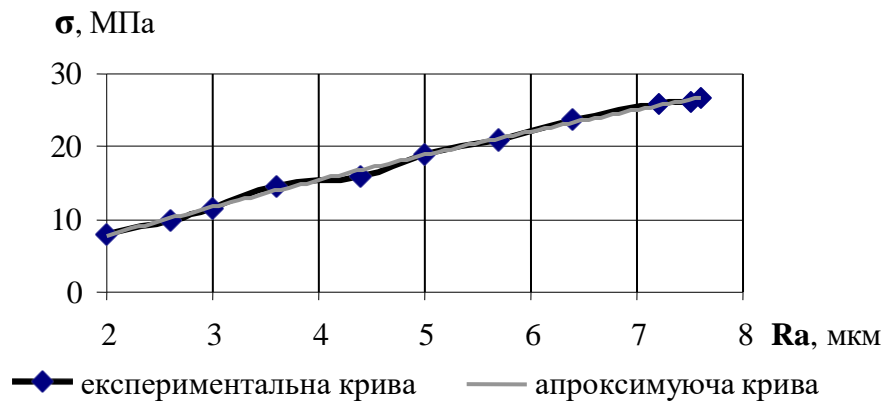


Рис. 7.6. Залежність міцності зчеплення напиляного покриття з основою від шорсткості поверхні

Рівняння апроксимуючої кривої

$$\sigma_{сч} = -0,1447 R_a^2 + 4,8219 R_a - 1,5813. \quad (7.12)$$

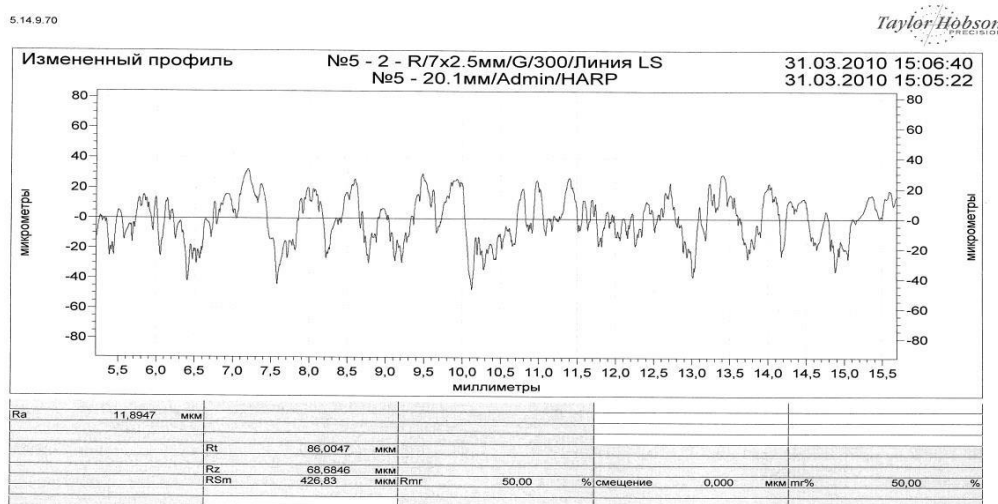
Величина коефіцієнта кореляції  $R = 0,9953$ . З рис. 7.6 видно, що зі збільшенням шорсткості напилюваної поверхні міцність зчеплення покриття з основою збільшується. Можна припустити, що максимальна міцність зчеплення буде обмежуватися міцністю газополум'яного покриття.

Оцінка мікротопографії поверхні проводилася за двома граничними режимами щеточної обробки, що охоплюють весь можливий діапазон зміни вихідних параметрів (табл. 7.1).

Таблиця 7.1 Режими щіткової обробки поверхні

Вид обробки	$d_r$ , мм	N, мм	D, мм	$l_r$ , мм	n, об/хв	P, шт/см <sup>2</sup>	$V_{под}$ , м/с
«М'який» режим	0,35	0,5	150	60	60	20	0,1
«Жорсткий» режим	0,8	3,00	150	30	150	40	0,1

Обробка по «м'якому» режиму забезпечила отримання мінімального рівня шорсткості, по «жорсткому» – максимального. Шорсткість оцінювалася параметрами  $R_a$ ,  $R_t$ ,  $R_{Sm}$ ,  $R_z$ ,  $R_{mr}$  (ГОСТ 2789-73 і стандарт ISO 4287-1997), які визначалися на профілографі – профілометрі «Taylor / Hobson» (рис. 7.7–7.8), де  $R_a$  – середнє арифметичне відхилення профілю,  $R_t$  – середнє квадратичне відхилення профілю,  $R_z$  – висота нерівностей по десяти точках,  $R_{Sm}$  – середній крок нерівностей,  $R_{mr}$  – крок профілю по вершинах. Профілі поверхні вимірювалися уздовж осі зразка. Відносна опорна довжина ( $L$ ) – 20 мм, базова довжина – 8 мм.



Параметри висотні, мкм:  $R_a = 11,89$ ;  $R_z = 68,7$ ;  $R_t = 86,0$ ;

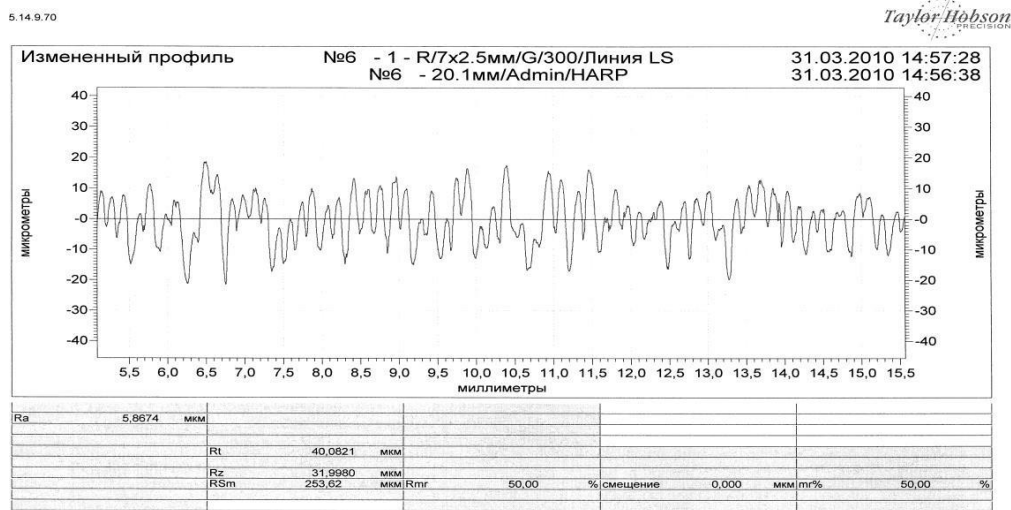
крокові, мкм:  $S_m = 426,83$ ; змішані:  $R_{mr}=50$

Рис. 7.7. Профілограми обробленої поверхні при «жорсткій» обробці щітковим інструментом

З рис. 7.7–7.8 випливає, що при «жорсткій» обробці відбувається відповідне збільшення параметрів  $R_a$ ,  $R_t$ ,  $R_z$ , а параметри  $Q_a$  – середнє арифметичне значення кута нахилу профілю та  $Q_q$  – середнє квадратичне значення кута нахилу профілю залишаються незмінними. Значення  $S_m$  вказують на те, що при незмінних  $Q_a$ ,  $Q_q$  нерівності стають більшими і більш протяжними.

Особливо цікавим є фіксація ефекту відтискування матеріалу при жорсткій обробці. Цей ефект характеризується зростанням параметрів  $R_a$ ,  $R_t$ ,  $R_z$  в зоні

контакту у напрямку руху щітки.



Параметри висотні, мкм:  $R_a = 5,9$ ;  $R_z = 31,0$ ;  $R_t = 40,1$ ;  
 крокові, мкм:  $S_m = 253,6$ ; змішані:  $R_{mr}=50$

Рис. 7.8. Профілограми обробленої поверхні при «м'якій»  
 обробці щітковим інструментом

Дані дослідження дозволяють сформулювати наступну методику дослідження мікротопографії поверхні, залежність її параметрів від обробки поверхні щітками зі змінними параметрами  $d_{ш}$ ,  $N$ ,  $l_{ш}$ ,  $n$ ,  $P$ :

- мікротопографії поверхні характеризується параметрами  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_t$ ,  $Q_a$ ,  $Q_q$ ;
- для характеристики висотних параметрів профілю необхідно використовувати параметри  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_t$ ;
- для характеристики мікрорельєфу профілю та опосередкованої характеристики крокових параметрів профілю слід використовувати параметри  $Q_a$ ,  $Q_q$ .

Результати даного дослідження можна використовувати при розробці технології отримання регламентованої мікротопографії поверхні деталей. Параметри  $R_p$ ,  $R_{вист}$ ,  $R_{вп}$ ,  $\theta$ ,  $V$  розраховувалися за методиками. Висота згладжування  $R_p$  визначалася як відстань від лінії виступів до середньої лінії. Середні радіуси виступів  $R_{вист}$  і впадин  $R_{вп}$  визначалися за формулами 7.13:

$$R_{вист} = \frac{9R_a^2 S_m^2}{128(R_p - 0,5R_a)^3}, \quad R_{вп} = \frac{9R_a^2 S_m^2}{128(5,5R_a - R_p)^3}. \quad (7.13)$$

Середній кут нахилу бічної стінки профілю розраховували за формулою 7.14:

$$\theta = \arctan \frac{2R_{\max}}{S}, \quad (7.14)$$

де  $R_{\max}$  – найбільша висота профілю;

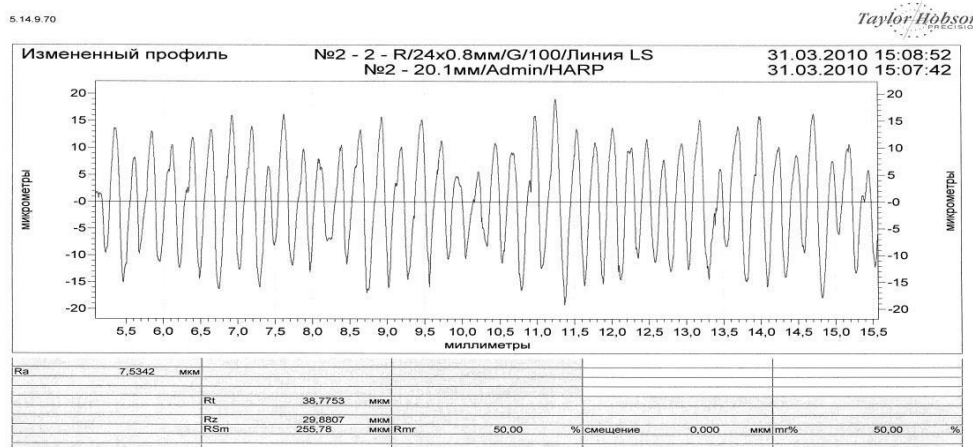
$S$  – середній крок виступів профілю щодо опорної довжини.

Параметри опорної кривої  $v$ ,  $b_1$  вираховували за формулами 7.15:

$$v = 2t_{\text{cp}} \frac{R_p}{R_a} - 1; \quad b_1 = t_{\text{cp}} \left( \frac{R_{\max}}{R_p} \right)^v \quad (7.15)$$

де  $t_{\text{cp}}$  – відносна опорна довжина профілю на рівні середньої лінії.

Для порівняння якості підготовки поверхні під напилення представлена мікротопографія поверхні (рис. 7.9) після струменево-абразивної обробки (розмір часток електрокорунду 0,5–0,8 мм, тиск стисненого повітря 0,5 МПа).



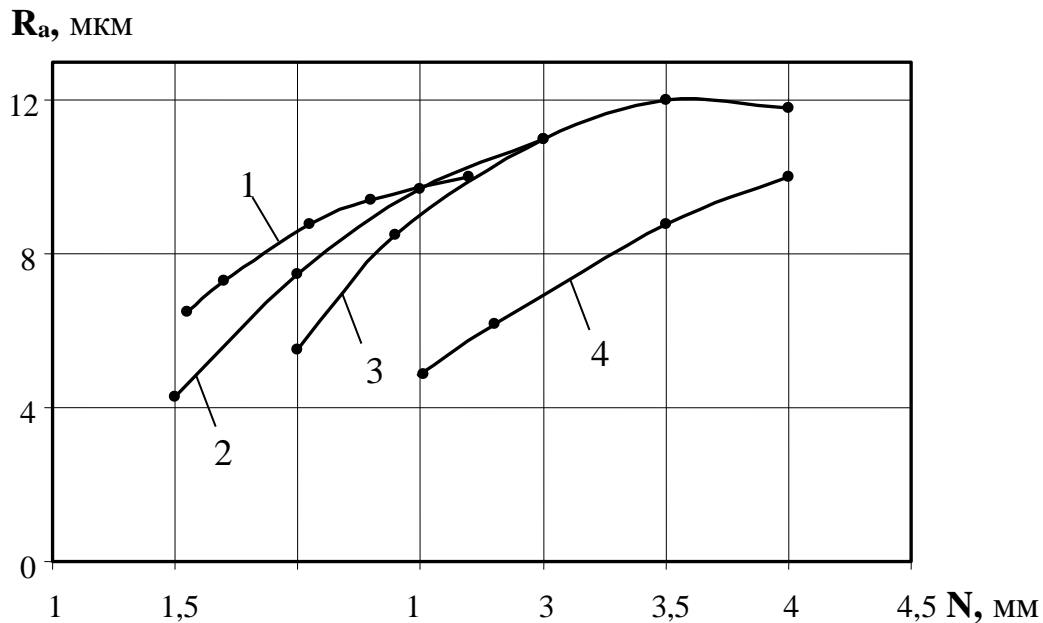
Параметри висотні, мкм:  $R_a = 7,53$ ;  $R_z = 29,88$ ;  $R_t = 38,77$ ;

крокові, мкм:  $S_m = 255,78$ ; змішані:  $R_{mr} = 50$

Рис. 7.9. Профілограми поверхні після абразивоструйної обробки

Встановлено, що збільшення  $d_r$  (при  $l_r = \text{const}$ ) призводить до зростання шорс-

ткості оброблюваної поверхні, однак зі збільшенням натягу шорсткість поверхонь, оброблених інструментами з різним діаметром голок, зменшується (рис. 7.10).



1 –  $d_r = 0,5$  мм;  $l_r = 20$  мм;  $P = 20$  шт/см<sup>2</sup>; 2 –  $d_r = 0,5$  мм;  $l_r = 40$  мм;  
 $P = 20$  шт/см<sup>2</sup>; 3 –  $d_r = 0,8$  мм;  $l_r = 40$  мм;  $P = 30$  шт/см<sup>2</sup>;  
 4 –  $d_r = 0,8$  мм;  $l_r = 60$  мм;  $P = 30$  шт/см<sup>2</sup>

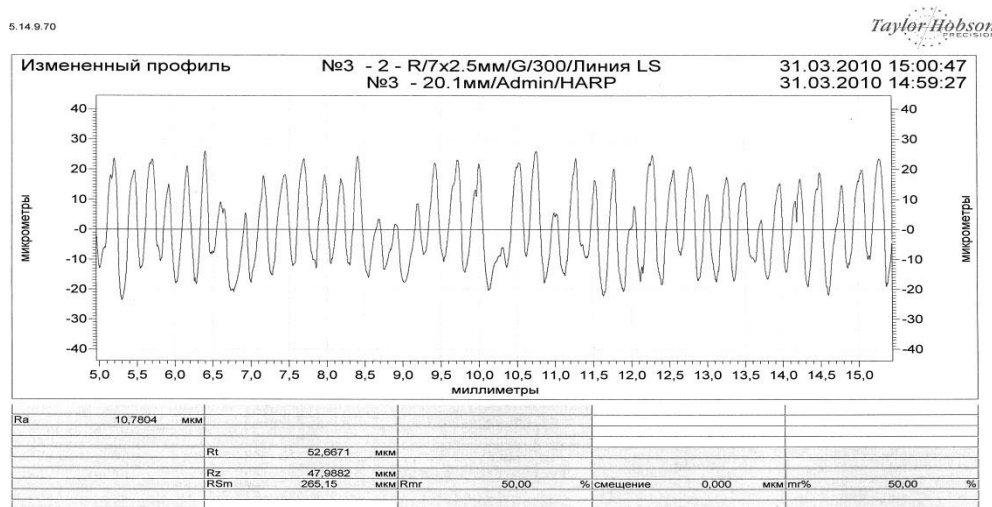
Рис. 7.10. Вплив натягу на висоту мікронерівностей  $R_a$  при різних  $d_r$  і  $l_r$  голок ( $n = 150$  об/хв)

Це пояснюється зростанням пластичних деформацій. Вибір вільної довжини голок впливає на вибір натягу. Встановлено, що збільшення натягу при збільшенні довжини голок знижує ефективність обробки поверхні і призводить до зростання напруги вигину в голках. Поряд з цим, при рівних натягах (рис. 7.10, криві 1 і 2) щітка з більшою довжиною голок забезпечує отримання меншої шорсткості поверхні, що пояснюється зменшенням глибини проникнення в результаті збільшення довжини голок.

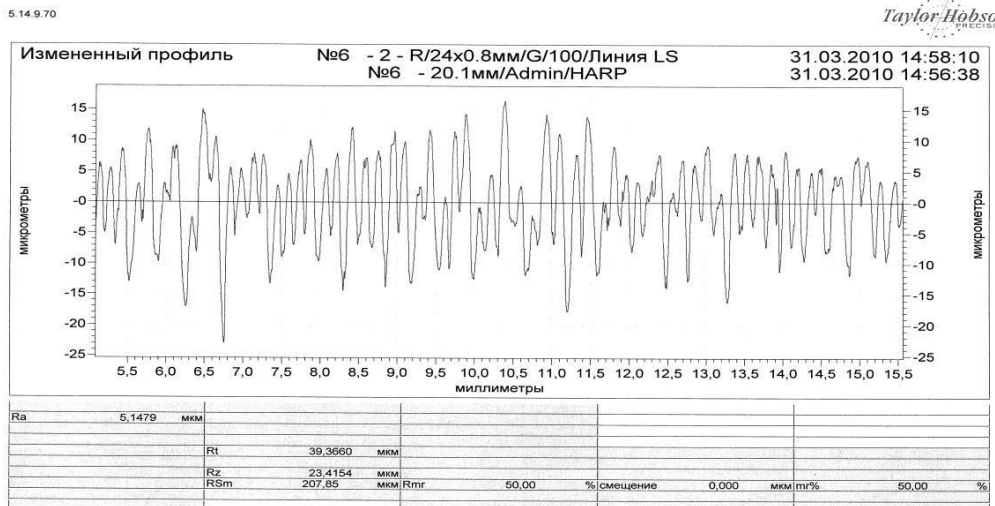
Зменшення шорсткості спостерігається при досягненні швидкості щітки  $n > 150$ – $160$  об/хв. Це пояснюється тим, що з ростом швидкості обробки збільшується отжатиє голок, що призводить до зменшення їх впровадження в оброблювану

поверхню і зниження шорсткості. Збільшення щільності розташування голок (Р) істотного впливу на шорсткість оброблюваної поверхні не робить.

Зі збільшенням натягу шорсткість поверхні зростає в результаті збільшення глибини впровадження голок. Збільшення натягу понад оптимальних значень призводить до зменшення глибини впровадження голок. Аналіз отриманих профілограм (рис. 7.11) показав, що максимальна величина  $R_z = 48$  мкм отримана



а



б

Швидкість обертання: а –  $n = 150$  об/хв; б –  $n = 200$  об/хв

Рис. 7.11. Профілограми поверхні основи після щіткової обробки

( $d_f=0,8$ мм;  $S_{щ}=1,2$  м/хв;  $N_{щ}=3$  мм)

при швидкості обертання щітки 150 об/хв, а мінімальна величина  $R_z = 23,4$  мкм отримана при швидкості обертання щітки 200 об/хв.

З огляду на те, що характер мікрорельєфу, отриманий щеточною обробкою, залишається одним і тим же при зміні параметрів процесу, можна вважати, що якісно картина формування шорсткості поверхні відображена правильно.

Порівняння значень міцності зчеплення покриттів, нанесених газополум'євим напиленням на поверхні, підготовлені струменево-абразивним методом (17–20 МПа) і щітковою обробкою (26–28 МПа), виконані випробуванням на зрушення, показали можливість використання останньої в технології відновлення циліндричних поверхонь деталей. Оскільки для щіткової обробки можна використовувати ручний електричний або пневматичний інструмент цей метод може знайти широке застосування в ремонтному виробництві.

## 7.2. Високошвидкісне напилення

На рис. 7.12 представлена схема розташування різних способів газотермічного напилення залежно від швидкості напилюваних частинок на основу.



Рис. 7.12. Хронологічна залежність швидкості частинок порошку для деяких способів газотермічного напилення

Аналізуючи представлені дані видно, що в останні роки з'явилися і отримують свій розвиток нові способи газотермічного напилення: надзвукове газополуменеве напилювання, надзвукове плазмового напилення, надзвукове газодинамічне напилення.

При використанні спеціальних плазмотронів із профільованими каналами сопел або при плазмовому напиленні в динамічному вакуумі (способи *VPS (Vacuum Plasma Spray)* та *LP PS (Low Pressure Plasma Spray)*) можна отримати надзвукові швидкості плазмового струменя.

При контакті частинок матеріалу, що напилюється, з поверхнею вони зчеплюються з нею внаслідок металургійної, механічної та інших видів взаємодії.

Найбільш характерні показники якості покриття для плазмового напилення наведені в табл. 7.2.

Таблиця 7.2. Характерні показники якості покриття, отриманого при плазмовому напиленні (за даними фірми *Sulzer Metco*)

Параметр	Матеріал покриття	Дозвукове плазмове напилення	Напилення в динамічному вакуумі (способи <i>VS/LPPS</i> )
Температура плазмового струменя, °С		12000 - 16000	10000 - 80000
Міцність зчеплення, МПа	Чорні метали	21 – 34	400 – 750
	Кольорові метали	14 – 48	
	Керамічні матеріали	21 – 41	25 – 55
	Карбіди	55 – 69	60 – 100
Пористість, %	Чорні метали	5 – 10	1 – 3
	Кольорові метали	5 – 10	1 – 3
	Керамічні матеріали	5 – 10	2 – 5
	Карбіди	5 – 10	2 – 5
Рекомендовані товщини шару покриття, мм	Чорні метали	0,4 – 2,5	0,05 – 10
	Кольорові метали	0,4 – 5,0	0,05 – 10
	Керамічні матеріали	0,4 – 5,0	0,05 – 5,0
	Карбіди	0,4 – 5,0	0,05 – 10

Одним із засобів, що дозволяє підвищити якість покриття, особливо з матеріалів, які можуть розкладатися, окиснюватися, азотуватися, є плазмове нанесення покриття в камері з контрольованою за складом і тиском атмосферою.

З цією метою використовують також захисні соплові насадки, що утворюють закритий простір між розпилювачем та виробом, заповнений плазмоутворювальним або захисним газом. Найдосконалішим є плазмове нанесення покриття в динамічному вакуумі – методи *VPS* та *LPPS*. Витікання плазмового струменя відбувається у вакуумну камеру, з якої безперервно відкачуються робочі гази. Швидкість витікання плазмового струменя перевищує швидкість звуку в два-три рази, збільшується швидкість частинок, що напилуються, до 800 м/с. Отримане покриття має міцне зчеплення з основним матеріалом деталі.

Новим у розвитку газополуменевого напилення є створення установок для високошвидкісного напилення.

Спосіб отримання газополуменевого покриття з використанням струменя надзвукової швидкості в світовій практиці отримав назву *High Velocity Oxygen Fuel* (HVOF) або «Високошвидкісне киснево-паливне напилення».

Для напилення використовують надзвуковий газовий струмінь, який генерується спеціальним пальником з камерою прискорення ракетного типу при спаленні ацетилену, пропану, водню, пропілену або метил-ацетиленпропану при тиску 0,6–0,8 МПа у суміші з киснем під тиском до 1,2 МПа.

Швидкість струменя продуктів згоряння при використанні способу HVOF сягає від 1350 до 2880 м/с, швидкість частинок матеріалу, що напилується – від 300 до 1000 м/с, а температура горіння – 3100 °С.

Для надзвукового напилення, в якому замість кисню як окисник використовується стиснуте повітря, застосовується спосіб за аналогією до *HVOF*, що має назву «Високошвидкісне повітряно-паливне напилення» або *HVAF* (*High Velocity Air Fuel*).

Показники якості покриття, які можна отримати при газополуменовому напиленні, наведені в табл. 7.3.

Палива при високошвидкісному газополуменеве напилювання спалюються в пальниках при підвищеному тиску, що забезпечують критичний перепад тисків на

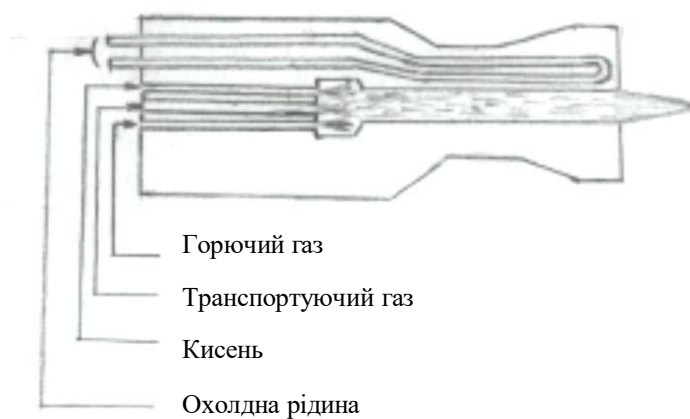
Таблиця 7.3. Характерні показники якості покриття, отриманого при газополуменевому напиленні (за даними фірми *Sulzer Metco*)

Параметр	Матеріал покриття	Дозвукове напилення		Надзвукове напилення (HVOF)
		дротяного матеріалу	порошкового матеріалу	
Температура полум'я, °С		3000	3000	2000 – 3000
Міцність зчеплення, МПа	Чорні метали	14 – 28	14 – 21	48 – 62
	Кольорові метали	7 – 34	7 – 34	48 – 62
	Самофлюсівні сплави	–	До 83	До 62
	Керамічні матеріали	–	14 – 34	–
	Карбіди	–	34 – 48	До 83
Пористість, %	Чорні метали	10 – 15	10 – 15	2 – 5
	Кольорові метали	10 – 15	10 – 15	2 – 5
	Самофлюсівні сплави	–	–	До 2*
	Керамічні матеріали	–	5 – 10	–
	Карбіди	–	10 – 15	2 – 5
Рекомендована товщина шару покриття, мм	Чорні метали	0,5 – 5,0	0,5 – 2,0	0,6 – 2,5
	Кольорові метали	0,5 – 5,0	0,5 – 5,0	0,6 – 2,5
	Самофлюсівні сплави	–	0,4 – 2,5	0,4 – 3,8
	Керамічні матеріали	–	0,4 – 0,8	–
	Карбіди	–	0,4 – 0,8	0,4 – 5,0

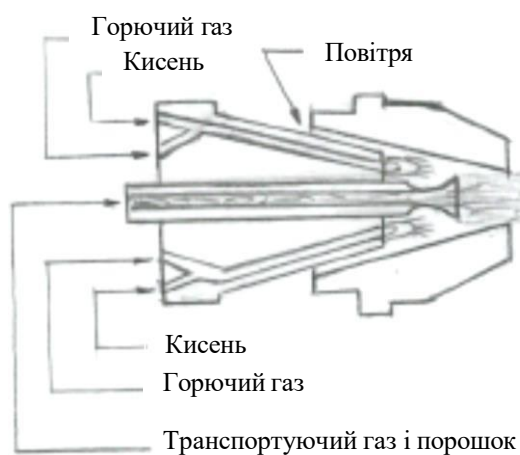
\* - неоплавлене покриття

надзвукових соплах (рис. 7.13, а). Цей метод відрізняється від традиційного газополум'яного напилення, при якому паливо спалюється в зовнішньому факелі при атмосферному тиску (рис. 7.13, б).

У табл. 7.4 представлена коротка характеристика деяких зарубіжних установок для високошвидкісного газополум'яного напилення.



а



б

Рис. 7.13. Конструктивні особливості пальників при різних способах газотермічного напильвання:

а – при надзвуковому газополуменеве напильовання;

б – при традиційному газополуменеве напильовання

Таблиця 7.4. Характеристика установок для високошвидкісного напильовання

Матеріали		Intelli-Jet	JP -5000	DJ2700	Top Gun
Кислород, м <sup>3</sup>		–	60	18	21
Сжатый воздух, м <sup>3</sup>		300	–	23	–
Паливо	Вид	Пропілен	Гас	Пропілен	Пропілен
	Витрата, кг	30	21	17	16
Азот, м <sup>3</sup>		0,96	1,2	1,08	1,02
Вода на охолодження, м <sup>3</sup>		–	1	0,72	0,72

Високошвидкісне газополум'яне напилення по праву вважається найбільш сучасної з технологій напилення. У країнах Європи і Північної Америки високошвидкісне напилення практично витіснило гальваніки і методи вакуумного напилення в багатьох галузях. Твердосплавні покриття, нанесені методами високошвидкісного напилення, за всіма статтями перевершують гальванічні покриття, процес створення яких визнаний надзвичайно канцерогенним.

**Надзвукове плазмове напилення** підрозділяється на струминне і каналове. При струменевому надзвуковому напиленні частки порошку подаються в струмінь надзвукового потоку на виході з каналу і при підльоті до основи мають розкид за швидкостями від нуля до максимальної швидкості на осі струменя. У покритті, при багаторазових проходах, досягається шарувата структура – від щільної (пористість менше 1 %) до звичайної (пористість від 1 до 6 %).

Значно кращі результати по щільності і міцності зчеплення з основою досягаються при «каналовому» надзвуковому плазмовому напиленні. В цьому випадку частинки порошку вводяться в потік до зрізу сопла і рухаючись по каналу нагріваються, а потім виходять в струмінь. Низька швидкість частинок порошку при такому покритті практично не реалізується, і швидкості польоту частинок порошку приймають тільки близькі до максимальних значення.

Відомо також багатодугового плазмового напилення, що володіє певними перевагами перед наведеними вище способами, з точки зору вигідності електроживлення плазматронов.

