



**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ
УКРАЇНИ**

**УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ ЗАЛІЗНИЧНОГО
ТРАНСПОРТУ**

**ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ОБРОБКИ
МАТЕРІАЛІВ**

Підручник

Харків – 2016

УДК 620.22(075)
ББК 34.6(075)
I 73

*Рекомендовано вченою радою Українського державного
університету залізничного транспорту як підручник
(витяг з протоколу № 8 від 29 листопада 2016 р.)*

Рецензенти:

професори С.В. Литовченко (ХНУ ім. В.Н. Каразіна),
Я.М. Пітак (НТУ «ХП»)

Авторський колектив:

Е.С. Геворкян, Л.А. Тимофеева, В.П. Нерубацький, О.М. Мельник

I-73 Інтегровані технології обробки матеріалів [Текст]: підручник
/ Е.С. Геворкян, Л.А. Тимофеева, В.П. Нерубацький та ін. – Харків:
УкрДУЗТ, 2016. – 238 с., рис. 56, табл. 2.

ISBN 978-617-654-060-1

У підручнику розглянуто новітні технології відновлення деталей, створення захисних поверхонь з метою збільшення ресурсу роботи різних деталей, використовуваних на залізничному транспорті та в інших галузях промисловості, враховується досвід застосування існуючих методів відновлення деталей.

Значну увагу приділено особливостям застосування нових методів нанесення захисних покриттів на різні деталі з метою їх відновлення та підвищення ресурсу роботи і питанням охорони праці під час обробки матеріалів.

Підручник розрахований на широке коло користувачів: студентів, аспірантів, інженерно-технічних працівників, викладачів, наукових працівників, що спеціалізуються в галузі ресурсозбереження, реновації та підвищення довговічності деталей.

УДК 620.22(075)
ББК 34.6(075)

ISBN 978-617-654-060-1

© Український державний університет
залізничного транспорту, 2016

Підручник

Геворкян Едвін Спартакович,
Тимофеева Лариса Андріївна,
Нерубацький Володимир Павлович
та ін.

**ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ОБРОБКИ
МАТЕРІАЛІВ**

Відповідальний за випуск Нерубацький В.П.

Редактор Ібрагімова Н.В.

Підписано до друку 07.04.16 р.

Формат паперу 60x84 1/16. Папір писальний.

Умовн.-друк.арк. 13,0. Тираж 100. Замовлення №

Видавець та виготовлювач Українська державна академія залізничного транспорту,
61050, Харків-50, майдан Фейербаха, 7.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 2874 від 12.06.2007 р.

**УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ**

**Е.С. Геворкян, Л.А. Тимофєєва,
В.П. Нерубацький, О.М. Мельник**

**ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ОБРОБКИ
МАТЕРІАЛІВ**

Підручник

Харків 2016

УДК 620.22(075)

ББК 34.6(075)

И73

*Рекомендовано Міністерством освіти і науки України
як навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів
(№)*

Рецензенти:

професори С.В. Литовченко (ХНУ ім. В.Н. Каразіна),
Я.М. Пітак (НТУ «ХП»)

Авторський колектив:

Е.С. Геворкян, Л.А. Тимофеева, В.П. Нерубацький, О.М. Мельник

Інтегровані технології обробки матеріалів [Текст]: підручник
/ Е.С. Геворкян, Л.А. Тимофеева, В.П. Нерубацький, О.М. Мельник.

И-73 – Харків: УкрДУЗТ, 2016. – 238 с., іл. 56, табл. 2, бібліогр.: 85 назв.

ISBN

У підручнику розглянуто новітні технології відновлення деталей, створення захисних поверхонь з метою збільшення ресурсу роботи різних деталей, використовуваних на залізничному транспорті та в інших галузях промисловості, враховується досвід застосування існуючих методів відновлення деталей.

Значну увагу приділено особливостям застосування нових методів нанесення захисних покриттів на різні деталі з метою їх відновлення та підвищення ресурсу роботи і питанням охорони праці під час обробки матеріалів.

Підручник розрахований на широке коло користувачів: студентів, аспірантів, інженерно-технічних працівників, викладачів, наукових працівників, що спеціалізуються в галузі ресурсозбереження, реновації та підвищення довговічності деталей.

УДК 620.22(075)

ББК 34.6(075)

ISBN 000-000-0000-00-0

© Український державний університет

ЗМІСТ

Список скорочень, що застосовуються в підручнику.....	6
ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1	
СУЧАСНІ МЕТОДИ ОБРОБКИ НОВИХ МАТЕРІАЛІВ.....	8
1.1. Лиття під тиском зі спінюванням.....	8
1.2. Газодинамічне ущільнення формувальних матеріалів.	18
1.3. Алмазне і алмазно-іскрове шліфування.....	36
1.4. Електроерозійні методи обробки.....	40
1.5. Електрохімічні методи обробки.....	45
1.6. Ультразвукові методи механічної обробки.....	47
1.7. Променеві методи розмірної обробки.....	51
1.8. Лазерна обробка.....	54
1.9. Плазмова обробка.....	67
1.10. Водоструминне різання.....	74
1.11. Нанесення покриттів нітриду титану.....	86
1.12. Тенденції розвитку технологій з'єднання матеріалів..	92
Питання для самоконтролю.....	102
РОЗДІЛ 2	
СУЧАСНІ МЕТОДИ ЗАХИСТУ ТА ВІДНОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ.....	106
2.1. Захисні покриття при гарячій обробці металів.....	106
2.2. Високотемпературні покриття.....	128
2.3. Газотермічне напилення.....	138
2.4. Вакуумне напилення.....	157
2.5. Електронно-променеві методи нанесення покриттів..	160
2.6. Технологія нанесення твёрдосплавних покриттів.....	168
2.7. Відновно-зміцнювальне наплавлення.....	175
2.8. Технологія термопружнопластичної деформації металу.....	181
2.9. Термоциклічна технологія зміцнення.....	186
2.10. Технології вибухового плакування і зміцнення.....	192
Питання для самоконтролю.....	207

РОЗДІЛ 3

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ОСНОВИ БЕЗПЕКИ

ПРИ ОБРОБЦІ МАТЕРІАЛІВ.....	210
3.1. Охорона праці при обробці матеріалів різанням.....	210
3.2. Охорона праці при хімічній і гальванічній обробці матеріалів.....	215
3.3. Охорона праці при зварюванні та паянні матеріалів.....	218
3.4. Охорона праці при обробці матеріалів тиском і пресуванням.....	223
3.5. Охорона праці при склеюванні та фарбуванні.....	225
 БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК.....	 232

Шановні читачі!

У підручнику розглядаються передові технологічні процеси отримання різних деталей. Оскільки сучасні композиційні матеріали мають унікальні властивості, що відрізняються від звичайних металевих сплавів, а саме досить високу твердість, у деяких випадках низьку теплопровідність і електропровідність, то традиційні способи обробки незастосовні. Для цього необхідно використовувати так звані інтегровані способи отримання, обробки та відновлення деталей. У деяких випадках необхідно отримати розміри в межах декількох мікрон, обробляти дуже тонкі деталі, досить вузькі канали та інші технологічні розміри. Авторами приділено увагу питанням технологій відновлення, так званої реновації зношених деталей. Ми спробували показати основні напрямки розвитку інтегрованих технологій, які застосовуються зараз і будуть розвиватися в майбутньому.

Підручник призначений для студентів вищих технічних закладів, інженерів і науковців.

Даний підручник може використовуватися при виконанні курсових, дипломних проектів і магістерських робіт всіх форм навчання, а також для підвищення кваліфікації слухачів ФПК, ІПК та інженерно-технічних працівників залізничного транспорту і промисловості.

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ, ЩО ЗАСТОСОВУЮТЬСЯ В ПІДРУЧНИКУ

- АІШ* – алмазно-іскрове шліфування
БТС – безвольфрамкові тверді сплави
ВВП – вакуумне вібропресування
ВПФ – вакуумно-плівкове формування
ВТМО – високотемпературна термомеханічна обробка
ГТН – газотермічне напилення
ДПН – детонаційне поверхнєве напилення
ЕЕО – електроерозійна обробка
ЕІ – електрод-інструмент
ЕПО – електронно-променева обробка
ЕППМ – електронно-променева порошкова металургія
ЕХО – електрохімічна обробка
ЛГМ – лиття за газифікованими моделями
ЛЗР – легкозаймисті рідини
ЛКМ – лиття по крижаних моделях
МЕП – міжелектродний проміжок
ТПА – термопластавтомат
ТПД – термопружнопластичне деформування металу
ТФВ – тугоплавка фаза впровадження
ТЦЕПТ – термоциклічна електролітно-плазмова технологія
GGD – технологія газового протитиску
MuCell (Microcellular Foam Technology) – технологія мікростільникового спінювання
SCF (supercritical fluid) – суперкритичний рідкий стан

ВСТУП

Сучасний розвиток технологій пов'язують не тільки з розробленням нових технологій і матеріалів, які мають нові функціональні і технічні властивості, але також з відновленням і захистом робочих поверхонь деталей машин і приладів, що веде до підвищення терміну служби деталей машин, а також сприяє ресурсозбереженню. Також спостерігається тенденція відносно того, як розвиток технологій нанесення шарів матеріалу веде до створення унікальних покриттів, які дозволяють не тільки відновлювати, але в багатьох випадках значно поліпшити деякі характеристики деталей.

Обробка матеріалу передбачає надання йому необхідних розмірів, форми, певних властивостей і включає в себе широкий клас таких процесів: різання, шліфування, тиск, пресування, термічна обробка, склеювання, паяння, зварювання, оксидування, сплавлення, травлення, електроліз, глибинне і поверхневе загартовування, обробка вибухом, водоструминна і піскоструминна обробка, обробка струмами високої частоти, розчинення, фарбування та ін.

У даній книзі автори спробували показати основні сучасні способи відновлення різних деталей, а також способи нанесення різних захисних покриттів на поверхні деталей з метою підвищення зносостійкості. Це веде до значної економії матеріалів і сприяє підвищенню ресурсу роботи різних деталей.

На багатьох сучасних підприємствах ведуться роботи щодо зниження витрат сировини, розробляються різні способи реновації зношених деталей. Великий інтерес представляє нанесення багатошарових захисних поверхонь, що дозволяють градієнтно змінювати властивості за поперечним перерізом деталі. Технології нанесення захисних поверхонь постійно удосконалюються, і в даному підручнику розглядаються деякі тенденції їх розвитку.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНІ МЕТОДИ ОБРОБКИ НОВИХ МАТЕРІАЛІВ

1.1. Лиття під тиском зі спінюванням

Не дивно, що лиття полімерних виробів з використанням різних технологій структурного спінювання стає все більш затребуваним. При цьому ось уже протягом 30 років ці технології постійно вдосконалюються.

Перевага лиття спінених полімерів полягає в нерівній залежності показників щільності матеріалу і міцності властивостей готових виробів. Так, якщо структурне спінювання дозволяє вивільнити від 10 до 20 % дорогого полімерного матеріалу, то, як показали експерименти, спінена деталь, дорівнює по масі аналогічній з таким самим суцільним полімером, демонструє перевагу до 70 % у властивостях міцності.

Є й інші переваги застосування технології спінювання при литті пластикових деталей. Але спочатку звернемося до суті технології.

Спочатку в циліндр пластикації в розплав полімеру під тиском подається спінюючий агент, який розчиняється в полімері. Протитиск у циліндрі перешкоджає передчасному розширенню бульбашок і утворенню пінної структури. Потім здійснюється неповне уприскування розплаву в порожнину прес-форми: розплав заповнює 80÷90 % об'єму формоутворювальної порожнини.

За відсутності протитиску мікробульбашки газу починають інтенсивно розширюватися, змушуючи розплав збільшуватися в об'ємі і займати весь простір прес-форми.

При зіткненні спіненого полімеру з більш холодними стінками прес-форми утворюється суцільна кірка, що сприяє забезпеченню досить високої якості поверхні.

У процесі охолодження розплаву залишковий тиск газу в стільниках значною мірою перешкоджає усадці. Очевидно, що через описані особливості процесу лиття зі структурним спінюванням потрібний значно менший тиск уприскування

(в'язкість розплаву зі спінуючим агентом падає) і менший тиск витримування, оскільки тіло розплаву, що формується, має власний внутрішній тиск. Тому на практиці для лиття спіненого аналога деталі, до цього відливаної з суцільного полімеру, достатніми є зусилля змикання в $1,5 \div 2$ разу менші, ніж традиційно.

З одного боку, крім економії матеріалу, це дозволяє заощадити і електроенергію. З іншого боку, з'являється можливість більш ефективно використовувати кілоньютони зусилля змикання термопластавтомата (ТПА) (наприклад, для лиття більш великих виливок порівняно з тими, що номінально дозволяє модель ТПА) або збільшити кількість гнізд. Дуже часто лиття зі структурним спінуванням надає можливість використовувати в 10, а то й у 20 разів більше поверхні формувань, що припадає на одну тонну зусилля змикання плит. Перехід на таке лиття дозволяє задіяти більш скромний ТПА для лиття замовленої деталі або розширити асортимент виробленої продукції за рахунок більш об'ємних деталей. Інша справа, наскільки все це дозволяють здійснити посадочні розміри плит, наявних у розпорядженні термопластавтоматів.

Переваги спінування. Використання спінених полімерних матеріалів значно розширює стандартні технології переробки пластиків:

- істотна економія полімерного матеріалу;
- формування більших або більш складних за формою деталей натомість оброблюваних різанням, без додаткових операцій складання і доведення;
- поліпшення якості деталей внаслідок істотного зменшення усадок і утяжок деталей;
- створення більш легких виробів із збереженням необхідної міцності структури;
- зменшення вимог до номінального зусилля змикання і потужнісних показників приводів;
- застосування більш дешевого інструменту.

Разом з тим слід враховувати, що наявність газових бульбашок у структурі полімерного розплаву знижує його теплопровідність, що позначається на тривалості фази

оохолодження. Деякі спінюючі агенти є окисниками і можуть негативно позначатися на ресурсі обладнання та інструменту.

Тепер є можливість використовувати прес-форми з елементами з алюмінієвих сплавів, що здешевлює вартість виготовлення інструментів. Звичайно, ресурс алюмінієвих прес-форм не такий великий порівняно зі сталевим інструментом, але при виробництві обмежених серій деталей 50÷100 тис. циклів цілком вистачить, щоб створити заділ для переходу на більш масові обсяги. Якщо стоїть завдання виготовити малу партію експериментальних деталей для відпрацювання технології, існує можливість замовити композитний інструмент, основу якого складає епоксидний склад. Каркас і міцнісні вставки виконуються з металів.

Способи отримання спінених пластиків. На сьогоднішній день існують два принципові різновиди спінювання полімерних матеріалів при литті під тиском: хімічний і фізичний.

При *хімічному спінюванні* утворення повітряних бульбашок відбувається через розпад на тверді та газоподібні фракції спінюючих агентів при впливі високих температур. Спінюючий агент підмішується до складу полімерної сировини на етапі приготування полімерної композиції або безпосередньо в дозуючій станції ТПА. Об'ємна частка спінюючих агентів у складі полімерної суміші може становити від 0,25 до 5 % залежно від складу агента і необхідного спінюючого ефекту.

Сучасні спінюючі агенти являють собою органічні і неорганічні сполуки. Їх розробленням і виробництвом займаються великі хімічні компанії (DuPont, Bayer, Solvay, Exxon Mobil та інші), а також ряд невеликих і середніх спеціалізованих підприємств Європи, Північної Америки і Південно-Східної Азії.

За перебігом процесу газоутворення спінюючі агенти поділяються на *екзотермічні* і *ендотермічні*.

Екзотермічні спінюючі агенти (зазвичай органічні, наприклад, азодикарбонамід) забезпечують спонтанне утворення повітряних кишень, що супроводжується виділенням тепла, яке необхідно відводити через прес-форму. Як тільки починається процес газоутворення, його не можна ні зупинити, ні керувати ним – процес носить безповоротний характер. Тиск у газових кишнях може досягати 12÷15 бар. Більш того, процес може не

закінчитися після охолодження і вилучення вилівка, що потребує тривалого витримування перед фінішними операціями.

При використанні ендотермічних спінюючих агентів (зазвичай неорганічні – наприклад, бікарбонат натрію, бікарбонат амонію) піковий тиск газу в бульбашках не перевищує $8 \div 10$ бар. Тепло рівномірно розподіляється і засвоюється структурою полімеру. Подальше газоутворення ефективно припиняється при зниженні теплового впливу. Крім того, продукти розпаду неорганічних спінюючих агентів нешкідливі як для озонowego шару, так і для людини, тому можуть використовуватися при виготовленні харчової упаковки.

Переваги та недоліки хімічного спінювання такі. Хімічний метод спінювання припускає, що ТПА для лиття спінених матеріалів з використанням спінюючих агентів не вимагає конструктивної переробки його основних вузлів – машина має стандартне виконання. Винятком є лише менші вимоги до параметрів потужності ТПА.

Змішування хімічних спінюючих агентів з полімером здійснюється при звичайних умовах (атмосферний тиск, кімнатна температура). Самі по собі хімічні агенти у своїй більшості термостабільні і не вимагають спеціальних умов зберігання чи складного обладнання для зберігання і транспортування.

Тим не менш, хімічний спосіб не дає можливості суворо контролювати параметри піноутворення. Розмір стільників може коливатися від 10 до 200 мкм. Крім того, при хімічному спінюванні окремі спінюючі агенти здатні синтезувати гази (наприклад, аміак), що сприяють корозії низьколегованих сталей.