### **7.3. Газодинамічне напилення покриття**

Формування металевих покриттів газодинамічним способом засновано на закріпленні твердих металевих частинок, які мають велику кінетичну енергію, на поверхні, що напилюється, в процесі високошвидкісного удару. Для нанесення покриття цим способом використовується обладнання, конструкція якого забезпечує створення надзвукового газового струменя і введення в нього частинок порошкового матеріалу і їх прискорення до швидкості, необхідної для формування покриття.

Відсутність високих температур, характерних для наведених вище газотермічних методів нанесення покриття, дала підставу авторам цього методу назвати метод «холодне газодинамічне напилення» (ХГН). Термін "холодне" введено для того, щоб підкреслити, що температура частинок значно менша за їх температуру плавлення, а термін «газодинамічне» вказує на першорядну роль високої швидкості частинок при формуванні покриттів.

На рис. 7.14 наведено схему установки для ХГН, розробленої Інститутом теоретичної та прикладної механіки (м. Новосибірськ) та фірмою «Ktech Corp».

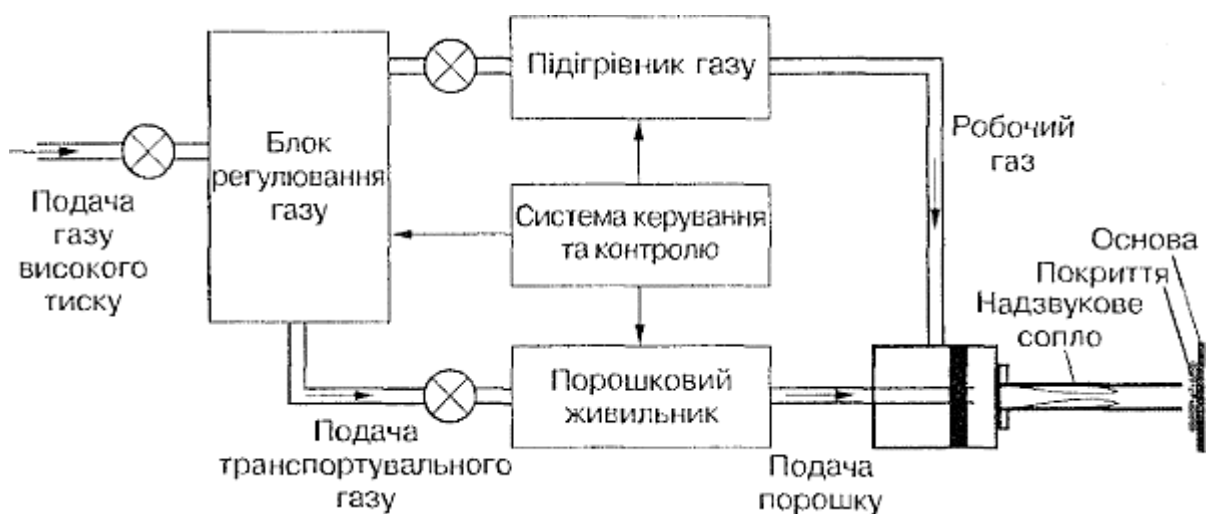


Рис. 7.14. Схема установки для холодного газодинамічного напилення

Метод ХГН реалізують за допомогою надзвукового сопла (сопла Лавалю), яке дозволяє отримати швидкість струменя з числом Маха  $M \approx 2-4$ . Як прискорювальний газ використовується суміш повітря з гелієм при загальному тиску у форкамері  $P_0 = 2,0$  МПа. Змінюючи склад суміші від чистого повітря до чистого гелію, можна збільшувати швидкість частинок від 200 до 1200 м/с. Температура підігрівання газу становить 100–600 °С.

Практика використання газодинамічного способу нанесення покриття показала, що, використовуючи надзвуковий струмінь газу, який має температуру 100–600 °С, можна отримати покриття з більшості металів.

Частинки порошкового матеріалу в процесі їх прискорення не нагріваються вище, ніж 200–300 °С і перебувають в твердому стані та практично не окиснюються

при нанесенні покриття.

Формування покриття з твердих частинок не викликає високотемпературного нагрівання основи, що забезпечує низький рівень залишкових напружень у покриттях, високу адгезію покриття і можливість нарощувати досить великі товщини, причому матеріал основи, як і матеріал частинок, практично не окислюється.

Продуктивність способу досягає рівня 3–15 кг/год, товщина покриття – 250 мкм за один прохід.

Розглянуті вище нові високошвидкісні способи дозволяють значно розширити можливості традиційного газотермічного напилення покриттів, використовуваного при відновленні деталей. Отримані покриття характеризуються більш високою адгезією, низькою пористістю, можуть наноситися на вироби складної форми, виготовлені практично з будь-яких металів, а також на кераміку і скло.

#### 7.4. Імпульсно-плазмове зміцнення

Спосіб розроблений в Інституті електрозварювання ім. О. Є. Патона НАН України. Підвищення потужності імпульсу здійснюється за рахунок детонації горючої газової суміші в реакційній камері (РК) 1 (рис. 7.15), в якій між двома

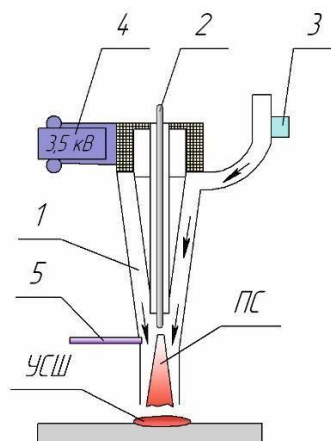


Рис. 7.15. Детонаційний пристрій з електромагнітним принципом введення додаткової енергії:

- 1 – реакційна камера; 2 – металевий електрод; 3 – малогабаритний детонаційний пристрій;  
4 – електричний перетворювач; 5 – трубка; ПС – плазмовий струмінь;  
УСШ – ударно-стиснутий шар

коаксіальними електродами наведено електричне поле  $E$ . По осі РК закріплений металевий електрод 2, кінець якого при перегріванні еродує і забезпечує введення в плазмовий струмінь парів металу. Ініціювання детонації в РК здійснюється малогабаритним детонаційним пристроєм 3. Через цей же пристрій здійснюють заповнення РК компонентами горючої газової суміші.

Енергію для підтримки напруженості електричного поля забезпечує електричний перетворювач 4. При ініціюванні детонації в РК по шару продуктів згорання за детонаційною хвилею (ДХ) тече електричний струм. Виникає додатковий приплив енергії до газу. Після виходу ДХ з РК 1, електричний струм тече від анода-електрода 2 до поверхні виробу, який напилюють (катода) по плазмовому струмені (ПС) і матеріалу, який напилюють, який подається транспортуючим газом через трубку 5.

При проходженні електричного струму виникають пондеромоторні сили, які стягують плазму до осі РК, що збільшує щільність її енергії і знижує ерозію стінок РК. Високоенергетичний струмінь газу формує на поверхні виробу ударно-стиснутий шар (УСШ), що забезпечує термоактивацію. Проходження електричного струму по ПС викликає додатковий нагрів порошкового матеріалу і поверхні.

При імпульсно-плазмовій обробці (ІПО) поверхня відчуває комплексний вплив, а саме: ударне, електромагнітне, термічне, оборотні мартенситні перетворення. Кожне з них окремо грає роль ініціатора дифузійних процесів, що різко прискорює масо перенос і робить на поверхневий шар виробу термохімічний вплив, стимулюючи протікання хімічних реакцій.

Обробка поверхні виробу імпульсною плазмою, що містить легуючі елементи, забезпечує легування поверхні складовими плазми і її зміцнення. Введення легуючих елементів в плазму здійснюється у вигляді продуктів ерозії металевого електрода (стержня) та у вигляді газу (пропан, азот).

При модифікуванні поверхні підвищується: втомна міцність (до 40 %), корозійна стійкість (до 200 %), зносостійкість (до 1000 %) і теплостійкість (до 200 %).

Імпульсно-плазмове модифікування забезпечує можливість вести безконтактну обробку поверхні рельєфу і може бути використано для обробки виробів, що мають складну конфігурацію та виготовлені з різних сплавів. Наприклад, обробка сплаву на основі титану дозволяє отримати модифікований шар, який має товщину до 60 мкм і твердість до 9 ГПа. На поверхні виробів з вуглецевих сплавів на основі заліза можна отримати шар товщиною до 100 мкм та твердістю до 20 ГПа. На поверхні виробів з чавунів або заліза можна отримати шар твердістю 9...14 ГПа.

Використання вуглеводневих газів в якості таких, що утворюють плазму, дозволяє створити вуглецеві імпульсні потоки плазми. Пари вуглецю конденсуються на поверхні зразка. Після 20 імпульсів обробки на поверхні була отримана вуглецева плівка, товщиною до 20 мкм. Рентгенографічний аналіз показав, що ця плівка складається з вуглецю, переважно аморфного.

Імпульсно-плазмове обладнання дозволяє наносити покриття з порошків або електродів. Найбільша твердість зміцненого шару на зразках зі сталі У8, які попередньо пройшли загартування і високий відпуск, була досягнута при використанні електродів з вольфраму і молібдену (рис. 7.16).

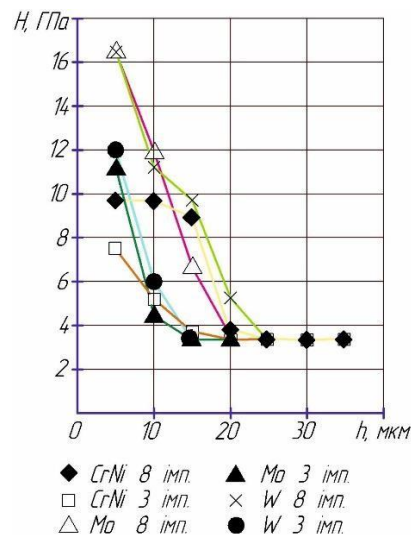


Рис. 7.16. Зміна твердості модифікованого шару в залежності від кількості імпульсів і введення в плазму металів

При нанесенні покриття з порошку  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  витрати компонентів горючої суміші становлять  $2 \text{ м}^3/\text{год}$  при частоті ініціювання детонації 4 Гц. Витрати електричної енергії на кожен плазмовий імпульс становлять 500...3500 Дж. Довжина порошкового струменя, обмежена циліндричним стовбуром, становить 0,350 м, а дистанція – 0,040 м, діаметр плями покриття, нанесеного за 1 імпульс, становить 0,033 м.

Покриття має товщину до 0,8 мм і містить до 8 %  $\gamma$ -фази  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , аморфні фази і інше  $\alpha$ -фази. Мікротвердість шару становить 9000...13000 Н/мм<sup>2</sup>.

При напиленні твердого сплаву (WC 98 %, Co 12 %) формується щільне покриття товщиною 0,1...1,0 мм і твердістю 8000...12800 Н/мм<sup>2</sup>.

Покриття мають високу зчіплюваність з підкладкою. Дослідження показали, що зчіплюваність покриття з порошку  $\text{Al}_2\text{O}_3$  з підкладкою зі сплаву на основі титану (BT-23) складає 30...50 МПа, зі сталеву підкладкою – 30...60 МПа, з підкладкою зі сплаву на основі алюмінію – 25...35 МПа. Зчіплюваність покриття з порошку твердого сплаву (WC 98 %, Co 12 %) з мідною підкладкою становить 200...250 МПа.

Продуктивність установки при нанесенні покриття з  $\text{Al}_2\text{O}_3$  становить 6...8 кг/год, а при нанесенні покриття з порошоків на основі металів продуктивність складає 8...10 кг/год при встановленій потужності установки 15 кВт. Подача компонентів горючої суміші і порошкового матеріалу в плазмотрон здійснюється безперервно, що здешевлює технології нанесення покриттів і технологічні пристрої.

Імпульсно-плазмова установка змонтована на базі горизонтально фрезерного верстата 1 (рис. 7.17) і використовується для зміцнення інструменту і нанесення високоякісних покриттів з металів, твердих сплавів і оксиду алюмінію на деталі машин.

Замість вертикального шпинделя верстата закріплена траверса з імпульсним плазмотроном 2 і малогабаритною детонаційною гарматою 3. Установка оснащена стандартним порошковим живильником 4. До реакційної камери плазмотрона приєднаний циліндричний стовбур 5, який призначений для обмеження газу порошкового струменя при його прискоренні і нагріванні. Порошок вводиться через

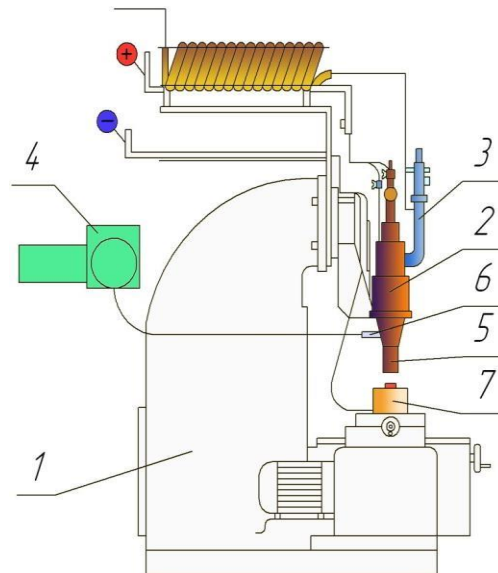


Рис. 7.17. Універсальна імпульсно-плазмова установка:

- 1 – горизонтально фрезерний верстат; 2 – траверса з імпульсним плазмотроном; 3 – малогабаритна детонаційна гармата; 4 – стандартний порошковий живильник; 5 – циліндричний стовбур; 6 – штуцер;  
7 – виріб, що напилюють (модифікують)

штуцер 6 у боковій стінці циліндричного стовбура. Виріб 7, що напилюють, закріплюється на столі фрезерного верстата. Досвід промислової експлуатації показав, що ресурс зміцненого інструменту підвищується в 3...5 рази.

### 7.5. Електролітно-плазмові зміцнення

Технологія електролітно-плазмового зміцнення (ЕПЗ) поверхні великогабаритних виробів розроблена в Інституті електрозварювання ім. О. Є. Патона, м. Київ.

Електролітно-плазмові зміцнення здійснюється нагріванням ділянок поверхні виробу електричними розрядами через плазмовий шар. Плазмовий шар формується з матеріалу електроліту на водній основі в зазорі між рідким (електролітним) електродом і поверхнею виробу.

Нагрівач містить металевий анод з характерним розміром  $D_a$  й наскрізними отворами для протікання електроліту до поверхні виробу-катода (рис. 7.18).

Електроліт в нагрівачі обтискається діелектричними стінками на дистанції  $H$  до діаметру вихідного сопла  $D_k$ . Швидкість електроліту збільшується пропорційно

відношенню площі отворів в аноді і площі сопла.

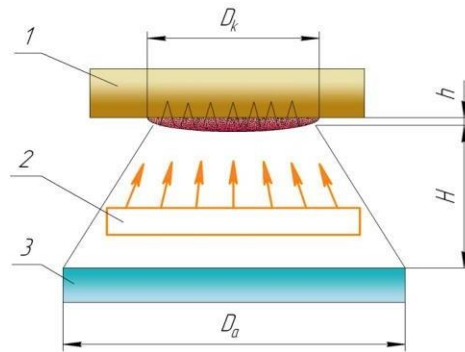


Рис. 7.18. Схема електролітно-плазмового нагрівача:

1 – вихідне сопло; 2 – електроліт; 3 – металевий анод

Основні витрати енергії йдуть на випаровування і нагрівання електроліту (формування плазмового шару) і нагрівання поверхні виробу електричними розрядами. Вартість обладнання для ЕПЗ нижче, ніж обладнання для загартування СВЧ в 5...10 разів, при одній і тій же продуктивності зміцнення поверхні.

Зміцнення досягається за рахунок утворення на поверхнях виробу, що зношуються, твердих включень, які забезпечують підвищений опір абразивному зносу і руйнуванню при знакозмінних динамічних навантаженнях (рис. 7.19).

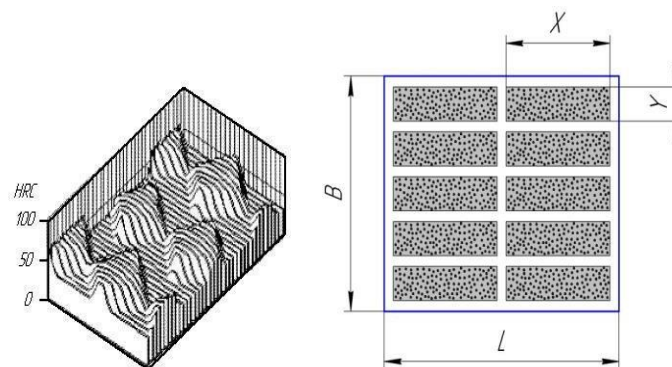


Рис. 7.19. Діаграма розподілення твердості і розміщення локальних твердих ділянок на поверхні циліндричного виробу після ЕПЗ:

$B$  – довжина розгортки;  $X$  і  $Y$  – характерні розміри загартованих ділянок поверхні

Тверді включення на поверхні виробу, завтовшки 2...10 мм, протистоять абразивному зносу, а не зміцнені проміжки між ними служать для релаксації напружень.

Технологія рекомендується для зміцнення шийок валів, наприклад, корінних і шатунних шийок колінчастого валу і поверхонь бурових труб.

Після електролітно-плазмового зміцнення, робоча поверхня – шийка валу – має тверді включення у вигляді випуклих прямокутних лінз, які періодично чергуються з м'якими плоскими впадинами.

При передачі навантаження на вал його поверхня нагрівається нерівномірно завдяки наявності теплового бар'єру по межі твердості. Це призводить до розширення матеріалу твердої лінзи і його випинання. Навантаження сприймають випуклі ділянки поверхні валка, які більш тверді і зносостійкі. Між виступами сформовані впадини, які в залежності від режимів навантаження можуть мати глибину до 30 мкм при ширині 10...20 мм. Ці впадини містять масло, а стінки впадин є гідродинамічними клинами.

При переміщенні поверхні валу щодо деталі (вкладишу), що сполучається, на поверхні мікрокліну виникає гідродинамічна підйомна сила, пропорційна швидкості ковзання і куту підйому клину. Сумарна підйомна сила всіх мікроклінів навіть при низьких швидкостях більше фізичного навантаження на вал, що гарантує утворення змащувального шару та безносий режим роботи валу (рис. 7.20).

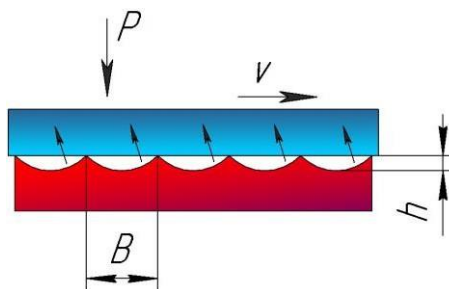


Рис. 7.20. Принципова схема рельєфу нерівностей, що утворюється після зміцнення

Запропонована конструкція поверхні шийок валів має такі переваги:

- 1) пружність передачі функціонального навантаження на поверхню вкладиша;
- 2) демпфірування вібраційних навантажень;
- 3) забезпечення рідинного тертя навіть при невеликих швидкостях переміщення;
- 4) виключення розриву розділової рідинної плівки і безпосереднього контакту поверхонь, що труться при імпульсних навантаженнях;
- 5) збільшення фактичної площі контакту і за рахунок цього тепла.

При електролітно-плазмовому зміцненні поверхні виробу зі сталі 40 на поверхні утворюється система твердих ділянок твердістю до HRC 55. Ділянки можуть мати форму кола, квадрата або овалу. Система твердих включень (рис. 7.19) забезпечує гідродинамічне тертя, сприймає зносні навантаження і забезпечує стискаючі напруження в поверхневому шарі. Завдяки стискаючим напруженням допустиме навантаження на виріб зі сталі 45 підвищується на 30...40 %. Округлений рельєф поверхні знижує втрати на тертя в 1,5...2 рази.

М'які ділянки поверхні забезпечують релаксацію напружень, що утворюються при експлуатації. Проміжки між загартованими ділянками мають низьку твердість, що підвищує міцність виробу.

Змінюючи режими обробки, яка зміцнює, можна отримати на поверхні загартовані шари товщиною 0,5, 1,5, 4, 6, 7, 8 і 9 мм (рис. 7.21).

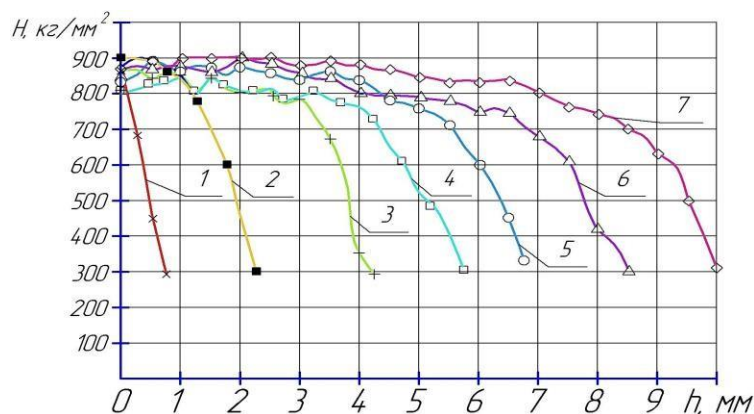


Рис. 7.21. Твердість загартованого шару на поверхні сплаву залізо-вуглецю (0,50 % C) в залежності від товщини зміцненого шару при напруженні електричного потенціалу  $U_n = 200$  В і часу нагрівання  $t$ :  
 1 – 5 с; 2 – 15 с; 3 – 30 с; 4 – 40 с; 5 – 50 с; 6 – 60 с; 7 – 70 с

При часі нагрівання 30 с товщина загартованого шару складає 4 мм, протягом 70 с – 9 мм. В якості електроліту використовують 13 % водний розчин карбонату натрію. Максимальна твердість поверхневого шару ( $900 \text{ кг/мм}^2$ ) практично не залежить від товщини зміцненого шару.

Твердість зміцненого шару виробу зі збільшенням його товщини плавно зменшується від максимальної ( $900 \text{ кг/мм}^2$ ) до твердості основи ( $250\text{...}300 \text{ кг/мм}^2$ ) і, як правило, не залежить від часу нагріву.

Технологія ЕПЗ використана для зміцнення колінчастого валу і бурильної труби. Залежно від технологічних вимог і розмірів виробу електролітний нагрівач повинен забезпечувати поверхневий нагрів і загартування у вигляді прямокутника з характерними розмірами, рівними 20 і 50 мм. При нагріванні до температури фазових перетворень, витримці 5...15 с і охолодженні електролітом, в поверхні виробу утворюються тверді включення у вигляді випуклих прямокутних лінз  $20 \times 50 \text{ мм}$ , максимальна глибина включення твердої лінзи в поверхню до 10 мм.

Для обробки виробів виготовлено установку ЕПЗ (рис. 7.22), яка складається зі спеціалізованих навісних нагрівачів 2, пульта управління 3, джерела електричного живлення 4, бака 6 з насосною станцією 5 і обертача 7, в якому фіксується циліндрична деталь 1.

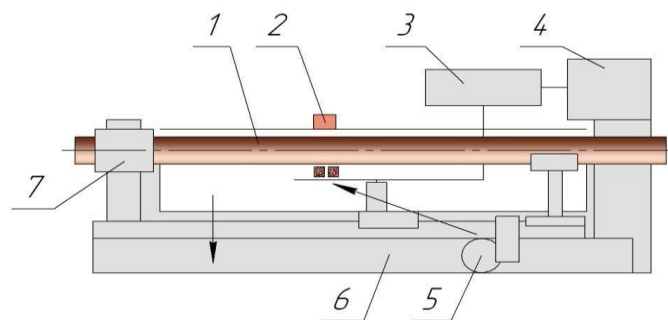


Рис. 7.22. Схема установки для електролітно-плазмової обробки, яка зміцнює, циліндричних виробів типу колінчастий вал (бурова штанга):

- 1 – деталь; 2 – навісні нагрівачі; 3 – пульт управління; 4 – джерело електричного живлення;  
5 – насосна станція; 6 – бак для електроліту; 7 – обертач

Виріб фіксують в маніпуляторі 7, нагрівач 2 встановлюють на поверхню, яка зміцнює деталі 1 та по команді з пульта управління 3 здійснюють її періодичне нагрівання та охолодження. В процесі періодичного повторення технології «нагрів – охолодження – поворот» на поверхні виробу формується система твердих включень у вигляді прямокутних лінз.

На рис. 7.23 наведено вид навісного пристрою для ЕПЗ зовнішньої поверхні бурової штанги (замка, муфти). Система твердих (до HRC 60) включень у поверхні труби бурової штанги, що зношується, забезпечує підвищення зносостійкості поверхні і міцності.



Рис. 7.23. Навісний пристрій для зміцнювальної обробки циліндричних деталей

Промислові випробування, проведені в Інгулецькому ГЗК (м. Кривий Ріг), показали, що довговічність бурових штанг верстата СБШ-250 МНА зросла в 2...3 рази. Продуктивність технології ЕПЗ бурових штанг становить до 5 м погонних труби в годину при встановленій потужності перетворювача електричної енергії 40 кВА.

ЕПЗ забезпечує швидкість нагрівання і охолодження поверхні виробу в діапазоні 10... 500 °С/с, і термоциклічну обробку (загартування) локальних ділянок поверхні виробів на глибину від 0,3 до 10 мм. Твердість ділянок поверхні на сталі з вмістом вуглецю до 50 % підвищується до 900 кг/мм<sup>2</sup>.

Устаткування для ЕПЗ комплектується зі стандартних маніпуляторів

(обертачів) і перетворювачів електричної енергії, а нестандартне обладнання (нагрівачі і пульт управління) виготовляють навісним, знімним і переносним. Досвід промислового використання обладнання підтвердив високу ефективність ЕПЗ.

Технологія ЕПЗ є перспективною для зміцнення і підвищення довговічності шийок опорних валків робочих клітей прокатних станів, які працюють в сполученні з підшипниками ковзання.

### **7.6. Мікродугове оксидування**

В останні роки вченими проводиться багато досліджень в області розвитку методу мікродугового оксидування (МДО), що є різновидом методу плазмової електролітичної анодної обробки (оксидування). Мікродугове оксидування – екологічно чиста технологія електроплазмохімічного перетворення поверхневого шару деталей з алюмінієвих сплавів у високотемпературні модифікації оксидів алюмінію  $\alpha$ - і  $\gamma$ -фаз.

МДО дозволяє створювати на поверхні виробу керамічні багатофункціональні покриття, що відрізняються високою зносостійкістю і міцністю зчеплення, теплостійкістю і стійкістю до впливу агресивних середовищ. Простота технологічного обладнання, екологічно чисті електроліти, відсутність спеціальних вимог до підготовки поверхні перед нанесенням покриттів зумовлюють перспективність методу МДО для машинобудування, а також відновлення та зміцнення зношених деталей.

Технологічна установка (рис. 7.24) для нанесення МДО-покриттів складається з джерела технологічного струму (ДТС) 6 і технологічної ванни 1, сполученої з ємністю 5 для охолодження електроліту та змійовиком 4 сполучними шлангами 3. Насос 2 служить для перекачування електроліту з однієї ванни в іншу. Деталь 7 поміщають в електроліт і закріплюють на струмопідвідній шині.

При пропусканні від ДТС змінного струму на поверхні оброблюваної деталі виникають мікродугові розряди. У каналах розрядів утворюється низькотемпературна плазма і відбуваються реакції, в ході яких поверхневий шар деталі перетворю-

ється в високотемпературні модифікації оксидів алюмінію  $\alpha$ - і  $\gamma$ -фаз з включенням в нього компонентів електроліту.

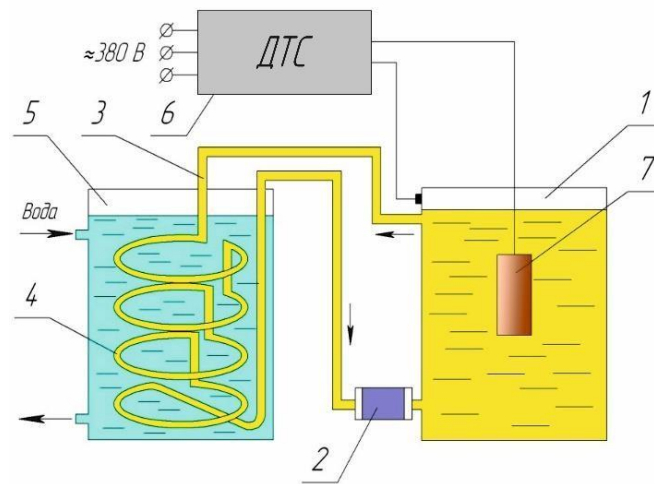


Рис. 7.24. Схема установки для мікродугового окиснення:

1 – технологічна ванна; 2 – насос; 3 – сполучні шланги; 4 – змійовик;  
5 – ємністю для охолодження електроліту; 6 – джерела технологічного струму; 7 – деталь

В локальній зоні утворення оксиду електричний опір зростає. Тому, коли шар покриття досягає певної товщини, мікродугові розряди переміщуються на сусідні ділянки, де електричний опір нижче. І так триває доти поки сила струму не знижується до рівня, при якому процес окислення припиняється. В результаті утворюються покриття, які можна порівняти за зносостійкості з карбідом вольфраму.

Розроблені технології відновлення і зміцнення деталей з алюмінієвих сплавів АК7ч ГОСТ 1583, АОЗ-7 ГОСТ 14113, АД1 (1013), АМг2 (1520), Д16 (1160) по ГОСТ 4784, а також корозійностійкої сталі 12Х18Н10Т ГОСТ 5632.

На рис. 7.25 представлена загальна структурна схема технологій відновлення і зміцнення деталей із застосуванням МДО.

Деталі розбиті на групи за значенням зносу і для кожної групи розроблена технологія відновлення і зміцнення.