Додавання спінюючого агента в полімерну сировину вимагає більш точного дозування, а отже, більш дорогих дозуючих станцій. В іншому випадку коливання вмісту спінюючого агента в полімері призведе до нестабільності готових виробів (розкид якісних показників від партії до партії).

Вибір хімічного агента визначається типом полімеру, який належить переробляти. Існують достатньо універсальні спінюючі агенти (наприклад, той самий азодикарбонамід), у той час як інші мають більш сувору спеціалізацію в залежності від сімейства пластиків, що переробляються.

Фізичні спінюючі агенти. При фізичному спінюванні газ або рідина, перебуваючи під тиском, рівномірно проникають у розплав полімеру через інжектори, які найчастіше встановлені в циліндрі пластикації. Передчасне розширення спінюючого газу неможливе через наявність протитиску в циліндрі пластикації, тому газ, перебуваючи в ньому, тільки змішується з розплавом полімеру, паралельно зменшуючи в'язкість розплаву. При вприскуванні полімеру у формоутворювальне гніздо прес-форми протитиск падає, і змішаний з полімером спінюючий компонент починає інтенсивно збільшуватися в об'ємі, утворюючи пори в полімерному матеріалі. У якості спінюючих газів застосовуються діоксид вуглецю, азот або звичайне повітря, а також екологічно безпечні газові суміші. Рідкі спінюючі компоненти зазвичай являють собою розчинники з низькою точкою кипіння. При високому тиску в розплаві полімеру рідина рівномірно змішується з ним, і з падінням тиску при вприскуванні розчинник переходить у газоподібний стан, тим самим формуючи пори. Однак ряд рідинних спінювачів завдає певної шкоди екології, тому в країнах, які ратифікували Монреальський протокол, виробники змушені переходити з рідинних спінювачів на екологічно безпечні газоподібні або на метиленхлорид.

До основних недоліків фізичного методу спінювання можна віднести те, що:

- рідини і гази вимагають спеціального обладнання для їх зберігання і подачі. При цьому газові спінюючі агенти необхідно перевести в рідкий стан перед подачею в циліндр пластикації. Для всього цього потрібно дороге спеціалізоване обладнання;

- вузол вприскування термопластавтомата також піддається переробці з метою впровадження інжекторів. Таким чином, переналагодження обладнання для лиття з фізичним спінюванням вимагає додаткових інвестицій і в основне обладнання.

Мікростільникове спінювання. Традиційні технології спінювання не могли забезпечити рівномірності формування бульбашок і їх розподілу, а також точного контролю результуючої щільності формованого матеріалу. Крім того, для утворення газових бульбашок використовувалися не завжди екологічно дружні реактивні агенти, що теж обмежувало дієздатність відомих технологій, не кажучи вже про те, що для

виробництва виробів зі спінених полімерів необхідно було спеціальне обладнання, яке не підходило для переробки полімерів з природною щільністю. Технологія мікростільникового спінування (Microcellular Foam Technology) MuCell дозволила зробити великий ривок у переробці більшості полімерних матеріалів.

Особливість технології полягає в тому, що самий звичайний атмосферний газ (азот або діоксид вуглецю) переводиться в суперкритичний рідкий стан (SCF – supercritical fluid), щоб забезпечити високу точність дозування при вприскуванні через інжектори в циліндр шнека під час його протиходу, і рівномірно змішується з полімерною масою при безперервно контрольованих величинах тиску вприскування рідкого газу (SCF), тиску розплаву в зоні вприскування SCF, температури розплаву. Відразу слід зазначити, що шнек має особливу, відмінну від традиційних, геометрію, що також впливає на загальну вартість впровадження технології MuCell. Інертний газ виконує роль тимчасового пластифікуючого агента (маючи в'язкість як у газу і щільність як у рідині). Перебуваючи в SCF-стані, газ дозволяє знизити в'язкість розплаву приблизно на 30 % (у граничних випадках – до 60 %). Це, зокрема, дозволяє поліпшити процес заповнення тонкостінних гнізд і гнізд для формування гнучких елементів виробу.

Після заповнення гнізд прес-форми розплавом і подальшого охолодження починають формуватися бульбашки газу. Вони в міру розростання створюють необхідний внутрішній тиск у прес-формі, яка необхідна для повного заповнення прес-форми розплавом.

Даний ефект дозволяє зменшити, а іноді і зовсім пропустити тривалість фази витримування під тиском, оскільки зростання тиску у всіх «центрах зростання стільників» буде однаковим, навіть у віддалених від ливника частинах гнізда прес-форми. За рахунок цього також вдається зменшити піковий внутрішній тиск у прес-формі на величину до 80 % того самого параметра при традиційному литті. Крім того, прискорюється процес відведення тепла від полімеру до стінок, що дозволяє знизити час циклу охолодження. У результаті формуються пори однакового розміру,

рівномірно розподілені по всьому об'єму виливка. Розмір мікростільників може становити від 5 до 50 мкм.

Багато переваг технології MuCell впливають з переваг лиття під тиском спінених матеріалів. Зупинимося на них докладніше:

- зменшується в'язкість розплаву на величину до 60 %;
- збільшується відношення довжини шляху розплаву до товщини стінки виробу (товщини перетину формоутворювальної порожнини гнізда прес-форми);
- істотно знижуються температури пластифікації через знижену в'язкість;
- тиск у гідравліці і тиск вприскування зменшується на величину до 50 %;
- зменшується час повного циклу: менше час циклів витримування під тиском і охолодження;
- знижується маса виливка;
- знижується витрата матеріалів;
- зменшується необхідне зусилля змикання на величину від 50 до 80 %;
- виключається викривлення, формування усадкових раковин і зон внутрішнього напруження.

Найбільш важливою перевагою технології MuCell слід вважати зниження часу повного циклу лиття. При хорошому розкладі, коли досягнуто мінімальний час циклів витримування і охолодження, загальний час литтєвого циклу можна зменшити на третину. Говорить на користь технології MuCell і такий істотний чинник, як економія матеріалу. Відомі випадки отримання деталей з необхідними фізико-механічними властивостями при економії сировини до 40 %.

Зменшення висоти внутрішнього тиску в прес-формі дозволяє або використовувати термопластавтомати з меншим зусиллям змикання, ніж при традиційній технології лиття, або при тому самому зусиллі змикання використовувати прес-форму з великою кількістю гнізд. У першому випадку зменшуються енергетичні витрати, у другому – збільшується загальна продуктивність. Крім того, застосування ТПА з меншим зусиллям змикання дозволить заощадити на інструменті.

Як показує практика, зменшується час передсерійного налагодження обладнання – швидше вдається отримувати стабільні за якісними показниками партії виливків, навіть якщо йдеться про тонкостінне лиття (товщина стінки тут може становити 0,5 мм).

Показовим є і той факт, що до появи цієї технології лиття результат залежав від компромісу між зниженням часу циклу і отриманням ідеальних плоских поверхонь без викривлення, усадочних раковин і концентрацій внутрішніх напружень. Тепер, з використанням нової технології, можна досягти і того й іншого для багатьох типів виробів, наприклад робити різні корпусні деталі, фітинги та інші деталі з ідеально рівними посадковими поверхнями.

До переваг слід віднести гарні фізико-хімічні властивості зразків, отриманих за технологією мікростільникового спінювання. Наприклад, висока межа міцності при стисненні і ударостійкість. Крім того, на сьогодні усі матеріали вважаються придатними для переробки за технологією MuCell. Та й самі виробники полімерних матеріалів постійно вдосконалюють рецептури, намагаючись запропонувати кращі, ніж у конкурентів, матеріали. Тут можна відзначити такі компанії, як Ticona і Rhodia Polyamide. Пропонуються і спеціальні гарячеканальні системи для оптимізації литтєвого процесу за технологією MuCell (зокрема, серія гарячеканальних продуктів Fusion компанії Mold-Masters).

Природно, що наявність мікроскопічних лунок у місцях прориву газових бульбашок на поверхні може викликати нарікання щодо шорсткості поверхні одержуваних виливків. Тому довгий час частина деталей, що виготовляються за технологією мікростільникового спінювання, не була призначена для застосування в зовнішніх елементах дизайну. Технологія MuCell ідеально підходить для виробництва виробів електротехнічного призначення (рознімачі для напівпровідникової техніки, дроти, кріплення), для автомобільної промисловості (патрубки, кожухи, корпуси), медицини, упаковки (тонкостінні контейнери) і т. п. У ряді виробів шорстка поверхня буде прийнятнішою, запобігаючи прослизання, наприклад у виробництві рукояток інструменту. У цьому випадку при

виготовленні формують прес-форм можна заощадити на операціях піскоструминної або електрохімічної обробок.

Тим не менш, існує ще одна технологія, яка дозволяє отримувати ідеальну блискучу поверхню і при використанні процесу MuCell. Institut fuer Werkstofftechnik (Інститут технології матеріалів, Кассель, Німеччина) розробив *технологію газового протитиску* GGD. Вона полягає в тому, що перед уприскуванням в прес-форму з отворів, розташованих з протилежного від ливників боку, подається інертний газ під точно підтримуваним тиском, створюючи тим самим газову подушку в порожнині прес-форми. Розплав вприскується проти тиску інертного газу. Це дозволяє підтримувати постійний тиск газу по фронту руху розплаву, за рахунок чого запобігають утворення поверхневих газових кишень між відливками і стінками прес-форми.

Компанія Rhodia Polyamide нещодавно запропонувала нове покоління блендів Nylon6 Technyl Xcell, посилені скловолокном, з мінеральним наповнювачем. Цей склад відрізняється поліпшеними характеристиками протікання розплаву, а також забезпечує блискучу поверхню готової деталі.

Слід зазначити, що технологія MuCell не є конкуруючою для традиційного лиття, багатокомпонентного сендвіч-лиття (суцільна оболонка, спінена серцевина), лиття спінених матеріалів при низькому тиску, а також лиття з вприскуванням газу. Вона може чудово доповнити відомі технології, а також сприяти їх подальшому розвитку. Зокрема вже є рішення, коли деталь має гладку поверхню зі звичайного матеріалу і серцевину, отриману MuCell-процесом.

Устаткування. В основі обладнання, підготовленого для реалізації процесу MuCell, лежить серійний термопластавтомат з деякими зміненими агрегатами і додаткове обладнання (рис. 1.1). Принципово в термопластавтоматі для лиття за технологією MuCell відрізняється виконання вузла вприскування. У ньому використовується шнек особливої геометрії, що забезпечує гомогенізацію суміші розплаву і SCF, а також можливу переробку традиційних щільних матеріалів. Циліндр шнека має спеціальні порти для подачі SCF, а також додаткові датчики тиску розплаву в циліндрі. В усьому іншому ТПА не

відрізнятиметься від серійної моделі, за винятком внесення невеликих коректив у налаштування гідравліки і програмної частини числового контролера. Технологія SCF може бути використана на ТПА з будь-якими типами приводів: гідравлічним, колінно-важільним, електричним. У якості додаткового обладнання потрібен модуль підготовки газу до SCF-стану і дозованої подачі його в циліндр шнека. До недавнього часу модуль генерування SCF-рідини і її дозуючої подачі в вузол вприскування дуже часто міг істотно перевищувати вартість самого ТПА. Крім того, користувач технології, укладаючи ліцензійну угоду на право використання технології MuCell, повинен був ще заплатити і за ліцензією. Тому ціна питання для багатьох довгий час залишалася неприйнятною.



Рис. 1.1. Устаткування для реалізації процесу MuCell

Проте кілька років тому компанія Trexel Inc об'єднала процес ліцензування і постачання обладнання в єдиний комплекс. Вартість ліцензії включена у вартість устаткування – будь-то повний комплект литтєвого обладнання або тільки модуль для дозування рідини в надкритичному стані. Більш того, за твердженням Trexel Inc, недавно були знижені ціни на саме додаткове обладнання. Так, станції для дозування SCF малої і середньої продуктивності тепер коштують менше 100 тис. євро.

На сьогоднішній день комплексне рішення MuCell на базі власних ТПА готові запропонувати багато відомих і маловідомих виробників з Європи, Північної Америки і Південно-Східної Азії.

До лідерів впровадження та подальшого вдосконалення технології MuCell варто віднести компанію Trexel Inc. (США) і виробників ТПА: Engel (Австрія), Arburg, Battenfeld, Demag (ErgoCell), Krauss-Maffei, Ferromatik-Milacron (Німеччина) і т. д.

Альтернатива. Нещодавно інжинірингова група Sulzer Chemtech в партнерстві з DuPont, Ticona, Institut Kunststoffverarbeitung (IKV) вийшла на ринок з пропозицією технології мікростільникового спінювання OptiFoam® при використанні рідини в суперкритичному стані (азоту) як безліцензійної альтернативи технології MuCell. На відміну від технології MuCell, вприскування SCF-азоту здійснюється не в циліндрі пластикації, а в спеціальному адаптері, встановленому між соплом і циліндром. В адаптері укладена спеціальна кільцева головка, утворена торпедою і гільзою, і статичний змішувач, у якому рідкий азот у суперкритичному стані перемішується з розплавом. Впровадження азоту здійснюється через гільзу і торпеду (вони виготовлені з пористого металу). Велика сумарна площа поверхні впровадження азоту забезпечує ефективне змішування газу в суперкритичному рідкому стані і розплав.

Перевага полягає у використанні вузла вприскування стандартного виконання. Модифікування торкнеться тільки сопла і вимагатиме зміщення каретки циліндра пластикації на відстань, необхідну для установа адаптера. Буде потрібно також додаткове обладнання для зберігання, доведення азоту до надкритичного рідкого стану і його дозування в ТПА.

Певна економія коштів на ліцензування та обладнання може зробити зульцерівську технологію більш популярною порівняно з MuCell.

1.2. Газодинамічне ущільнення формувальних матеріалів

Розширення застосування сухого піску без зв'язуючого в якості формувального матеріалу в ливарному виробництві пов'язано з розвитком технології лиття у вакуумовані форми, при якій зв'язування сухого піску в ливарній формі виконують не за допомогою сполучних матеріалів, а фізичними засобами – пресуючи пісок перепадом газового тиску.

Цей перепад, що перетворює сипкий пісок у каменеподібний стан навколо порожнини піщаної форми, що заливається металом, створюють вакуумуванням пористого піщаного середовища в товщі форми. А зовні на герметично закупорений пісок (стінками опоки та синтетичною плівкою) діє атмосферний тиск повітря (*вакуумно-плівкове формування* (ВПФ)) або тиск газів від газифікації пінопластової моделі в поєднанні з атмосферним тиском (*лиття за газифікованими моделями* (ЛГМ), зокрема у вакуумовані форми).

Відсутність зв'язуючих у піску і відсмоктування засобами вакуумування з ливарної форми газів кардинально покращує атмосферу ливарного цеху та умови праці, а переведення ливарних цехів на такі технології створює комфортні умови для діяльності людини без традиційного погіршення ливарним виробництвом якості навколишнього середовища.

Пісок багаторазово бере участь в обороті з втратами за цикл до 5 %. Це, як правило, здійснюють із застосуванням пневмотранспорту, лінію з його очищення і охолодження зазвичай монтують поза приміщенням цеху біля зовнішньої його стіни (сухий пісок взимку не змерзається), економлячи цим виробничі площі.

Між тим практика виготовлення вакуумних форм при комплектації формувальних ділянок вітчизняним недорогим обладнанням виявляє деякі недоробки, що стосуються виробництва виливків з тонкостінними каналами складної конфігурації і дрібносерійного виготовлення форм, різних за об'ємом або масою. Зазвичай такі ділянки комплектуються одним вібростолом з рекомендованими в технічній літературі параметрами дії вібрації на «усереднену» виготовлену форму для отримання типових виливків-представників на момент проектування ділянки. Але швидко змінювана кон'юнктура коригує програму цеху і вібростол, який не розрахований на зміну режимів вібрації для переміжних різних за масою форм і складності виливків, з високою ймовірністю стає «вузьким місцем», що перешкоджає стабільному отриманню високоякісних виливків.

Процес формування пінопластових моделей у контейнерних формах починається з операції засипання і ущільнення піску в

контейнерні опоки. У відомих способах засипання піску навколо модельних блоків потік піску, потрапляючи на модельний блок, може стирати чи деформувати його, що погіршить якість одержуваних виливків. Особливо це явище проявляється при засипанні хрупких моделей, а також моделей, покритих порошковим протипригарним покриттям. Крім того, засипання піску в багатьох випадках спричиняє запилювання та порушення санітарних норм. Для запобігання цьому модельний блок, встановлений на шарі піску в контейнері, захищають рухливим екраном, встановленим на шляху потоку піску. Екран, виконаний у вигляді рамки, поміщають всередину контейнера, покриваючи модельний блок, і переміщують його вгору по мірі засипання піску, а пісок засипають по периметру екрана між його стінками і стінками контейнера. Так всередину рамки екрана з модельним блоком можуть засипати облицювальну формувальну суміш, а переміщення вгору рамки екрана можуть виконувати після закінчення засипання контейнера піском.

Здійснюють розроблений спосіб так (рис. 1.2). У контейнер 1 (опоку), наприклад на піщану постіль, поміщають модельний блок 3, який покривають екраном 4. Пісок подають по рукаву 5 через розподільний пристрій 6 (шибер) з бункера 7. У міру рівномірного засипання піску по периметру екрана, останній повільно піднімають, а пісок під кутом природного ухилу $33\div 38^\circ$ засипається до модельного блока.

За наявності на моделях порошкової або в'язкої фарби пісок притискається або прилипає до неї. При формуванні хрупких моделей всередину рамки екрана, що має стінки, близькі до вертикальних, можуть поміщати облицювальну формувальну суміш насипну, наливну і т. п., а переміщення вгору рамки екрана можна виконувати після остаточної засипки контейнера піском. У якості наповнюючого піску можна використовувати оборотну суміш, висипану з контейнера після заливання виливків. При застосуванні спеціально охолодженої до низьких температур облицювальної суміші можливе виготовлення екрана з теплоізолюючого матеріалу. Така конструкція екрана дозволить поміщати в нього охолоджену суміш для крижаних моделей, які після засипання контейнера і видалення екрана при вакуумуванні розплавляють і отримують порожнину під заливання металом.

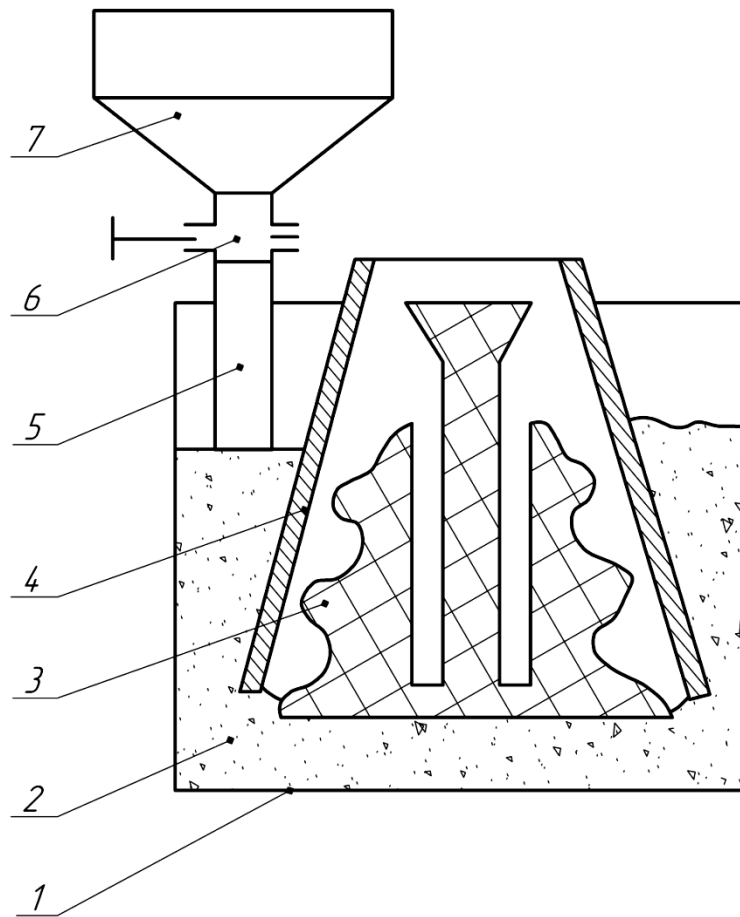


Рис. 1.2. Засипання піску навколо модельних блоків:
 1 – контейнер; 2 – пісок; 3 – модельний блок; 4 – екран;
 5 – гнучкий рукав; 6 – розподільний пристрій; 7 – бункер

Якщо екран 4 вилучають з контейнера рухом вгору по мірі засипання, то екран з вертикальними стінками найлегше отримати з засипаного контейнера при вібрації піску, коли сили тертя піску об екран знижуються. В обох випадках швидкість переміщення екрана повинна бути менше швидкості витання дрібних частинок піску. При цьому швидкість руху піску не повинна перевищувати 0,039 м/с, тоді дрібні фракції кварцового піску розміром 0,022 мм і вище не зможуть утворити запилювання.

Позитивний технічний результат цього способу заснований на засипанні піску по периметру екрана і подальшим перебігом піску під кутом природного ухилу до контакту піщинок з поверхнею моделі переважно в один дотик, що підвищить якість виливків при формуванні хрупких тонкостінних, зокрема крижаних, моделей. Обмеження швидкості руху екрана буде

запобігати запилюванню дрібних частинок, тому опускання шару піску висотою 1 м за 26 с і повільніше при підйманні екрана не здатне підняти в повітря дрібні частинки, на відміну від засипання піску у форму прямо з гнучкого рукава з бункера з піском.

Передумовами створення нового газодинамічного способу вібропресування слугували результати гравіметрії форми з незв'язаного піску при її вакуумуванні. Вони показали, що віброущільнений пісок при продуванні повітрям поступово тече у бік вакуум-фільтра, починаючи від дрібних фракцій, які йдуть з каркаса великих піщинок аж до його ослаблення і розсипання. І так у пневмопоточці переміщується вся маса піску, поки піщинки не упруться в перешкоду. При підтримці перепаду тиску потік повітря (а також і рідини при просоченні піску) знаходить шляхи найменшого опору, поки вони не закупоряться дрібними частинками, що переносяться.

Серед відомих варіантів застосування вібрації для нового способу ущільнення піску використовували деякі властивості способу, у якому формувальну оснастку, що зазнає вібрації, встановлюють на амортизатори без застосування вібростолів. Віброуючі частини діючих вібростолів по масі часто можна порівняти з масою ущільненого піску, що веде до витрати енергії на їх рух і є їх недоліком. А при вібрації контейнерної опоки з піском і одноразовою моделлю, щоб уникнути пошкодження моделей, не застосовують ущільнення піску з боку верхньої поверхні форми, що зменшує щільність верхніх його шарів порівняно з ущільненим шаром піску нижніх. Це веде до місцевого осипання піску в стояках і створює механічний пригар на поверхнях виливків, що контактують зі слабо ущільненим піском. До того ж вакуумування форм без зв'язуючого полегшує проникнення металу в нещільні місця піску поблизу виливка.

Ця мотивація призвела до розроблення способу ущільнення формувальних матеріалів, що виключає застосування рухливих вібростолів з вібраторами, що спрощує обладнання і дозволяє використовувати традиційні для ливарних цехів джерела газового тиску. А багатофакторний вплив на формувальний матеріал і можливість регулювання газових тисків, що подаються, різної

величини, частоти циклювання і зручність автоматизації процесу дозволить підвищити якість ущільнення піщаних форм.

Схема установки для реалізації способу вакуумного вібропресування показана на рис. 1.3. Піщана форма складається з ємності у вигляді металевий контейнера 1, заповненого піском 2 з разовою (крижаною, пінопластовою) моделлю 3. На верхній поверхні піску форми, притиснута затискачами 4 до стінок біля торця контейнера, може укладатися синтетична плівка 5. Пісок всередині контейнера вакуумують через вентсистему – пористий трубопровід 6. Контейнер стоїть дном на амортизаторі 7, наприклад, у вигляді наповненого повітрям замкненого рукава (оболонки) по периметру дна контейнера, у чомусь подібного до камери автомобільного колеса з гуми товщиною 5÷15 мм.

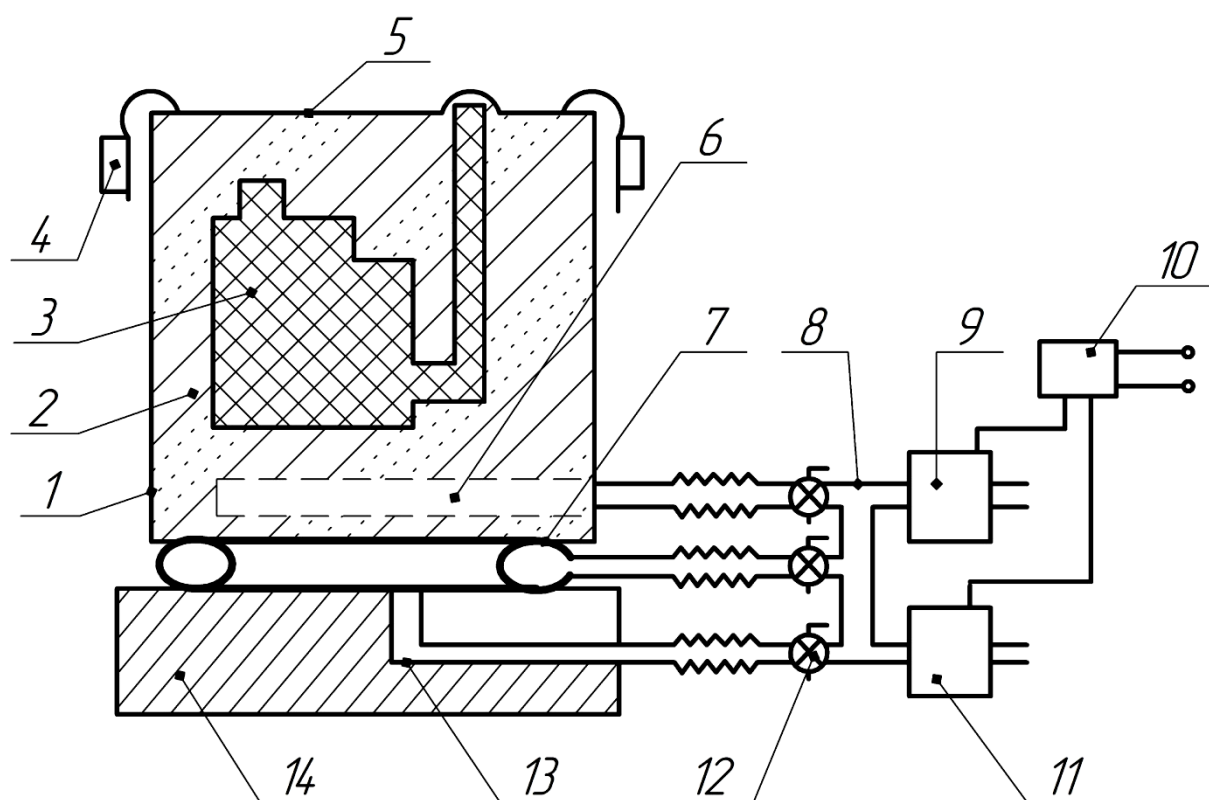


Рис. 1.3. Схема способу вакуумного вібропресування:
1 – металевий контейнер; 2 – пісок; 3 – разова модель;
4 – затискачі; 5 – синтетична плівка; 6 – вентсистеми;
7 – амортизатор; 8 – розподільник; 9, 11 – імпульсні клапани;
10 – реле; 12 – кран; 13 – трубопровід; 14 – підкладка

Порожнина цього рукава і вентсистеми 6 підключені за допомогою гнучких трубопроводів до трубчастого розподільника 8, до нього ж підключені імпульсні клапани 9 і 11, кероване реле 10, а також трубопровід 13, що подає газ у герметичну порожнину, створену підкладкою 14, поверхнею днища контейнера і гнучкими стінками амортизатора 7. На трубопроводі 13, як і на інших, що відходять вліво від розподільника 8, встановлено крани 12 або редуктори газового тиску.

Вібрацію передають формувальному матеріалу шляхом зміни тиску газу в пористому піщаному середовищі. Для цього можуть слугувати імпульсні клапани Messair VNP216 з прохідним діаметром 2". Для великих форм рекомендуються клапани з діаметром 2,5" і 3", VNP220 і VNP224. Клапан 9 підключають до вакуумного насоса типу ВВН, який дає тиск 20 кПа (-0,8 кг/см² за вакуумметром) і вище. Клапан 11 підключають до джерела стисненого повітря, тиск якого (у разі відсутності плівки 5) підтримують не вище тиску повітря, здатного створити потік газу через відкриту піщану поверхню форми зі швидкістю витання дрібних частинок піску, або встановлюють зверху на контейнер дрібнопористу сітку, щоб уникнути пилоутворення в повітрі робочої зони. Операцію ущільнення здійснюють по черговим одночасним відкриванням-закриванням клапанів 9 і 11 за допомогою реле 10 і таким чином подають знакозмінний тиск у трубчастий розподільник 8.

Циклічна знакозмінна зміна тиску газу в піщаному середовищі форми викликає вібрацію і складається з таких явищ. На поверхню піщинок діє змінне поле тиску, яке викликає відповідні сили стиснення – розширення з боку пружного матеріалу зерен піску. Такі ж сили діють і на модель всередині піску, і вона, особливо пінополістиролова, може стискатися – розширюватися на мікрорівні. Коливання тиску позначається на поверхневих явищах на тілі піщинок, що змінюють сили змочування вологи (конденсація з газу), коефіцієнт внутрішнього тертя та ін. У паровому просторі піску відбувається рух молекул газу, потоки якого в каркасі великих піщинок здатні рухати дрібні частинки, як початкова стадія їх пневмотранспортування. Надмірний тиск (понад атмосферний) обмежують так, щоб виключити потік газу через відкриту піщану поверхню форми зі

швидкістю витання дрібних піщаних частинок, який може підняти їх у повітря. На пісок діє сила гравітації, а також за наявності герметизуючої плівки на зовнішній поверхні піску в разі його вакуумування буде діяти пресуючий пісок перепад тиску, що дорівнює різниці атмосферного і зниженого внутрішньоформенного тиску газу; при частковій розгерметизації піску пресуючий перепад буде діяти частково з урахуванням герметизуючого впливу шару піску. За наявності механічних коливань об'єму піску діє динамічне ущільнення або віброущільнення, у якому беруть участь інертні сили, знижуючи внутрішнє тертя піску. При вакуумуванні контейнера під днищем він притискається до амортизатора і рухається як закріплена опока, що покращує заповнюваність підвнутрішньої моделі (на відміну від незакріпленої опоки). При збільшенні тиску під днищем контейнера форма може відійти за інерцією від амортизаторів вгору (підскочити) і тимчасово розгерметизувати порожнину під днищем, що використовується як метод стравлювання газу для обмеження зростання його тиску.

Всі зазначені явища сприяють тією чи іншою мірою ефективному ущільненню піску у формі, а також затікання його в підвнутрішню модель, що підвищує якість ливарних форм. Спосіб назвали **вакуумним вібропресуванням** (ВВП) з урахуванням основних ущільнюючих дій на формувальний матеріал. Спрощення обладнання для формування при традиційному наявному вакуумному насосі на дільницях виготовлення вакуумуючих форм з сухого піску полягає в тому, що ВВП можна реалізувати за допомогою простого пристрою на базі двох клапанів. Їх підключають до реле електрокерування гнучкими рукавами від зазначеного насоса і джерела стисненого повітря до ливарної форми, багаторазово змінюють тиск у піску контейнерної форми і під її днищем, що стоїть на амортизаторі. В одному з варіантів клапан *11* був сполучений з атмосферою цеху і подавав у відкритому стані атмосферний тиск. Циклом вважали збільшення тиску газу в піщаному середовищі від мінімально зазначеної величини до максимальної і зниження його знову до мінімальної величини, з якої розпочато цикл.

При установленні ємності для формування у вигляді контейнера *1* на амортизатор *7* під днищем контейнера навколо

амортизатора, поверхонь днища контейнера і герметизуючої підкладки 14 у вигляді металевої або бетонної плити створюється герметична порожнина з гнучкими стінками у вигляді амортизатора. У цій порожнині виконується багаторазова зміна тиску газу шляхом сполучення її по трубопроводу 13 з трубчастим розподільником 8. Амортизатори можуть бути з будь-якого пружного матеріалу, проте в описаному випадку вони повинні мати суцільну поверхню або покриватися герметизуючої гнучкою шторкою чи пластиною для створення зазначеної порожнини під днищем контейнера.

У розглянутому прикладі наведено амортизатор у вигляді газонаповненого рукава, яким створювали гнучкі стінки герметичної порожнини. Усередині газонаповненого рукава 7 виконували зміну тиску газу та/або одночасно синхронізували зміну тиску газу всередині газонаповненого рукава, герметичній порожнині з гнучкими стінками і/або в піщаному середовищі матеріалу форми. У кожному з трьох трубопроводів, що відходять від трубчастого розподільника 8 вліво на рис. 1.3 режим газового потоку може регулюватися кранами 12 або іншими регуляторами тиску чи витрат газу.

У ливарних цехах іноді застосовують контейнери зі штуцерами підключення вентиляційної системи 6, розташованими в днищі контейнера, а не на вертикальній боковій стінці, як на рис. 1.3. Для таких контейнерів зміна тиску газу навколо піщинок формувального матеріалу синхронізується з тиском у герметичній порожнині шляхом сполучення вентиляційної системи з цією порожниною через отвір (штуцер) у днищі контейнера без показаного на рис. 1.3 сполучення трубопровода вентсистеми з трубчастим розподільником 8 (тобто використовують лише 2 трубопроводи від розподільника 8). Відключенням крана на верхньому трубопроводі віброуцільнення піску в контейнері приводиться до традиційно застосовуваного в ливарних цехах механічного електроприводного процесу вібрації без використання пресуючого впливу вакууму. Однак остання складова вельми важлива в процесі ущільнення, для її реалізації на піщану поверхню форми накладають і закріплюють затискачами 4 по периметру ємності синтетичну плівку 5. Якщо ущільнення ведуть в такому режимі, що плівка не

надувається зверху міхуром і не рветься від надлишкового тиску газу, то застосовують суцільне полотно плівки.