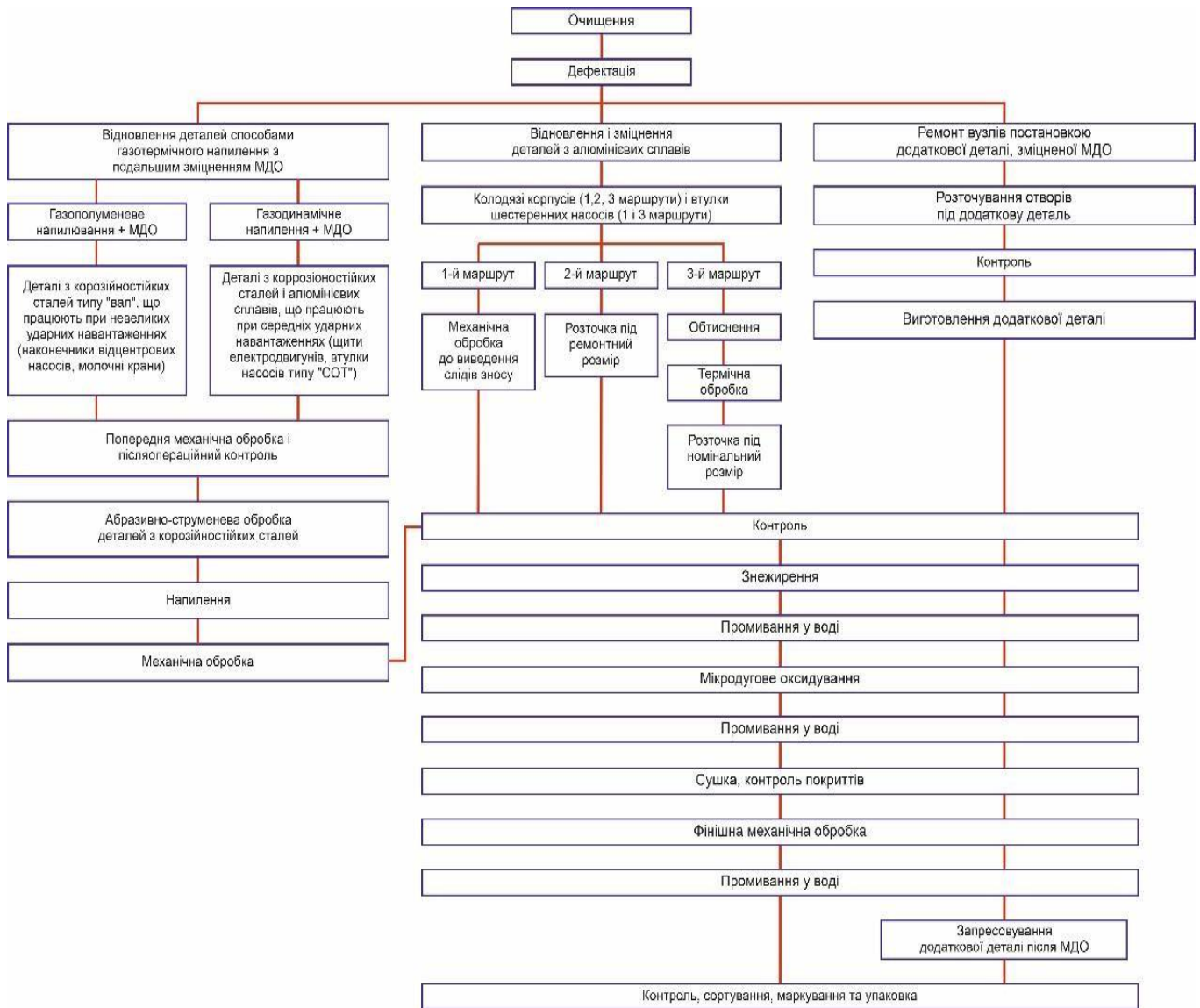


Рис. 7.25. Загальна структурна схема технологій відновлення і зміцнення деталей із застосуванням МДО

Деталі з алюмінієвих сплавів розділені на три групи:

- 1 група – деталі, з зносом до 0,06 мм;
- 2 група – деталі, з зносом від 0,06 до 3,0 мм;
- 3 група – деталі, з зносом понад 3,0 мм.

Для деталей першої групи рекомендується технологія відновлення і зміцнення деталей МДО. Технологія включає попередню обробку (очищення та дефектація деталей, попередня мехобробка, знежирення, ізоляція місць, що не підлягають

нарощуванню і монтаж деталей на підвіску), нарощування (МДО) і обробку деталей після нарощування (демонтаж з підвіски, зняття ізоляції, промивка водою, сушка та контроль покриттів, фінішна мехобробка покриттів і контроль). Для нарощування деталей з АК7ч і АОЗ-7 використовують електроліт складу № 1, що містить КОН – 1,8...2,1 г/л,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  – 14...18 г/л. Щільність струму становить 25...30 А/дм<sup>2</sup>. Тривалість обробки 100...110 хв. Товщина покриття досягає 0,115 мм, а мікротвердість – 8 ГПа.

Деталі другої групи рекомендується відновлювати трьома комбінованими технологіями: розточування під ремонтний розмір з подальшим зміцненням МДО, пластичним деформуванням з подальшим зміцненням МДО або надзвуковим газодинамічним напиленням (ГДН) з подальшим зміцненням МДО. У першій комбінованій технології використовують ті ж режими і електроліт складу № 1, зазначені в попередній технології.

Для зміцнення сплавів, що деформуються, в другій комбінованій технології рекомендується електроліт складу № 2, який включає КОН – 4...6 г/л,  $\text{H}_3\text{BO}_3$  – 20...25 г/л, крохмаль – 6...12 г/л. Добавка крохмалю підвищує працездатність електроліту до 2 разів. Зміцнення МДО проводять при температурі електроліту 20...40 °С, щільності струму 15...20 А/м<sup>2</sup> і тривалості обробки 100...120 хв. Товщина зміцненого шару досягає 0,15 мм, а мікротвердість – 19 ГПа.

Надзвукове ГДН роблять при тиску повітря 0,7 МПа, температурі 400 °С і дистанції напилювання 10...15 мм. Для напилення використовують порошок на основі алюмінію А-80-13, фракцією 30...50 мкм. Обробку МДО здійснюють при щільності струму 18...22 А/дм<sup>2</sup> з тривалістю окисдування 100...120 хв. В електроліт складу № 3 входять КОН – 2,9...3,6 г/л,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  – 4...6 г/л. Товщина зміцненого шару досягає 0,135 мм, а мікротвердість – 16 ГПа.

Для деталей третьої групи рекомендується постановка додаткової ремонтної деталі з алюмінію, зміцненої МДО. Для зміцнення використовують електроліт складу № 1.

Швидкість зношування покриттів, отриманих МДО на алюмінієвих сплавах і

напилених поверхнях, в 4...6 разів нижче швидкості зношування незміцнених деталей.

Деталі з корозійностійких сталей також розділені на три групи:

1 група – деталі, що працюють при невеликих контактних навантаженнях, зі зносом до 0,6 мм;

2 група – деталі, що працюють при невеликих і середніх контактних навантаженнях, зі зносом від 0,6 до 3,0 мм;

3 група – деталі, зі зносом понад 3,0 мм.

Для деталей першої групи рекомендується комбінована технологія відновлення і зміцнення – газополуменеве напилювання (ГПН) з подальшим зміцненням МДО. Напилення роблять порошковими газополуменевими пальниками фірми «ТЕРМІКА»: «Іскра-1» і «Іскра-1В». Спочатку напилюють підшар порошком ПТ-Ю5Н товщиною 0,1...0,2 мм, потім основний шар – з алюмінієвого порошку САС-1 товщиною 0,15...0,3 мм.

Зчіплюваність основного напиленого шару залежить від фракції порошку і шорсткості підшару (рис. 7.26 та рис. 7.27). Як видно з рис. 7.26. і 7.27, оптимальні фракції порошку  $D$  лежать в діапазоні 60 ... 100 мкм, а шорсткість поверхні підшару  $Rz$  – 60...120 мкм. Зміцнення МДО проводять із застосуванням електроліту складу № 2, при цьому товщина зміцненого шару досягає 0,125 мм, а мікротвердість – 11 ГПА.

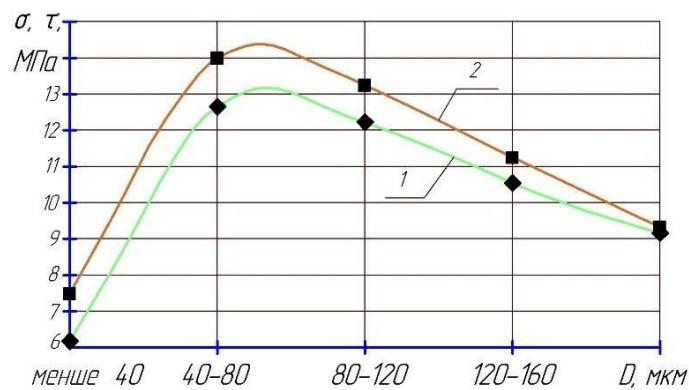


Рис. 7.26. Вплив фракції алюмінієвого порошку на зчіплюваність алюмінію САС-1 з підшаром ПТ-Ю5Н: 1 – при відриві; 2 – при зсуві

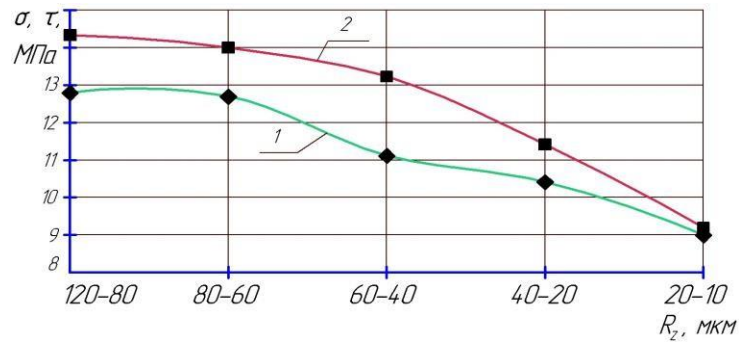


Рис. 7.27. Вплив шорсткості підшару ПТ-Ю5Н на зчіплюваність з алюмінієм  
САС-1: 1 – при відриві; 2 – при зсуві

Деталі другої групи рекомендується відновлювати комбінованою технологією – надзвуковим газодинамічним напиленням (ГДН) з подальшим зміцненням МДО. Режими ГДН і МДО ті ж, що і при відновленні алюмінієвих деталей другої групи.

Для деталей третьої групи рекомендується постановка алюмінієвої додаткової ремонтної деталі, зміцненої МДО. Для зміцнення використовують електроліт складу № 1. Корозійна стійкість покриттів з обробкою МДО підвищується в 1,4...1,6 раза, а зносостійкість – до 5 разів, порівняно з аналогічними характеристиками сталі 12Х18Н10Т.

Досвід відновлення шестеренних насосів НШ-32У-3 і НШ-10Е, насосів 50-3Ц7, 1-20, поршнів гідромумфи коробки передач трактора «Fendt Favorit 824», валів стану СПО-35-89 для укладання металокорду автотракторних шин, показав високу ефективність розроблених технологій.

В даний час найбільше поширення в ремонтному виробництві отримав ванний спосіб формування МДО-покриттів. При відновленні даним способом великогабаритних деталей виникає необхідність в значному збільшенні габаритних розмірів ванн, істотно підвищуються витрати на приготування, контроль і коригування електроліту, якого в цьому випадку потрібно на порядок більше. Зважаючи на те що, як правило, відновлюють не всю деталь, а лише зношені поверхні, значно збільшується площа поверхні, яка підлягає ізоляції. За вищезгаданих причин значно збільшується собівартість відновлення.

У зв'язку з цим при відновленні великогабаритних деталей МДО представля-

ється перспективним проточне оксидування. Суть методу полягає в тому, що за допомогою нескладних пристроїв відновлювані поверхні стають стінками електролітичної чарунки, через яку лугостійким насосом прокачується електроліт. При цьому можливо локальне відновлення і зміцнення поверхонь деталей практично будь-яких габаритних розмірів, що відрізняється в порівнянні з ванним способом істотним зниженням витрати електроенергії. Завдяки інтенсивному оновленню електроліту і видаленню газоподібних продуктів з анодно-катодного простору досягається більш оптимальна структура МДО-покривів і зниження в них залишкових напружень.

Розроблено конструкцію установки для проточного МДО внутрішніх циліндричних поверхонь нероз'ємних підшипників ковзання з охолодженням електроліту, принципова схема якої зображена на рис. 7.28.

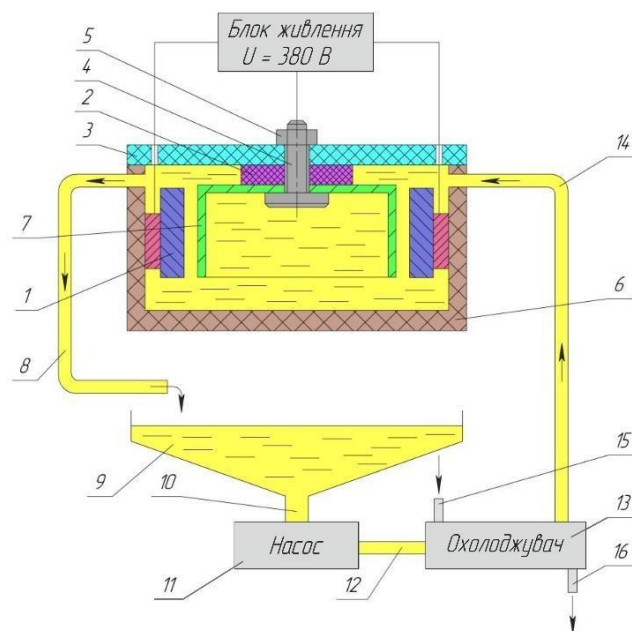


Рис. 7.28. Установа для проточного МДО деталей з охолодженням електроліту:

- 1 – деталь; 2 – кільце; 3 – пластина; 4 – болт; 5 – гайка; 6 – електролітична чарунка;  
 7 – електрод; 8 – відвідна труба; 9 – бак; 10 – трубопровід; 11 – лугостійкий насос;  
 12 – трубопровід; 13 – охолоджувач; 14 – вхідний шланг; 15 – вхідний патрубок;  
 16 – вихідний патрубок

При її роботі лугостійкий насос 11 закачує електроліт з бака 9 і нагнітає його

через трубопровід 12, охолоджувач 13 і вхідний шланг 14 у внутрішню порожнину електролітичної чарунки 6. В останній встановлена деталь 1, що оксидується, і електрод 7 у формі циліндра з нержавіючої сталі, який через кільце 2 кріпиться до пластини 3 за допомогою болта 4 і гайки 5. У цей же час через вхідний патрубок 15 в секцію охолодження охолоджувача 13 подається охолоджуючий реагент, який після заповнення секції відводиться через вихідний патрубок 16. Коли деталь 1, що оксидується, повністю покривається електролітом, останній через відвідну трубу 8 надходить в бак 9 і одночасно включається блок живлення.

Чим вище щільність струму, тим інтенсивніше протікає процес. Однак зі зростанням струму, що протікає через електроліт, останній сильно нагрівається. Відбувається його часткове випаровування, перегрів ізоляції струмопроводу та підвіски і в певний момент часу зростання зміцненого шару покриття починає сповільнюватися. Це пов'язано з тим, що при високій температурі електроліт починає частково розчиняти МДО-покриття, яке формується, що призводить до зменшення його товщини і утворення додаткової пористості.

Крім цього знижується пасивація поверхні, що оксидується, через що електричний пробій відбувається при менших значеннях напруги і це, в свою чергу, є причиною зменшення вмісту в зміцненому шарі високотемпературної зміцнювальної фази  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ . Тому для здійснення процесу при високій щільності струму необхідно охолодження електроліту. Найбільш ефективним методом охолодження деталі, на поверхні якої формується МДО-покриття, є метод внутрішнього охолодження. Однак його реалізація відрізняється складністю, так як крім пропускання через деталь електричного струму, необхідно здійснити подачу і відведення охолоджуючого реагенту, який повинен циркулювати всередині деталі і не змішуватися з електролітом при оксидуванні.

Існує більш простий метод охолодження деталі – метод зовнішнього охолодження. При його застосуванні деталь охолоджується безпосередньо електролітом, який повинен мати постійну температуру, що змінюється в незначних межах. Для цього в контур циркуляції проточної установки вбудовують

охолоджувач, в якому електроліт віддає своє тепло холодному тілу реагенту (холодній воді, фреону або хладону R134A).

Завдяки безперервному охолодженню електроліту при його проточному циркулюванні по системі прокачування установки, температура електроліту підтримується в інтервалі 8...10 °С, тому формування МДО-покриттів можна здійснювати при більш високій щільності струму, що збільшує їх товщину і покращує фізико-механічні властивості (табл. 7.5).

Таблиця 7.5. Властивості покриттів, отриманих при проточному МДО

Показник	Значення	
	без охолодження електроліту	з охолодженням електроліту
Товщина покриття, мкм:	100	130
зміцнений шар	70	115
рихлий шар	30	15
Мікротвердість, ГПа	9,6	11,0
Пористість, %	25...35	14...18
Інтенсивність зношування, (г/ч)×10 <sup>-3</sup>	156	115
Корозійна стійкість, %	100	150

Як видно з табл. 7.5, застосування проточного МДО деталей з охолодженням електроліту дозволяє до 50 % збільшити товщину й корозійну стійкість зміцненого шару МДО-покриття, а також на 15 % – його мікротвердість. При цьому пористість і інтенсивність зношування знижуються.

Найбільша продуктивність досягається тоді, коли при оксидуванні створюється турбулентний режим течії електроліту, який досягається при швидкості потоку більше 1 м/с.

Мікродугове оксидування в проточному електроліті має такі переваги:

- 1) інтенсивне перемішування електроліту та поповнення його новими

збагаченими порціями призводить до поліпшення фізико-механічних властивостей і підвищення якості покриттів;

2) постійна подача свіжого електроліту і барботування стисненим повітрям зони горіння мікродугових розрядів призводить до ініціювання останніх, тим самим збільшується продуктивність оксидування;

3) зменшується насиченість покриття і матеріалу підкладки воднем, що виділяється при оксидуванні;

4) збільшується термін служби електроліту і, відповідно, інтервали часу між його замінами;

5) значно зменшується кількість використовуваного електроліту, що знижує собівартість відновлення;

6) процес формування покриттів, які зміцнюються, відрізняється високою стабільністю, що дозволяє рекомендувати спосіб в масовому виробництві для отримання покриттів із заданими властивостями.

Механізм формування покриттів способом МДО передбачає наявність в них наскрізної пористості, яка визначає захисні властивості покриттів при роботі в контакті з агресивними середовищами. При граничному терті в покриттях, сформованих МДО, при певних умовах експлуатації може проявлятися збільшення фрикційних властивостей. Це призводить до того, що деталь з покриттям МДО викликає підвищене зношування деталі, яку сполучаємо, діючи на неї як абразив.

Проблема підвищення корозійної стійкості покриттів МДО вирішена шляхом оптимізації режимів МДО, що забезпечує зниження наскрізної пористості покриття. Для підвищення зносостійкості робочих поверхонь деталей машин запропоновано наповнювати маслом покриття, сформоване МДО, або наносити на нього мідний шар оригінальним фрикційно-механічним способом.

Натираюча мідна пластина 1 притискається з зусиллям  $F_n$  до покриття МДО 4 і пересувається відносно неї зі швидкістю  $V_{ск}$  (рис. 7.29).

Пластина з технічно чистої міді марки М2 закріплена на натискному елементі пристрою для натирання 4. Між ними розміщено оксидне покриття 2.

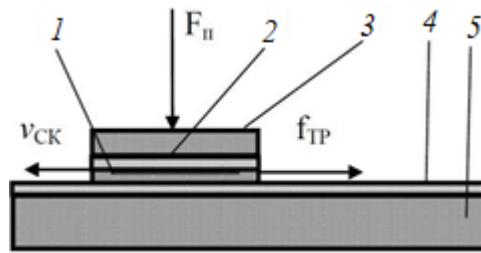


Рис. 7.29. Схема взаємодії пластини, яку натираємо, з покриттям, сформованим МДО, при фрикційно-механічному нанесенні мідного шару:

1 – пластина, яку натирають, з міді; 2 – тепло ізолююче оксидне покриття, сформоване МДО; 3 – натискний елемент пристрою для натирання; 4 – покриття, сформоване МДО; 5 – деталь

Оскільки мідна пластина контактує з обох сторін з керамічними (оксидними) покриттями, вона має обмежений тепловідвід в навколишнє середовище. Тому при русі пластини її температура підвищується до значення, при якому відбувається її рекристалізація і перенесення на поверхню покриття з утворенням суцільного мідного шару.

Дослідженнями встановлено оптимальні параметри МДО: концентрація компонентів електроліту, г/л: КОН – 3,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  – 10, решта – дистильована вода; режими МДО: щільність струму –  $20 \text{ А/дм}^2$ , температура електроліту –  $200 \text{ }^\circ\text{C}$ , тривалість МДО – 2 години. Оптимізація складу електроліту і режимів МДО дозволила знизити наскрізну пористість покриттів з 14...15 до 3...4 %.

Визначено оптимальні режими фрикційно-механічного нанесення мідного шару на поверхню покриття, сформованого МДО: контактний тиск – 15 МПа, швидкість ковзання – 0,5 м/с, товщина натирає пластини – 0,05. 0,10 мм, тривалість нанесення – 230...240 с, мастило контактуючих поверхонь – технічний гліцерин, які дозволяють отримати мідний шар товщиною 4,0...4,5 мкм та шорсткістю  $R_a = 0,63 \text{ мкм}$ .

### Контрольні запитання

1. Назвіть варіанти інтегрування газотермічного напилення з іншими методами обробки поверхні?

2. Як залежність міцності зчеплення газополуменевого покриття ПГ-10Н-01, напиляного на основу зі сталі 45, від швидкості обертання металеві щітки?
3. Яка швидкість витікання плазмового струменя при напиленні в динамічному вакуумі?
4. Яка швидкість частинок порошку при надзвуковому напиленні?
5. У чому суть формування металевого покриття газодинамічним способом?
6. Які матеріали застосовуються для холодного газодинамічного напилення?
7. Охарактеризуйте спосіб імпульсно-плазмового зміцнення.
8. Охарактеризуйте електролітно-плазмове зміцнення.
9. У чому полягає суть способу мікродугового оксидування?

## **8. СВС-ПРОЦЕСИ В ТЕХНОЛОГІЯХ ЗМІЦНЕННЯ І ВІДНОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН НАПЛАВЛЕННЯМ І ГАЗОТЕРМІЧНИМИ СПОСОБАМИ НАПИЛЕННЯ ПОКРИТТІВ**

### **8.1. Історія відкриття і розвитку СВС-процесів**

Самопоширюваний високотемпературний синтез матеріалів як окремий науковий напрям був започаткований у 1967 р. радянським вченим О.Г. Мержановим. Отримавши перший експериментальний СВС-зразок, вчений зазначив: «Прошу мені повірити, я відразу зрозумів, що тримаю в руках продукцію майбутнього заводу».

Олександр Григорович Мержанов народився 1931 р. у Ростові-на-Дону. Ще в студентські роки, навчаючись на фізико-математичному факультеті Ростовського державного університету, Мержанов захопився наукою, складаючи та вирішуючи нові диференціальні рівняння з пошуком спеціальних функцій. Закінчивши у 1954 р. університет, молодий фахівець був розподілений інженером на Єреванський електроламповий завод, однак така професія не наближала його до заповітної мрії стати вченим.

Здійснити свою мрію допоміг незламний характер, у тому ж році йому вдається влаштуватися на роботу молодшим науковим співробітником Інституту хімічної фізики АН СРСР (ІХФ АН СРСР), який в той час очолював відомий організатор науки, лауреат Нобелівської премії з хімії Микола Миколайович Семенов. Там Мержанов показав себе працелюбним та талановитим дослідником. Він блискуче вирішив поставлені перед ним перші наукові задачі з розрахунку безпеки виготовлення потужних вибухових речовин з позиції теорії теплового вибуху. Поштовх до майбутнього відкриття самопоширюваного високотемпературного синтезу був зумовлений інтенсивними фундаментальними дослідженнями О. Г. Мержанова та вирішенням практичних завдань з теорії горіння та вибуху, які вчений виконував упродовж 13 років з 1954 до 1967 рр. Цей період має назву «до СВС-період». У зв'язку із цим розглянемо його детальніше.

Теорія теплового вибуху ґрунтується на вирішенні системи рівнянь теплопровідності з тепловим джерелом та кінетикою хімічної реакції, при визначених граничних умовах, для різних моделей вихідної форми горючої речовини. Фундаментальні дослідження з цієї проблеми здійснювали такі відомі вчені, як М. М. Семенов, О. М. Тодес, Д. А. Франк-Камінський, в наукових працях яких були розглянуті найпростіші моделі теплового вибуху.

Вирішуючи поставлене завдання, Мержанов не лише не користується раніше здобутими відомими результатами вчених, а навпаки, розпочинає виконувати всі теоретичні та експериментальні дослідження самостійно, що дозволяє більш широко ознайомитися з поставленою перед ним проблемою, самостійно її «відкрити», синтезувати отримані результати та зробити висновки.

Мержанов самостійно «відкриває» перетворення експоненти по Франк-Камінському, «повторює» стаціонарну теорію теплового вибуху Семенова. При цьому отримує і власний, не відомий раніше, науковий результат. Розглядаючи нестационарну систему рівнянь, які описують тепловий вибух для автокатолітичних реакцій, він виявив, що за певних умов така реакція може самостійно прискорюватися і у екзотермічних умовах. В цьому випадку процес протікання реакції складається з ряду рівноважних, стаціонарних положень, за яких перехід від одного до іншого положення відбувається за рахунок ізотермічної зміни швидкості реакції. Критерієм квазістаціонарності процесу є мала швидкість теплового накопичення у порівнянні зі швидкістю теплоутворення. Близьку вирішивши поставлені завдання, О. Г. Мержанов сподобався М. М. Семенову, який запропонував перспективному молодому вченому продовжити працю в цьому напрямку і з того часу почав ставитися до нього з великою повагою.

Вагомий внесок О. Г. Мержанова було зроблено до теорії горіння пороху. У класичних підходах, які були сформульовані у 1942 р. Я. Б. Зельдовичем, горіння пороху протікає за рахунок слабкої екзотермічної реакції в конденсованій фазі, продукти якої згорали за рахунок потужних екзотермічних реакцій газової фази. При цьому вважалося, що провідне місце в хімічній реакції належало взаємодії

елементів у газовій фазі. Незважаючи на це, серед учених з теорії горіння, в тому числі із Інституту хімічної фізики АН СРСР, ще не існувало остаточної думки щодо цього питання. Так, наприклад, відомий експериментатор О. Ф. Беляєв відстоював думку про те, що провідна стадія горіння порошу знаходиться у газовій фазі, а завідувач відділу вибухових речовин П. Ф. Похил виокремлював у хвилі горіння три зони тепловиділення (конденсовану, димову-газову та безпосередньо газову).

П. Ф. Похил відстоював думку про те, що важливою є проміжна зона (в той час ще не було остаточно зрозуміло як саме), яка утворюється при диспергуванні вихідного порошу.

Наукові праці О. Г. Мержанова дозволили певним чином вирішити ці суперечки. Провівши дослідження в наближенні Зельдовича (нехтуючи теплом, що витрачається на прогрівання порошу в процесі реакції), Мержанов отримав аналітичні формули, які дозволили оцінити ширину зони реакції та її швидкість у конденсованій фазі. Також на основі цих результатів стало можливим зробити висновок щодо провідної ролі диспергування (подрібнення) порошу. Результат був однозначним: швидкість горіння не залежить від тиску інертного газу, а відповідно до цього при горінні порошу є важливою конденсована фаза. Отримані результати, пов'язані з дослідженнями механізму горіння у конденсованій фазі, стали основою для захисту О. Г. Мержановим у 1959 р. кандидатської дисертації на тему «Дослідження теплового вибуху конденсованих систем» та одним з наукових підґрунть до майбутнього відкриття фізичного явища «твердого полум'я».

Важливою подією у розвитку наукових і прикладних досліджень з теорії горіння, а також роботи з потужними вибуховими зарядами, стало заснування у 1956 р. за ініціативою М.М. Семенова спеціалізованого полігону. Полігон було створено недалеко від селища Черноголовка (Московська обл.), а його керівником призначено Ф. І. Дубовицького.

Оцінюючи вагомі напрацювання співробітників полігону, у 1959 р. М. М. Семенов прийняв рішення перетворити його у відокремлений філіал Інституту хімічної фізики АН СРСР. У новоствореній структурі О. Г. Мержанову

запропонували створити та очолити лабораторію спалаху та переходу горіння у детонацію. У свої 29 років О. Г. Мержанов став наймолодшим завідувачем лабораторії у структурі цієї установи. Продовжуючи дослідження закономірностей моделей горіння балістичного пороху, О. Г. Мержанову було необхідно знайти суміші, які б горіли без утворення газового полум'я, так званні «без газові суміші». Захопившись цією тематикою, він почав пошук простих систем, з яких у якості початкової обрав ацетиленід міді.

До вирішення цієї задачі він залучив студента-дипломника, а згодом і інженера-стажера В. М. Шкиро<sup>7</sup>. Основу тогочасної лабораторії Мержанова складала, як правило, фізики з теорії горіння. Враховуючи це, для її підсилення фахівцем-хіміком у кінці 1965 р. директор філіалу Ф. І. Дубовицький перевів молодого хіміка-синтетика І.П. Боровінську (рис. 8.2). Нині досить важко спрогнозувати, чи відбулося відкриття СВС, якби ці вчені не зустрілися в одному місці та в один час.

Спочатку до ідеї Мержанова використати як безгазову модель горіння ацетиленід міді, враховуючи його вибухоподібну реакцію при розкладанні, І.П. Боровінська віднеслась доволі скептично, однак спробувала почати його синтезувати за відомими методиками. Ацетиленід міді  $Cu_2C_2$  здатний до вибухоподібного розкладання на тверді мідь (Cu) та вуглець (C), з суттєвим утворенням теплоти. У таких умовах синтезувати абсолютно сухі суміші, без кристалізованої води, не вдавалося, за рахунок чого було досить трудомістко отримати безгазовий процес. При проведенні цих дослідів відбувся вибух, що призвело до відмови від подальшого дослідження цього реагенту.