Якщо для інтенсифікації процесу застосовують підвищений тиск і плівка в початковий період операції ущільнення може надуватися, то застосовують підбурювання надлишку газів шляхом нанесення двох полотен з отворами і/або надрізами на них. Зазвичай нижнє полотно розміщують у натягнутому вигляді, а верхнє – вільно, надрізи на плівках зміщують так, що з форми надлишок повітря може виходити, а при вакуумуванні полотна притискаються до піску і повітря не пропускають. В останньому випадку діє пресуючий пісок перепад тиску, що дорівнює різниці атмосферного і зниженого внутрішньоформенного тиску газу. Для дрібносерійного виробництва виливків у контейнерних формах різної величини зручно частоту та інші характеристики багаторазової зміни тиску газу в піщаному середовищі вибирати за візуальним контролем руху зазначеної синтетичної плівки. Домагаються, щоб вона була нерухомою в контакті з піщаною поверхнею форми або мала загасальні коливання, що переходять до кінця операції ущільнення формувального матеріалу до нерухомого стану плівки, що лежить на піску. Це вказує на домінування пресуючих явищ у верхній частині форми. Газові потоки до кінця операції ущільнення піску і зниження його газопроникності настільки короткочасно досягають поверхні плівки і звертаються назад, що не можуть відірвати плівку від піску. Одночасно нижні шари піску, де зазвичай переважає не пресуюча, а струшувальна складова ущільнення, так ущільнилися і гальмують газові потоки, різко знизивши свою газопроникність, що енергія пульсації газового тиску в пристрої типу сполучених посудин перерозподіляється на нижні порожнини, інтенсифікуючи процес струшування.

Для різних піщаних форм, у технології яких газ застосовують як реагент або теплоносій, спосіб дозволяє в заданий період ущільнення застосовувати охолоджений або нагрітий газ, або газ, що вступає в хімічну реакцію зі зв'язуючим формувального піску. Тут доречні такі приклади.

Для отримання заморожених форм застосовують охолоджений азот, навіть обприскуючи рідким азотом формувальний матеріал.

Для нагріву крижаної моделі перед плавленням у піщаній формі можна подавати газоподібний теплоносії, для CO₂-процесу використовувати газоподібний реагент. Такого роду газу, наприклад, в останній момент часу операції ущільнення можна подати всередину контейнера, підключивши їх джерело трубопроводом до трубчастого розподільника 8, якщо давати їх у суміші з повітрям, або на вхід клапана 11 замість підключення повітря, перед цим слід закрити всі трубопроводи, крім того, що йде до вентиляційної системи 6. Якщо затрата газу не викликає значних витрат, то його можна давати протягом всієї операції вібрації через клапан 11.

У цілому спосіб ВВП ущільнення ливарних форм на базі комплексного впливу на формувальний матеріал має авторегулюючі властивості. Миттєвості різноспрямованого статичного напруження в піску чергуються з газодинамікою рухомих різноспрямованих потоків газу в каркасі тією чи іншою мірою закріплених піщинок, яким задається прискорення знову ж у протилежних напрямках, що чередуються, при механічному переміщенні форми. Де струмені газу проходять по пухкому піску, там, насамперед, його пористість ущільнюють сили вібропресування, і струмені газу або газопилової фракції постійно спрямовуються до найбільш проникних місць, пористість яких тут же і послаблюють, додаючи до комплексу зовнішніх ущільнюючих зусиль елемент газодинаміки (повертаючи піщинки і переміщаючи дрібну фракцію).

Спосіб ВВП виготовлення ливарних форм виключає застосування вібростолів і вібраторів з рухомими частинами, на яких витрачається енергія вібрації і які незручні для регулювання, що спрощує обладнання і дозволяє використовувати традиційні для ливарних цехів джерела газового тиску. Можливі варіанти його поєднання з діючими вібростолами. Багатофакторність впливу на формувальний матеріал і можливість у значних межах регулювання газових тисків, що подаються, у кожному з трьох розглянутих зон, частота перемикання клапанів і зручність автоматизації процесу дозволить підвищити якість ущільнення піщаних форм. Спосіб дуже перспективний для ущільнення піщаних сумішей зі зв'язуючим, для формування по разових пінопластових і

крижаних моделях. Пристрій для його застосування може складатися з переносних регуляторів тиску, які дозволять здійснювати формування моделей в цеху, де нема вібростола, а автоматизовані регулятори придатні для формування на конвеєрах.

Наступний розроблений спосіб ущільнення піску у формі стосується використання механізму пневматичного транспортування для заповнення піском складних каналів моделей при формуванні. Складні канали виливків, що виконуються стрижнями при традиційному формуванні зі зв'язуючим, часом викликали сумнів, чи під силу вони способу ЛГМ. Крім високої плинності піску при вібрації, у вакуумуючих піщаних формах відомо застосування вакууму для видалення (транспортуванням у пневмопоточці) частини сухого піску з форми з метою прискорення охолодження виливка. А також відомо застосування в конструкції пінопластових моделей для вакуумного формування газопроникних вент, які не пропускають пісок, але дозволяють впливати вакуумом на метал, який заливається. Цього разу венті застосували для подачі піску в складнофасонні канали моделі, оскільки виникають труднощі заповнення піском формоутворювальної порожнини моделі з нижнім отвором, так, коли отвір, через який засипають пісок, знаходиться нижче самої порожнини або її стелі.

З поширенням способу ЛГМ на виливки зі складнопрофільними каналами і піднутреннями, наприклад виливки блоків і головок двигунів, автоматичних коробок передач, гідророзподільників, рідинних опалювальних або конвекторних радіаторів і т. п., не завжди легко заповнити стельові частини піднутрення ущільненим піском. Це веде до погіршення якості виливків у цих важкооброблюваних місцях у вигляді металевих напливів, наростів, здутих і механічного пригару. У таких піднутреннях пісок часто може не доходити до стелі – стінки моделі, де потрібно його ущільнення, навіть при використанні вібраторів з високою питомою потужністю (вібуючих аж до «закипання піску») або працюючих тривалий час. Тривала вібрація може призвести до деформації моделі та розшарування піску. До того ж зазвичай металеві деталі проектуються

конструктором під традиційну технологію лиття зі стрижнями без урахування мінімізації піднутрень.

При формуванні в сухому піску (з подальшим вакуумуванням форми) судинноподібних моделей (типу корпусів снарядів) формоутворювальну порожнину моделі засипають піском, для вакуумування якого часто застосовують вставні вакуумдроти. Інакше ускладнене опором піску відкачування газу з віддалених від вентиляційної системи опоки вузьких каналів послаблює вакуум у піщаному болвані газонепроникної моделі і веде до браку виливка. Газ утворюється від газифікації моделі, коли гази, що бурхливо виділяються з моделі, різко знижують вакуум всередині піщаного болвана і розцільнений пісок обсипається або розмивається розплавом металу, що рухається по його поверхні. Однак виливки зі складною порожниною, зокрема патрубкі двигунів, мають настільки тонкі і криволінійні канали, що це не дозволяє застосувати вказані вставні вакуумні дроти й інші методи запобігання браку, бо вони не дають стабільного отримання якісних виливків.

Оскільки вакуум від вентиляційної системи на стінках опоки в заповнену піском формоутворювальну порожнину або канал по звивистому довгому шляху між стінками газонепроникної моделі проникає з ослабленням, то стінки моделі вирішили виконати з газопроникними ділянками шляхом виконання вент. Через них по короткому шляху вакуум проникає в зазначений піщаний об'єм, що і створює в разі ЛГМ достатній перепад тиску газів від газифікації моделі (з одного боку) і розрідження всередині цього піщаного об'єму (з іншого боку).

Тоді вакуумування діє не гірше, ніж в інших місцях форми, що виключає причини появи зазначених видів браку.

Для *лиття по крижаних моделях* (ЛКМ) вирівнювання вакууму за допомогою таких вент (з глибини піщаного каналу на зовнішню поверхню моделі) дасть можливість рівномірного просочення під вакуумом піску продуктами танення моделі. У матеріал моделі часто перед заморожуванням вводять зв'язуюче (рідке скло, декстрин і т. п.), це просочення рівномірно зміцнює пісок по обидві сторони утвореної на місці моделі ливарної порожнини, що запобігає браку з вини недостатньої міцності піщаного болвана.

Приклад реалізації способу показано на рис. 1.4, де схематично в розрізі зображена форма з піском 1. Контур контейнерної опоки умовно показано основною лінією, на стінці опоки є вентиляційна система 2. Розріз форми проходить по одному з каналів одноразової моделі 3, заповненим піском головним чином через отвір 4, модель ливникової системи не відображено для спрощення на рис. 1.4. При цьому інші частини моделі розташовані оптимально за умовами засипання і живлення вилівка. У верхній частині моделі виконана вента 5, до якої під час попереднього віброуцільнення піску і/або засипання його в формоутворювальну порожнину прикладають трубопровід 6, сполучений з вакуумним насосом. Торець трубопроводу 6 закривають газопроникним матеріалом, що не пропускає пісок, та/або забезпечують трубчастим наконечником 7 з м'якої гуми, що дозволяє притиснути трубопровід 6 до вент без щілини для проходження піску. Також є друга вента 8, яку разом з вентою 5 розташовують у ряд уздовж передбачуваного руху фронту розплавленого металу.

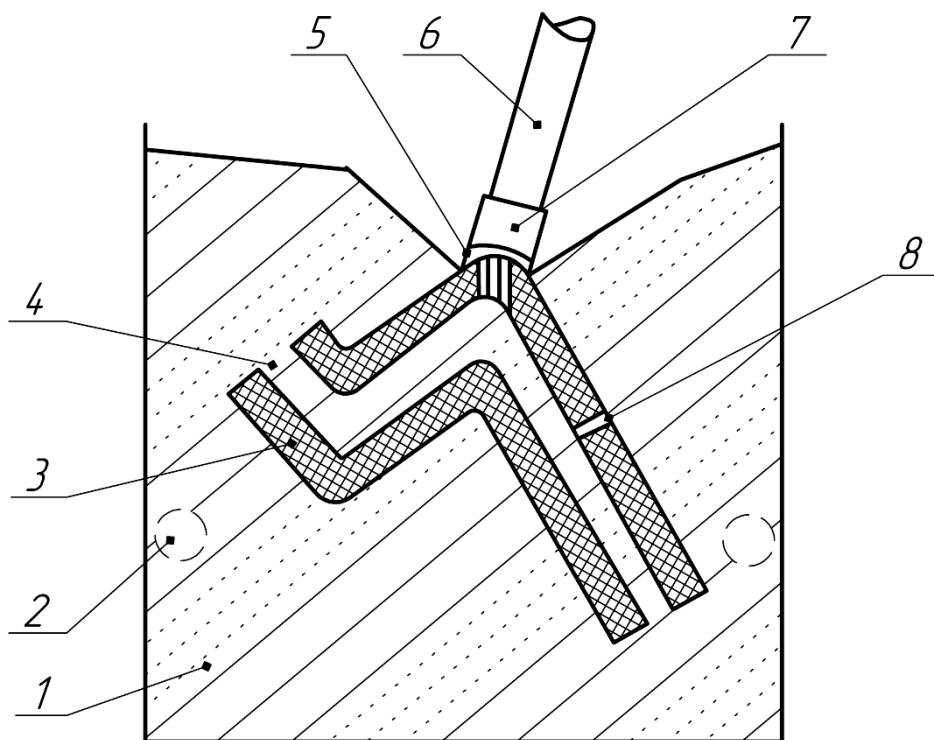


Рис. 1.4. Контейнерна форма з моделлю зі складними каналами:
 1 – форма з піском; 2 – вентиляційна система; 3 – одноразова модель; 4 – отвір в моделі; 5, 8 – венти; 6 – торець трубопроводу;
 7 – трубчастий наконечник

Виготовлення форми за рис. 1.4 включає засипання в опоці піском 1 одноразової моделі 3 з потраплянням піску на вхід отвору 4 її формоутворювальної порожнини, попереднє віброуцільнення піску на вібростолі з частковим заповненням формоутворювальної порожнини і уцільнення піску вакуумуванням форми через вентиляційну систему 2 на стінках опоки. Під час попереднього віброуцільнення піску та/або засипання його в формоутворювальну порожнину з нижнім отвором здійснюють вакуумування стельової зони в найвищому місці цієї порожнини через венту 5, виконану в стінці моделі над цим місцем, шляхом прикладання зверху до цієї венті торця трубопроводу 6, сполученого з вакуумним насосом. При цьому в напрямку до стельової частини формоутворювальної порожнини моделі утворюється повітряний потік, аналогічний транспортуванню сухого піску в пневмопотоці, який сам або разом з дією вібрації на пісок (можливо чергування) утворює щільно заповнений піском канал. Проходження повітря через пісок підпирає венту 5, уцільнює цей пісок, а одночасна дія вібрації прискорює цей процес, знижуючи внутрішнє тертя між піщинками.

Після заповнення формоутворювальної порожнини моделі у вигляді наскрізного або тупікового каналу і відключення вібрації трубопровід 6 видаляють, якщо потрібно; пісок у форму досипають з додатковим віброуцільненням протягом 10÷20 с, накривають форму синтетичною плівкою і встановлюють ливникову воронку. При ЛГМ вакуумування піску форми, включаючи формоутворювальну порожнину, виконують через вентиляційну систему 2 зі стабільним проникненням вакууму в формоутворювальну порожнину через венті 5 і 8.

Венти на товщину стінки моделі виконують відомими способами, у тому числі наскрізним свердлінням стінки моделі з подальшим приклеюванням до зони з отворами діаметром 0,3÷1,0 мм тонкої газопроникаємої тканини, що не пропускає пісок. Виконання венті на опуклій частині моделі дозволяє легко зачистити виліток на абразивному колі, якщо вента дасть збільшення шорсткості його поверхні, а розташування вент по роз'єму частин складової моделі полегшить установлення стандартно виготовлених вент, наприклад при виконанні двох напівкруглих виїмок по стику дасть отвір для круглої венті. А

також можливе заклеювання щілинної вентри по стику смужкою газопроникної тканини.

Виконання при ЛГМ ряду вент у моделі уздовж руху фронту газифікації цієї стінки моделі дає можливість вентилювати заповнену піском порожнину кожної вентри до газифікації металом останньої вентри. До цього моменту пісок у каналі пропустить через себе бурхливо виділювані гази від моделі і перебуватиме в стабільному стані оточений металом, який під час присмоктування вакуумом до піску утворив поверхневу кірку. Такий стан зберігається до кінця заливання і повного затвердіння вилівка, нерухомий метал не може зруйнувати затиснутий їм пісок у каналі, а вакууму від вентиляційної системи форми достатньо для стабільного завершення затвердіння вилівка. Вентри на моделі виконують з того ж матеріалу, що і основне тіло моделі; при розташуванні в ряд уздовж руху фронту газифікації в стінці моделі їх по черзі газифікує метал, який підіймається.

Досягнення стабільного рівномірного вакуумування важкодоступних складнофасонних і тонкостінних піщаних каналів одноразової моделі при виготовленні форми, а також швидке їх заповнення ущільненим піском при використанні трубопроводу б дозволяє забезпечити високу якість виливків зі складними порожнинами, таких як гідророзподільники, деталі двигуно-, насосо- і арматуробудівництва.

При виготовленні форм з сипкого наповнювача, що ущільнюється вібрацією як новими, так і традиційними способами, зокрема для діючих у ливарних цехах процесів ВПФ і ЛГМ, а також і для новітнього процесу ЛКМ важливим критерієм якості форм є максимально можливий ступінь ущільнення піску, який застосовується. Однак традиційний спосіб визначення ущільненості і насипної щільності формувальних сумішей зі зв'язуючим, у якому використовують удари копра, для сипкого сухого піску не підходить. Це мотивувало розроблення нескладного способу визначення моменту досягнення найбільшої щільності піску під час його віброущільнення в різних за масою ливарних формах.

За результатами досліджень на зразках визначено, що для різних кварцових пісків протягом близько 20 с вібрації щільність піску збільшується прямо пропорційно часу, потім стає максимальною і при подальшій вібрації не змінюється. Зазначені

дані увійшли в підручники з фізико-хімічного ливарного виробництва. Однак при різній жорсткості контейнерних опок у ливарних формах з різними моделями і масою піску, а також з урахуванням підвищеної тривалості затікання піску в піднутрення моделей і під трубчасті вакуумуючі фільтри всередині опок кожна форма для отримання максимальної щільності піску вимагає різної тривалості вібрації. Недостатній час вібрації конкретної форми збільшує рівень браку і витрати на його виправлення і очищення виливків, надлишковий час збільшує енерговитрати, може призвести до деформування моделі і розшарування піску, також викликає погіршення якості поверхні виливка.

Оскільки при вібрації зменшується ущільнення піску на величину, що становить до 20 % обсягу його вільної засипки, то нескладно при віброущільненні у формі визначити рівнеміром наявність процесу зниження верхнього рівня піску в опоці, і як тільки припиниться це зниження, відразу припинити вібрацію. Такого роду моніторинг зміни рівня піску в опоці дозволить визначити тривалість ущільнення піску для різних форм. Крім того, вібровплив шляхом зменшення сил внутрішнього тертя перетворює пісок у псевдорідину. Отже, як підтверджено практикою, при вібрації важкі предмети занурюються в пісок – «тонуть», а легкі «спливають». Для моніторингу (відстеження) руху верхнього рівня ущільненого піску використовується пристосування, аналогічне поплавковому денсиметру, також можна застосовувати рівнеміри інших конструкцій.