Аналітичний склад розуму та розвинена наукова інтуїція наштовхнули О.Г. Мержанова на ідею замінити класичну реакцію розкладу на некласичну реакцію синтезу. Для цього проаналізували термодинамічні довідники, щоб знайти речовини, які можна використати у якості вихідних реагентів. Однак широка номенклатура таких речовин зумовила необхідність консультації з фахівцями-неоорганіками, а саме: з Г. М. Ничепоренком та Б. М. Таракановим, які

рекомендували зупинитися на системі «тугоплавкий метал – неметал», спираючись на позицію високої екзотермічної реакції продуктів горіння. Знайшовши потрібні вихідні реагенти, було досліджено безгазові системи  $Ti - C$  та  $Ti - W$ . Експериментальний зразок горів досить гарно, переносячи тепло від одного шару до іншого, змінюючи свій колір від яскраво жовтого до червоного. Газу не утворювалося, зразок не втратив ані форми, ані розмірів, а перетворився у твердий, як «алмаз» спек. Такий процес горіння, розробники назвали «твердим полум'ям».

Ці результати дали поштовх до проведення комплексу досліджень з горіння безгазових систем, зокрема  $Me - C$ ,  $Me - Si$ ,  $Me - N$ . Отримавши значну кількість тугоплавких з'єднань різних класів типу боридів, карбідів, нітридів, силіцидів, оксидів, а згодом і композиційних матеріалів, О. Г. Мержанов з колегами відвідав Інститут проблем матеріалознавства АН УРСР (нині Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України), де зустрівся з членкор. АН УРСР Г. В. Самсоновим, який ознайомився з представленими розробками та зазначив перспективність цих досліджень. З того часу відбулося налагодження зв'язків з цим науковим закладом, яке виявлялося у проведенні спільних наукових нарад та конференцій. Незважаючи на це, були вчені металурги та матеріалознавці, які спочатку відверто не підтримували цю розробку, вважаючи її науково нежиттєздатною, однак, уже досить швидко змінили свою думку.

Інтенсивний розвиток досліджень процесів «твердого полум'я» невпинно продовжувався. Наприкінці 60-х та на початку 70-х років у філіалі ІХФ АН СРСР, де відбулося відкриття, були досліджені механізми горіння систем  $Me-C$ ,  $Me-W$  та  $Me-N_2$  та запропоновані нові на той час напрями досліджень горіння конденсованих систем. У цей період були відкриті та описані режими нестійкого горіння, такі як теплові автоколювання фронту, спинові хвилі, розроблена методологія отримання тугоплавких з'єднань з вибором оптимальних умов процесу. Стало можливим синтезувати металоподібні та неметалеві нітриди, карбіди, бориди та силіциди високої якості.

Фізичне явище «твердого полум'я» дозволило розвинути новий напрям науки

про матеріали та технології їх отримання – самопоширюваний високотемпературний синтез. СВС є ширшим від явища «твердого полум'я», оскільки з процесом горіння пов'язана лише його перша стадія – поширення хвилі хімічної реакції. За хвилиною протікають вторинні, об'ємні процеси (догорання, фазо- та структуроутворення), які визначають характеристики та якість кінцевого продукту. Основою СВС є принцип максимального використання хімічної енергії реагуючих речовин для отримання неорганічних з'єднань, матеріалів та виробів різного призначення, а також оптимальної організації високоефективних технологічних процесів. Перша наукова доповідь з СВС була виконана О. Г. Мержановим на II симпозиумі з горіння та детонації у Єревані, а перша наукова публікація відбулася у 1972 р. Тоді технологія і отримала офіційну назву – самопоширюваний високотемпературний синтез.

На початку 70-х років експериментальні дослідження ІХФ АН СРСР дозволили створити першу технологічну установку для виробництва СВС порошків. Результати досліджень сприяли появі нових методів синтезу, розробці способів нанесення покриттів та зварювання деталей в режимі СВС, зумовили появу нових матеріалів та виробів для сучасної техніки. Також значну увагу науковців було приділено методам математичного моделювання СВС-процесів, зокрема безгазовому та фільтраційному горінню.

Отримані результати дали імпульс до формування нових дослідницьких груп на теренах Радянського Союзу. До перших цілеспрямованих СВС-досліджень належать експерименти, отримані в Єревані (горіння у водні та синтез гібридів), Томську (синтез та технологія азотованих феросплавів), Києві (обробка СВС- продуктів та створення абразивного інструменту). Важливою подією у розвитку наукових і прикладних досліджень СВС-процесу стало відкриття у 1975 р. у місті Кіровакан (Вірменська РСР) підприємства з виробництва високотемпературних нагрівачів на основі порошків дисиліциду молібдену.

У 80-ті роки, враховуючи велику наукову та практичну актуальність СВС-процесу, його було взято під увагу державних органів. Також ефективність СВС-

технології привернула увагу закордонних науковців. Спочатку роботи за цим напрямом були розпочаті в США та Японії, згодом у Польщі, Китаї та інших країнах. Поштовхом для стрімкого розвитку СВС-технології за кордоном стала стаття Джона Крайдера, опублікована у 1982 р. під назвою «Самопоширюваний високотемпературний синтез – радянський метод отримання матеріалів». Як результат у США було створено енергетично стимульовані СВС-процеси з використанням джоулевого та СВС-нагріву, проведено математичне моделювання процесу зі складним фізико-хімічним механізмом, вченими Японії налагоджено технологію вирощування монокристалів із тугоплавких безкисневих СВС-продуктів, освоєно технологію виготовлення труб великого діаметру з внутрішнім покриттям, в Польщі розроблено пластичну СВС-кераміку.

У 1984 р. на процес СВС було видано диплом на відкриття СРСР № 287, під назвою «Явище хвильової локалізації автогальмівних твердофазних реакцій», автори О. Г. Мержанов, І. П. Боровінська, В. М. Шкіро. Згодом були отримані патенти в США, Англії, Франції, Італії, Японії та інших країнах.

Обговорюючи характерні риси відкриття, Мержанов виділив головні з них: високе значення теплового ефекту, потужне кінетичне гальмування, самопоширення при малій глибині реакції (не потрібне повне перетворення речовини), фронтальний (хвильовий) характер поширення реакції, високі швидкості нагріву речовини у хвилі горіння та високі швидкості поширення фронту, зафронтові процеси, які не впливають на швидкість горіння (фазові та структурні перетворення у первинних продуктах), які він вважав основою відмінністю СВС від горіння порошу та вибухових речовин. На основі цих характеристик О. Г. Мержановим було запропоновано схему відмінності між цими процесами (рис. 8.1).

У середині 80-х років створюється Наукова рада з теорії та практики СВС-процесів, а також розроблено загальносоюзну програму наукових робіт. Створено Міжгалузевий науково-технічний комплекс «Термосинтез» та засновано Інститут структурної макрокінетики АН СРСР (1987 р.) з функціями головної академічної



Рис. 8.1. Класифікаційні схеми відмінності процесу горінням від СВС, запропоновані О. Г. Мержановим

організації з даної тематики. Діяльність «Термосинтезу» сприяла появі нових виробничих потужностей з виробництва порошків у багатьох містах країни. Виробництво абразивних порошків організовано у Баку та Полтаві, азотованого ферованадію в Іжевську та Чусовій, високотемпературних теплових ізоляторів у Куйбишеві, порошків ніобію літію у Дзержинську.

У 1992 р. розпочався розпад Міжгалузевого науково-технічного комплексу «Термосинтез», що суттєво вплинуло на можливості його працівників впроваджувати наукові розробки. Однак вагомий науковий та виробничий потенціал СВС було збережено за кордоном. Нині в Китаї працює 30 СВС-заводів лише з виробництва труб з захисними покриттями для перекачування агресивних середовищ, в Англії виробляють складні твердосплавні СВС-порошки, в США – нанопорошки диборида та інших складних з'єднань, в Японії – сіалони та ін.

Важливим етапом розвитку самопоширюваного високотемпературного синтезу як нового наукового напрямку є створення у 1991 р. за ініціативою та керівництвом О. Г. Мержанова Міжнародних симпозіумів «Самопоширюваний високотемпературний синтез». Такі міжнародні наукові симпозіуми (що відбувалися кожні два роки, починаючи з 1991 р.) проходили в таких містах, як: Алма-Ата (Казахстан, 1991 р.), Гавайї (США, 1993 р.), Ухань (Китай 1995 р.), Толедо (Іспанія, 1997 р.), Москва (Росія, 1999 р.), Хайфа (Ізраїль, 2002 р.), Краків (Польща, 2003 р.), Кальярі (Італія, 2005 р.), Діжон (Франція, 2007 р.), Єреван (Вірменія, 2009 р.), Анавісос (Греція, 2011 р.), Техас (США, 2013 р.), Анталія (Туреччина, 2015 р.), Тбілісі (Грузія, 2017 р.), Москва (Росія, 2019 р.).

Наукові напрями симпозіумів стосуються перспективних результатів синтезу

матеріалів, дослідження структури та фізико-механічних властивостей нових матеріалів, практичного впровадження СВС-технологій.

Важливо відмітити і деякі моменти коректування назви СВС. На Міжнародному симпозиумі по СВС у Китаї (1995 р.) професором Каліфорнійського університету у Дейвісі (США), фахівцем у галузі СВС Зухаїром Муніром було запропоновано змінити назву «СВС» на «синтез горінням». Позиція вченого ґрунтувалася на двох аргументах: по-перше, англійська назва *SVC-Self-propagating High-temperature Synthesis* є складною для вимовляння, по-друге – синтез в режимі теплового вибуху не можна називати «самопоширюваний». Розпочалася наукова дискусія. О. Г. Мержанов відстоював право як першовідкривачів процесу дати йому саме таку назву, яку він вважав найкращою. Він опублікував статтю, в якій показав, що поширення реакції може відбуватися не лише у хвильовому режимі, а й у режимі вибуху. У 2002 р. на Міжнародному форумі СІМТЕС в Італії вчені примирилися. З того часу терміни «СВС» (SHS) *Self-propagating High-temperature Synthesis* та «СС» (CS) *Combustion Synthesis* використовуються як синоніми.

Заслугове на увагу XIV Міжнародний симпозиум із самопоширюваного високотемпературного синтезу (SHS – 2017), який відбувся у Тбілісі (Грузія), де було представлено доповіді з 17 країн: Вірменії, Білорусії, Греції, Грузії, Естонії, Ізраїлю, Індії, Іспанії, Італії, Польщі, Росії, США, Казахстану, Туреччини, України, Франції, Японії.

У цьому симпозиумі взяли участь і виступили з доповідями відомі науковці з проблем СВС, зокрема: професор Технологічного університету Хайфи (Ізраїль) та університету Айови (США) лауреат Нобелівської премії з хімії (2011) професор Дан Шехтман «*Quasi-Periodic Materials – a Paradigm Shift in Crystallography*», директор Інституту металургії та матеріалознавства імені Фердинанда Тавадзе НАН Грузії Г.Ф. Тавадзе «*Successes and Ways of Development of SHS in Georgia*», професор Університету Нотр-Дам (США) О.С. Мукосьян «*Fifty Years of Discovery: History and Future*».

Україна була представлена доповідями академіка НАН України

О. М. Івасишина *Hydrogen Approach in Powder Metallurgy of Ti and Zn Based Alloys* та співробітниця з Інституту електрозварювання імені Є.О. Патона НАН України, доктором технічних наук О. М. Бердніковою – «Функціональні металокерамічні покриття: структура та експлуатаційні властивості». Міжнародні симпозиуми стали важливим етапом у розвитку світової науки з самопоширюваного високотемпературного синтезу, розкрили широкі можливості входження України у світову наукову спільноту у цій галузі знань.

Зазначимо, що дещо раніше, у 2016 р., за результатами конкурсу до здобуття найвищої відзнаки Національної академії наук України – Золотої медалі В. І. Вернадського, у номінації «закордонний вчений», був відзначений фахівець з СВС, директор Інституту металургії та матеріалознавства ім. Фердинанда Тавадзе НАН Грузії Гіоргій Фердинандович Тавадзе.

Професор Г.Ф. Тавадзе є автором спільної з професором А.С. Штейнбергом монографії «Получение специальных материалов методами самораспространяющегося высокотемпературного синтеза», в якій досліджено властивості порошкових матеріалів.

Аналіз наукових публікацій (*Web of Science*) показує, що вчені з 117 країн світу займаються дослідженнями в галузі СВС-процесів. У результаті цілеспрямованих наукових СВС-досліджень багатьма науковцями створено оригінальні методи діагностики СВС-процесів; з'ясовано механізми та закономірності безгазового та фільтраційного горіння, виявлено нові, важливі знання з теорії горіння; виконано моделювання одномірних та двомірних моделей горіння СВС- систем, які дозволяють описувати та прогнозувати практичні експериментальні моделі; розроблено широкий комплекс СВС-технологій (синтез порошків, СВС- спікання, силове СВС-компактування, технологія високотемпературних СВС- розплавів, СВС-зварювання, газотранспортна СВС-технологія); проведено виробничу апробацію використання СВС-продуктів у багатьох галузях промисловості. Сучасна промисловість набула впевненості, що СВС технології та матеріали можуть дати конкурентно спроможні результати.

Компанії, які використовують СВС у своїх технологіях, отримали суттєві переваги на ринку машинобудівної, авіаційної, металургійної, оборонної та ряду інших галузей.

У теперішній час сформована потужна наукова основа самопоширюваного високотемпературного синтезу, яка дозволяє розробити матеріали принципово нового рівня. Обмежений об'єм огляду може слугувати певним виправданням тому, що акцент роботи здійснено у ретроспективному аналізі, орієнтованому на розгляд безпосередньо основ формування та розвитку СВС. У цей же час є доцільним коротко відмітити деякі перспективні завдання розвитку цього напрямку.

Незважаючи на очевидний прогрес у цій галузі за останні роки та суттєве накопичення результатів досліджень, практично відсутні опубліковані розробки, спрямованні на теоретичні дослідження механізмів динаміки структуроутворення кінцевих продуктів на основі методів комп'ютерної діагностики побудови фізико-хімічних моделей СВС. Все більшого значення набувають дослідження з використання мінеральної сировини (глини, піщаних матеріалів), твердих промислових та радіоактивних відходів (плавильні шлаки, металева стружка) у якості реагентів для СВС-процесів. Інтенсивні можливості відкриває СВС-технологія для створення нерівноважних матеріалів, які приходять у рівноважний стан у процесі експлуатації.

## **8.2. Технології і матеріали, що застосовуються для СВС-процесів**

Метод СВС дозволяє синтезувати матеріали необхідного хімічного, фазового складів і їх властивостей. Крім цього метод дозволяє здійснювати прямий синтез виробів із заданими розмірами і формою. Для вирішення цих завдань розроблено понад 30 технологічних різновидів СВС, які об'єднані в шість основних технологічних типів – ТТ.

ТТ-1 (хімічний синтез). Процес проводиться в герметичних СВС-реакторах, в атмосфері повітря або інертного, або реакційного (азоту, водню, кисню) газу. Продукти мають вигляд спіков, які можуть використовуватися в якості

напівфабрикатів або перероблятися в порошки для порошкової металургії і газотермічних способів нанесення покриттів.

ТТ-2 (СВС-спікання). При цьому типі технології з реакційної шихти попередньо виготовляють виріб заданої форми і СВС-процес проводять так, щоб зберегти цю форму і розміри. Два різновиди процесу отримали застосування: синтез нитридної кераміки при високих газових тисках і синтез карбідних, боридних, силіцидних і інтерметалевих матеріалів у вакуумі з попередньою термічною обробкою шихти.

ТТ-3 (силове СВС-компактування). Процес СВС проводять в спеціальній прес-формі, і гарячий продукт горіння ущільнюють до безпористого стану. Варіанти різняться способами механічного впливу. Створена серія нових марок твердих сплавів групи синтетичних твердих інструментальних матеріалів з різним поєднанням твердості і міцності.

ТТ-4 (СВС-лиття). У цьому технологічному типі використовують висококалорійну шихту (алюмотермічну суміш), в результаті горіння якої досягаються температури вище температури плавлення продуктів. Продукт утворюється у вигляді розплаву, до якого застосовують відомі металургійні операції: лиття в форму, відцентрове лиття, кристалізацію злитків, наплавку і ін. Литі однорідні і неоднорідні СВС-матеріали знаходять широке застосування в вигляді литих порошоків, деталей з твердосплавними наплавленнями, а також метало - і мінералокерамічні труби. Найбільш поширені керметні фази – карбіди, бориди і силіциди Cr, W, Mo і Nb; керамічні – оксид алюмінію. Технологія дозволяє здійснювати лиття тугоплавких матеріалів при температурах 3300-3800 К.

ТТ-5 (СВС-зварювання). Зварювання СВС застосовується для з'єднання деталей з тугоплавких матеріалів: ніобій, вольфрам, молібден, тантал, графіт і композитів на їх основі між собою і з іншими (більш легкоплавкими) сплавами. Реакційна суміш розташовується в проміжку між сполучними деталями, ініціювання реакції відбувається за рахунок пропускання електричного струму через зварювані деталі.

ТТ-6 (газотранспортна СВС-технологія). Використовується: при отриманні

тонких (5-100 мкм) осаджених покриттів. Оброблювані деталі і газотранспортний агент (йод) вводяться в шихту, що отримується за способом ТТ-1. В результаті газотранспортного процесу, після проходження хвилі горіння, деталь покривається тонким шаром кінцевого продукту. Відпрацьовано деякі процеси нанесення покриттів з хрому або боридів хрому на сталеві деталі, з нітриду титану – на тверді сплави.

Всі шість технологічних типів СВС-технологій побудовані за єдиним принципом. Узагальнена система СВС-технологій представлена на рис. 8.2.

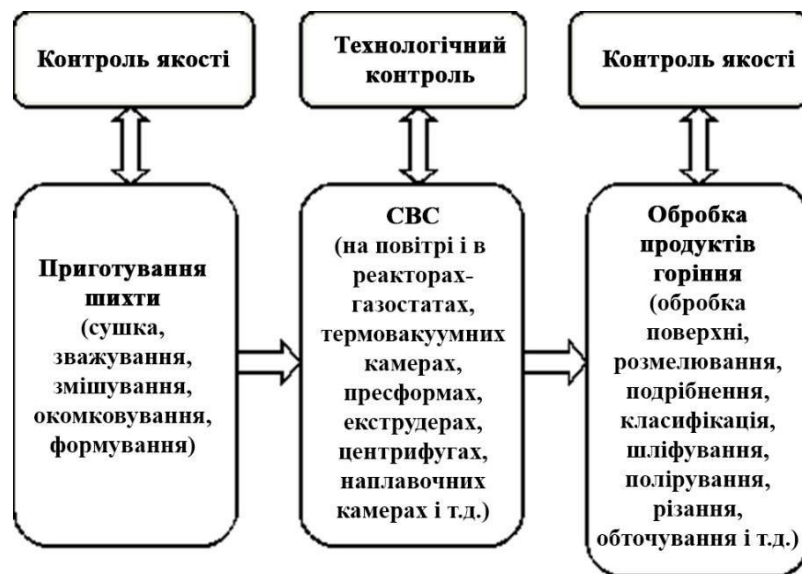


Рис. 8.2. Узагальнена схема СВС-технологій

На основі аналізу узагальненої схеми можна зробити висновок: головна особливість полягає в тому, що основна стадія проводиться в режимі СВС. Технології СВС розрізняються видами вихідної сировини, структури шихти, типами хімічних реакцій і процесів, зовнішніми впливами, морфологією продуктів і способами їх обробки або переробки, призначенням кінцевої продукції.

Необхідно відзначити, що СВС не тільки нова технологія застосування відомих матеріалів, але і можливість створення нових типів матеріалів. Як приклад можна відзначити позитивні результати експериментів з отримання складних оксидних нанопорошків, ниткоподібних кристалів безкисневої кераміки, анізотропної оксидної кераміки, функціонально-градієнтних матеріалів, безкисневих монокристалів та ін.

Технологія СВС є ефективним енерго- і ресурсозберігаючим методом отримання композиційних порошків. Метод заснований на використанні екзотермічного ефекту реакцій взаємодії металів з вуглецем, кремнієм, бором, азотом та ін. Сутність процесу полягає в тому, що після локального ініціювання реакція протікає у вузькій зоні – хвилі горіння, яка переміщається по виробу за рахунок теплопередачі. В якості реагентів застосовуються суміші наступних елементів: металів з неметалами, металів з металами, неметалів з неметалами або їх з'єднань, що виділяють при взаємодії велику кількість тепла.

Загальну схему процесу можна представити в наступному виді:



де  $X(i)$  – реагент в твердому стані;

$Y(i)$  – реагент в твердому, рідкому або газоподібному стані;

$Z(k)$  – продукт синтезу (карбіди, бориди, силіциди, нітриди, інтерметаліди та ін.) в конденсованій фазі.

СВС-процес дозволяє синтезувати композиції, отримання яких іншими відомими способами вимагає великих витрат, складного і дорогого обладнання або взагалі неможливо. Крім того СВС дозволяє отримати багатокomпонентні продукти в одну стадію навіть у системах матеріалів, що значно відрізняються за властивостями.

В інституті порошкової металургії, м. Мінськ більше 25 років ведуться інтенсивні дослідження і розробка технологічних процесів високотемпературного синтезу композиційних порошків. Результати досліджень і створені термодинамічні і фізичні моделі дозволили розробити технології отримання широкого спектру композиційних СВС-порошків типу «металева зв'язка - тугоплавкое з'єднання», в тому числі які не мають аналогів в світі. Як зв'язок використовуються метали, металеві сплави на основі заліза, нікелю, алюмінію і інтерметалідів - *NixAlu*, *FexAlu*, *TixNiy*, *TixAlu*. Як тугоплавкі сполуки використовують карбіди титану, хрому, кремнію та їх комбінації, а також оксиди алюмінію, титану і хрому.

Основні етапи типової технологічної схеми процесу отримання СВС-

порошків: підготовка порошкової шихти, синтез, розмелювання і розсівання по фракціям. При необхідності застосовують механічну активацію реакційної суміші в атриторі. Дана операція дозволяє зробити взаємо подрібнення вихідних порошків і сформувати композиційні частинки з рівномірним розподілом вихідних реагентів за обсягом, а також знижує тепловтрати при синтезі, підвищує активність системи і гомогенність продукту горіння. Синтез в системах з низьким тепловмістом здійснюють із застосуванням попереднього підігріву в печі.

Найбільш популярними є композиції на основі карбиду титану. Це пов'язано з високим екзотермічним ефектом реакції утворення карбиду титану з елементів (8.2), що забезпечує широкий вибір матеріалу зв'язки:



У результаті виділення тепла температура твердих і розплавлених продуктів реакції досягає 2500–3500 К, тому реакція не залежить від зовнішніх джерел нагріву і може поширюватися як хвиля горіння, яка сама виробляє енергію для свого поширення. Незважаючи на високу температуру, перехід будь-якого з компонентів суміші в газову фазу незначний, і їм можна знехтувати.

Синтез композиційних порошків на основі карбідів хрому з елементів через низький екзотермічний ефект проводиться із застосуванням попереднього підігріву шихти до температури 723–873 К.

СВС-технологія дозволяє синтезувати композиції на основі складних карбідів в одну стадію для металів IV і VI груп періодичної системи хімічних елементів Д.І. Менделєєва, що володіють більш високими фізико-механічними характеристиками в порівнянні з утворюючими їх карбидами. Типовим представником таких матеріалів є композиційні порошки системи  $Cr_3C_2-TiC/NiCr$ . Інший підхід до підвищення властивостей композиційних металокерамічних композиційних порошків на основі карбідів – розробка матеріалу зв'язки. Позитивні результати були отримані при створенні композиційних порошків на основі карбиду титану зі складними легованими зв'язками, які вводяться в шихту у вигляді готових порошків-сплавів, або формуються в процесі СВС в результаті плавлення і хімічної

взаємодії простих реагентів.

Перспективним напрямком є розробка антифрикційних композиційних порошкових матеріалів, що містять в своєму складі тверді мастила, такі як графіт, дисилицид молібдену і фторид кальцію. Порошок отримують методом СВС шляхом введення в реакційну щільну порошків твердих мастил, наприклад:  $TiC/NiCr/MoS_2$ ,  $TiC/NiCr/CaF_2$ ,  $TiC/FeCr$ /графіт,  $TiC/FeCrMo$ /графіт та  $Cr_2O_3/TiO_2/CaF_2$ , які забезпечують високу працездатність покриттів в умовах сухого тертя або тертя при граничному змазуванні, а також в при високих температурах.

Ще одним класом перспективних матеріалів є композиційні порошки типу «інтерметаліди-оксид» на основі алюмінідів нікелю, заліза і титану, що забезпечують значне зменшення маси за рахунок невисокої щільності алюмінідів в порівнянні з традиційно використовуваними сплавами при збереженні високих механічних та корозійних властивостей композицій. Ці композиції можуть бути отримані двома способами: 1 – синтезом інтерметалічних сполук з елементів в присутності дисперсних частинок оксидів і 2 – формуванням необхідних композицій з використанням алюмінотермічних реакцій. Обидва способи мають обмеження, обумовлені невисоким по 1-му способу або навпаки, занадто високим по 2-му способу теплосмістом реакційних систем. Використання попередньої механічної активації дозволяє активувати процес синтезу в низькоекзотермічних системах і формувати однорідну тонкозернисту структуру композицій з рівномірним розподілом оксидних частинок в обсязі матеріалу. Перебіг механохімічної реакцій в обмежених обсягах на етапі механоактивації дозволяє знизити теплосміст реакційних сумішей і отримувати ультрадисперсні композити та навіть наноконпозиційні порошки в системах з алюмінотермічними реакціями. Такий підхід був реалізований в системах  $Fe-Al-Fe_2O_3$  і  $Fe-Al-Cr_2O_3$ . Були отримані наноконпозиційні порошки на основі моноалюмініда заліза  $FeAl/Al_2O_3$  и  $FeAl(Cr)/Al_2O_3$ , що повністю успадковують структурну морфологію прекурсорів.

Розроблені композиційні порошки застосовуються для напилення зносо- і корозійностійких покриттів плазмовим, детонаційними і високошвидкісним

газополуменим способам. У порівнянні з традиційно застосовуваними для газотермічного напилення механічними сумішами і конгломерованими порошками синтезовані порошки забезпечують збереження фазового складу композиції в процесі напилення, рівномірний розподіл твердої фази в об'ємі покриття, збільшення коефіцієнта використання матеріалу на 10-30%, а також більш високу зносостійкість покриттів. Особливо перспективними представляються композити  $Cr_3C_2/Me$ ,  $TiC/Me$  та  $Cr_3C_2/TiC/Me$ , з яких отримують високоякісні зносостійкі покриття, які не поступаються зносостійким покриттям з композитів на основі карбиду вольфраму.

Завдяки своїм особливостям, метод СВС дозволяє отримувати порошки на основі інтерметалевих сплавів з унікальною структурою і властивостями. Загальна хімічне рівняння синтезу інтерметаллідів методів СВС можна записати в такий спосіб:



Оскільки екзотермічний ефект утворення інтерметаллідів з елементів недостатньо високий для забезпечення формування порошків інтерметаллідів застосовується попередній підігрів. Завдяки малій щільності і високим питомим механічним властивостям найбільш перспективні порошки на основі алюмінідів нікелю, заліза і титану.

Високі властивості газотермічних покриттів з розроблених СВС-порошків поставили завдання промислового освоєння розроблених технологій. Так, наприклад, в Інституті порошкової металургії вперше була розроблена безреакторна технологія процесу синтезу композиційних порошків в режимі горіння в середовищі повітря, що забезпечує можливість синтезу композицій типу «карбід-метал», «інтерметаліди-оксид» і ін. В умовах будь-якої термічної ділянки підприємства. В даний час на базі інституту порошкової металургії створено дослідно-промислове виробництво композиційних порошків потужністю 10 т/рік з можливістю випуску порошків для напилювання вузького гранулометричного складу. Основні споживачі СВС-порошків такі фірми: Metalspray (США), Union

Technology (США), РАФАКО (Польща).

### 8.3. Застосування СВС-процесу для синтезу композиційних матеріалів, що застосовуються в газотермічних покриттях і процесах дугового наплавлення

Одним з нових напрямків в отриманні захисних покриттів є застосування попередньо механоактивованих композиційних матеріалів в процесах високо-температурного синтезу, а також застосування композитів, що містять в обсязі матриці нанорозмірні синтезовані включення, в процесах детонаційного напилення. Об'єднання СВС, детонаційного напилення та механохімії в єдину інтегральну технологію має певні перспективи в плані розвитку нанотехнологій. Результати досліджень В. І. Яковлева дозволили встановити, що для більшості технологічних параметрів (гранулометричний склад порошку 40–63 мкм., товщина покриття за один постріл 10–20 мкм., витрати газів горючої суміші – стехіометричне співвідношення, дистанція напилення 50–100 мм., і т.п.) є вузький діапазон, при яких формуються покриття з досить високими властивостями міцності.

Розроблено двоступенева технологія, що поєднує процеси механічної активації порошкових сумішей і СВС, призначених для виготовлення та відновлення деталей сільськогосподарської техніки, схильних до інтенсивного зношування. Створено багатокарбідні СВС-механокомпозити, що представляють собою нові композиційні матеріали зі структурою типу «зміцнююча фаза – матриця». Застосування складів типу « $TiC + (Ni-Cr)$ », « $TiC + SiC + (Ni-Cr)$ », « $TiC + WC + (Ni-Cr)$ », « $TiC + SiC + WC + (Ni-Cr)$ » дозволяє за допомогою порошкового електрода сформувати зносостійке покриття на деталях сільськогосподарського машинобудування.

Розроблено композиційні СВС-матеріали системи  $P6M5 + TiC$  і  $NiCr$ -сталь +  $TiC$ , призначені для зміцнення деталей методами електродугової наплавки і детонаційного напилення, застосовуються для підвищення ресурсу стрілочастих лап культиваторів і сівалок. Можна зробити висновок про перспективність інтегрування СВС-процесів з газотермічними способами напилення покриттів.

Підприємства Міжгалузевий науково-виробничий центр «Елісон ЛТД», м.