Спосіб було опробовано з застосуванням пристрою подібного найпростішого датчика вимірювання рівня палива в бензобаці автомобіля. Він складається з пінопластового поплавка (чутливий елемент) на одному кінці важеля, а кінець важеля по інший бік від осі механічно зв'язаний з повзунком реостата. Корпус пристрою кріпили затискачем (магнітним або механічним) до верхньої частини стінки опоки, встановленої на вібростолі, пінопластовий поплавок укладали на поверхню піску, попередньо засипаного в опоку з моделлю, і починали віброущільнення. При зниженні рівня піску поплавок, який лежав на ньому, з важелем переміщався вниз, а повзунок по обмотці реостата – у бік зменшення опору реостата. При припиненні зміни опору реостата, фіксованого приладом, вібрацію форми

припиняли. Нескладно зібрати пристрій автоматичного відключення вібратора через 1÷5 с після зупинки руху важеля, як варіант використання зворотного зв'язку, коли вихідний сигнал системи (припинення зміни електроопору) призводить до зміни вхідного сигналу у вигляді припинення електроживлення вібратора. Таким чином, використання зворотного зв'язку від такого критерію, як припинення зміни рівня піску, дозволяє оптимізувати тривалість процесу ущільнення піску, у тому числі в автоматичному режимі. Моніторинг процесу зниження рівня піску може контролювати оператор при виведенні сигналу від рівнеміра на табло або екран комп'ютера.

Стабільне досягнення віброущільнення піску до максимальної щільності при виготовленні форм дозволяє зменшити рівень браку виливків, одержувати виливки без очищення або з малими витратами на нього, а відсутність зайвої роботи вібраторів прискорить процес формування і зменшить енерговитрати на виробництво виливків.

Приклади виробництва складнофасонних і порожнинних виливків у цехах ЛГМ показані на рис. 1.5 – пінополістиролові моделі і виливки зі складними каналами та крижані моделі з наскрізними і «глухими» порожнинами.



Рис. 1.5. Приклади разових моделей і виливків з каналами складної форми (для з'ясування розмірів на фото показані лінійки та копійка)

1.3. Алмазне і алмазно-іскрове шліфування

На сьогодні одним з найбільш прогресивних способів обробки твердих сплавів є *алмазне шліфування*. Проте знижена шліфованість *безвольфрамкових твердих сплавів* (БТС) виявляється і при обробці їх алмазними кругами, наприклад на бакелітових і металевих зв'язках в умовах звичайного і електролітичного шліфування. Це виражається в більшій напруженості процесу (зусиллях, температурах, питомій роботі шліфування), у підвищеній відносній витраті, а також в низькій продуктивності. Основною причиною низької працездатності алмазних кругів, особливо на найміцніших і зносостійких металевих зв'язках, є засалюваність різальної поверхні і, як наслідок, нестабільність властивостей, а також недостатня поновлюваність рельєфу.

Вивчення і аналіз великої кількості робіт, пов'язаних з дослідженням працездатності алмазних кругів, показали, що вони носять експериментальний характер, їх результати дозволяють оцінити вплив технологічних чинників процесу на його вихідні параметри лише для певних конкретних умов експерименту і справедливі для обмеженого часового інтервалу. Крім того, проведені роботи виконані, як правило, за різними методиками з застосуванням різноманітних показників (критеріїв) працездатності кругів, що ускладнює їх зіставлюваність. Нестійкість умов взаємодії робочої поверхні алмазних кругів з матеріалом не дозволяє також розробити розрахункові методи визначення показників їх працездатності на базі теоретичних моделей.

Проблема підвищення ефективності шліфування твердих сплавів, зокрема БТС, гостро висуває завдання винайдення заходів з забезпечення стабільних умов взаємодії різального рельєфу з матеріалом при збереженні високих показників працездатності кругів (продуктивність, знос, собівартість, якість обробки).

Стабілізація високих показників працездатності алмазних кругів може бути досягнута введенням у зону різання додаткової енергії у вигляді електричних імпульсів, виявленням умов шліфування, що характеризуються стійким (якісним) станом

рельєфу (щільність розподілу зерен, модальна висота, різновисотність) і забезпечують сприятливий (якісний) стан поверхневого шару (залишкові напруження).

Процес шліфування з введенням додаткової енергії і стабілізацією оптимальних характеристик працездатності кругів – *алмазно-іскрове шліфування* (АІШ) – полягає в тому, що в ньому поєднано процес механічного різання алмазними зернами з дією електричного струму в зоні різання; унаслідок ерозійних розрядів, що виникають між оброблюваним матеріалом і робочою поверхнею круга, відбувається видалення частинок, що засалюють круг, активне самозаточування його різальної поверхні, унаслідок чого продуктивність процесу шліфування зберігається тривалий час на високому рівні. При цьому можна вважати, що при АІШ практично виключається контакт взаємодії круга з оброблюваною поверхнею, що сприяє повнішій реалізації унікальних різальних властивостей синтетичних алмазних зерен і прояву вищої потенційної різальної здатності алмазних кругів. Таким чином, застосування АІШ дозволяє вирішити триєдине завдання: інтенсифікація процесу шліфування, вирішення питання оброблюваності будь-яких важкооброблюваних матеріалів і створення передумов автоматизації процесу.

Разом з тим слід зазначити, що процес АІШ не тільки дозволяє значно розширити технологічні можливості алмазного шліфування, що само по собі має велике практичне значення, але і створює передумови для прогнозування показників працездатності алмазних кругів. При звичайному шліфуванні, зокрема алмазними кругами, як вже наголошувалося, не забезпечується стабільна поновлюваність робочої поверхні кругів, а отже, і стійкість стану рельєфу; тому прогнозування продуктивності і зносу кругів, пов'язане з необхідністю підтримки однакових умов впровадження різальної поверхні в матеріал протягом тривалого періоду часу, неможливо надійно реалізувати. Процес алмазно-іскрового шліфування в цьому сенсі створює сприятливу можливість для розроблення теоретичних моделей адекватно тим, що відображують умови взаємодії робочої поверхні кругів з твердими сплавами, і дозволяє реалізувати мікроскопічний підхід при аналізі цієї взаємодії.

Вивчення робіт у галузі досліджень різних аспектів проблеми підвищення ефективності алмазного шліфування і працездатності кругів показало, що вони мають індивідуальний характер відносно об'єктів дослідження, методики проведення, трактування отримуваних результатів. Тому відсутність єдиної методології укрій ускладнює проведення цілеспрямованого наукового пошуку у сферах розроблення і прогнозування умов експлуатації високопродуктивних алмазних кругів. Таким чином, враховуючи можливості і перспективи технології АШ, фізичних методів аналізу, теоретичного моделювання, прикладної математики (зокрема чисельних методів), обчислювальної техніки, що бурхливо розвивається, можна вважати, що рівень досліджень з підвищення ефективності алмазного шліфування важкооброблюваних матеріалів і працездатності кругів, а також реалізація результатів не задовольняють сучасним вимогам і викликають необхідність подальшого розвитку.

Вирішення цієї проблеми з урахуванням перспектив АШ полягає в розкритті закономірностей і особливостей процесу алмазно-іскрового шліфування твердих сплавів, зокрема безвольфрамних, суті фізико-механічної взаємодії на основі мікроскопічного підходу, підсумовування нескінченно малих по шарах матеріалу і різального рельєфу при розробленні математичних моделей продуктивності і зносу з метою підвищення ефективності шліфування, стабілізації високого рівня працездатності кругів і прогнозування її показників для створення технологічних передумов автоматизації обробки інструментів різного призначення в умовах технології без участі людини. Теоретичний аналіз впровадження різального рельєфу круга в оброблюваний матеріал на основі мікроскопічного підходу дозволяє розкрити основні закономірності процесу, виявити механізм знімання матеріалу і зносу алмазних кругів.

Математичні моделі, алгоритмічне і програмне забезпечення розрахунків продуктивності і зносу за допомогою ЕОМ дають можливість виявити велику кількість співвідношень між технологічними чинниками, фізичними параметрами процесу і вихідними показниками працездатності алмазних кругів і створюють передумови прогнозування її показників.

Експериментальні дослідження фізико-механічних умов взаємодії алмазних зерен при мікрорізанні, а також робочої поверхні кругів з твердими сплавами дозволяють оцінити напруженість процесу, оброблюваність різних сплавів, особливості зносу кругів, а також встановити залежності глибини впровадження одиничних зерен від навантаження, параметрів розподілу зерен і коефіцієнтів їх працездатності від товщини зрізу, необхідні для використання в математичних моделях. Експериментальна оцінка працездатності кругів в умовах АШ має самостійне значення, але вона необхідна також для порівняння з розрахунковими показниками з продуктивності процесу і зносу алмазних кругів.

Отримані результати з працездатності кругів, знайдені умови високопродуктивного АШ твердих сплавів можуть мати практичне значення лише при забезпеченні якості обробки. Тому дослідження основних закономірностей і особливостей формування поверхневого шару після АШ твердих сплавів, зокрема безвольфрамових, аналіз взаємозв'язку залишкових напружень зі зносостійкістю шліфованих інструментів є необхідним і важливим аспектом комплексного підходу до вивчення даної проблеми.

Проведені теоретичні і експериментальні дослідження АШ дозволяють розробити умови, що забезпечують досягнення стійкого високого рівня продуктивності порядку $800 \div 1000 \text{ мм}^3/\text{хв}$ при обробці вольфрамомісних твердих сплавів і $600 \div 800 \text{ мм}^3/\text{хв}$ при обробці безвольфрамових, що в $4 \div 5$ разів вище, ніж при звичайному шліфуванні кругами на металевих зв'язках і в $2 \div 2,5$ разу вище, ніж при електrolітичному, при низькій питомій собівартості і гарантованій якості поверхневого шару, що забезпечує найбільшу зносостійкість шліфованих інструментів. Виконання комплексних наукових і практичних розробок з підвищення працездатності алмазних кругів шляхом стабілізації високого рівня її показників дозволяють виявляти і встановлювати найбільш ефективні умови шліфувань і створюють технологічні передумови автоматизації процесу обробки твердосплавного інструменту різного призначення з гарантією надійності забезпечення необхідних вимог щодо

продуктивності, якості і економічності протягом тривалого періоду часу.

Забезпечення високої продуктивності і якості обробки є основною вимогою до процесу шліфування. При цьому під якісною розуміється така обробка, при якій стабільно формується сприятливий стан поверхневого шару, що пов'язано перш за все з необхідністю стійкої підтримки високих різальних властивостей круга. Якщо вимоги до якості обробки доповнюються більш точними параметрами, то з'являється необхідність оцінки зносу круга в часі або відносно кількості зішлифованого матеріалу. Шліфування різних матеріалів в однакових умовах дозволяє також за продуктивністю процесу (різальною здатністю круга) оцінювати їх оброблюваність.

Таким чином, показники процесу (продуктивність, знос і якість), які характеризують працездатність круга, фактично достатньо повно відображують багатогранність шліфування, явища, що виникають при взаємодії різального рельєфу з оброблюваним матеріалом.

Високі потенційні можливості алмазних кругів найбільш повно реалізуються при введенні в зону шліфування додаткової енергії у вигляді електричних імпульсів, сприяючих розвиненості різального рельєфу і стійкості його стану. Забезпечення стабільних умов взаємодії робочої поверхні круга з оброблюваним матеріалом дозволяє розробити теоретичні моделі, що адекватно відображують цю взаємодію на рівні окремих елементів рельєфу, що створює передумови для прогнозування працездатності кругів.

1.4. Електроерозійні методи обробки

Електроерозійні (електророзрядні) методи засновані на використанні явища електричної ерозії – направленою локального руйнування електропровідних матеріалів у результаті теплової дії імпульсних електричних розрядів між електродом-інструментом і електродом-заготівкою.

Принципова схема *електроерозійної обробки* (ЕЕО) наведена на рис. 1.6. Електрод-інструмент 1 і оброблювана заготівка 2 занурені в робочу рідину і сполучені з генератором

електричних імпульсів 3. Всі процеси, що викликають обробку, протікають у *міжелектродному проміжку* (МЄП) Δ . При підведенні до електродів електричного імпульсу найбільша електрична напруженість буде між найбільш близькими мікровиступами: відбувається пробій проміжку, виникають провідність і імпульсний розряд, що супроводжується дуже високою температурою (до 10^4 °С), що викликає плавлення і випаровування металів.

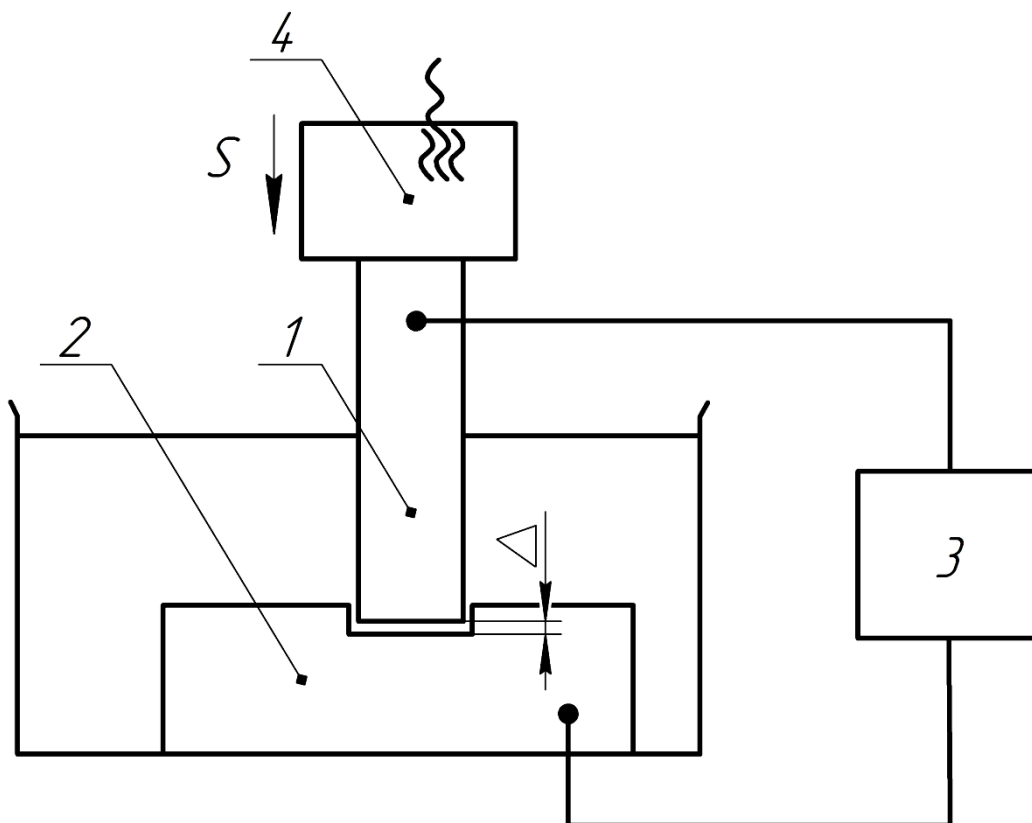


Рис. 1.6. Принципова схема електроерозійної (електроіскрової) обробки

Кількість теплоти, що виділяється на електродах, неоднакова і залежить від їх полярності і енергії імпульсів. Заготівку 2 сполучають з тим полюсом, на якому виділяється велика частка теплоти. У процесі обробки електрод-інструмент 1 переміщається і за допомогою спеціального регулятора 4 підтримується постійна величина МЄП ($\Delta = 5 \div 10$ мкм). Робочий процес протікає в рідкому діелектричному середовищі (керосин, мастило, дистильована вода).

Робоча рідина при електроерозійній обробці:

- сприяє диспергуванню продуктів ерозії, утворенню гранул кулястої форми, перешкоджає осадженню продуктів ерозії одного електроду на іншій;

- забезпечує стабільне протікання процесу, видаляючи продукти ерозії і очищаючи міжелектродний проміжок;

- охолоджує електроди.

Робоча рідина повинна мати невисоку в'язкість і безпеку в експлуатації, хімічну нейтральність щодо матеріалу інструменту і деталі, нетоксичність і невисоку вартість. Загальне знімання металу відбувається під дією великої кількості електроімпульсів, що виникають з певною частотою.

Величина електричної ерозії визначається хімічним складом матеріалів електрода-інструменту і заготовки, складом робочої рідини, а також енергетичними характеристиками імпульсів.

Процес ерозії електродів містить три основні фази:

1) виділення енергії в каналі розряду і передача її поверхням електродів;

2) руйнування ґрат металу (плавлення, випаровування);

3) евакуація продуктів ерозії з зони розряду.

Оброблюваність матеріалів електроерозійним методом залежить від їх теплофізичних властивостей і умов протікання процесу. Якщо оброблюваність нормалізованої сталі прийняти за одиницю, то для жароміцних сплавів вона дорівнює $1,3 \div 1,4$, а для тугоплавких металів і твердих сплавів лише $0,4 \div 0,5$. Оброблюваність загартованих сталей на $25 \div 30$ % вище, ніж незагартованих, через їх меншу теплопровідність.

Застосовуються декілька кінематичних схем ЕЕО.

1. Прошиття отворів і порожнин з прямою і криволінійною віссю у двох варіантах: а) пряме копіювання, коли електрод-інструмент знаходиться над заготовкою; обробка буває одно- і багатоелектродною; б) зворотне копіювання з розташуванням заготовки над **електродом-інструментом** (ЕІ). Рух подачі тут може здійснюватися заготовкою, при цьому поліпшуються умови евакуації продуктів ерозії і підвищується точність обробки.

2. Електроерозійне шліфування, найбільш ефективно при обробці внутрішніх фасонних поверхонь.