Івано-Франківськ інформує про розробку електродів СВС-класу, що дозволяють наплавляти захисне покриття з твердістю 63-70 HRC, зносостійкість якого в 1,2–1,5 раза вище зносостійкості твердих сплавів типу ВК в абразивному середовищі.

Необхідно відзначити основний недолік СВС-технології, який полягає в тому, що вона не універсальна. Не кожену реакцію можна провести в режимі СВС, оскільки для цього вона повинна виділяти достатню кількість тепла. Це накладає обмеження на вибір матеріалів для синтезу.

В даний час у сфері СВС провадяться перспективні роботи зі синтезу нанопорошків і наноматеріалів, створення композиційних матеріалів типу полімер-кераміка, синтезу надтвердих матеріалів. У частині методів наплавлення – завдання створення електродів на основі СВС-продукту неповного перетворення. Дореагування електрода в процесі наплавлення з виділенням тепла підвищує температуру наплавлення і забезпечує зниження енергоємності процесу.

#### **8.4. Властивості покриттів із композиційних механоактивованих СВС-матеріалів, наплавлених електродуговим способом**

У сільськогосподарському машинобудуванні робочі органи ґрунтооброблювальних машин і знарядь: лемеші плугів, стрілочасті лапи культиваторів, диски луцильників і інші для забезпечення достатнього рівня міцності і в'язкості виготовляють з вуглецевої або низьколегованої конструкційної сталі із змістом вуглецю від 0,45 до 0,75% з подальшою зміцнюючою термообробкою. Така термообробка не забезпечує достатнього рівня абразивної зносостійкості в роботі при контакті леза з ґрунтом, тому на нього наноситься, найчастіше за допомогою наплавлення, певний шар більш зносостійкого, але дорогого матеріалу.

Відомі порошки на основі нікелю (ГОСТ 21448-75, ТУУ 322-19-004-96, ТУ ІЕЗ 374-83), що самофлюсуються, покриття з яких після напилення і оплавлення володіють високою міцністю і твердістю. Проте їх зносостійкість в умовах сухого тертя також недостатньо висока.

В даний час досить активно розвивається метод отримання порошкових

матеріалів шляхом саморозповсюджуючого високотемпературного синтезу (СВС), з попередньою механоактивуючою обробкою їх складових компонентів.

Попередня механічна активація порошкових реагуючих сумішей є ефективним способом управління реакцією твердополуменевого горіння для синтезу неорганічних матеріалів.

Тому в цей час інтенсивно розширяється область застосування композиційних матеріалів, синтезованих за технологією СВС-процесу, що механічно активується.

Одним з ефективних напрямів використання порошкових СВС-механокомпозитів є їх застосування в процесі електродугового наплавлення зносостійких покриттів на деталі сільськогосподарського машинобудування.

Поверхневі шари робочих органів сільськогосподарської техніки в процесі експлуатації піддаються інтенсивному абразивному зношуванню в результаті взаємодії з ґрунтом.

Відома французька компанія «AGRICARB» для збільшення терміну служби робочих органів пропонує застосовувати спеціальні захисні пластини із спеченого карбїду вольфраму, які припоюються в місцях найбільш схильних до зносу. Спосіб дорогий і вимагає забезпечення оптимального поєднання жорсткості пластини і її міцності на удар, а також приблизно однакову швидкість зносу сталеві основи і ділянки, захищеної карбїдною пластиною.

У різних галузях народного господарства, в тому числі і при ремонті сільськогосподарських машин, застосовується велика кількість методів і способів відновлення деталей. Аналіз даних дозволяє зробити висновок, що частка деталей, відновлюваних на підприємствах агропромислового комплексу методами наплавлення, найбільша і становить 34,4 %.

Тому найбільш раціональне, на наш погляд, рішення, зазначеної проблеми, полягає в створенні нових матеріалів для наплавлення покриттів, що забезпечують встановлений ресурс деталей машин.

Процесом, що володіє значним потенціалом у отриманні нових матеріалів, у

тому числі карбідоміських, є самопоширюючийся високотемпературний синтез (СВС). Відкриття в 1967 році нового явища, що отримало назву «твердого полум'я» (офіційна назва «Явище хвильовий локалізації автотормозящихся твердофазних реакцій») вигідно відрізняється від застосовуваних раніше способів малим споживанням енергії, високою продуктивністю і простим малогабаритним обладнанням. Тверде полум'я дозволило отримувати цінні тугоплавкі матеріали. Це привело до створення нового високоефективного методу їх виробництва – саморозповсюджуючого високотемпературного синтезу (СВС).

Одним з нових напрямків в отриманні захисних покриттів є застосування попередньо механоактивованих композиційних матеріалів в процесах високотемпературного синтезу, а також застосування композитів, що містять в обсязі матриці нанорозмірні синтезовані включення, в процесах детонаційного напилення. Об'єднання СВС, детонаційного напилення та механохімії в єдину інтегральну технологію має певні перспективи в плані розвитку нанотехнологій. Результати досліджень В. І. Яковлева дозволили встановити, що для більшості технологічних параметрів (гранулометричний склад порошку 40–63 мкм, товщина покриття за один постріл 10–20 мкм, витрати газів горючої суміші – стехіометичне співвідношення, дистанція напилення 50–100 мм, і т.п.) є вузький діапазон, при яких формуються покриття з досить високими властивостями міцності.

Розроблена двоступенева технологія, що поєднує процеси механічної активації порошкових сумішей і СВС, призначених для виготовлення та відновлення деталей сільськогосподарської техніки, схильних до інтенсивного зношування. Створено багатокарбідні СВС-механокомпозити, що представляють собою нові композиційні матеріали зі структурою типу «зміцнююча фаза - матриця». Застосування складів типу « $TiC + (Ni-Cr)$ », « $TiC + SiC + (Ni-Cr)$ », « $TiC + WC + (Ni-Cr)$ », « $TiC + SiC + WC + (Ni-Cr)$ » дозволяє за допомогою порошкового електрода сформувати зносостійке покриття на деталях сільськогосподарського машинобудування.

Розроблено композиційні СВС-матеріали системи  $P6M5 + TiC$  і  $NiCr$ -сталь +

TiC, призначені для зміцнення деталей методами електродугової наплавки і детонаційного напилення, застосовуються для підвищення ресурсу стрільчастих лап культиваторів і сівалок. Зроблено висновок про перспективність інтегрування СВС-процесів з газотермічними способами напилення покриттів.

Огляд науково-технічної літератури свідчить про перспективність робіт в області СВС-процесів стосовно до газополуменевого напилення і наплавлення зносостійких покриттів.

Найбільшою зносостійкістю володіють тверді сплави на основі карбідів, одним з яких є карбід титану (*TiC*).

Карбід титану *TiC* відноситься до безкисневих тугоплавким сполук, які є основою сучасних матеріалів, призначених для роботи в екстремальних умовах дії високих температур, тиску, швидкостей, агресивних середовищ і т. д. В даний час все більшого значення набуває застосування порошків карбиду титану високої і особливо високої дисперсності (мікро - і нанопорошків), які забезпечують істотне поліпшення властивостей матеріалів на його основі. Основним способом виробництва карбиду титану є вугільнотермічний спосіб його отримання з діоксиду титану, який характеризується великим енергоспоживанням на стадії тривалого синтезу в печах і при подрібненні спечених брикетів карбиду титану в розмельних агрегатах.

Виконання операції механоактивації реакційної суміші в атриторі дозволяє зробити взаємоподрібнення вихідних порошків і сформувати композиційні частинки з рівномірним розподілом вихідних реагентів за обсягом, а також знижує тепловтрати при синтезі, підвищує активність системи і гомогенність продукту горіння. Найбільш популярними є композиції на основі карбиду титану. Це пов'язано з високим екзотермічним ефектом реакції утворення карбиду титану з елементів (179 кДж/моль), що забезпечує широкий вибір матеріалу зв'язки.

В результаті виділяемого тепла температура твердих і розплавлених продуктів реакції досягає 2500–3500 K, тому реакція не залежить від зовнішніх джерел нагріву і може поширюватися як хвиля горіння, яка сама виробляє енергію для свого

поширення. Незважаючи на високу температуру, перехід будь-якого з компонентів суміші в газову фазу незначний, і їм можна знехтувати.

Бор є одним з найбільш ефективних і економічних легуючих елементів сталі. У більшості випадків мінімальна концентрація бору в металі для одержання позитивного результату становить близько однієї тисячної масової частки відсотка. Унікальність бору полягає в тому, що при такому малому змісті в сталі, він здатний надавати на її властивості вплив, еквівалентну дії значно більшої кількості таких легуючих елементів, як *Cr*, *Mo*, *Ni* і ін. Використання бору для легування сталі привабливо також з точки зору безпеки його застосування та екологічної нешкідливості. Однак існують певні труднощі з борним мікролегуванням сталі, які до цього часу залишаються невирішеними. Традиційним матеріалом, використовуваним для борного легування сталі, є ферробор. Багаторічна практика застосування ферробора показала, що здійснити мікролегування сталі бором з його допомогою досить складно. Пов'язано це, в першу чергу, з високою реакційною здатністю бору в сталевому розплаві і його високою хімічною спорідненістю по відношенню до кисню та азоту. Крім того, в більшості випадків потрібно забезпечити в металі вкрай малу концентрацію розчиненого бору.

Тому при отриманні композиційного матеріалу будемо синтезувати диборид титану:



В якості вихідних матеріалів для отримання порошкових наплавних сумішей використовували порошки титану марки *BT1-0*, бору *B*, вуглецю марки *ПМ-15* з метою синтезу карбіду і диборида титану. Крім того, для збільшення теплового ефекту в процесі синтезу карбіду і дибориду титану в механічну суміш вводиться термореагуючий порошок алюмініда нікелю *ПТ-НА-01*, алюмінієвий порошок *ПАП-1* ГОСТ 5494-95 і оксид заліза  $Fe_2O_3$ . Фракційний склад всіх вихідних порошкових компонентів знаходився в межах (63...100) мкм. Вибрані компоненти змішувалися, і отримана порошкова суміш піддавалася механічній активації. Вибір цього способу впливу на матеріали обумовлений необхідністю створення

композитів, в мікрооб'ємах яких повинна відбуватися реакція СВС. Функцію матричного матеріалу виконував самофлюсуючийся наплавочний порошок марки ПГ-10Н-01 ТУ 322-19-004-96.

Для отримання механоактивованих порошкових сумішей застосовувався метод механічної активації в планетарних кульових млинах АГО-2.

У проведених експериментах обсяг барабанів – 160 см<sup>3</sup>, діаметр куль – 4-5 мм, маса куль 200 г. Час процесу механоактивації варіювалося в діапазоні від 2 до 6 хвилин.

Дугова наплавлення здійснювалася на заготовки зі сталі 20. Наплавлення виконували з використанням інверторного джерела живлення Патон ВДІ-200Р DC TIG.

Наплавочную смесь получали по следующей технологии:

- змішування та механоактивація порошоків Ti, В, С, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al;
- додавання сполучного – клей марки «Метилан»;
- формування циліндра і сушіння;
- ініціювання саморозповсюджуючогося високо-температурного синтезу;
- дроблення і механоактивація композита, отриманого на першому етапі і додавання матричного матеріалу ПГ-10Н-01.

Наплавлення СВС-механокомпозитів проводилося графітовим електродом діаметром 10 мм.

Досліджували структури за допомогою оптичного мікроскопа МІМ-8.

Мікротвердість покриттів вимірювалася на твердомірі марки ПМТ-3 згідно ГОСТ 9450-76.

СВС проводили на циліндричних зразках в умовах фронтального здійснення синтезу. Підпалювання реагуючого складу здійснювалося електричною дугою (рис. 8.3–8.4).

Після отримання композиційного матеріалу у вигляді спека (рис. 8.4, б) виробляли його дроблення, здійснювали механоактиваційну обробку і додавали матричний матеріал ПГ-10Н-01 в кількості 80–90 % для поліпшення технологічних

властивостей при наплавленні (рис. 8.5).

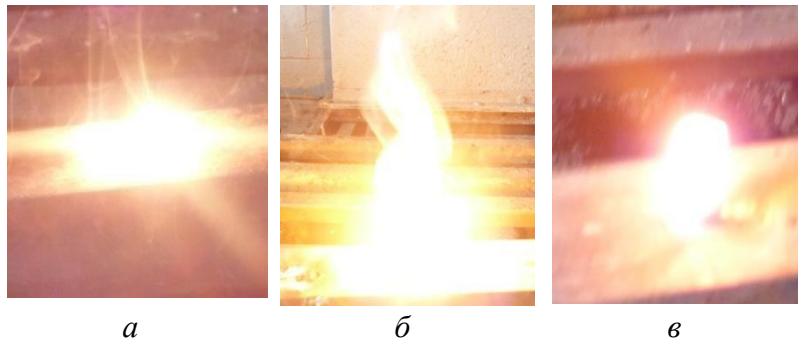


Рис. 8.3. CVC-процес формування композиційного матеріалу з компонентів  $(Ti+B+C+Fe_2O_3+Al)$ , стадії:

*a* – початкова; *б* – максимальне горіння; *в* – завершуюча

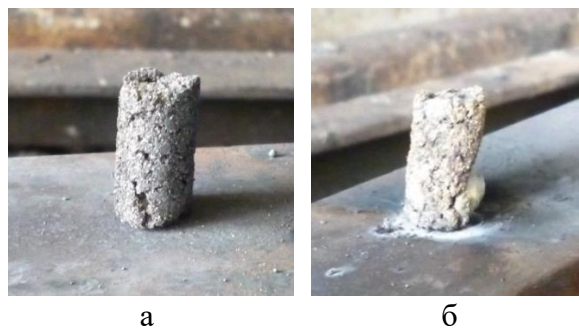


Рис. 8.4. Композиційний матеріал  $(Ti+B+C+Fe_2O_3+Al)$  після:  
*a* – формування; *б* – CVC-процесу

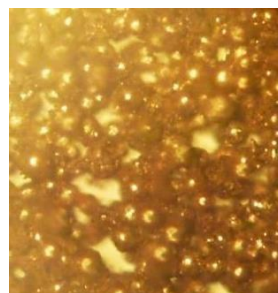


Рис. 8.5. Композиційний матеріал  
10 %  $(Ti+B+C+Fe_2O_3+Al)$  + 90 % ПГ-10Н-01,  $\times 35$

Результати дослідження мікротвердості наплавлених покриттів з композиційних матеріалів складу  $\{10\% (Ti+B+C+Fe_2O_3+Al) + 90\% \text{ ПГ-10Н-01}\}$  та

{20% ( $Ti+B+C+Fe_2O_3+Al$ ) + 80 % ПГ-10Н-01}, показали, що в наплавленому шарі присутні тверді включення – імовірно це карбід ( $TiC$ ) і диборид титану ( $TiB_2$ ), карбід заліза ( $Fe_3C$ ). Так, мікротвердість покриття композиційним матеріалом {20 % ( $Ti+B+C+Fe_2O_3+Al$ ) + 80 % ПГ-10Н-01}, отриманого електродуговим наплавленням на сталеву основу (сталь 20), перевищує мікротвердість наплавленого покриття ПГ- 10Н-01, рівну 760  $HV$ , і становить 787  $HV$ .

На рис. 8.6 представлені результати зносних випробувань покриттів ПГ-10Н-01 і композиційного матеріалу {20% ( $Ti+B+C+Fe_2O_3+Al$ ) + 80 % ПГ-10Н-01} на машині тертя типу МІ за схемою диск-колодка в середовищі індустриального мастила питомим навантаженням 8 МПа.

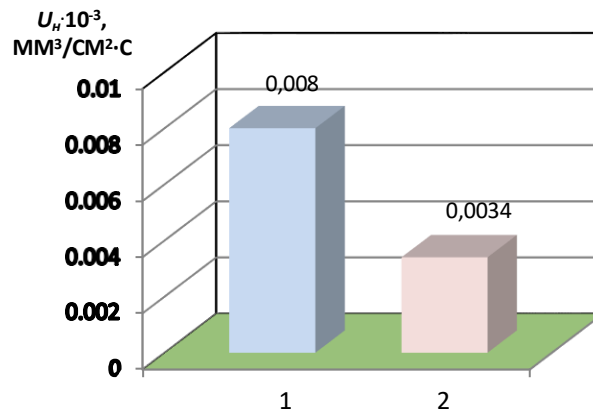


Рис. 8.6. Інтенсивність зношування в процесі нормального тертя в середовищі індустриального мастила пар:

покриття ПГ-10Н-01 – сталь 45  $HRC$  50 (1); покриття з композиційного матеріалу {20 % (70 % ( $Ti+C+Fe_2O_3+Al$ ) + 20 % ПГ-10Н-01 + 10 % ПТ-НА-01) + 80% ПГ-10Н-01} – сталь 45  $HRC$  50 (2)

Результати випробувань свідчать про більш високу зносостійкість пропонованого механокомпозиту {20% ( $Ti+B+C+Fe_2O_3+Al$ ) + 80% ПГ-10Н-01}, яка в 2,35 раза перевищує зносостійкість самофлюсуючого сплаву ПГ-10Н-01.

Мікроструктура наплавлених покриттів являє собою матричний матеріал – сплав ПГ-10Н-01, в якому рівномірно розподілені тверді включення, імовірно, ґрунтуючись на результатах виконаних досліджень, це частинки карбиду ( $TiC$ ) і диборида титану ( $TiB_2$ ), карбиду заліза ( $Fe_3C$ ) (рис. 8.7).

Дані включення забезпечують високу зносостійкість композиційного матеріалу. При збільшенні вмісту твердих включень в матричному матеріалі його зносостійкість збільшується.

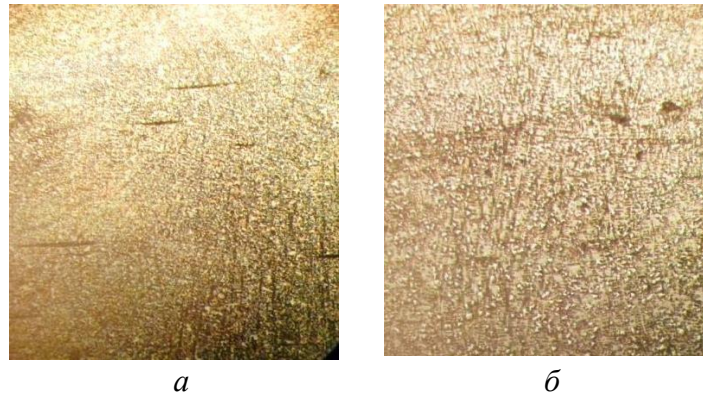


Рис. 8.7 Мікроструктура наплавлених композиційних покриттів,  $\times 100$ :

*a* – 10 % ( $Ti+B+C+Fe_2O_3+Al$ ) + 90 % ПГ-10Н-01;

*б* – 20 % ( $Ti+B+C+Fe_2O_3+Al$ ) + 80 % ПГ-10Н-01

Розроблено композиційний матеріал на основі самофлюсуючого сплаву системи  $Ni-Cr-B-Si$  (порошок марки ПГ-10Н-01 ТУ У 322-19-004-96), модифікований механокомпозитом складу ( $Ti+B+C+Fe_2O_3+Al$ ), отриманим із застосуванням СВС-процесу, що містить карбід і диборид титану.

Композиційний матеріал 20 % ( $Ti+B+C+Fe_2O_3+Al$ ) + 80 % ПГ-10Н-01 має більш високу зносостійкість в порівнянні з самофлюсуючим сплавом ПГ-10Н-01.

Мікроструктура наплавлених покриттів являє собою матричний матеріал – сплав ПГ-10Н-01, в якому рівномірно розподілені тверді включення, імовірно, це частинки карбіду ( $TiC$ ) і дибориду титану ( $TiB_2$ ), карбіду заліза ( $Fe_3C$ ).

### Контрольні запитання

1. Яка історія відкриття і розвитку СВС-процесів?
2. Які технології і матеріали, що застосовуються для СВС-процесів?
3. Застосування СВС-процесу для синтезу композиційних матеріалів, що застосовуються в газотермічних покриттях і процесах дугового наплавлення?

4. Які властивості покриттів із композиційних механоактивованих СВС- матеріалів, наплавлених електродуговим способом.
5. Яка мікроструктура наплавлених покриттів?
6. Навіщо виконується механоактивація шихти перед СВС процесом?
7. Які тверді сплави володіють найбільшою зносостійкістю?
8. У чому виконують механоактивацію порошкової суміші?

## 9. НАНОМАТЕРІАЛИ ТА НАНОТЕХНОЛОГІЇ

Розглянемо деякі основні поняття.

**Нано** – десяткова приставка (у перекладі з грецької *nanos* – «карлик»), що означає одну мільярдну частину будь-якої величини.

**Наномасштаб** передбачає порядок розмірів між 1 та 100 нанометрами ( $1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м} = 10^{-6} \text{ мм} = 10^{-3} \text{ мкм}$ ).

**Наноматеріали** – це матеріали, що містять структурні елементи (кристаліти, волокна, шари, пори), геометричні розміри яких хоча б в одному напрямку не перевищують нанотехнологічного кордону – 100 нм (від 1 до 100 нм), які мають якісно інші порівняно з традиційними матеріалами фізичними, хімічними, механічними та біологічними властивостями, функціональними та експлуатаційними характеристиками.

**Нанокластери** (атомні кластери, наночастинки, атомні частинки) – низько розмірні структури, що мають характеристичні розміри менше 100 нм (1...100 нм), що складаються з десятків, сотень чи тисяч атомів.

**Фулерени** – особливий вид нанокластерних структур; стабільні замкнуті сферичні та сфероїдальні багатоатомні молекули, поверхня яких утворена правильними багатогранниками з атомів вуглецю (або іншого елемента), що виявляють істинно нанорозмірні ефекти.

**Нанотрубки** – ниткоподібні наночастки з атомів вуглецю або інших елементів діаметром не більше 100 нм, що містять протяжну внутрішню порожнину.

**Нановолокна** – ниткоподібні частинки діаметром не більше 100 нм, які не мають внутрішньої порожнини.

Квантові точки, дроти, ями – штучно створені кластерні наноструктури з розмірним квантуванням руху носіїв заряду у трьох, двох та одному напрямках відповідно.

**Нанопорошки** (ультрадисперсні порошки) – порошки розміром частинок менше 100 нм.

**Наноструктурні покриття** – покриття нанометрової товщини (наношарові покриття); покриття з нанометровим розміром кристалітів (нанокристалічні покриття).

**Нанокompозити** – композиційні матеріали з металевою, полімерною, керамічною матрицею та наповнювачем у вигляді наночасток, нановолокон, наношарів, а також композиційні матеріали зі складним використанням нанокompонентів.

### 9.1. Історія розвитку нанотехнологій

Прабатьком нанотехнологій можна вважати грецького філософа Демокріта Абдерського. 2400 років тому він уперше використав слово «атом» для опису найменшої частки речовини. Головним досягненням філософії Демокріта вважається розвиток ним вчення про неподільну частинку речовини, що володіє істинним буттям, не руйнується і не виникає (атомістичний матеріалізм). Він описав світ як систему атомів у порожнечі, відкидаючи нескінченну подільність матерії, постулюючи не лише нескінченність числа атомів у Всесвіті, а й нескінченність їх форм.

1661 р. ірландський фізик і хімік Р. Бойль, один із засновників Лондонського Королівського Товариства, у праці «Хімік-скептик» вказав на потенційну важливість найдрібніших частинок – кластерів («корпускул»). Критикуючи думку Аристотеля про матерію, що з чотирьох першооснов (землі, вогню, води та повітря), автор припустив, що ці матеріальні об'єкти складаються з над малих корпускул, які досить стійкі й у різних поєднаннях утворюють різні речовини і предмети. Згодом ідеї Демокріта та Бойля були прийняті науковою спільнотою.

Прикладом першого використання нанотехнологій можна вважати винахід у 1883 р. американським винахідником Д. Істменом, засновником відомої компанії *Kodak*, рулонної фотоплівки, що являє собою нанесену на прозору еластичну основу (наприклад, з ацетату целюлози) емульсію розкладу чистого срібла, які є пікселями зображення.

1905 р. першим ученим, що використовував вимірювання в нанометрах, прийнято вважати відомого фізика А. Ейнштейна, який теоретично довів, що розмір молекули цукру дорівнює одному нанометру ( $10^{-9}$  м).

1931 р. німецькі фізики М. Кнолл і Е. Руска створили електронний мікроскоп, що просвічує, що став прообразом нового покоління пристроїв, які дозволили зазирнути у світ нанооб'єктів.

1959 р. американський фізик, Нобелівський лауреат Р. Фейнман, у знаменитій лекції в Каліфорнійському технологічному інституті, відомий за назвою «Там, внизу, ще багато місця» («The Plenty of Room at the Bottom»), висловив ідеї управління будовою речовини на атомарному рівні: «Навчившись регулювати і контролювати структури на атомному рівні, ми отримаємо матеріали з абсолютно несподіваними властивостями і виявимо зовсім незвичайні ефекти. Розвиток техніки маніпуляції на атомарному рівні дозволить вирішити багато проблем».

1968 р. співробітники наукового підрозділу американської компанії *Bell A.* Чо та Д. Артур розробили теоретичні основи нанообробки поверхні.

1971 р. компаніями *Bell* та *IBM* отримані перші напівпровідникові плівки одноатомної товщини – квантові ями, що стало початком епохи «практичних» нанотехнологій.

Р. Янг висунув ідею приладу *Topografiner*, який став прообразом зондового мікроскопа.

1974 р. уперше термін «нанотехнологія» запропонований японським фізиком М. Танігучі у доповіді «Про основні засади нанотехнології» («On the Basic Concept of Nanotechnology») на міжнародній конференції задовго до початку масштабних робіт у цій галузі. Термін був використаний для опису надтонкої обробки матеріалів з нанометровою точністю. Терміном «нанотехніка» було запропоновано називати механізми розміром менше одного мікрметра.

1981 р. німецькі фізики Г. Біннінг і Г. Рорер, співробітники компанії *IBM* (*International Business Machines Corporation*), створили тунельний скануючий мікроскоп (Нобелівська премія 1986 р.) – перший прилад, що дозволяє не

тільки отримувати тривимірне зображення структури з електропровідного матеріалу з розділенням порядку розмірів окремих атомів, а й здійснювати вплив на речовину на атомарному рівні, тобто маніпулювати атомами, отже, безпосередньо збирати із них будь-яку речовину.

1985 р. колектив учених у складі Г. Крото (Англія), Р. Керла, Р. Смоллі (США) відкрив нову алотропну форму існування вуглецю в природі – фуллерен і досліджував його властивості (Нобелівська премія 1996 р.). Можливість існування сферичних високо симетричних молекул вуглецю було передбачено в 1970 р. японськими вченими Еге. Осавой і З. Йошидою. У 1973 р. російські вчені Д.А. Бочвар та Є.Г. Гальперн теоретичними квантово хімічними розрахунками довели стабільність таких молекул.

1986 р. створено скануючий атомно-силовий мікроскоп (автори – Г. Біннінг, К. Куатт, К. Гербер, співробітники ІВМ, Нобелівська премія 1992 р.), що дозволив, на відміну від скануючого тунельного мікроскопа, вивчати атомарну структуру не тільки провідних, а й будь-яких матеріалів, зокрема органічних молекул, біологічних об'єктів тощо.

Нанотехнології стали відомі широкому загалу. Базова системна концепція, яка осмислила попередні досягнення, прозвучала в книзі американського футуролога, співробітника лабораторії штучного інтелекту Массачусетського технологічного інституту Е. Дрексlera «Двигуни творення: ера нанотехнології, що настає» («Engines of Creation: The Coming Era of Nanotech»). Автор передбачив активний розвиток та практичне застосування нанотехнологій. Цей прогноз, розрахований на багато десятиліть, виправдовується крок за кроком із суттєвим випередженням у часі.

1987 р. перший одноелектронний транзистор створено американськими фізиками Т. Футоном і Г. Доланом (компанія *Bell Labs*).

Французький фізик Ж.М. Л'юон узвичаїв поняття «самоорганізація» і «само збірка», які стали ключовими при конструюванні нанооб'єктів.

1988–1989 рр. двома незалежними групами вчених під керівництвом А. Фера і

П. Грюнберга відкрито явище гігантського магнітного опору (*GMR*) – квантово-механічного ефекту, що спостерігається в тонких плівках із феромагнітних і немагнітних поперемінних шарів, що проявляється в істотному зменшенні електричного опору в присутності. Використання цього ефекту дозволяє записувати дані на жорстких дисках з атомарною щільністю інформації (Нобелівська премія 2007 р.).

1989 р. продемонстровано перше практичне досягнення нанотехнології: за допомогою скануючого тунельного мікроскопа, виробленого фірмою IBM, американські дослідники Д. Ейглер, Е. Швейцер виклали три літери логотипу компанії (*IBM*) з 35 атомів ксенону шляхом їх послідовного переміщення на поверхні монокристалу нікелю.

1990 р. колектив учених на чолі з В. Кретчмером (Німеччина) і Д. Хаффманом (США) створив ефективну технологію синтезу фулеренів, що сприяло інтенсивному вивченню їх властивостей, визначенню перспективних областей їх застосування.

1991 р. японським фізиком С. Іджіма відкрито нову форму вуглецевих кластерів – вуглецеві нанотрубки, які виявляють цілий спектр унікальних властивостей та є основою для революційних перетворень у матеріалознавстві та електроніці.

У Японії почала реалізовуватися державна програма розвитку техніки маніпулювання атомами і молекулами – проєкт «Атомна технологія» (*Atomic Technology*).

1993 р. у США організовано першу нанотехнологічну лабораторію.

1998 р. голландський фізик З. Деккер створив перший нанотранзистор з урахуванням нанотрубок.

У Японії запущено програму *Astroboy* з розвитку наноелектроніки, здатної працювати в умовах космосу.

2000 р. у США розпочали реалізацію широкомасштабної програми досліджень у галузі нанотехнологій, названої Національною нанотехнологічною ініціативою (*NNI*).

2004 р. у Манчестерському університеті (Великобританія) створено графен – матеріал зі структурою графіту завтовшки в один атом, перспективний заміник кремнію в інтегральних мікросхемах (за створення графену вченим А. Гейму та К. Новоселову у 2010 р. присуджено Нобелівську премію).

2005 р. компанія *Altair Nanotechnologies* (США) оголосила про створення наноакумулятора.

2006 р. дослідники з Північно-Західного університету США розробили перший «друкарський верстат» для наноструктур – установку, що дозволяє виробляти в нанорозмірному діапазоні одночасно понад 50 тисяч наноструктур з атомарною точністю та однаковою молекулярним шаблоном на поверхні, що є фундаментом майбутнього масового виробництва наносистем.

2007 р. Компанія *Intel* (США) почала випускати процесори, що містять найменший структурний елемент розміром ~ 45 нм.

Співробітниками Технологічного інституту (штат Джорджія, США) розроблено технологію скануючої літографії з роздільною здатністю 12 нм.

Наведені та інші дослідження, відкриття, винаходи дали потужний поштовх до застосування нанотехнологічних методів у промисловості. Почався бурхливий розвиток прикладної нанотехнології.

З'явилися перші комерційні наноматеріали – нанопорошки, нанопокриття, об'ємні наноматеріали, нанохімічні та нанобіологічні препарати; створено перші електронні пристрої, рецептори різного призначення на базі нанотехнологій; розроблено численні методи одержання наноматеріалів.

Багато країн світу активно долучилися до досліджень з проблем нанотехнологій на рівні урядів та глав держав, оцінивши перспективи у майбутньому. У провідних університетах та інститутах світу (США, Німеччина, Японія, Англія, Франція, Італія, Швейцарія, Китай, Ізраїль тощо) створено лабораторії та відділи наноструктур, які очолили відомі вчені.

Нанотехнології вже використовуються у найбільш значущих галузях людської діяльності – радіоелектроніці, інформаційній сфері, енергетиці, транспорті,

біотехнології, медицині, оборонній промисловості.

Сьогодні в нанодослідженнях задіяно понад 50 країн світу. За унікальні результати досліджень у цій галузі присуджено 8 Нобелівських премій.

## 9.2. Структура та властивості наноструктурних матеріалів

Речовина наносистем порівняно з традиційними об'єктами з мікроскопічними характеристичними розмірами має такі особливості:

- нанометровий розмір кристалітів;
- дискретний характер атомно-молекулярної структури;
- високу частку поверхневих атомів;
- безліч меж розділу;
- квантові закономірності поведінки;
- домінування над процесами штучного впорядкування явищ само упорядкування та самоорганізації;
- збільшення швидкодії перебігу різноманітних процесів у наносистемі;
- потенційну багатofункціональність;
- передумови до мінімізації, зниження енергоємності, матеріаломісткості

виготовлення виробів і т.д.

Фундаментальні дослідження явищ, що відбуваються в структурах із розмірами менше 100 нм, дали початок розвитку нової галузі знань, яка, очевидно, в найближчому майбутньому буде вносити революційні зміни в технології XXI століття.

Подібним структурам відповідає такий стан речовини, коли в їх поведінці проявляються і домінують принципово нові явища, серед яких квантові ефекти, статистичні часові варіації властивостей та їх масштабування залежно від розмірів структур, переважний вплив поверхні, відсутність дефектів в обсязі монокристалів, значна енергонасиченість, визначальна висока активність у хімічних реакціях, процесах сорбції, спікання, горіння тощо.

Ці явища наділяють нанорозмірні частинки та структури унікальними

механічними, електричними, магнітними, оптичними, хімічними та іншими властивостями, які відчиняють двері в принципово нову область маніпулювання матерією із застосуваннями, які важко уявити у звичайній ситуації.

Протягом багатьох років важливою основою матеріалознавства служили такі характеристики матеріалу: хімічний склад, справжня структура, тобто дальній і ближній порядок розташування атомів, і навіть номенклатура дефектів. Останні десятиліття до них додався характерний розмір частинки чи елемента структури.

Саме розмірні ефекти визначають багато унікальних властивостей наночастинок і наноматеріалів. Для різних характеристик (механічних, електричних, магнітних, хімічних, квантових і т.д.) критичний розмір елемента структури, при якому спостерігається «аномалія» властивостей, може бути різним, як і характер змін (рівномірний або нерівномірний).

Істотні зміни властивостей наноматеріалів порівняно з традиційними аналогами пов'язані, насамперед, з особливостями їх структурного стану.

При переході від макрооб'ємів до нанооб'єктів відбувається зміна співвідношення поверхневих та об'ємних атомів матеріалу. Для наночастинок частка атомів, що знаходяться в тонкому поверхневому шарі (його товщину приймають, як правило, дорівнює 1 нм, що відповідає 2...3 атомним шарам для більшості металів), порівняно з мезо- і мікрочастинками помітно зростає. До певного розміру частинок частка поверхневих атомів мала, їх внесок можна знехтувати. У наночастинок властивості поверхневих атомів стають визначальними (рис. 9.1).

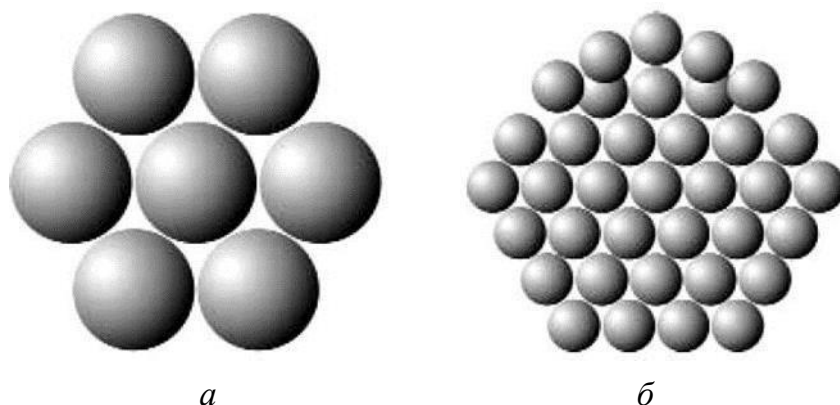


Рис. 9.1. Схема розташування атомів у наночастинці (а) та в об'ємному матеріалі (б)

Частина приповерхневих атомів  $a$  пропорційна відношенню поверхні  $S$  частинки до її обсягу  $V$ :  $a \sim S/V$ . Якщо позначити характерний розмір частинки як  $R$  і прийняти, що частинки мають сферичну форму, то в міру зменшення їх розміру дедалі більша частка атомів виявляється на вільних поверхнях:  $a \sim S/V \sim R^2/R^3 \sim 1/R$ .

Отримуємо такі співвідношення між діаметром зерна (частки) та об'ємною часткою поверхневого шару:

діаметр зерна (частки), нм .....	100	50	25	20	10	6	4
об'ємна частка поверхневого шару, % .....	6	12	24	30	60	100	150.

Таким чином, в нанокристалічних матеріалах, починаючи з діаметра зерна 6 нм, об'єм поверхневого шару стає більше об'ємної частки кристалів.

Положення атомів поблизу поверхні відмінні геометрично і фізично від положень, які займають атоми в масі кристала.

Поверхневі атоми мають властивості, відмінні від об'ємних, оскільки вони пов'язані з «сусідами» по-іншому, ніж в обсязі (змінюється координаційне число, симетрія локального оточення і т.д.).

У поверхневих атомів, на відміну від твердого тіла, що знаходяться в обсязі, задіяні не всі зв'язки з сусідніми атомами. Для атомів, що знаходяться на виступах і уступах поверхні, не насиченість зв'язків ще вища. В результаті у приповерхневому шарі може відбутися атомна реконструкція та виникнення іншого порядку розташування атомів, що призводить до спотворень кристалічних ґрат і навіть до зміни її типу.

У загальному випадку поверхневі атоми знаходяться на ближчих відстанях один від одного, ніж атоми в обсязі кристалічної решітки, мають підвищений запас енергії.

Поверхня навіть найідеальнішого кристала може вважатися великим двовимірним або навіть об'ємним дефектом і служить стоком (майже нескінченної ємності) для більшості дефектів кристалічної будови, в першу чергу, вакансій та дислокацій. При малих розмірах частинок цей ефект помітно зростає, що може

призводити до виходу більшості структурних дефектів на поверхню та очищення наночастинки матеріалу від дефектів структури і хімічних домішок.

Встановлено, що процеси деформації та руйнування протікають у тонкому приповерхневому шарі з випередженням у порівнянні з внутрішніми обсягами кристалічного матеріалу, що багато в чому визначає механічні властивості (міцність, пластичність).

Ще одним аспектом є прояв тонких фізичних ефектів, пов'язаних із специфічним характером взаємодії електронів із вільною поверхнею. З'являються аномалії поведінки електронів, квазічастинок (фононів, плазмонів, магнонів) та інших елементарних збуджень, які спричиняють зміну фізичних властивостей наноструктурних систем порівняно з масивними матеріалами.

Все це разом узятє істотно змінює механічні, електричні, оптичні та інші властивості і дозволяє розглядати приповерхневий шар як якийсь новий стан речовини.

Якщо кількість речовини на поверхні та в обсязі стає порівнянною, то роль поверхні як активнішої складової істотно зростає.

Для наноматеріалів увесь матеріал працює як приповерхневий шар.

Оскільки властивості нанорозмірних частинок багато в чому визначаються поверхневими ефектами, то для масивного об'єкта, що складається з конгломерату наночастинок, його властивості будуть визначатися ефектами, що виникають на межі наночастинок. «Аномалії» властивостей наноматеріалів, насамперед, об'ємних (компактних), обумовлені також тим, що при зменшенні розміру зерна збільшується довжина поверхонь розділу та їх внесок у механізми міцності та пластичності матеріалу.

У структурі наноматеріалів виділяють відносно слабо спотворені центральні частини зерен («внутрішньозеренну фазу») і сильно спотворені зони вздовж кордонів зерен шириною близько декількох нанометрів («зерно граничну фазу»), рис. 9.2. Кількісне співвідношення цих зон стає суттєвим при нанометровому масштабі зерен (менше 100 нм).

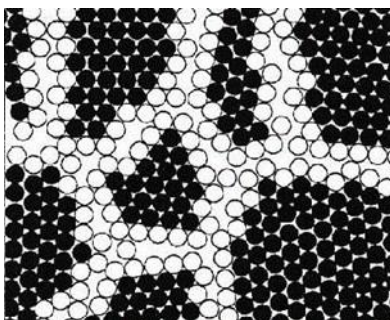


Рис. 9.2. Модель будови нанокристалічного матеріалу

Створено спеціальні структурні моделі зерен та їх меж у наноструктурних матеріалах. Головним у них є уявлення про нерівноважні межі зерен з гранично високою щільністю практично всіх видів дефектів (вакансій, домішкових атомів, дислокацій і т.д.), високою надмірною енергією та далеко діючою пружною напругою. Нерівно важність кордонів зерен викликає виникнення високих значень напруг і спотворень кристалічних ґрат, поява значних зміщень атомів, аж до втрати далекого порядку.

У розмірному інтервалі 1...100 нм наночастинки знаходяться на межі квантового та класичного мікросвітів, і цей метастабільний стан багато в чому також визначає винятковий комплекс фізико-хімічних властивостей.

### 9.3. Фізичні властивості наноматеріалів

Особливістю наноматеріалів є збіг розмірів наночастинок з «характерними» (критичними) розмірами для багатьох фізичних явищ та властивостей. Якщо розмір часток менший за певну для кожної властивості характеристичної довжини, можлива поява нових фізичних властивостей.

Порівняно із звичайними матеріалами в наноматеріалах змінюються такі фундаментальні характеристики, як модуль пружності, питома теплоємність, температура плавлення, коефіцієнт дифузії, магнітні та електричні властивості. Стає іншою фізична сутність багатьох процесів.

Зміна деяких розмірно залежних властивостей наноматеріалів як відгук

зменшення розміру зерна до нанодиапазона наведено в табл. 9.1.

Таблиця 9.1 – Розмірна залежність деяких характеристик фізичних властивостей

Властивості	Відгук матеріалу на зменшення розміру
Термічні	Зниження температури фазових
Кінетичні	Аномально високі значення коефіцієнтів дифузії
Теплові	Підвищення теплоємності, зниження теплопровідності
Електричні	Вищий питомий електроопір металів, більш висока електропровідність кераміки, можливість надпровідності вуглецевих нанотрубок
Магнітні	Зростання магнітної проникності, супер магнетизм

#### 9.4. Хімічні властивості

Існують численні експериментальні свідчення наявності у речовин у нанорозмірному стані, відмінних від макро- та мікроструктурних аналогів хімічних властивостей.

Можна виділити такі особливості їх прояви:

– більшість методів синтезу призводить до отримання наночастинок у нерівноважному метастабільному стані, що, з одного боку, ускладнює їх вивчення та практичне використання у нанотехнологічних процесах, а, з іншого, дозволяє здійснювати незвичайні та неможливі у рівноважних умовах хімічні перетворення;

– наночастинки є системами, що володіють надмірною енергією та високою хімічною активністю. Частинки розміром  $\sim 1$  нм практично без енергії активації вступають у процеси агрегації та реакції з іншими хімічними сполуками, в результаті яких одержують речовини з новими властивостями. «Запасена» енергія таких об'єктів визначається некомпенсованістю зв'язків поверхневих та при-

поверхневих атомів;

– зокрема, аномально високу реакційну здатність виявляють металеві нанокластери. Вуглецеві кластери (фулерени), володіючи високою електронегативністю (здатністю в з'єднаннях притягувати до себе електрони), виступають у хімічних реакціях як сильні окислювачі. Приєднуючи до себе радикали різної хімічної природи, дані наночастки можуть утворювати широкий клас хімічних сполук з різноманітними фізико-хімічними властивостями (магнітними, електричними, оптичними);

– велика кривизна поверхні наночастинок та зміна характеру зв'язку атомів на поверхні призводить до зміни їх хімічних потенціалів. Внаслідок цього істотно інший буде розчинність і каталітична, у тому числі біокаталітична, здатність наночастинок та їх компонентів;

– висока питома поверхня (з розрахунку на одиницю маси) наноматеріалів збільшує їхню здатність до адсорбції (тобто поглинання речовин із розчинів або газів), капілярні властивості (здатність втягувати всередину рідини під дією сил поверхневого натягу).

Наприклад, вуглецеві нанотрубки мають високі сорбційні характеристики (поглинають водень, азот, кисень, пари води, вуглекислий газ, органічні домішки з водних розчинів і т.д.) і є своєрідними акумуляторами і нанофільтрами; виявляють капілярні ефекти (зокрема стосовно розплавів чи розчинів металів – заліза, нікелю, кобальту, свинцю тощо);

– для багатьох наноструктурних матеріалів (покриттів, об'ємних матеріалів) характерна підвищена стійкість до окислення, що пояснюється великою кількістю меж зерен та високими швидкостями дифузії та висока корозійна стійкість.

## 9.5. Механічні властивості

При різних схемах випробувань наноструктурні матеріали (зокрема метали Fe, Cu, Ti, Ni, Ag, Pd та інші) демонструють значно вищі порівняно з традиційними аналогами значення багатьох характеристик механічних властивостей – межі

плинності, тимчасового опору, твердості, ударної в'язкості, міцності втоми і т.д. (табл. 9.2–9.4).

Таблиця 9.2 – Усереднені механічні властивості деяких об'ємних матеріалів у великому та нанокристалічному стані

Матеріал		Межа міцності (тимчасовий опір), $\sigma_b$ , МПа	Межа плинності $\sigma_t$ , (умовна межа плинності $\sigma_{0,2}$ ), МПа	Мікротвердість, $HV$ , МПа
Мідь технічна М1	КК	200	60	600
	НК	850	350	1250
Титан технічний ВТ1-0	КК	430	360	1700
	НК	1000	690	2500
Титановий сплав, що деформується ВТ6	КК	1050	980	3270
	НК	1500	1460	-
Сталь високолегована корозійностійка 12Х18Н10Т	КК	550	240	2000
	НК	-	1340	-

КК – великокристалічний стан; НК – нанокристалічний стан

Таблиця 9.3 – Міцність металевих нанощарових покриттів (тонких плівок) порівняно з масивними крупнокристалічними аналогами та сталлю

Матеріал		Міцність $\sigma_b$ , МПа	Марка сталі (великокристалічний стан)	Міцність сталі після термообробки (загартування+відпустка), МПа
Нікель	КК	450	Сталь 45	980
	НП	2000		
Мідь	КК	200	Сталь 65Г	1670
	НП	1700		
Срібло	КК	140	Сталь ШХ15	2350
	НП	1200		

КК – масивне великокристалічний стан; НП – нанощарове покриття

Таблиця 9.4 – Характеристики нанокристалічних покриттів

Склад	Товщина покриття, мкм	Розмір зерна, нм	Мікротвердість $HV$ , $GPa$
$TiN$	1...2	5...30	35...50 (21...26)*
$TiB_2$	1...4	2...8	50...70
$Ti(B,N,C)_x$	2...5	1...5	60...70
$TiN/Si_3N_4$	2	9	50
$TiN/NbN$	2	10	78
$TiN/NbN$	2	10	70 (34)*
$TiC/TiB_2$	3	1...2,5	71

\*У дужках вказані значення мікротвердості для покриттів з мікрокристалічною структурою

Високі характеристики механічних властивостей наноструктурних матеріалів обумовлені, перш за все, малими розмірами їх зерен та великою об'ємною часткою, яку займають межі зерен.

Останнє робить істотний (іноді визначальний) внесок у пластичну деформацію. Високі міцність і твердість нанокристалічних матеріалів також обумовлені особливостями впливу ансамблів кордонів зерен на процеси руйнування при механічному навантаженні.

Наприклад, тріщини в механічно навантажуваних нанокристалічних матеріалах зазвичай формуються на межах зерен, нанокристалічні розміри яких призводять до дуже високих значень критичної напруги для їх утворення.

Однією з найважливіших механічних властивостей матеріалів, як відомо, є міцність, що визначається хімічним складом та реальною атомарною структурою, тобто наявністю певної кристалічної решітки (або її відсутністю) та всім спектром її недосконалостей.

Високих показників міцності можна досягти двома прямо протилежними способами: знижуючи концентрацію дефектів структури (у межі наближаючись до ідеального монокристалічного стану) або, навпаки, збільшуючи її аж до створення дрібнодисперсного нанокристалічного або аморфного стану.

Один з основних механізмів зміцнення в цьому випадку обумовлений ефектом накопичення дислокацій поблизу перешкод, якими при зменшенні розмірів зерен є їх межі.

Обидва шляхи широко використовують у сучасному фізичному матеріалознавстві, і в обох напрямках межі, що існували донедавна, подолані на основі використання наноматеріалів.

## 9.6. Класифікації наноматеріалів

Можна виділити переважно чотири групи технологічних методів отримання консолідованих наноматеріалів: порошкова металургія, інтенсивна пластична деформація, кристалізація з аморфного стану і плівкова технологія. Класифікація ця досить умовна та різкої межі між цими методами не завжди можна провести.

Наноматеріали можна класифікувати за хімічним складом, формою кристалітів та розташування меж розділу. Один із варіантів подібної класифікації був запропонований Г. Глейтером і представлений у табл. 9.5.

За формою кристалітів наноструктурні матеріали (НСМ) ділять на три групи: шаруваті, волокнисті та рівноосні, див. табл. 12.5 для яких відповідно товщина шару, діаметр волокна або розмір зерна менше 100 нм.

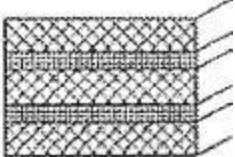

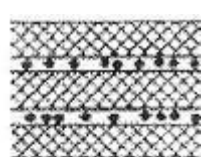





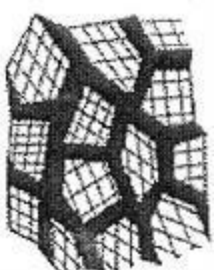


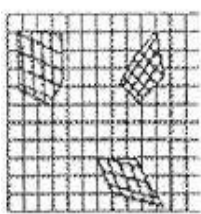
За хімічним складом кристалітів можна виділити чотири групи НСМ, див. табл. 9.5.

Як видно, пропонуються чотири різновиди наноматеріалів за хімічним складом та розподілом структурних особливостей (однофазні, багатофазні з ідентичними та неідентичними поверхнями розділу та матричні композиції) та три категорії форм структури (шарувата, стовпчаста та рівноосна). Насправді, різноманітність структурних типів може бути більшою за рахунок змішаних варіантів. Найпростіший варіант – це, коли хімічний склад нанокристалітів та меж зерен однаковий. Наприклад, чисті метали з нанокристалічною рівноважною структурою.

Друга група представляє НСМ із кристалітами різного хімічного складу,

зокрема, багат шарові структури.

Таблиця 9.5 – Класифікація об'ємних наноматеріалів за складом, розподілом та формою структурних складових

Форма кристалітів	Хімічний склад кристалітів			
	Склад кристалітів та меж розділу однаковий	Склад кристалітів різний	Склад кристалітів та меж розділу різний	Кристаліти дисперговані в матриці різного складу
Шарувата				
Волокниста				
Рівноосна				

Для матеріалів третьої групи хімічний склад зерен та меж розділу різний.

Четверту групу НСМ складають матеріали, в яких нанорозмірні компоненти (шари, волокна, рівноосні кристаліти) розподілені (диспергуванні) у матриці іншого хімічного складу. Залежно від структурного та хімічного складу НСМ матимуть різні властивості та різні сфери застосування.

## 9.7. Нанопорошки

Особливістю нанопорошків є те, що вони є самостійною групою наноматеріалів (нульмерних) і в той же час є вихідним матеріалом для отримання об'ємних (компактних) наноматеріалів, у тому числі твердих сплавів, керамічних і композиційних матеріалів.

Перехід від грубодисперсного стану до стану в нанометровому діапазоні супроводжується зміною ряду фундаментальних властивостей речовини (фізичних, хімічних, механічних), що й послужило виділенню нанопорошків в окремий клас наноматеріалів, застосування яких відкриває широкі можливості в галузі створення новітніх матеріалів та технологій, принципово нових приладів та пристроїв.

Порівняно з порошками традиційних розмірів нанопорошки характеризуються рядом особливостей:

1. Утворення нанопорошків відбувається за умов, далеких від рівноваги, тому їх частки є нерівноважними, у яких запасена надлишкова енергія проти звичайного крупно зернистого матеріалу.

2. Нанопорошки відрізняються значно більшими значеннями питомої поверхні в порівнянні з традиційними порошковими масами. Під питомою поверхнею, найважливішою характеристикою будь-якої дисперсної системи, розуміють величину поверхні одиниці маси або одиниці об'єму порошкового матеріалу.

Зазвичай для порошків металів, які у технології порошкової металургії, питома поверхня рідко перевищує  $1 \text{ м}^2/\text{г}$ . Для нанопорошків значення питомої поверхні становлять від  $20 \dots 40 \text{ м}^2/\text{г}$  за діаметра  $100 \text{ нм}$ , до  $110 \dots 120 \text{ м}^2/\text{г}$  за діаметра  $10 \text{ нм}$ .

Значення питомої поверхні відіграють важливу роль у визначенні технологічних властивостей порошку, виборі технології та режимів одержання компактних виробів.

3. Для нанопорошків характерна висока реакційна здатність, саме тому нанопорошки часто застосовують як каталізатори.

Нанопорошки різних металів, карбідів, нітридів, оксидів та інших матеріалів одержують механічними, фізико-хімічними, а також біологічними методами (відомо понад 20 методів). Дані технології багато в чому аналогічні традиційно

застосовуваним у технологіях порошкової металургії, проте мають певні особливості, пов'язані зі специфікою нанорозмірних об'єктів.

Вибір способу отримання нанопорошків визначається областю їх застосування, бажаним набором властивостей кінцевого продукту. Характеристики порошкової маси – гранулометричний склад, форма частинок, вміст домішок, величина питомої поверхні – можуть коливатися у досить широких межах залежно від способу одержання. Наприклад, за різних умов одержання нанопорошки можуть мати сферичну, гексагональну, пластівчасту, голчасту форми, аморфну або дрібнокристалічну структуру.

**Механічні методи** одержання порошків, як відомо, полягають у механічному подрібненні сировини та характеризуються переробкою вихідного матеріалу практично без зміни хімічного складу.

Подрібнення при отриманні нанопорошків здійснюється у млинах різного типу – кульових, планетарних, відцентрових, вібраційних, гіроскопічних пристроях, атриторах та симолоерах.

Механічним шляхом одержують нанопорошки металів, кераміки, полімерів, синтетичного алмазу. Ступінь подрібнення залежить від виду матеріалу та обраного методу.

Різновидом механічного подрібнення є механосинтез, або механічне легування, коли в процесі подрібнення відбувається взаємодія подрібнюваних матеріалів з отриманням порошкового матеріалу нового складу. Так отримують нанопорошки легованих сплавів, інтерметалідів, силіцидів, дисперснозміцнених композитів розміром частинок 5...15 нм. Унікальним достоїнством способу є те, що за рахунок взаємо дифузії в твердому стані можливе отримання «сплавів» компонентів, взаємна розчинність яких при використанні рідкофазних методів дуже мала.

Позитивною стороною механічних способів подрібнення є порівняльна простота установок і технології, можливість подрібнення різних матеріалів та отримання порошків сплавів, а також можливість синтезу матеріалу у великій кількості.

До **фізико-хімічних методів** отримання порошків відносять технологічні процеси, які пов'язані зі зміною складу вихідної сировини або її стану в результаті хімічного або фізичного впливу на вихідний продукт. Дані процеси умовно поділяють на хімічні та фізичні, хоча у багатьох випадках роздільну грань провести досить складно.

Фізичні методи включають вплив на вихідний матеріал зовнішніх фізичних факторів (в основному теплового), а хімічні – зовнішню дію інших речовин та фізичних факторів, що спричиняє розрив старих та створення нових зв'язків між атомами.

Хімічні методи більш універсальні, забезпечують високу чистоту одержуваних матеріалів, досить вузький спектр розподілу частинок за розмірами, дозволяють отримувати нанопорошки металів, хімічних сполук, багатокомпонентні системи.

Фізичні методи мають перевагу щодо управління розмірами, складом та формою частинок.

**Хімічні методи** засновані на використанні тих чи інших фазових перетворень, що відбуваються у рідині чи парі. Ці методи включають процеси хімічного осадження розчинів, термічного розкладання, золь-гель-технології, реакції відновлення і т.д.

Як правило, методи цієї групи – багатостадійні та включають набір із вищевказаних процесів та реакцій.

Наприклад, *спосіб осадження із розчинів* полягає в приготуванні розчинів солей відповідних металів з подальшим осадженням різних сполук металів з розчинів за допомогою осаджувачів. Продуктом осадження є високодисперсні (до 100 нм) порошки оксидів та гідрооксидів металів сферичної, лускатої або неправильної форми. Як осадник використовують розчини лугів натрію, калію і т.д.

Нанопорошки складного складу одержують методом співосадження. У цьому випадку реактор подають одночасно два або більше розчинів солей металів і лугу при заданій температурі і перемішуванні.

У ряді випадків нанопорошки отримують шляхом *розкладання нестабільних*

сполук, наприклад, форміатів (солей та ефірів мурашиної кислоти), карбонатів (солей та ефірів вугільної кислоти), карбонілів (хімічних сполук металів з оксидом вуглецю), оксалатів (солей шавлевої кислоти), оцтової кислоти або її солей металів внаслідок процесів термічної дисоціації або піролізу. Так, за рахунок реакції дисоціації карбонілів металів одержують порошки *Ni, Mo, Fe, W, C<sub>2</sub>*. Шляхом термічного розкладання суміші карбонілів на нагрітій підкладці одержують поліметалеві плівки. Нанопорошки металів, оксидів, а також сумішей металів та оксидів одержують шляхом піролізу форміатів металів. Таким способом одержують порошки *Mn, Fe, Ca, Zr, Ni, Co*, їх оксидів та металооксидних сумішей.

*Золь-гель-метод* (колоїдно-хімічний) полягає в переведенні водного розчину різних металів в колоїдний стан з подальшим затвердінням. Цей спосіб застосовується для одержання нанопорошків заліза та інших металів, оксидів металів (кераміки), нових гібридних органіко-неорганічних матеріалів.

Для *відновлення металів* - завершальної операції багатьох із зазначених хімічних методів - застосовують різні газоподібні відновники, наприклад, водень (для отримання нанопорошків *Fe, Ni, Co, Cu, W*), оксид вуглецю або тверді відновники - вуглець, метали або гідриди металів (для отримання нанопорошків *Mo, Cr, Pt, Ni, Zr, Hf, Ta*). Розмір частинок 5–30 нм.

**Фізичні методи** отримання нанопорошків металів включають способи, що ґрунтуються на випаровуванні металів, сплавів або оксидів з подальшою їх конденсацією в реакторі з контрольованою температурою та атмосферою (у присутності інертного газу).

Фазові переходи пар-рідина-тверде тіло або пар-тверде тіло відбуваються в об'ємі реактора або на поверхні охолоджуваної підкладки (або стінок).

Сутність методів полягає в тому, що вихідна речовина випаровується шляхом інтенсивного нагрівання, за допомогою газу-носія подається в реакційний простір, де різко охолоджується. Нагрівання випаровуваної речовини здійснюється за допомогою плазми, лазера, електричної дуги, печей опору, індукційним способом, пропусканням електричного струму.

Залежно від виду вихідних матеріалів та одержуваного продукту випаровування та конденсацію проводять у вакуумі, в інертному газі, в потоці газу або плазми. Розмір та форма частинок залежать від температури процесу, складу атмосфери та тиску в реакційному просторі.

Таким методом одержують порошки *Ni, Mo, Fe, Ti, Al*. Розмір частинок у своїй – десятки нанометрів.

Однією з перспективних технологій отримання нанопорошків є також технологія *випаровування-конденсації в умовах швидкого охолодження*. При цьому випаровування матеріалів здійснюють різними способами: у плазмовому струмені, пропусканням струму, лазерним та електронним променем тощо. Обов'язковою умовою у всіх випадках є над швидке охолодження з перепадом температур до  $10^5 \dots 10^7$  градусів в секунду. Внаслідок різкого охолодження кристалізація матеріалу відбувається у вигляді наночастинок.

Дуже ефективний і продуктивний даний метод, що реалізується як *плазмохімічний*, – в плазмотронах, при використанні джерела нагріву високотемпературної плазмової дуги. З його допомогою можна отримувати широкий спектр матеріалів, у тому числі тугоплавкі метали та сполуки (*W, Mo, Ta, SiO<sub>2</sub>*), порошки нітридів, карбідів, боридів з розмірами частинок від 10 до 100 нм.