3. Обробка непрофільованим електродом 3 (рис. 1.7) – рухомим тонким дротом ($d = 0,05 \div 0,3$ мм) – зазвичай по двох

координатах. Ця схема дозволяє вирізувати важкоконтурні деталі високої точності при використанні коротких імпульсів з малою енергією. Дріт отримує безперервний рух за допомогою роликового механізму 1-2-6. Оброблювана деталь 4 отримує поперечну і подовжню подачі (або за криволінійною траєкторією).

4. Формоутворення шляхом поєднання взаємного переміщення оброблюваної деталі 1 (рис. 1.8) і профільованого ЕІ 2 (обгинання або обкатка). Така схема використовується при електроерозійному виправленні фасонних алмазних кругів, обробці вузьких канавок (менше 0,5 мм) на сталевих і тврдосплавних роликах.

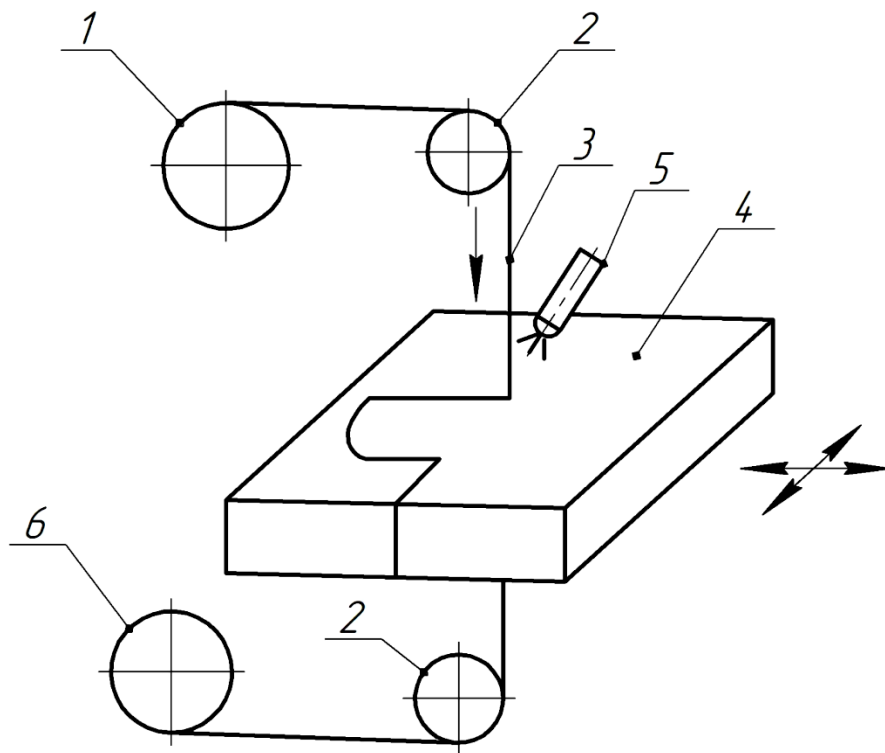


Рис. 1.7. Схема обробки непрофільованим електродом-інструментом (дротом): 1 – котушка з дротом; 2 – напрямні ролики; 3 – дріт; 4 – оброблювана деталь; 5 – подача робочої рідини; 6 – котушка

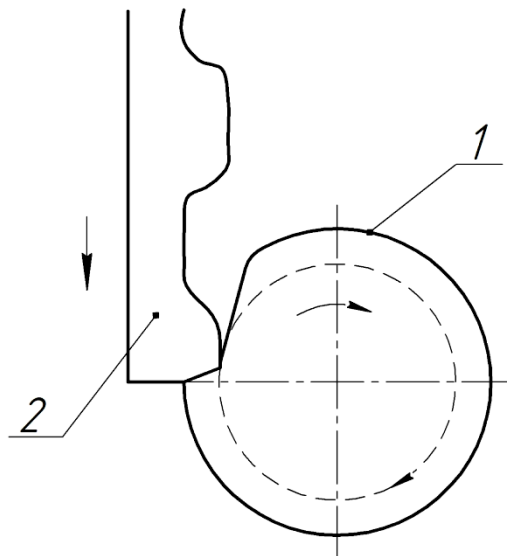


Рис. 1.8. Схема електроерозійного формоутворення методом обкатки

Електроерозійний метод дозволяє обробляти отвори з криволінійними осями, тонкостінні деталі, вузькі канали, сполучні отвори в корпусах гідро- і пневмоапаратури. Перевага цих методів – відсутність задирок.

Всі верстати для фізико-хімічної обробки так само, як і звичайні металорізальні верстати, поділяються на універсальні, спеціалізовані і спеціальні. Види електроерозійних верстатів, що отримали найбільше застосування:

- універсальні прошивальні верстати, що працюють за схемами прямого і зворотного копіювання (мод. 4Г721М, 4Д721АФ3, 4Д722АФ3, 4П724Ф3М);

- універсальні вирізні верстати (мод. 4531Ф3, 4532Ф3, 4535Ф3);

- універсальні верстати для видалення зламаного інструменту і шпильок (мод. 4Б611);

- спеціалізовані багатопозиційні верстати для перфорації лопаток газо-турбінних двигунів, обробки роторів, форсунок тощо;

- спеціалізовані верстати обкатки для обробки кільцевих і гвинтових струмків змінного перетину (МА4730А, МА4727);

- верстати для обробки електроконтакта (МЕ301).

Найбільш широке застосування отримали універсальні прошивальні і вирізні верстати.

1.5. Електрохімічні методи обробки

Всі різновиди методів *електрохімічної обробки* (ЕХО) засновані на використанні процесу електролітичного полірування, розробленого в 1911 р. російським хіміком Е.І. Шпітальським. Електрохімічна обробка використовує процеси електролізу, тобто хімічні перетворення на поверхні електродів в середовищі електроліту. Заготівка є анодом, а інструмент – катодом.

В основі ЕХО лежить процес анодного розчинення металу заготівки. У робочому середовищі – електроліті – молекули речовини розпадаються на електрично заряджені частинки – іони, кожен з яких переносить один або декілька електричних зарядів, і без зовнішнього електричного поля іони в електроліті рухаються хаотично. Якщо заготівку і інструмент з'єднати з джерелом постійного струму (напругою 6÷12 В), то в електроліті виникає направлений рух іонів: позитивні іони (катіони) рухаються до катода, а негативні (аніони) – до анода. Поблизу електродів поступово підвищується концентрація іонів протилежного знака, і на катоді починається відновлення катіонів, а на аноді – окиснення металу, тобто анодне розчинення.

Характер електрохімічних реакцій залежить від складу, концентрації і температури електроліту. Найбільш поширеним електролітом при обробці сталей і жароміцних сплавів є 10÷20-відсотковий водний розчин NaCl. Застосовуються і 5÷15-відсоткові водні розчини азотнокислого натрію (Na_2NO_3) при обробці жароміцних сплавів, алюмінієвих і мідних сплавів. Добрі результати при ЕХО аустенітних сталей дає розчин сірчанокислого натрію, а при обробці вольфраму, молібдену, ніобію і танталу – розчини лугів. Відомі також складніші системи, що містять лимонну кислоту, бром, фтор та інші компоненти.

Для забезпечення стабільності процесу необхідно підтримувати в певних межах величину водневого показника pH . При $pH = 7$ розчин хімічно нейтральний; при $pH < 7$ він має кислотні властивості, при $pH > 7$ – лужні.

На сьогодні застосовується велика кількість різновидів ЕХО. Обробка при малій щільності струму і в нерухомому

електроліті називається **електрополіруванням**. Схема електрополірування проста: оброблювану деталь поміщають в електроліт і сполучають з позитивним полюсом джерела постійного струму. Катодом служить пластина з металу, що не вступає в хімічну реакцію з електролітом. При проходженні струму найінтенсивніше розчиняються вершини мікронерівностей, з'являється блиск і досягається ефект полірування.

Електрополірування використовують перед проведенням гальванічних процесів, для зняття тонких шарів металу при вивченні залишкової напруги, для видалення наклепаного шару після процесів різання та ін. Разом з електрополіруванням застосовується і чисто хімічний процес – **розмірне травлення** («хімічне фрезерування»), суцільне і вибіркоче. При вибіркочому травленні місця, що не підлягають обробці, захищають шаром лаку. Травлення ведеться у водних розчинах лугів і кислот. Глибина травлення не перевищує декількох міліметрів, а продуктивність – невисока (0,4÷1,2 мм/год). Цей процес найбільш ефективний при обробці рельєфних поверхонь на деталях з алюмінієвих сплавів, а також сталей і титанових сплавів з великими площами: вафельних панелей, створок, обшивок гондоли двигуна та ін. Порівняно з процесами різання трудомісткість знижується у 2÷3 рази.

Електрополірування характеризується невисокою інтенсивністю знімання металу через низьку щільність струму на аноді (менше 0,1 А/см²) і поступовим уповільненням процесу унаслідок пасивації анода неелектропровідними частинками гідроксидів металу.

Розрізняють такі різновиди ЕХО:

- анодно-гідралічна обробка ведеться в умовах інтенсивного проточного руху електроліту і малого зазора між електродами ($\Delta < 0,5 \div 1$ мм);

- анодно-механічна обробка, при якій продукти анодного розчинення видаляються за рахунок механічної дії диска, що обертається, або рухомої стрічки. Застосовується в заготовчих цехах для розрізання заготовок з важкооброблюваних металів;

- електроабразивна (електроалмазна) обробка ведеться абразивним або алмазним кругом на металевій зв'язці.

Застосовується в інструментальних цехах для виготовлення фасонного інструменту.

Найбільш широкий розвиток отримав перший різновид – ЕХО в потоковому електроліті. Вона використовується при виконанні таких робіт:

- при нерухомих електродах: а) калібрування; б) контурна обробка; в) видалення задирок; г) скруглення кромки; д) маркіровка;
- поступальному переміщенні електрода: а) копіювання; б) проширення отворів; в) протягування; г) калібрування; д) гостріння;
- обертанні катода: а) обробка плоских і фасонних поверхонь; б) відрізання; в) кільцева вирізування;
- обертанні анода: а) обробка фасонних поверхонь (зовнішніх і внутрішніх); б) обробка канавок (прямих і спіральних); в) відрізання;
- складному русі електрода: а) вирізування дротом (стрижнем); б) вирізування трубчасто-контурним методом.

Найбільше промислове застосування в наш час отримали процеси копіювання фасонних поверхонь і проширення глухих і крізних отворів різного профілю, калібрування шліцьових отворів після термообробки, видалення задирок, у яких використовується ЕХО в проточному електроліті.

Точність обробки складає $0,2 \div 0,3$ мм.

1.6. Ультразвукові методи механічної обробки

Ультразвукові методи обробки засновані на використанні енергії ультразвукових коливань частотою $f = 18 \div 44$ кГц і інтенсивністю 10 Вт/см². Джерелом ультразвуку служать п'єзокерамічні або магнітострикційні перетворювачі, що збуджуються від ультразвукового генератора.

На рис. 1.9 наведено різновиди ультразвукової обробки: а) обробка незакріпленим абразивом для зняття дрібних задирок (менше $0,1$ мм) і шліфування дрібних деталей (масою менше $10 \div 20$ г); б) розмірна обробка деталей з твердих крихких матеріалів абразивною суспензією; в) очищення і змащування робочої поверхні круга в процесі чистового шліфування в'язких матеріалів; г) зв'язок вимушених ультразвукових коливань малої амплітуди різальним інструментом (лезвийним і абразивним) для

інтенсифікації звичайних процесів різання важкооброблюваних матеріалів.

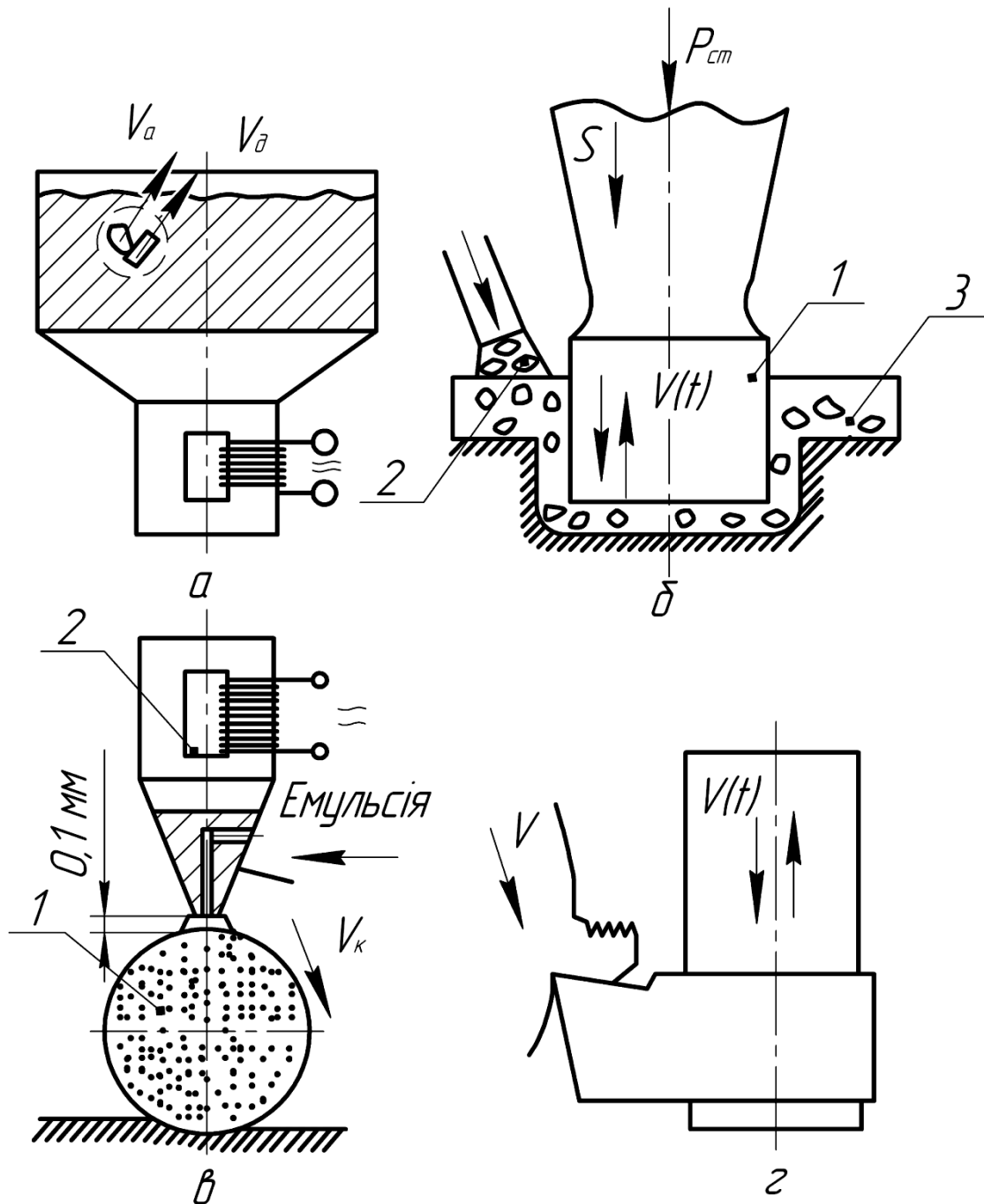


Рис. 1.9. Різновиди ультразвукової обробки

Перспективно також використання ультразвуку для чистової поверхнево-зміцнювальної обробки деталей. Під дією ультразвуку знижується опір поверхневих шарів металу пластичної деформації. Тому при малій статичній силі вдається

здійснювати значну пластичну деформацію і вести обробку тонкостінних деталей і деталей з м'якими покриттями.

При обробці за першим різновидом (рис. 1.9, а) деталі поміщають в абразивну суспензію і збуджують у ній інтенсивні ультразвукові коливання. Під дією гідродинамічних потоків абразивні зерна і деталі через різну щільність рухаються з різними швидкостями ($V_a=V_d$) і відбувається зняття задирок. Цей процес реалізований в установках УЗВД-6 і УЗВД-8.

Найбільш широке застосування отримали другий і четвертий різновиди. Інструмент 1 (рис. 1.9, б) здійснює ультразвукові коливання ($A=0,02\div 0,05$ мм) і впливає на заготовку 3 з невеликою статичною силою P_{cm} ($P_{cm}=30\div 200$ Н). У робочу зону подаються зважені абразивні зерна 2 (зазвичай карбіди бору), і спостерігаються два основні процеси: ударне втискування абразивних зерен, що викликає виколування невеликих частинок матеріалу заготовки, і циркуляція та зміна абразиву в робочій зоні для віднесення виколотих частинок і доставки свіжого абразиву. Розмір виколуваних частинок невеликий, проте кількість ударів велика ($18\div 44$ кГц) і за певних умов обробка йде достатньо ефективно.

Головний рух – коливання інструменту. Швидкість (м/с) головного руху $V=(4\cdot f\cdot A)/10^3$, де f – частота коливань, Гц; A – амплітуда коливань, мм. Подача може бути подовжньою (S_{np}), поперечною (S_{mn}) і круговою ($S_{кр}$) – обертання інструменту або заготовки. Залежно від виду подачі, а також форми інструменту можна здійснити різні кінематичні схеми ультразвукової обробки, аналогічні процесу електроерозійної обробки.