Для створення нанопорошків спеціально розроблено нову модифікацію цього методу – метод електричного вибуху дротів (ЕВП).

Метод полягає в тому, що через відрізок металевого дроту діаметром 0,1...1,0 мм пропускається імпульс струму великої сили ( $10^4 \dots 10^6$  А/мм<sup>2</sup>), під дією якого дріт руйнується на дрібні частинки та пари. Розлітаючись із великою швидкістю, продукти руйнування швидко охолоджуються, утворюється високодисперсний порошок переважно сферичної форми.

Залежно від роду газу, що оточує дріт, що руйнується, можна отримувати порошки металів, сплавів, хімічно активних сполук або порошки композиційних складів. Як газову атмосферу використовують аргон, водень, азот або суміші газів (наприклад, аргон + кисень).

У такий спосіб одержують нанопорошки розміром 5...100 нм із усіх металевих матеріалів, що випускаються у вигляді дроту (*Ti, Co, W, Fe, Mo, Cu, Ag, Al, Ni* тощо).

При використанні горіння частинок, що утворюються в результаті, в кисні отримані також нанопорошки оксидів – *TiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZrO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, NiO, MgAl<sub>2</sub>O<sub>x</sub>* і т.д.

Нанопорошки складних хімічних сполук та сумішей більш ефективно одержувати випаровуванням мішеней відповідного складу лазерним випромінюванням або пучком електронів. Для мішеней використовуються порошки, що випускаються промисловістю, або відходи, одержані в результаті сепарації порошоків на ЕВП-установках.

## 9.8. Вуглецеві наноструктури

Особлива роль серед різних груп наноматеріалів належить вуглецевим багатоатомним кластерним утворенням – фулеренам, нанотрубкам.

Вуглець – унікальний хімічний елемент, що є основою живої природи; відрізняється здатністю з'єднуватися з більшістю елементів і утворювати молекули різного складу та будови.

Відкриття в останні роки дивовижного різноманіття форм вуглецю (фулеренів, гіперфулеренів, нанотрубок, графенів і т.д.) змушує по-новому поглянути, а в ряді випадків і переглянути уявлення про фундаментальні процеси, що відбуваються за участю вуглецю в живій і неживій природі.

Фулерени і нанотрубки є елементарними об'єктами нанотехнологій, на основі яких можливе створення безлічі макрооб'єктів, що мають практичне значення, - матеріалів і пристроїв.

Потенціал використання цих структур (особливо нанотрубок) перевищує потенціал інших наноструктур.

Досить довгий час були відомі три основні алотропні модифікації вуглецю – графіт, алмаз та сажа (аморфний вуглець), рис. 9.3.

Однак із середини минулого століття вуглецеве сімейство почало швидко

поповнюватися. Спочатку були відкриті одновимірний варіант вуглецю карбін і гексагональний різновид алмазу лонсдейліт.

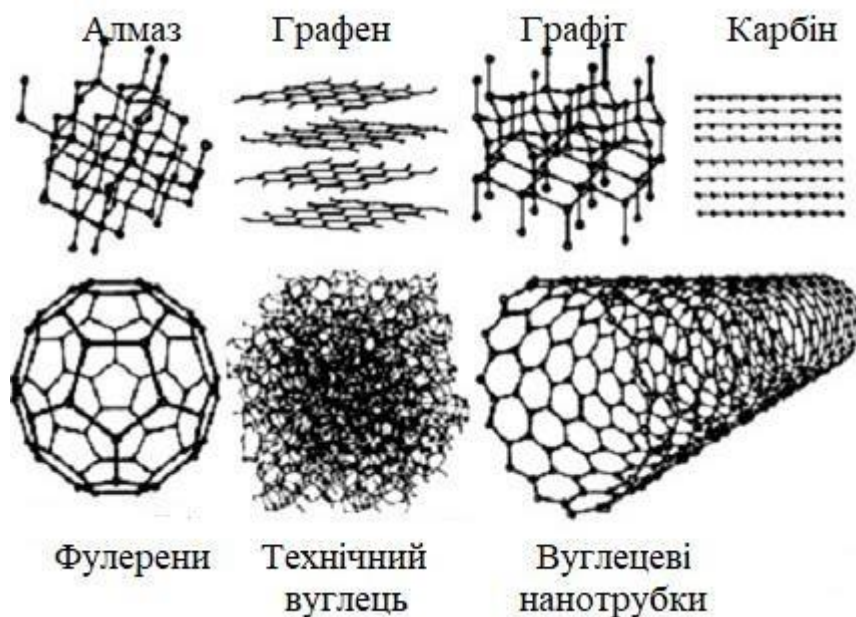


Рис. 9.3. Алотропні модифікації вуглецю

Далі (1985 р.) було виявлено молекули фулеренів  $C_{60}$  (див. рис. 9.3) та їх похідні  $C_n$ . Менш ніж через 10 років світ дізнався про існування циліндричної модифікації вуглецю – одновимірних одношарових та багат шарових вуглецевих нанотрубок.

І, нарешті, у 2004 р. групою вчених з Англії було одержано двовимірну форму вуглецю – графен (див. рис. 9.3).

Щоб зрозуміти принципи будови нанорозмірних структур вуглецю, розглянемо спочатку найвідоміші алотропні модифікації вуглецю – графіт і алмаз.

Структура кристалічної решітки графіту наведена на рис. 9.3–9.4, *a*. Кристали графіту складаються з паралельних площин (шарувата структура), в яких атоми розташовані у вершинах правильних шестикутників. Відстань між сусідніми атомами у площині (сторона шестикутника) 0,142 нм, між сусідніми площинами – 0,335 нм.

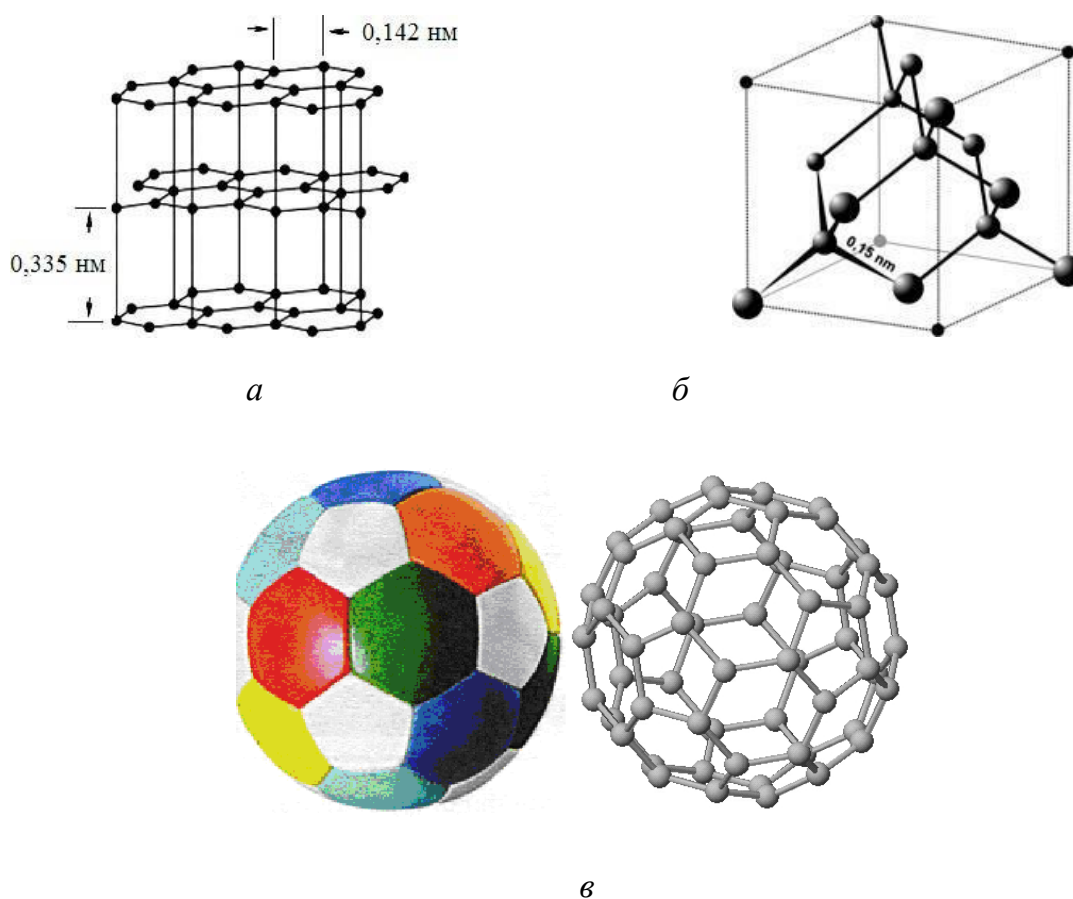


Рис. 9.4. Кристалічна решітка графіту (а); алмазу (б); молекула фулерену (аналогія з футбольним м'ячем) (в)

Кожен атом у площині пов'язаний із трьома сусідами сильними неполярними ковалентними зв'язками. Між атомами, розташованими в різних площинах, формується слабкий ван-дер-ваальсовий зв'язок.

У графіті в утворенні зв'язків бере участь три електрони, четверті електрони атомів вільні.

Подібна структура обумовлює характерні властивості графіту - низьку твердість і здатність легко розшаровуватися навіть при малих навантаженнях (застосовується як тверде мастило); електричну провідність, що в площинному напрямку перевищує провідність у поперечному напрямку в 10000 разів (завдяки електричній провідності графіт застосовують як матеріал електродів в електрохімічних та електротехнічних пристроях); високу теплопровідність, що також залежить від напрямку (графіт застосовують як футерувальний матеріал).

При 3000 K і тиску 11...12 ГПа відбувається прямий перехід графіту в алмаз. Структура кристалічної решітки алмазу наведена на рис. 9.4, б. Елементарний осередок алмазу є тетраедр, у центрі та чотирьох вершинах якого розташовані атоми вуглецю. Координаційне число вуглецю в решітці алмазу, тобто число атомів, розташованих на рівній найменшій відстані від даного атома, дорівнює чотирьом. Усі атоми віддалені один від одного на відстань 0,154 нм.

Всі чотири валентні електрони атомів вуглецю утворюють високоміцні ковалентні зв'язки С-С, завдяки чому алмаз характеризується високою міцністю, твердістю (найтвердіший з відомих у природі мінералів). Електрони провідності відсутні, він є діелектриком. Особливістю алмазу, пов'язаного з його структурою, є висока температура плавлення (3550 °С), хімічна інертність.

Алмаз менш стабільний, ніж графіт, і перетворюється на графіт при температурі 1970 K і нормальному тиску (графіт, не плавлячись, виганяється при температурі 4100 K).

При високих тисках і відносно низьких температурах (1200 K) з високоорієнтованого графіту утворюється гексагональна модифікація вуглецю з кристалічною решіткою типу вюрциту – лонсдейліт (параметри решітки  $a = 0,252$  нм,  $c = 0,412$  нм) із щільністю, як у алмазу. Лонсдейліт знайдено також у метеоритах.

Кристалічна модифікація вуглецю гексагональної сингонії з ланцюжковою будовою молекул називається карбіном. Відомо кілька форм карбину, що відрізняються числом атомів в елементарному осередку, розмірами осередків і щільністю (2,68...3,30 г/см<sup>3</sup>). Карбін зустрічається в природі у вигляді мінералу чаоїту та отриманий штучно – окислювальною дегідрополіконденсацією ацетилену, дією лазерного випромінювання на графіт, з вуглеводнів або ССl<sub>4</sub> у низькотемпературній плазмі. Карбін є лінійним полімером вуглецю.

Ця модель має напівпровідникові властивості, причому під впливом світла його провідність значно збільшується. На цій властивості засновано одне з найважливіших практичних застосувань – у фотоелементах.

Особливості будови визначають «аномальні» фізико-хімічні властивості

фулеренів.

Найбільш досліджений фулерен  $C_{60}$  має чорний колір, є найчистішим з алотропів вуглецю.

Щільність фулерену становить  $1,7 \text{ г/см}^3$ , тобто значно менше густини графіту і тим більше алмазу. Це пов'язано з тим, що молекули фулеренів порожні.

Фуллерен стійкий в інертному середовищі до температур  $1700 \text{ K}$ , проте в присутності кисню окислення цієї форми вуглецю (з утворенням оксиду та діоксиду вуглецю  $CO_2$ ) спостерігається вже при істотно нижчих температурах – близько  $500 \text{ K}$ .

Таким чином, фулерени мають окислювальну здатність, виявляють властивості ароматичних сполук, здатні вступати в хімічні реакції різного типу (відновлення, циклоприєднання, галогенування, гідрування, окислення, полімеризації тощо).

Фуллерен нерозчинний у воді, проте, на відміну від алмазу та графіту, розчиняється в деяких органічних розчинниках, що використовується при виробництві та очищенні фулеренів.

### **9.9. Галузі застосування наноматеріалів та нанотехнологій**

Відомо, що матеріали є фундаментом для  $70 \%$  валового національного продукту промислово розвинених країн і, отже, є життєво важливими для економіки. На основі нанотехнологічних принципів вже реалізовані зразки наноструктурованих надтвердих, надміцних, надлегких, корозійно- та зносостійких матеріалів та покриттів, каталізаторів з високорозвиненою поверхнею, нанопористих мембран для систем тонкого очищення, матеріалів з незвичайними магнітними, електричними, оптичними та іншими властивостями.

Виробництво та застосування цих груп матеріалів може істотно змінити багато сфер діяльності – машинобудування, металургію, механообробку, будівництво, транспорт, енергетику, сільське господарство, національну безпеку, екологію, медицину. Завдяки наноструктурним матеріалам можуть виникнути нові галузі виробництва.

Однією з найбільш важливих та затребуваних газузей застосування нанотехнологій є створення принципово нового класу конструкційних матеріалів – з гранично високою міцністю, що поєднують високу міцність і пластичність, мають високу питому міцність, здатні змінювати свою структуру та властивості залежно від зовнішніх впливів.

На відміну від існуючих раніше напрямів збільшення міцності конструкційних матеріалів шляхом легування та зміни фазового складу нанотехнологічний підхід заснований на формуванні у матеріалів нанокристалічної будови, що забезпечує суттєве збільшення механічних властивостей та формування сприятливого співвідношення між міцністю та пластичністю.

Дані матеріали вже застосовуються, наприклад, для виготовлення деталей аерокосмічного призначення, космічних антен, оптики, дзеркал, антирадарних покриттів; як матеріал деталей конструкції автомобіля; у військовій промисловості; виготовлення побутової електронної техніки; у виробництві шлангів та труб для подачі горючих газів та рідин тощо.

Ведуться роботи зі створення принципово нового класу композиційних матеріалів на основі комбінації різних груп наноматеріалів – фулеренів, нанотрубок та нанодротів, нанопокриттів,

Наноматеріали становлять інтерес з точки зору використання їх як інструментальних. Причинами для цього є їх високі механічні властивості (зокрема, твердість), більш високі в порівнянні з традиційними матеріалами зносостійкість, термостійкість.

Наприклад, нанопорошки вже застосовуються як абразив для надтонкої механічної обробки поверхонь деталей. Так, нанопорошки металів з включеннями карбідів використовують як шліфувальний і полірувальний матеріал на кінцевих стадіях обробки напівпровідників, діелектриків.

Склади на основі наноалмазів застосовуються для полірування матеріалів для електроніки, оптики, медицини, машинобудування, ювелірної промисловості та

дозволяють отримувати бездефектну дзеркальну поверхню твердих тіл будь-якої геометричної форми з висотою нерівностей поверхні до 2...8 нм.

Дуже перспективні як інструментальні керамічні матеріали в наноструктурному стані на основі оксиду алюмінію  $Al_2O_3$ , оксиду цирконію  $ZrO_2$ , карбідів тугоплавких металів.

Наприклад, на основі нанопорошків карбіду вольфраму  $WC$  і кобальту  $Co$ , а також на основі  $TiC/Fe$  розроблені нанокомпозитні металокерамічні матеріали, що значно перевершують за зносостійкістю, міцністю та ударною в'язкістю аналоги зі звичайною мікроструктурою.

Перспективним напрямом генеративного формоутворення є створення функціональних наноструктурних покриттів.

Завдяки застосуванню високотвердих нанокристалічних зносостійких покриттів на основі нітридів, карбідів, боридів тугоплавких металів, багат шарових наноструктурних покриттів складного складу може бути суттєво збільшена стійкість різних видів різальних інструментів та забезпечений значний прогрес у напрямку створення вискоефективних інструментальних матеріалів, підвищена стійкість деталей, що працюють та знос.

Розроблено склади та технології нанесення надтвердих наноструктурних покриттів (що мають мікротвердість 40...80  $GPa$ ), а також ультра твердих (з твердістю понад 80  $GPa$ ), що поступаються за твердістю лише алмазу.

Нанорозмірні покриття, крім високої твердості, мають також більш високу міцність порівняно з покриттями зі звичайною структурою, високою термічною стабільністю, надвисокою ударною в'язкістю. Ще однією їх важливою перевагою є зменшення рівня залишкової напруги і, як наслідок, потенційна можливість збільшення їх товщини в кілька разів.

Багатофункціональні наноструктурні покриття знаходять успішне застосування для захисту поверхні виробів та інструменту, що піддаються одночасно різним видам зношування, впливу високих температур, агресивних середовищ. Це насамперед різальний та штамповий інструмент, прокатні валки,

деталі авіаційних двигунів, навігаційно-приладових комплексів, газових турбін та компресорів; підшипники ковзання, сопла для екструзії скла та мінерального волокна і т.д.

Іншими прикладами реального застосування наноструктурних покриттів можуть бути такі:

- використання багатофазних складів (наприклад,  $TiB_2/MoS_2$ ) як самозмащувальні покриття для космічної техніки;

- застосування нанопокриттів (наприклад, на основі  $TiO_2$  та полімерного сполучного) для забезпечення водо- та масло відштовхувальних властивостей поверхонь ряду виробів – автомобільного скла, скління літаків, корпусів резервуарів для зберігання рідин, будівельних конструкцій тощо;

- застосування керамічних багатофункціональних (зносостійких, корозійностійких) нанопокриттів для підвищення зносостійкості валів гвинтів та перископів підводних човнів, в інших вузлах механізмів, що працюють в умовах корозійних середовищ.

Планується нанесення керамічних нанопокриттів на деталі реактивних та дизельних двигунів для підвищення їх робочих характеристик. Передбачається використання даних покриттів також у медицині – у стоматології та імплантатів в ортопедії.

Все більш широке застосування останнім часом знаходить наноструктурна кераміка, отримана компактуванням нанопорошків тугоплавких і крихких у звичайних умовах речовин різної фізико-хімічної природи: оксидів (алюмінію, цирконію, кремнію, берилію, титану, магнію), нітридів кремнію, карбідів (тугоплавких металів –  $W, Ti, V, Ta$ , а також кремнію, бору), боридів, силіцидів тощо.

Нанокераміка має ряд переваг перед металами: поряд з високою твердістю і міцністю вона має високу жароміцність, не схильна до корозії, має меншу питому вагу.

### Контрольні запитання

1. Дайте визначення нано.
2. Який розмір часток у нанопорошків?
3. Історія розвитку нанотехнологій.
4. Які фізичні властивості наноматеріалов?
5. Класифікації наноматеріалів.
6. Які особливості у нанопорошків?
7. Механічні методи одержання порошків.
8. Фізико-хімічні методи отримання порошків.
9. Хімічні методи отримання порошків.
10. Фізичні методи отримання порошків.
11. Вуглецеві наноструктури.
12. Області застосування наноматеріалів та нанотехнологій.

## 10. УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ ПОВЕРХНІ ТА ВИБІР ТЕХНОЛОГІЇ ВІДНОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ

### 10.1. Якість покриття

Типовий технологічний процес відновлення (зміцнення) деталей нанесенням покриттів включає такі операції: підготовка поверхні, нанесення підшару (при необхідності), напилення покриття, обробка покриття. Кожна технологічна операція характеризується певною кількістю факторів, які роблять вплив на властивості покриттів.

Якість покриття характеризується наступними властивостями: міцність зчеплення покриття з основою, міцністю напиленого шару, пористістю, рівномірною товщиною покриття, рівнем залишкових напружень, однорідністю структури та властивостей покриття (рис. 10.1).

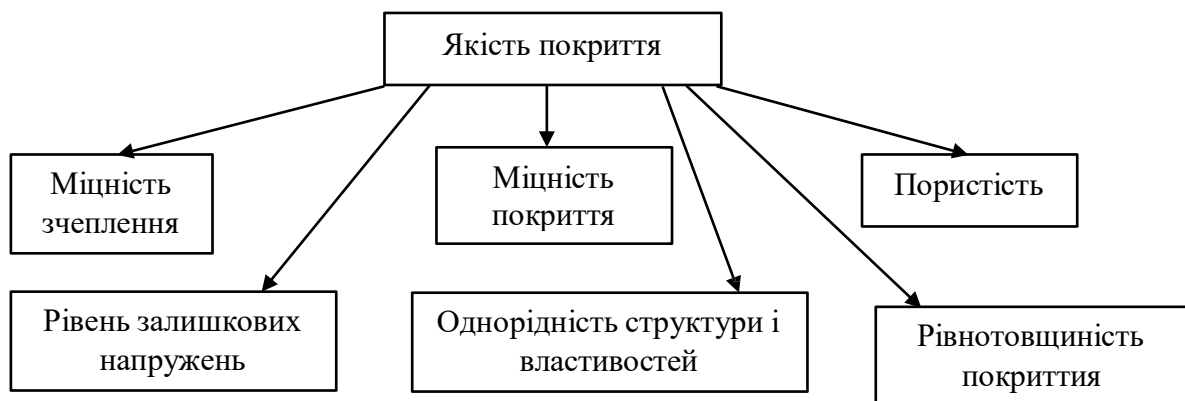


Рис. 10.1. Якість покриття

При нанесенні покриття всі фактори, що впливають на його якість, можна розділити на дві групи.

До першої групи належать фактори, які визначають параметри процесу напилення: склад і витрата горючої газової суміші, властивості напилюваних матеріалів, конструкція пальника, швидкість і температура струменя горючої газової суміші, а також частинок, що напиляються.

До другої групи відносяться: твердість і шорсткість напилюваних поверхонь,

дистанція напilenня, температура основи, швидкість переміщення поверхні по відношенню до пальника, умови охолодження покриття, додаткові дії на деталь і покриття. На рис. 10.2 наведено структуру загальних принципів управління якістю покриттів

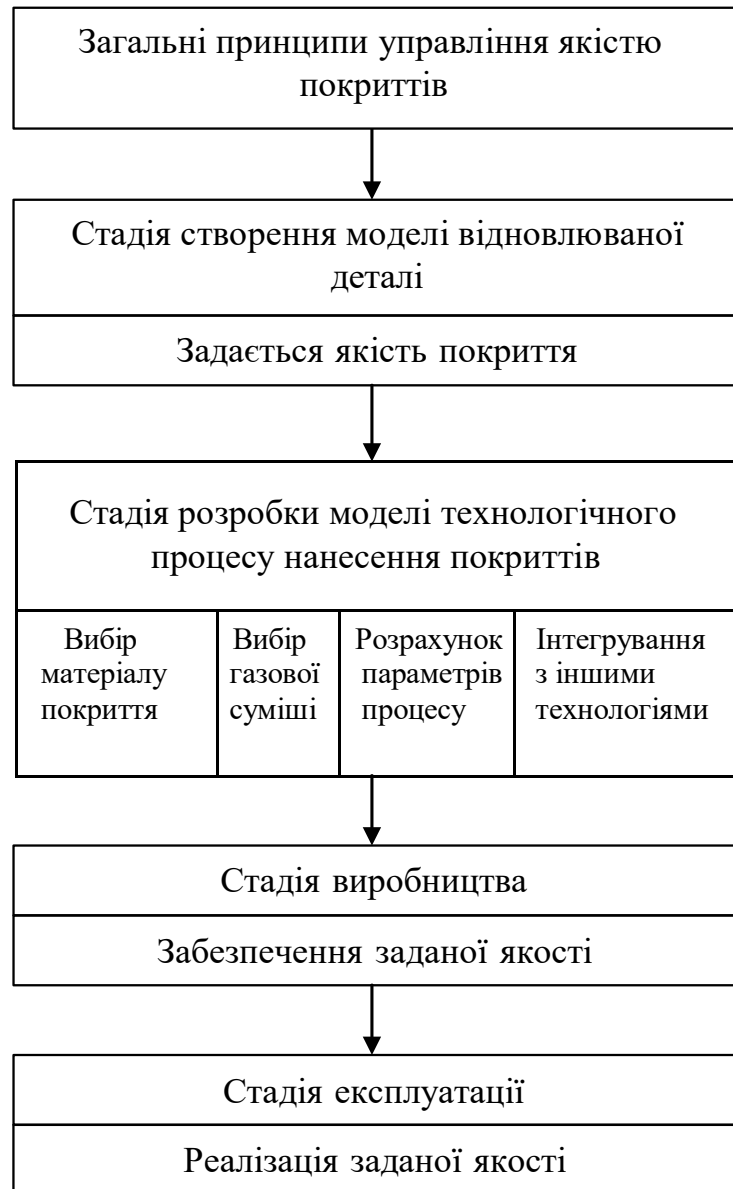


Рис. 10.2. Структура загальних принципів управління якістю покриттів

## 10.2. Методика визначення товщини відновлювальних покриттів, які забезпечують необхідний ресурс

1. За нормативно-технічною документацією на транспортний засіб установлю-

ємо величини граничного зазору ( $z_2$ ) у сполученні й максимальний зазор по кресленнях ( $z_k$ ).

2. Визначаємо граничну величину зношування сполучення взаємодіючих поверхонь деталей:

$$\Delta H = z_{\Gamma} - z_k \quad (10.1)$$

3. Визначаємо товщину відновлювального покриття ( $T$ ) з урахуванням співвідношення швидкостей зношування поверхонь деталей, які сполучаються

$$T = \frac{\Delta H}{k \left( \frac{V_c}{V_g} + 1 \right)} = \frac{z_n - z_c}{k \left( \frac{V_c}{V_g} + 1 \right)} \quad (10.2)$$

де  $V_c, V_g$  – швидкість зношування серійної й відновленої деталей;

$k$  – коефіцієнт, рівний: 1 – при нанесенні покриття на одну сторону; 2 – при нанесенні покриття на протилежні сторони деталі й циліндричні поверхні.

Після визначення товщини відновлювального покриття (формула 10.2) розробляємо ремонтне креслення деталі або її елемента (рис. 10.4) на основі моделі відновлюваного контуру (рис. 10.3).

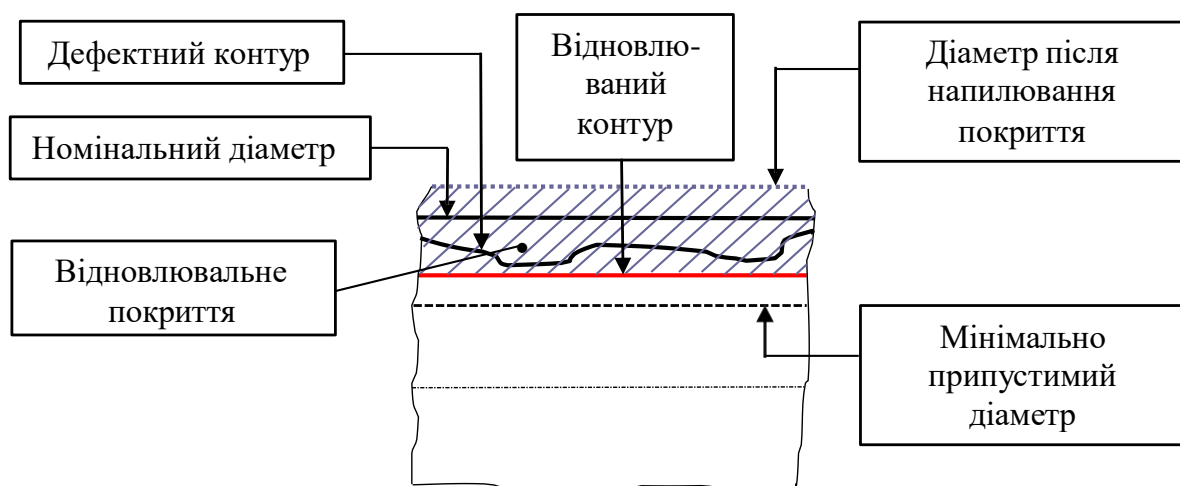


Рис. 10.3. Модель утворення відновлюваного контуру елемента деталі

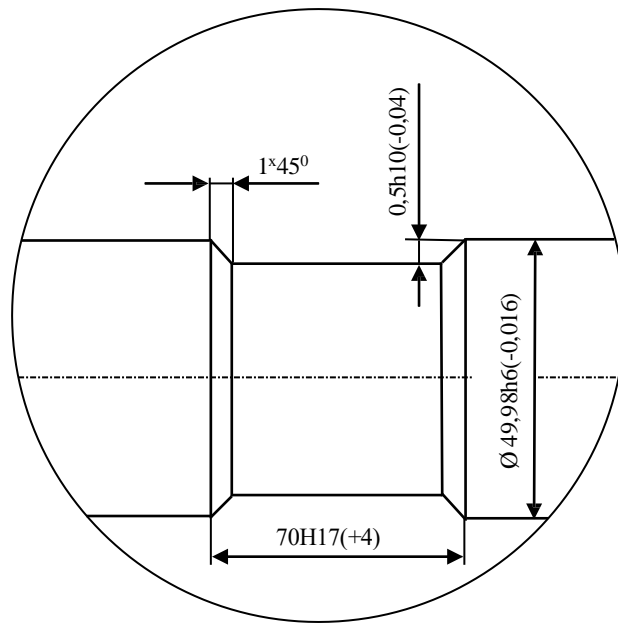


Рис. 10.4. Ремонтне креслення елемента відновлюваної деталі

### 10.3. Вибір технології відновлювання деталей

Вибір технології відновлювання деталей пропонується здійснювати з використанням критеріїв економічної доцільності відновлювання, технологічного і комплексного техніко-економічного, який враховує швидкість зношування і питомі витрати по напилюванню покриття (рис. 10.5).