Ультразвукові установки і верстати поділяються на переносні установки невеликої потужності і стаціонарні ультразвукові верстати – універсальні і спеціальні. Універсальний ультразвуковий верстат складається з ультразвукового генератора, акустичної головки з п'єзокерамічним або магнітострикційним перетворювачем, механізмів подачі головки, столу для закріплення заготовок, системи підведення абразивної суспензії, пристроїв для вимірювання глибини обробки і періодичного піднімання і опускання інструменту.

Продуктивність і якість поверхні залежать від властивостей оброблюваних матеріалів, амплітуди коливань A , зернистості абразиву і статичного навантаження P . Продуктивність процесу V пропорційна квадрату критерію крихкості t_x : $V = c \cdot t_x^2$ (t_x – відношення опору зсуву σ до опору на відрив τ). Матеріали, що мають t_x більше 2 (скло, кераміка, кремній, германій і т. д.), найефективніше обробляються ультразвуковим методом. При збільшенні амплітуди і частоти, а також зернистості абразиву V зростає. Існує оптимальне значення P , при якому величина V максимальна.

Цей метод застосовують для формоутворення зовнішніх і внутрішніх поверхонь деталей з твердих крихких матеріалів (кераміка, сітали, скло, кварц, ферит і ін.). Перевага ультразвукового методу перед електроерозійним і електрохімічним – можливість обробки діелектрика, а при обробці тугоплавких металів і твердих сплавів – вища якість поверхневого шару. Для підвищення продуктивності, особливо при обробці отворів глибиною більше 5 мм, застосовують підведення абразивної суспензії під тиском або вакуумне відсмоктування її з зони обробки. Обробку глибоких отворів малого діаметра ($D = 3 \div 8$ мм, h до 500 мм) доцільно вести алмазними коронками, що обертаються, при взаємодії інструменту ультразвукових коливань уздовж його осі.

Застосування ультразвуку для інтенсифікації звичайних процесів різання важкооброблюваних матеріалів шляхом зв'язку вимушених коливань малої амплітуди ($A = 3 \div 10$ мкм) інструменту I (рис. 1.9, z) або заготовки найефективніше при роботі з малими перетинами зрізу, наприклад при нарізуванні різьби мітчиками. При взаємодії мітчика або розкатки ультразвукових коливань знижується крутний момент на 25÷50 %, поліпшується якість обробленої поверхні і за рахунок зменшення кількості мітчиків у комплекті в 1,5÷3 рази підвищується продуктивність процесу.

Ультразвукове нарізування різьб малого діаметра (М3÷М12) дозволяє механізувати процес, підвищити стійкість інструменту, виключити брак, що викликається поломками мітчиків.

Перспективним напрямом фізико-хімічних методів є раціональне поєднання різних процесів, яке дозволяє значно

інтенсифікувати процес обробки. Наприклад, запропонований у МАІ спосіб, заснований на поєднанні ультразвукової і електрохімічної обробки, дозволив значно підвищити продуктивність процесу і поліпшити якість поверхневого шару. При обробці тугоплавких металів і твердих сплавів суміщений спосіб забезпечує продуктивність, у десятки разів вищу, ніж електроерозійний спосіб, і в 5÷6 разів більшу, ніж ультразвуковий, дозволяє в 5 разів знизити знос інструменту і в 3÷5 разів зменшити енергоємність процесу. З'являється можливість замінити карбід бору значно дешевшим абразивом – карбідом кремнію. Встановлено, що при ультразвуковій обробці твердих сплавів порівняно з іншими електрофізичними методами досягається вища якість поверхневого шару: утворюється стискальна залишкова напруга. Тому підвищуються зносостійкість і втомна міцність твердосплавних штампів, матриць, прес-форм, фільтер і інших деталей, що обробляються ультразвуковим методом. Суміщений метод реалізований в ультразвукових верстатах мод. 4Б772 і 4Д772Е.

1.7. Променеві методи розмірної обробки

Під променевими методами розмірної обробки розуміють процеси видалення матеріалу плавленням і випаровуванням його під дією енергії променевих потоків або високоенергетичних струменів з питомою щільністю енергії до $10^6 \div 10^9$ Вт/см². Основні різновиди променевих методів – *електронно-променева і світлопроменева (лазерна) обробки*. Відмінність променевих методів розмірної обробки від паяння і зварювання полягає головним чином у тривалості імпульсів: у першому випадку застосовуються короткі імпульси (τ ; π 10 мкс), а в другому – імпульси великої тривалості.

При розмірній обробці промінь діє протягом часу, необхідного для плавлення і випаровування металу, і не діє під час викиду цього металу з лунки. Регулюванням шпаруватості циклу (від 0,1 до 1,0) в імпульсному режимі можна в певних межах керувати процесом формоутворення і якістю поверхневого шару.

Електронно-променева обробка (ЕПО) заснована на видаленні речовини при дії сфокусованого пучка електронів – випаровування або сублімація речовини з точки дотику електронного променя (локальний нагрів за рахунок перетворення кінетичної енергії електронів у теплову). При обробці вольфраму, молібдену і ніобію ККД перетворення кінетичної енергії на теплову складає $0,75 \div 0,79$.

При нагріванні металу електрони можуть отримати швидкості в напрямі, перпендикулярному до поверхні тіла, достатні для подолання потенційного бар'єру (термоелектронна емісія). Дуже великі швидкості (до 10 км/с) можна забезпечити електронам лише в середовищі, що має високий вакуум, при використанні високих прискорюючих напружень.

Сучасні засоби електротехніки і електронної оптики дозволяють регулювати кінетичну енергію електронів і фокусувати її на дуже малих площах.

Установка для ЕПО (рис. 1.10) складається з електронної гармати 4, у якій формується потужний електронний промінь; вакуумної робочої камери, у якій проводиться обробка деталі 13 (разом з пристроями точного установлення і переміщення заготовки); вакуумної насосної системи, що створює вакуум порядку 10^{-5} см рт. ст. ($1,33 \cdot 10^{-2}$ Па); контрольної системи, що управляє електронним променем і його траєкторією; імпульсного джерела енергії 1; приладів для контролю спостереження за ходом процесу.

Режими обробки електронним променем визначаються силою струму в промені I , прискорюючою напругою U , щільністю енергії у фокальній плямі q , тривалістю τ і частотою імпульсів f , а також швидкістю переміщення променя відносно заготовки.

Залежно від величини q механізм видалення матеріалу заготовки може бути різним: термічним, краплинним, пароструминним і вибуховим.

Найбільш ефективний режим кинджального проплавлення, коли передача енергії твердому тілу здійснюється періодичними тепловими вибухами і швидкість виділення теплоти значно перевищує швидкість її відведення (вибухоподібне випаровування).

Утворюється ударна хвиля, що генерує направлений у глиб тіла потік дислокацій і ініціює процес плавлення.

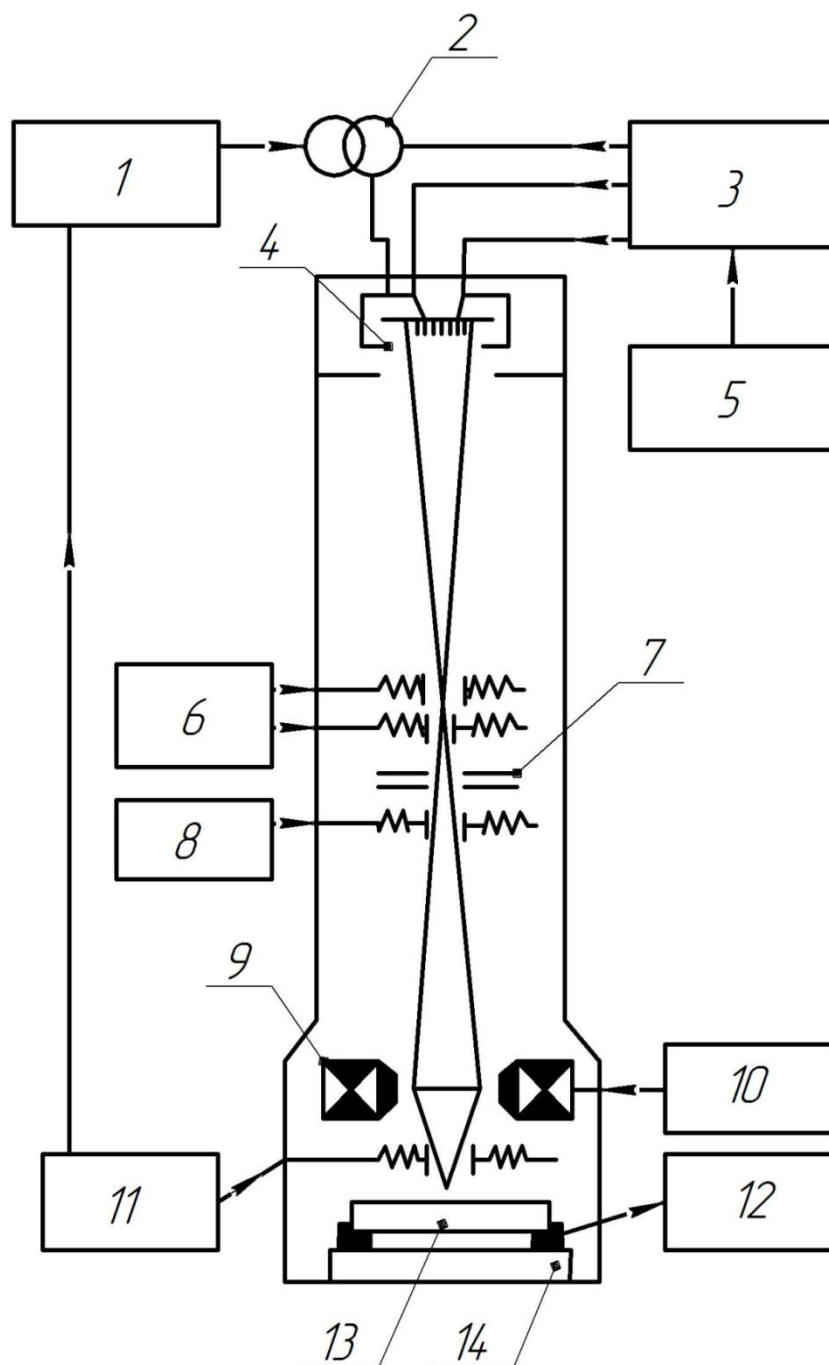


Рис. 1.10. Схема електронно-променевої обробки:
 1 – генератор імпульсів; 2 – імпульсний трансформатор;
 3 – джерело напруги, збудження і накали; 4 – катод; 5 – джерело високої напруги; 6 – електромагнітне юстирування;
 7 – діафрагма; 8 – коректор зображення; 9 – магнітна лінза; 10 – джерело живлення лінзи; 11 – контрольний контур; 12 – катодний осцилоскоп; 13 – оброблювана деталь; 14 – робочий стіл

Потужність W_i електронного пучка в імпульсі: $W_i = I \cdot U \cdot f \cdot \tau$. Продуктивність процесу V і глибина обробки h залежать від W_i , площі поперечного перетину променя F , а також теплофізичних характеристик матеріалу заготовки.

Електронно-променевим методом можна обробляти як електропровідні, так і неелектропровідні матеріали з будь-якими механічними властивостями.

Проте переважною є обробка деталей з електропровідних матеріалів або деталей із струмопровідними покриттями, оскільки в цьому випадку статичний заряд відводиться шляхом заземлення деталі. Наявність статичного заряду надає дефокусуєчою дію на потік електронів.

Вітчизняні електронно-променеві установки для розмірної обробки типу ЕЛУРО-П зазвичай працюють у багатоімпульсному режимі з частотою проходження імпульсів електронного пучка $10 \div 1000$ Гц і тривалістю імпульсу $15 \div 100$ мкс при прискорюючій напрузі $80 \div 100$ кВ. При цьому діаметр електронного пучка у фокальній плямі складає $10 \div 50$ мкм і щільність потоку енергії $10^7 \div 10^8$ Вт/см². Основна сфера застосування ЕПО – обробка вузьких канавок і виготовлення малих отворів (перфорування).

Переваги ЕПО: висока продуктивність процесу, відсутність хімічної взаємодії, можливість обробки важкодоступних місць, обробка дуже малих отворів і вузьких канавок.

Недоліки ЕПО: необхідність створення вакууму (на це потрібно $10 \div 15$ хв), складність і висока вартість установок, необхідність захисту обслуговуючого персоналу від рентгенівського випромінювання.

1.8. Лазерна обробка

Частка «високих технологій» у промисловому виробництві тієї або іншої країни – найістотніший критерій при оцінці її перспектив і найпереконливіший аргумент при визначенні її місця в ряді інших світових гравців. При цьому одними з «найвищих» і значущих на сьогодні є лазерні технології – воістину безцінна спадщина минулого двадцятого століття, спадщина, до вивчення і застосування якої ми, по суті, тільки приступили.

Епоха лазерів почалася в другій половині ХХ ст. Відкритий у ці роки квантовий генератор (або більш звичною мовою – лазер) являє собою джерело монохроматичного когерентного світла і є дивовижним оптичним приладом, який лавиноподібно генерує фотони з однаковою енергією, спрямованістю руху і поляризацією, тобто випромінює вузьконаправлений світловий промінь високої потужності.

Фізики і інженери гідно оцінили це відкриття і вже в 1962 р., майже відразу після випробування першого лабораторного квантового генератора, були розроблені і запропоновані ринку комерційні лазери фірми Spectra Physics (США). Це час справжньої революції в лазерній технології, у результаті якої було створено і тепер успішно використовується безліч модифікацій і типів лазерів: від найменших, розміром у декілька мікрон, до гіганта Nova в Національній лабораторії Лоуренса Лівермора в США завдовжки 137 м і сумарною потужністю в 1014 Вт.

Завдяки своїм унікальним властивостям (перш за все високій потужності випромінювання – до 10^8 - 10^9 Вт/см² в безперервному режимі і до 10^{16} - 10^{17} Вт/см² в імпульсному) лазер (рис. 1.11) став вискоефективним інструментом, що дозволяє миттєво нагрівати (пропалювати) і охолоджувати матеріал на локальній ділянці обробки, не піддаючи тепловій деформації всю заготовку. Крім того, лазерний промінь легко керований, тобто органічно вписується в будь-які автоматизовані системи.

Завдяки цим перевагам лазерна техніка проникла буквально у всі наукові і виробничі галузі, перш за все в металообробку. Починаючи з 70-х рр. ХХ ст., лазер успішно застосовують для зварювання, різання, наплавлення, маркування і гартування металів. За статистикою останніх років, світова промисловість використовує близько 40000 лазерних комплексів загальною вартістю до \$1,5 млрд дол.

У той же час лазерні технології стали пріоритетними напрямками в системах зв'язку і обробки інформації, в оптоелектроніці, біології і медицині, у системах вимірювань, при наукових дослідженнях.



Рис. 1.11. Зовнішній вид лазерної установки

Причина активного впровадження лазерів у всі сфери сучасної цивілізації полягає в тому, що ця технологія є по-справжньому «високою», такою, що багато в чому визначає загальний рівень технологічного розвитку. У найближчому майбутньому очікується подальше розширення сфери застосування лазерних технологій у машинобудуванні (лазерна обробка матеріалів), фотохімії, у мікро- і нанотехнологіях, телекомунікаціях, при оптичній обробці і записі інформації, у медичній діагностиці, хірургії та в екологічному моніторингу.

Класифікація лазерів

Твердотільні лазери на люмінесціювальних твердих середовищах (діелектричні кристали і стекла). У якості активаторів зазвичай використовуються іони рідкоземельних елементів або іони групи заліза Fe. Накатування – оптичне і від напівпровідникових лазерів – здійснюється за три- або чотирирівневою схемою. Сучасні твердотільні лазери здатні працювати в імпульсному, безперервному і квазібезперервному режимах.

Напівпровідникові лазери. Формально також є твердотільними, але традиційно виділяються в окрему групу, оскільки мають інший механізм накатування (інжекція надмірних носіїв заряду через $p-n$ перехід або гетероперехід, електричний

пробій у сильному полі, бомбардування швидкими електронами), а квантові переходи відбуваються між дозволеними енергетичними зонами, а не між дискретними рівнями енергії. Напівпровідникові лазери – найбільш застосовуваний у побуті вид лазерів. Окрім того, застосовуються в спектроскопії, у системах накачування інших лазерів, а також у медицині.

Найважливішим елементом кожного твердотілого лазера – стрижневого, дискового або світлопровідного – є діодна система накачування, що трансформує електричну енергію в оптичну. Теоретично давно відомо, що використання вихідного випромінювання лазерного діода безпосередньо для обробки матеріалів може спростити лазерну систему і бути конструктивним з погляду вартості і розмірів лазера.

Останніми роками в технології виробництва діодів з прямим переходом відмічено істотний прогрес, зокрема стосовно напівпровідників, методів пакетування, оптичних систем і прогресивної системи водяного охолодження. Лазерні діоди з прямим переходом (DDL) і з вихідним випромінюванням потужністю в декілька кіловат виявилися оптимальним рішенням для декількох застосувань.

У простому діодному лазері, так званому одиночному випромінювачі, випромінювання генерується в дуже невеликому об'ємі і виходить через мікроскопічний випромінюючий майданчик. Такі діоди застосовуються в CD/DVD-програвачах, телекомунікаціях і для накачування малопотужних твердотілих лазерів. Наступний рівень складності діодних лазерів – створення монолітної лінійки лазерних діодів (до 50 діодно-лазерних випромінювачів). Більш високу потужність отримують, стикуючи діоди у двовимірну матрицю або стопку. У подібних конфігураціях вихідне випромінювання може бути реструктуроване і сфокусовано традиційною оптикою або шляхом приєднання до світлопровода або пучка світлопроводів.