Для забезпечення економічної доцільності відновлювання деталей необхідно, щоб собівартість їх відновлювання  $C_v$  не перевищувала добутку собівартості виготовлення нових  $C_n$ , на коефіцієнт зносостійкості, тобто повинна виконуватися умова:

$$C_v \leq K_3 C_n, \quad (10.3)$$

де  $V_v$  и  $V_n$  – швидкість зношування відповідно відновленої і нової деталей у вагових або лінійних величинах, що приходить на машино-годину або кілометр пробігу.

Технологічний критерій дозволяє визначити застосовність способів відновлювання до конкретних деталей. Вибір способів відновлювання залежить від конструктивно-технологічних особливостей і умов роботи деталей, величини їх

зносу, експлуатаційних властивостей самих способів, що визначають довговічність відремонтованих деталей і вартості їх відновлення.

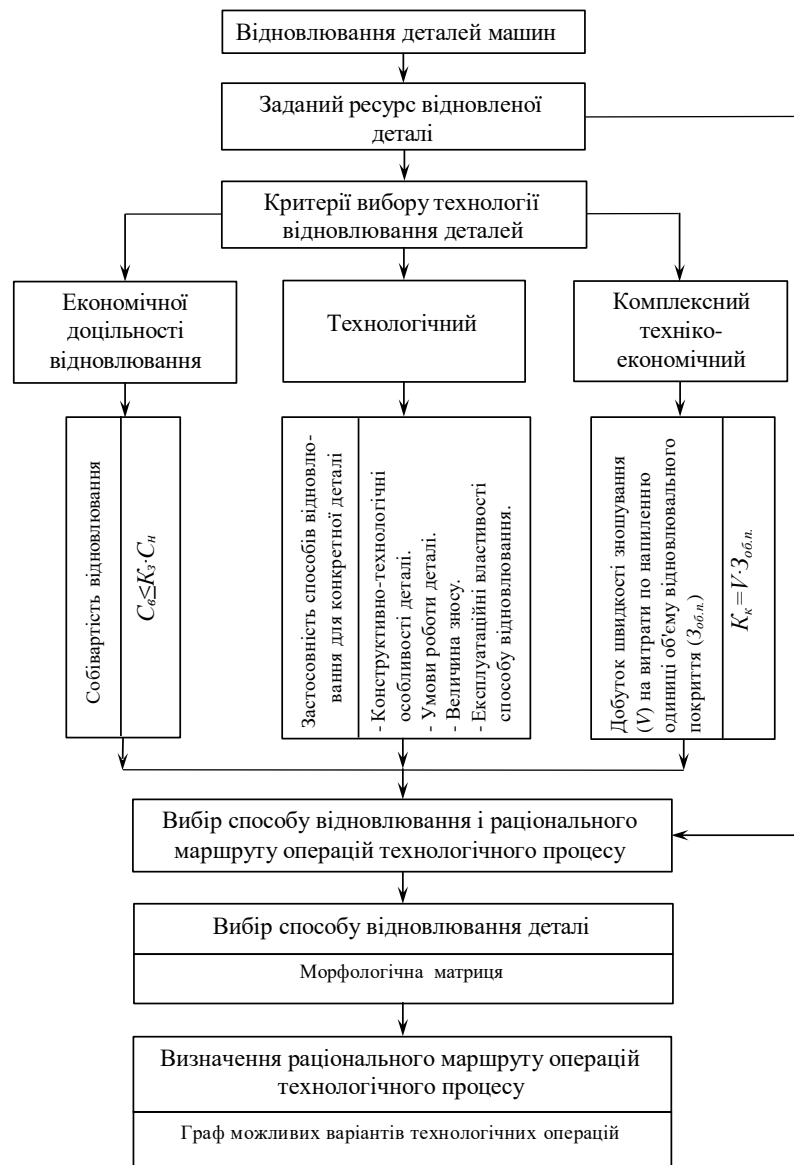


Рис. 10.5. Вибір способу і визначення раціонального маршруту технології відновлення деталей машин за техніко-економічними критеріями

Вибір оптимального способу відновлення деталей з урахуванням їх ресурсу і економічної доцільності пропонується виробляти по комплексному техніко-економічному критерію ( $K_k$ ), який є добутком швидкості зношування ( $V$ ) на витрати по напиленню одиниці об'єму відновлювального покриття ( $Z_{об.п}$ ), оскільки

мінімальний рівень витрат не завжди може відповідати необхідній зносостій-кості відновленої деталі (10.4):

$$K_k = V \cdot Z_{об.п} \quad (10.4)$$

Формула (10.5) є багатопараметричною техніко-економічною моделлю, що дозволяє визначити витрати на отримання одиниці об'єму відновлювального покриття, що і є критерієм економічної ефективності технологічного процесу.

$$Z_{об.п.і} = \frac{1}{60Q_i} \left( \frac{E_n K_i}{\Phi_i} + C_{mi} \right) \quad (10.5)$$

Задачу вибору способу відновлювання деталі, який відповідає комплексному техніко-економічному критерію, і структури технологічного процесу вирішуємо на основі графового представлення можливих варіантів поєднання технологічних операцій, які забезпечують мінімальне значення цільової функції (табл. 10.1, 10.2).

Безліч вершин графа відповідає безлічі складових операцій. Горизонтальні ряди вершин графа відповідають підмножини видів  $i = n$  операції  $j$  - го типу. Вибране підмножина вершин, взятих за однією з кожного ряду графа, визначає один з варіантів технологічного процесу.

Найкоротший шлях  $L_{i+1}$  між зазначеними вершинами визначається шляхом рішення рекурентного рівняння в кожній вершині графа.

$$L_{i+1} = \min(\text{по всім } i, \text{ по всім } n) [L_{(i+1)-1} + L_i]$$

де  $i$  – кроки рішення;  $n$  – число видів технологічної операції  $j$ -го типу;  $L_i$  – витрати на виконання  $i$ -тої операції за умови, що відповідний ділянку графа обраний оптимальним чином;  $L_{i+1}$  – витрати, віднесені до  $i+1$  операціями;  $L_{(i+1)-1}$  – витрати, віднесені до приєднання  $(i+1)$ -й операції процесу до  $i$  його операціями.

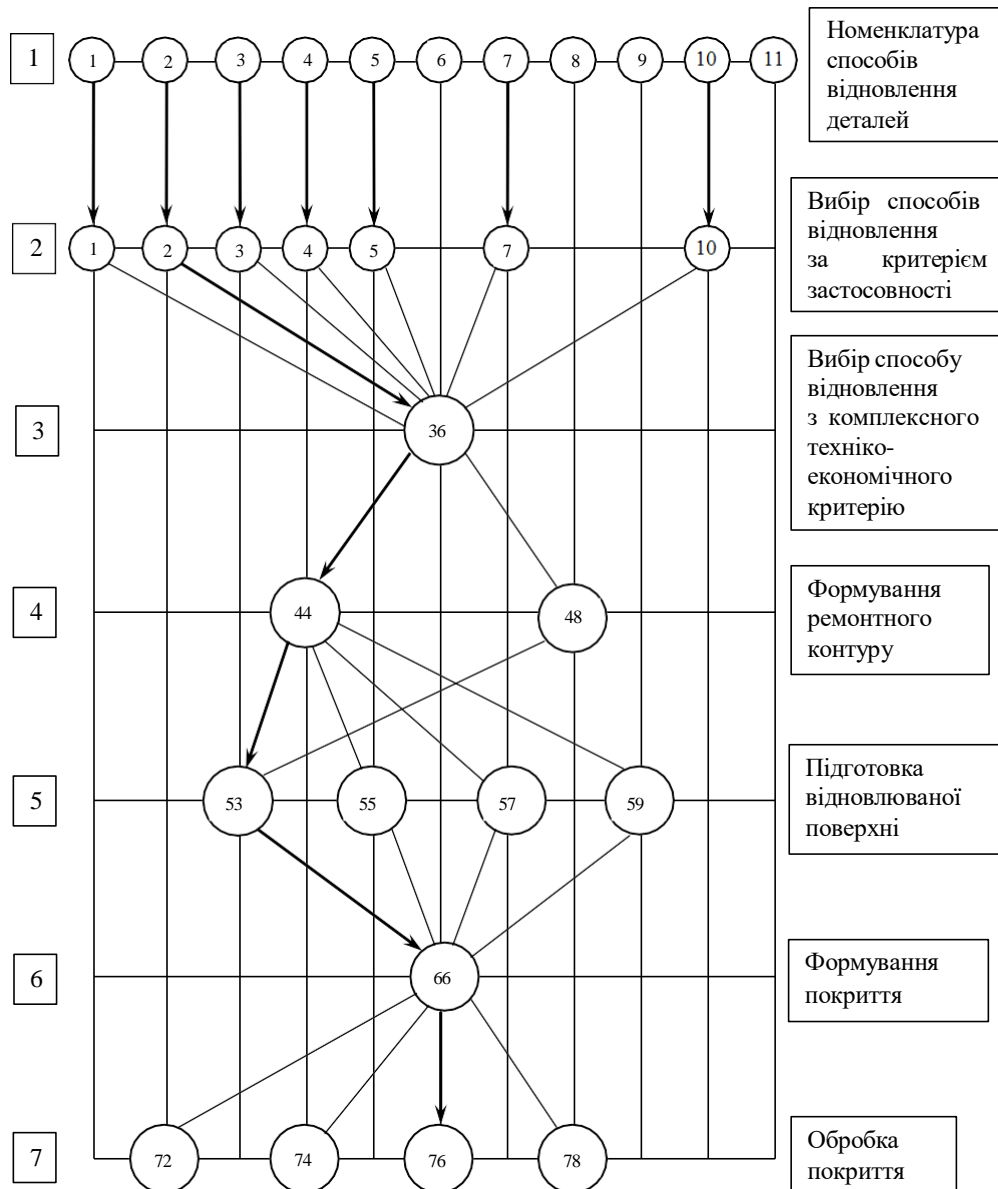
Вибір оптимального способу відновлення (вершина 36) здійснюється в напрямку від 1-го ряду на 2-му за критерієм застосовності і від 2-го до 3-го ряду з комплексного техніко-економічного критерію. Довжину кожного ребра графа розглядаємо як витрати на виконання наступної операції. Оптимізація завдання полягає в пошуку найкоротшого шляху з вершини 36 в одну з вершин нижнього ряду 7 графа і відповідно підмножина вершин на цьому шляху визначає

оптимальний склад операцій технологічного процесу. Значення цільової функції проставляється у верхній вершині графа 3б.

Таблиця 10.1 – Морфологічна матриця основних операцій технологічного процесу

№ етапу	Операція		Координати вершин
	Тип	Вид	
1	Визначення номенклатури способів відновлення деталей	1. Газополуменеве напилення. 2. Інтегроване газополум'яне напилення. 3. Плазмове напилення. 4. Детонаційне напилення. 5. Електродугова металізація. 6. Осталивание. 7. Вибродуговая наплавлення. 8. Наплавлення під шаром флюсу. 9. Хромування. 10. Наплавлення в вуглекислому газі. 11. Ручне наплавлення.	1–1 1–2 1–3 1–4 1–5 1–6 1–7 1–8 1–9 1–10 1–11
2	Вибір способів відновлення деталі за критерієм застосовності	1. Газополуменеве напилення. 2. Інтегроване газополуменеве напилення. 3. Плазмове напилення. 4. Детонаційне напилення. 5. Електродугова металізація. 7. Вибродуговая наплавлення. 10. Наплавлення в вуглекислому газі.	2–1 2–2 2–3 2–4 2–5 2–7 2–10
3	Вибір способу відновлення деталі з комплексного техніко-економічного критерію	2. Інтегроване газополуменеве напилення.	3–6
4	Формування ремонтного контуру	1. Видалення поверхневого шару на технологічно максимальну або мінімально необхідну глибину. 2. Оброблення та видалення дефектів.	4–4 4–8
5	Підготовка відновлюваної поверхні	1. Струминно-абразивна. 2. Механічні способи: – нарізування рваною різьби; – фрезерування насічки, канавок клиноподібної форми; – нарізування кільцевих канавок; – щіткова обробка. 3. Хімічне травлення. 4. Електроіскрова обробка.	5–3 5–5 5–7 5–9
6	Формування відновного покриття (шару)	2. Інтегроване газополуменеве напилення.	6–6
7	Обробка покриття	1. Точіння. 2. Фрезерування. 3. Шліфування.	7–2 7–4 7–6

Таблиця 10.2. Граф варіантів технологічного процесу відновлення деталей



### Контрольні запитання

1. Які загальні принципи управління якістю покриттів?
2. Як визначається товщина відновлювального покриття, яка забезпечує необхідний ресурс?
3. Які критерії визначають вибір технології відновлювання деталей?
4. Як здійснюється вибір оптимального способу відновлення деталей?
5. Як оцінюється економічна доцільність відновлення деталей?

## 11. ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВІДНОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ

### 11.1. Критерій вибору способу відновлення деталей з урахуванням їх ресурсу

Вибір оптимального способу відновлення деталей з урахуванням їх ресурсу та економічної доцільності пропонується проводити з комплексного техніко-економічним критерієм ( $K_k$ ), який представляє собою твір швидкості зношування ( $V$ ) відновного покриття на питомі витрати з його напилювання ( $Z_{об.уд}$ ):

$$K_k = V \cdot Z_{об.уд} \quad (11.1)$$

Критерій економічної ефективності технологічного процесу нанесення відновного покриття зручно представити як питомі витрати на напилення одиниці об'єму покриття. Це дозволяє порівнювати різні способи нанесення покриттів з економічної точки зору.

### 11.2. Оцінка витрат на нанесення покриття

Річні витрати з нанесення покриття становлять

$$Z_i = E_n K_i + C_i \quad (11.2)$$

де  $E_n$  – нормативний коефіцієнт окупності капітальних вкладень;

$K_i$  – капітальні витрати (вартість технологічного обладнання, оснащення);

$C_i$  – витрати на матеріал покриття, технологічні матеріали та електроенергію;

$i$  – номер варіанта способу нанесення покриття.

Тоді витрати при нанесенні покриття на одну деталь складають

$$Z_{уді} = \frac{Z_i}{N_i} = \frac{E_n K_i + C_i}{N_i} \quad (11.3)$$

де  $N_i$  – кількість деталей, відновлюваних протягом року.

$$N_i = \frac{\Phi_i}{T_{ni}} \quad (11.4)$$

де  $\Phi_i$  – дійсний річний фонд часу роботи обладнання з урахуванням втрат часу з організаційних причин, на простої, огляди та ремонти;

$T_{ni}$  – час нанесення покриття.

Підставляючи вираз (11.4) в (11.3), отримаємо таку формулу:

$$Z_{yoi} = \frac{T_{ni}(E_n K_i + C_i)}{\Phi_i} = T_{ni} \left( \frac{E_n K_i}{\Phi_i} + \frac{C_i}{\Phi_i} \right) \quad (11.5)$$

Аналізуючи вираз (11.5) робимо висновок, що перший доданок в дужках являє собою капітальні витрати, віднесені до однієї години дійсного фонду роботи обладнання, іншими словами - питомі капітальні вкладення. Другий доданок є технологічною собівартістю години роботи обладнання, тобто питомі витрати на нанесення покриття.

Якщо уявити час нанесення покриття  $T_{ni}$  в наступному вигляді:

$$T_{ni} = \frac{F_i h_i}{Q_i} \quad (11.6)$$

де  $F_i$  – сумарна площа відновлюваної поверхні,  $\text{см}^2$ ;

$h_i$  – товщина покриття,  $\text{см}$ ;

$Q_i$  – продуктивність нанесення покриття,  $\text{см}^3/\text{хв}$ .

Тоді вираз для визначення витрат при нанесенні покриття на одну деталь (11.5) набуде вигляду

$$Z_{yoi} = \frac{F_i h_i}{60 Q_i} \left( \frac{E_n K_i}{\Phi_i} + C_{mi} \right) \quad (11.7)$$

де  $C_{mi} = \frac{C_i}{\Phi_i}$  – технологічна собівартість години роботи обладнання.

Отриманий вираз (11.7) дозволяє визначити витрати на нанесення покриття необхідної товщини на задану площу відновлюваної поверхні або, іншими словами, технологічну собівартість нанесення покриття.

Для зручності порівняльної оцінки різних способів нанесення відновного покриття отримаємо вираз без урахування геометричних характеристик покриття (площі і товщини), тобто розділимо витрати з нанесення покриття на його обсяг, тобто:  $V_i = F_i h_i$

$$Z_{об.уди} = \frac{1}{60Q_i} \left( \frac{E_n K_i}{\Phi_i} + C_{mi} \right) \quad (11.8)$$

Формула (11.8) являє собою багатопараметричну техніко-економічну модель, що дозволяє визначити витрати з напилування одиниці об'єму відновного покриття, що і є критерієм економічної ефективності технологічного процесу.

Мінімум  $Z_{об.уди}$  буде свідчити про високу економічну ефективність технологічного процесу відновлення деталей. У той же час мінімальний рівень витрат не завжди може відповідати необхідній зносостійкості деталі. Тому вибір оптимального технологічного процесу відновлення деталей слід проводити з комплексного техніко-економічним критерієм  $K_e$  (11.1), враховує швидкість зношування нанесеного покриття:

$$V = \frac{I}{\Delta T} \quad (11.9)$$

де  $I$  – лінійний знос деталі (зразка);

$\Delta T$  – інтервал часу, протягом якого виник знос.

### Контрольні запитання

1. Напишіть формулу критерію вибору способу відновлення деталей з урахуванням їх ресурсу та економічної доцільності?
2. Як оцінюються витрати на нанесення покриття?
3. Напишіть формулу, яка є критерієм економічної ефективності технологічного процесу.
4. Як визначається технологічна собівартість нанесення покриття?

## **12. СКЛАДАННЯ МАРШРУТУ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВІДНОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ. ВИЗНАЧЕННЯ МАРШРУТІВ ОБРОБКИ ОКРЕМИХ ПОВЕРХОНЬ**

Маршрутний опис ТП (тобто скорочений опис всіх технологічних операцій у маршрутній карті без зазначення переходів, режимів, але з вказівкою типу обладнання) в одиничному виробництві зазвичай є основним.

При відновленні деталі проходить послідовно ряд технологічних операцій у такому порядку:

В першу чергу виконуються підготовчі операції (очищення, знежирення, правка, відновлення базових поверхонь);

Механічна обробка, яка призначена для усунення дефектів, що утворилися в процесі експлуатації, або надання правильної геометричної форми зношеним поверхням, у тому числі спеціальну (наприклад, при електродуговому напиленні нарізка «рваної» різьби, фрезерування канавок і т. п.);

Нарощування зношених поверхонь (наплавлення, напилення і ін.). При цьому в першу чергу виконують операції, при яких деталі нагрівають до високої температури (зварювання, наплавлення, термічна обробка). Якщо необхідно, то деталі піддають вторинній правці. Потім виконують операції, що не вимагають нагріву деталей (хромування, залізнення та ін.);

Остаточна обробка (токарна, фрезерна, слюсарна і ін.);

Контрольні операції призначають у кінці технологічного процесу і після виконання найбільш відповідальних операцій.

Запис операцій робиться коротко, наприклад:

05 – термічна (відпуск шліців); 10 – токарна (зрізування шліців);

15 – наплавлювальна (вібродугове наплавлення поверхні під шліци); 20 – токарна (обточування поверхні під шліци);

25 – фрезерна (шліцефрезерна);

30 – слюсарна (заготівля стрічки під три зношені шийки і т. п.).

При встановленні послідовності обробки керуються слідуючими міркуваннями:

1. В першу чергу слід обробляти поверхні, що вважаються чистими (обробленні), технологічні бази.

2. Послідовність обробки залежить від системи виставлення розмірів. На початок маршруту виносять обробку тої поверхні, відносно якої на креслені координовано більше число інших поверхонь.

3. При невисокій точності вихідної заготовки спочатку слід обробити поверхні, які мають найбільшу товщину матеріалу, що видаляється (для раннього виявлення лінійних та інших дефектів). Далі послідовність операцій необхідно встановлювати в залежності від необхідної точності поверхні. Останньою потрібно обробляти ту поверхню, яка є найбільш точною та відповідальною.

4. Операція обробки другорядних поверхонь (свердління отворів, зняття фасок, прорізання канавок, видалення заусенців, нарізання різьби) слід виконувати в кінці ТП, але до операцій кінцевої обробки відповідальних поверхонь.

5. В тому випадку, коли заготовку піддають ТО потрібно передбачити правку або повторну обробку.

При відновленні деталей, маршрут механічної обробки ділять на етапи: попередню (чорнову), проміжну (чистову) і кінцеву (оздоблювальну).

При виготовленні прецизійних деталей, також необхідно чергувати механічну обробку і операції термічної стабілізації розмірів.

Інша особливість ТП прецизійних деталей полягає в необхідності проведення додаткової обробки технологічних баз.

#### *Визначення маршрутів обробки окремих поверхонь*

Як правило починають з вибору метода кінцевої обробки, що забезпечує точність і стан поверхневого шару. При цьому можливі декілька видів обробки, що мають приблизно однакові технічні показники.

Далі при відомому способі отримання заготовки визначають початковий метод

обробки в маршруті. Вибравши остаточний і перший методи обробки поверхні призначають проміжні.

Число етапів розмірної обробки буде залежати не тільки від точності розмірів, але і від рівня відносної геометричної точності форми поверхні (припусків циліндричності, округлості, профіль повздожнього перетину, площиності).

Число варіантів маршруту обробки відновлюваної поверхні, які задовольняють технологічному принципу, може бути доволі великим. Всі варіанти, проте, різні за ефективністю (продуктивністю) та рентабельністю. Визначити кінцевий варіант за цими показниками важливо, але складно і трудомістко.

Наприклад, розглянемо складання маршруту обробки наскрізного отвору по 7-му квалітету точності.

В корпусі деталі після відновлення потрібно отримати наскрізний отвір діаметром  $50^{+0.021}$ ,  $Ra = 0.63$  мкм.

В ремонтній заготовці отримують отвір діаметром  $42 \pm 0.32$ ;  $Rz = 160$  мкм.

В якості попередньої обробки можна призначити чорнове зенкерування (IT12,  $Ra=100$  мкм) або розточування (IT11...IT12,  $Ra = 10$  мкм).

В якості остаточної – можна призначити розгорнення (IT7,  $Ra=0.63$  мкм), тонке розточування (IT6...IT7,  $Ra=0.63$  мкм), чистове шліфування (IT6...IT7,  $Ra=0.2$ ... $0.63$  мкм) або чистове протягування (IT7,  $Ra=0.63$ ... $1.25$  мкм).

В якості проміжних методів можуть бути використані чистове зенкерування (IT9,  $Ra = 2.5$  мкм), чистове розточування (IT8...IT9,  $Ra = 2.5$  мкм) і попереднє шліфування (IT8 IT9,  $Ra = 1.25$  мкм).

Таким чином для даного випадку, можливі 24 різних маршрути обробки отвору.

Число варіантів можна зменшити з урахуванням деяких обставин.

1. Можливості обробки даної поверхні на одному верстаті за декілька послідовних переходів (зниження похибки обробки і часу на переустановлення заготовлі);

2. Обмеження застосування інших методів обробки через недостатню

жорсткість заготовки або через конфігурацію заготівлі;

3. Необхідність обробки даної поверхні разом з іншими поверхнями (для досягнення більшої точності їх взаємного розташування);

4. Обмеження по стабільності точності розмірів (розточування дає більш стабільні результати точності, ніж внутрішнє шліфування, в свою чергу розгортання переважає розточування).

5. Необхідність забезпечення даної продуктивності.

6. Наявність ТО (так, наприклад, загартування шийок валу, як правило виключає лівійну обробку).

Більш точно маршрут можна вибрати при порівнянні сумарної собівартості обробки по різних варіантам.

### **Контрольні запитання**

1. Напишіть формулу критерію вибору способу відновлення деталей з урахуванням їх ресурсу та економічної доцільності.

2. Чим керуються при встановленні послідовності обробки?

3. Як визначаються маршрути обробки окремих поверхонь?

4. На які етапи ділиться механічна обробка деталей?

5. Від чого залежить число етапів розмірної обробки?

## Список джерел інформації

1. Спеціальні способи зварювання : підручник / Кривцун І.В., Квасницький В.В., Максимов С. Ю., Єрмолаєв Г. В. Миколаїв : НУК, 2017. 346 с. ISBN 978–966–321–321–7.
2. Квасницький В. В. Спеціальні способи зварювання [Текст] : навч. посіб. Миколаїв: УДМТУ, 2003. 437 с.
3. Seyffarth, P. Laser-arc processes and their application in welding and material treatment [Text] / P. Seyffarth, I. V. Krivtsun // Welding and Allied Processes. – London: Taylor and Francis, 2002. Vol. 1. 184 p.
4. Лузан С. О. Структура концепції відновного ремонту газотермічним напиленням покриттів. Механіка та машинобудування. Харків : НТУ «ХП», 2011. № 1. С. 163–169.
5. Лузан С.О. Забезпечення зносостійкості деталей газополум'яним напиленням покриттів з віброобробкою. Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. Харків : 2011. Вип. 114. С. 196–202.
6. Інженерія поверхні : підручник / Ющенко К. А., Борисов Ю. С., Кузнецов В. Д., Корж В. М. Київ : Наукова думка, 2007. 559 с.
7. Лузан С.О., Сідашенко О.І. Інженерія поверхні : курс лекцій. Харків: Водний спектр Джі-Ем-Пі, 2019. 188 с.
8. Пащенко В. М. Обладнання для газотермічного нанесення покриттів: навчальний посібник. К.: ІВЦ «Політехніка». 2001. 416 с.
9. Корж В. М. Технологія та обладнання для напилення. навчальний посібник. Київ : НМЦ ВО. 2000. 407 с.
10. Погребна Н. Е., Куцова В. З., Котова Т. В.. Способи зміцнення металів. навч. посіб. Дніпро : НМетАУ, 2021. 89 с.
11. Савуляк В. І. Методи та засоби дослідження складу, структури та властивостей матеріалів : навч. посіб. Вінниця : ВНТУ, 2021. 76 с.
12. Ружилю З. В., Мельник В. І., Новицький А. В. та ін. Надійність машин та

обладнання. Частина 2. Ремонтування машин та відновлення деталей : навчальний посібник. Київ : НУБіП України, 2023. 309 с.

13. Гожій С. П. Основи фізико-технічних та хіміко-термічних процесів для підвищення ресурсу виробів машинобудування. Навч. посіб. з вибіркової компоненти «Основи фізико-технічних та хіміко-термічних процесів для підвищення ресурсу виробів машинобудування» для студентів галузі знань 13 Механічна інженерія, спеціальностей 131 Прикладна механіка усіх форм навчання. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 104 с.

14. Грабченко А.И., Пупань Л.И., Товажнянский Л.Л.. Введение в нанотехнологии : текст лекций. Харьков : НТУ «ХПИ», 2012. 288 с.

15. Сідашенко О.І. Технологія ремонту машин та обладнання. Курс лекцій / Сідашенко О.І., Тіхонов О.І., Лузан С.О. та інші. навч. посібник. – Харків: ХНТУСГ, 2017. – 361 с.

16. Sidashenko O. Repair Technology of Machinery and Equipment. Lecture course. / Sidashenko O., Tikhonov O., Luzan S., and others. Textbook. – Kharkiv: KhNTUA, 2017. – 340 p.

17. Лузан С.О. Підвищення довговічності деталей машин під час їх відновлювального ремонту / С.О. Лузан, Д.М. Петренко // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка. – Харків: 2019. – Вип. 205. – С. 211-217.

18. Лузан С.О. Обґрунтування та вдосконалення технологій відновлення деталей. Курс лекцій / С.О. Лузан, О.І. Сідашенко, А.С. Лузан. – Харків: Діса плюс, 2020. – 127 с.

19. Luzan, S.O., Luzan, A.S. Microstructure and Abrasive Wear Resistance of Deposited Materials of the Ni–Cr–B–Si System with Inclusions of Dispersed Phases (2020) Materials Science, 56 (3), pp. 381-388. DOI: 10.1007/s11003-020-00441-x (SCOPUS).

20. S. O. Luzan, V. A. Bantkovskiy, and A. S. Luzan, Tribological Properties of Composite Coating Ni–Cr–B–Si–Boron-Containing Dispersed Phases Obtained by Arc

Surfacing, at Abrasive Action and Sliding Friction, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 44, No. 4: 531–547 (2022) (in Ukrainian). DOI: 10.15407/mfint.44.04.0531 (SCOPUS).

21. Лузан С.О., Бантковський В.А. Підвищення антифрикційних властивостей поверхонь деталей машин шляхом плазмового напилення покриття порошком ПГ-19М-01 замість литої бронзової втулки. Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Сер. : Автомобіле- та тракторобудування : зб. наук. пр. Харків : НТУ "ХПІ", 2023. № 1. С. 47-54. DOI: 10.20998/2078-6840.2023.1.05. (Б 2)

22. Luzan, S.A., Bantkovskiy, V.A. Structure and Tribotechnical Properties of Deposited Composite Layers Based on PG 10N-01 Alloy Containing AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. *Mater Sci* 59, 328–334 (2023). <https://doi.org/10.1007/s11003-024-00781-y>

23. Лузан С. О., Ситников П. А. Ретроспективний аналіз формування та розвитку самопоширюваного високотемпературного синтезу. Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. Випуск 4/2022 (135). С. 88-96. DOI <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2022.4.12>

Навчальне видання

ЛУЗАН Сергій Олексійович

# **ТЕХНОЛОГІЇ ЗМІЦНЕННЯ ТА ВІДНОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН**

Навчальний посібник

для студентів

спеціальності G 8

«Матеріалознавство»

Відповідальний за випуск доц. Крахмальов О. В.

Роботу до видання рекомендувала проф. Пономаренко О. І.

В авторській редакції

План 2025 р., поз. 79

Підп. до друку 2025 р. Гарнітура Times New Roman. Ум. друк. арк. 11

---

Видавничий центр НТУ «ХП»

Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 5478 від 21.08.2017 р.

61002, Харків, вул. Кирпичова, 2

---

Електронне видання