Лазери на фарбниках. Тип лазерів, що використовує в якості активного середовища розчин флюоресціювальних з утворенням широких спектрів органічних фарбників. Лазерні переходи здійснюються між різними коливальними підрівнями першого збудженого і основного синглетних електронних станів. Накачування оптичне, можуть працювати в безперервному і

імпульсному режимом. Основною особливістю є можливість перебудови довжини хвилі випромінювання в широкому діапазоні. Застосовуються в спектроскопічних дослідженнях.

Газові лазери – лазери, активним середовищем яких є суміш газів і пари. Відрізняються високою потужністю, монохроматичністю, а також вузькою спрямованістю випромінювання. Працюють у безперервному та імпульсному режимах. Залежно від системи накачування газові лазери розділяють на газорозрядні лазери, газові лазери з оптичним збудженням і збудженням зарядженими частинками (наприклад, лазери з ядерним накачуванням; на початку 80-х рр. ХХ ст. проводилися випробування систем протиракетної оборони на їх основі, проте без особливого успіху), газодинамічні і хімічні лазери. За типом лазерних переходів розрізняють газові лазери на атомних переходах, іонні лазери, молекулярні лазери на електронних, коливальних і обертальних переходах молекул і ексимерні лазери.

Газодинамічні лазери – газові лазери з тепловим накачуванням, інверсія населеностей у яких створюється між збудженими коливально-обертальними рівнями гетероядерних молекул шляхом адіабатичного розширення рухомої з високою швидкістю газової суміші (частіше N_2+CO_2+He або $N_2+CO_2+H_2O$, робоча речовина – CO_2).

Ексимерні лазери – різновид газових лазерів, що працюють на енергетичних переходах ексимерних молекул (димірах благородних газів, а також їх моногалогенідів), здатних існувати лише якийсь час у збудженому стані. Накачування здійснюється пропусканням через газову суміш пучка електронів, під дією яких атоми переходять у збуджений стан з утворенням ексимерів, що фактично є середовищем з інверсією населеностей. Ексимерні лазери відрізняються високими енергетичними характеристиками, малим розкидом довжини хвилі генерації і можливістю її плавної перебудови в широкому діапазоні.

Хімічні лазери – різновид лазерів, джерелом енергії для яких служать хімічні реакції між компонентами робочого середовища (суміші газів). Лазерні переходи відбуваються між збудженими коливально-обертальними і основними рівнями складених молекул продуктів реакції. Для здійснення хімічних

реакцій у середовищі необхідна постійна присутність вільних радикалів, для чого використовуються різні способи дії на молекули для їх дисоціації. Відрізняються широким спектром генерації в ближній ІЧ-області, великою потужністю безперервного та імпульсного випромінювання.

Лазери на вільних електронах – лазери, активним середовищем яких є потік вільних електронів, що коливаються в зовнішньому електромагнітному полі (за рахунок чого здійснюється випромінювання) і розповсюджуються з релятивістською швидкістю в напрямі випромінювання. Основною особливістю є можливість плавної широкодіапазонної перебудови частоти генерації. Розрізняють убітрони і скаттрони, накачування перших здійснюється в просторово-періодичному статичному полі ондулятора, других – потужним полем електромагнітної хвилі. Існують також лазери на циклотронному резонансі і строфотрони, засновані на гальмівному випромінюванні електронів, а також фліматрони, що використовують ефект Черенковського і перехідного випромінювань. Оскільки кожен електрон випромінює до 10⁸ фотонів, лазери на вільних електронах є, по суті, класичними приладами і описуються законами класичної електродинаміки.

Волоконні лазери з повним правом можуть бути віднесені до розряду твердотільних, та все одно багато фахівців наполягають на виділенні їх в окрему групу. Справа в тому, що в потужних волоконних лазерів є цілий ряд технічних особливостей і властивостей, через які переносити досвід застосування класичних лазерів на нову техніку не зовсім коректно. Доцільно перерахувати ці відмінності і особливості.

1. Унікальний ресурс нових випромінювачів (більше 100 тисяч годин з можливістю продовження ресурсу при порівняно невеликих витратах) і майже нульові експлуатаційні витрати.

2. Мінімальні час і витрати на підготовку приміщень і пусканалагодження.

3. Універсальність лазерного джерела. Волоконний лазер є зразком джерела «чистої променевої» енергії, і в ньому самому майже нема технологічної специфіки, тобто він може бути

переорієнтований з виконання одного технологічного процесу на інший при диверсифікації або іншій перебудові виробництва.

4. Можливість нарощування потужності. Можна придбати лазер з конструктивним запасом, скажімо, на потужність 700 Вт при поставці і потім просто докупувати блоки накачування і збільшити потужність до 2400 Вт, практично нічого не змінюючи у виробничій системі (операція устанавлення додаткових блоків триває не більше 2÷3 год).

Транспортування випромінювання по оптичному кабелю завдовжки від 10 до 100 м істотно спрощує проектування і компонування технологічних систем. Можна використовувати величезний асортимент серійної промислової робототехніки.

5. Можливість організації на базі волоконних лазерів багатоцільових і багатофункціональних технологічних ділянок для максимізації завантаження лазерного джерела.

6. І, нарешті, питання кадрів і фахівців. Волоконні лазери позбавляють необхідності тримати штат фахівців з досить спеціальними знаннями в галузі оптики, електричних розрядів і вакуумних систем. Нічого цього не вимагається для експлуатації, навчання фахівця-оператора займає не більше тижня. Тобто цілком можливо задіювати наявний персонал і заразом отримати інший, вищий, рівень продуктивності.

Переходячи до економічного аспекту, слід зазначити, що волоконні лазери зараз дещо дорожче за класичні лазери CO₂ і тому вартість самого лазера складає, як правило, істотну частину технологічної системи. У той же час можливість транспортувати випромінювання на значні відстані і підведення його за допомогою спеціальних оптичних систем у важкодоступні місця дозволяють проводити обробку в тих випадках, коли інші методи застосувати просто неможливо.

Інші види лазерів, розвиток принципів яких на даний момент є пріоритетним завданням досліджень (рентгенівські лазери, гамма-лазери та ін.).

Види лазерної обробки

Лазерне різання металів застосовується для розкрою і точної обробки фасонних деталей, які неможливо обробити іншим способом унаслідок їх крихкості, низької жорсткості,

високої твердості або вони є дуже складними для обробки іншими способами. Цим способом доцільно виготовляти штучні складні деталі – розмір партії одночасно оброблюваних деталей мало впливає на собівартість одиниці продукції.

Різання листового металу – приклад впровадження лазерних технологій у глобальному масштабі. І у Китаї, і в Мексиці, і в Канаді ріжуть однаковий листовий метал – інструментальну, нержавіючу сталь, алюмінієві сплави – приблизно з однією і тією самою товщиною, швидкостями і продуктивністю. Тому не дивно, що лазерний розкрій металу упевнено потіснив традиційні технології, такі як плазмове і гідроабразивне різання.

Як правило, металорізальне устаткування на принципі лазерного різання скомпоновано за схемою «координатний стіл» – лазерна головка, керована комп'ютером верстата, переміщається над поверхнею оброблюваної деталі. На сьогоднішній день технологічний рівень верстатів лазерного розкрою металу досяг такого рівня, що продуктивність і якість різання у всіх підприємств дуже близькі.

Для різних матеріалів потрібно застосовувати різні ступені інтенсивності випромінювання в зоні різання, тиск і склад ріжучого газу. Тому існує декілька видів лазерного різання: лазерно-кисневе; кисневе різання з підтримкою лазерним променем (LASOX); лазерне різання в інертному газі; лазерне випарне (сублімаційне різання); лазерне терморозколювання крихких матеріалів (скло).

Стандартний і найбільш поширений метод – **лазерно-кисневе різання**, де ріжучим газом служить кисень, при взаємодії якого з розжареним металом відбувається екзотермічна реакція окиснення.

Лазерне різання матеріалів проводиться в **імпульсному** або **безперервному режимі**. При різанні в імпульсному режимі безперервного різання отримують у результаті накладення наступних один за одним отворів. Для цього застосовують імпульсні лазери на алюмо-ітрієвому гранаті з модуляцією добротності, лазери на вуглекислому газі. Імпульсний характер обробки забезпечує мінімальну глибину прогрівання матеріалу.

Лазери безперервної дії на вуглекислому газі потужністю від декількох кіловат до сотень кіловат застосовують для

газолазерного різання, при якому в зону дії лазерного променя подається струмінь газу. Газ вибирається залежно від виду оброблюваного матеріалу. При різанні дерева, фанери, пластиків, паперу, картону, текстильних матеріалів у зону обробки подається повітря або інертний газ, які охолоджують зрізані краї і перешкоджають згоранню матеріалу і розширенню області різання. При різанні більшості металів, скла, кераміки струмінь газу видуває з зони дії опромінення розплавлений матеріал, що дозволяє отримувати поверхні з малою шорсткістю і забезпечує високу точність різання. При різанні заліза, маловуглецевих сталей і титану в зону нагріву подається струмінь кисню. У результаті екзотермічної реакції окиснення металу виділяється додаткове тепло, що дозволяє значно підвищити швидкість різання.

Лазерне зварювання. Близько 11 % твердотільних і CO₂-лазерів інтегровані у зварювальні системи, що застосовуються в найрізноманітніших галузях, починаючи від мікрозварювання у виробництві стоматологічного і хірургічного інструменту і закінчуючи зварюванням кузовів в автомобільному виробництві.

До списку підприємств, що використовують лазерне зварювання, слід також включити вагонобудівні заводи і виробників сільськогосподарського, холодильного, хімічного устаткування, професійного кухонного і ресторанного устаткування, меблів, а також рекламно-виробничі компанії.

Маркування і гравіювання. Ця частина ринку генерує майже 15 % всього доходу ринку лазерних систем. На сьогодні це найбільш сформований і зрілий ринок, хоч би з тієї точки зору, що лазерні маркери – це продукт, що найповніше відповідає вимогам кінцевих користувачів за зручністю і безпекою устаткування, за гарантійними зобов'язаннями виробників і післягарантійною підтримкою, з найбільш глибоко опрацьованими технологіями та програмним забезпеченням.

Мікро- і нанообробка. Додатки цієї сфери належать до операцій лазерної обробки матеріалів мікронного масштабу. За прогнозами, у найближчі десятиліття очікується різке зростання частки цього напрямку у світовому лазерному ринку.

Максимальну частку ринку займають два базові додатки лазерної мікрообробки – прошиття (свердлення) крізних мікроотворів (як у металах, так і перфорація неметалів), різання і свердлення катетерів. Потенціал першого пов'язаний з розвитком мікроелектронної промисловості, а другого – з постійним зростанням державних і приватних інвестицій у розвиток охорони здоров'я.

Інші застосування, що стосуються мікрообробки, – це швидке прототипування і нанообробка, тобто обробка матеріалів з точністю вище 1 мкм. До останнього, як правило, належать додатки, засновані на процесі лазерної абляції. Типовий продукт – елементи сопел для струменевих принтерів, тонкоплівкові резистори з високою точністю номіналу, що використовуються для авіаційних ЖК-дисплеїв, фільтри з каліброваними отворами високої точності для медичних приладів, катетерів і так далі. Прошиття мікроотворів традиційно проводилося CO₂-лазерами з високою якістю випромінювання, твердотільними лазерами на гармоніках від основного випромінювання, і в ряді випадків – ескамерними лазерами. Проте останнім часом цей ринок поступово займають волоконні лазери.

Лазерне устаткування. Після появи кінематично складних роботів-маніпуляторів і гнучких оптоелектронних променедротів лазерна обробка металів отримала «друге дихання», тобто почала застосовуватися при різанні просторових металовиробів.

Лазерне устаткування, що застосовується при різанні, класифікують за джерелами випромінювання і вихідною потужністю, яка у свою чергу визначає матеріал обробки. Так, для обробки чорних металів і нержавіючої сталі застосовують твердотільні квазібезперервні та імпульсно-періодичні джерела лазерного випромінювання з вихідною потужністю 100÷300 Вт; у той же час для обробки легованих сталей і деяких видів сплавів (втім, і для чорних металів теж) використовують газові безперервні CO₂-лазери з вихідною потужністю до 2500 Вт.

Як правило, сучасне устаткування для лазерного різання металу складається (рис. 1.12):

- з лазера з системами охолодження і живлення;
- координатного стола для кріплення заготовки;

- комп'ютерної системи керування столом;
- пристрою подачі технологічного газу;
- вентиляційної системи.



Рис. 1.12. Устаткування для лазерного різання металу

Величезні потужності випромінювання призводять до перегріву лазера, тому для його охолодження використовують двоконтурні водяні системи або холодильні компресори на фреоні. Джерела живлення лазера підбирають виходячи з вирішуваних технологічних завдань – трансформаторні або імпульсні. Там, де потрібна надійність, використовують трансформаторні схеми; при мінімізації лазерних установок застосовують імпульсні.

Сучасні координатні столи є високоточним устаткуванням і, як правило, базуються на порталній схемі, де нерухома металева заготовка різиться переміщуваним лазерним променем. Є і інші схеми. Так, при різанні Nd YAG-лазерами промінь переміщається по одній координаті, а стіл з листовим матеріалом по іншій.

Управління координатним верстатом здійснюється промисловим комп'ютером і, окрім апаратних пристроїв – приводів, датчиків і т. п., включає пакет таких файлів:

- програми введення початкових даних (електронних креслень) у графічних редакторах AutoCad, CorellDraw; Adobe Illustrator і ін. (формати *.plt. *.ai, *.dxf, *.cf2);

- керуючі програми повороту, масштабування і розмноження початкового файлу (креслення) по робочому полю столу;

- програми налаштування параметрів лазерної обробки і режиму врізання, автоматичного обліку ширини області різання, визначення внутрішніх і зовнішніх контурів, коректування режиму різання безпосередньо в технологічному процесі та ін.;

- програми налаштування параметрів координатного привода і робочого середовища оператора, генерація (рисунання) простих геометричних фігур;

- програми підключення зовнішніх пристроїв, керування лазерним випромінювачем, зв'язок із зовнішньою локальною мережею.

У режимах лазерного різання використовують різний технологічний газ, наприклад для зашадливого різання чорного металу використовують кисень (газолазерне різання), а для нержавіючої сталі – потік інертного газу, зазвичай азоту. Для видалення газоподібних і аерозольних продуктів розпаду, що виникають при пропалюванні металевого листа, застосовують вентиляційні пристрої, що є невід'ємною частиною всіх промислових комплексів лазерної обробки. Одним з методів є застосування деформованих дзеркал, що поєднують переваги стаціонарної і «портальної» схеми. Лазерний промінь, перш ніж досягти оброблюваної заготовки, двічі змінює траєкторію, відбиваючись у комплексі дзеркал з керованою формою поверхні. Явною перевагою методу є відсутність складної механіки; до недоліків слід віднести складність у керуванні поверхнею дзеркал.

Розвиток лазерних технологій. Лазерні технології знаходяться на самому початку своєї еволюції і продовжують удосконалюватися за рахунок впровадження нових економічних і надпотужних лазерів, світлопроводів, схем доставки до заготовки та інших нововведень. Фахівці виділяють такі напрями розвитку лазерної обробки:

- розширення видів оброблюваних матеріалів (спецсплави і неметалічні матеріали), зокрема матеріалів, що працюють в

екстремальних умовах експлуатації, стійких у хімічно агресивних і радіаційно навантажених середовищах;

- зростання діапазону товщини матеріалів;
- підвищення технологічної якості оброблених матеріалів і створених виробів;
- розроблення, створення і доведення до рівня індустріального серійного застосування нового виду процесів.

Найактивніше розвиваються пряме лазерне виробництво виробів з металевих і керамічних мікро- і нанопорошків методом селективного лазерного спікання; лазерне вигинання пластиків; гібридні технології – комбінації лазерної і традиційних (електродугових, ультразвукових) видів обробки; дистанційна обробка і зварювання великогабаритних виробів в енергетиці, суднобудуванні, будівництві; свердлення і різання мінералів, гірських порід. Розпочато дослідження таких перспективних процесів, як зварювання і різання під водою, лазерна перфорація надкороткими ($10^{-8} \div 10^{-13}$ с) лазерними імпульсами.

Розвиток традиційних і зароджувальних видів лазерної обробки матеріалів супроводжується фундаментальними і прикладними дослідженнями фізики процесів впливу лазерного випромінювання на матеріали, розробленням і вдосконаленням індустріальних лазерів і периферійного устаткування (адаптивних і інтелектуальних комп'ютерних систем, нових методів і приладів діагностики і моніторингу процесів) не тільки в наукових лабораторіях, але і в умовах промислового застосування. Зокрема поглиблення розуміння фізики процесів лазерної обробки при високих потужностях випромінювання з глибоким проникненням випромінювання в матеріал і створення індустріальних лазерів з високою оптичною якістю випромінювання дозволило приступити до освоєння лазерного зварювання і різання матеріалів великої товщини. Розвиток фізики потужних ультракоротких лазерних імпульсів привів до створення нових процесів – прецизійного свердлення і абляції матеріалу з поверхні без теплової дії, при безпосередньому розриві міжмолекулярних зв'язків лазерним випромінюванням.

Неперервно поліпшуються параметри випромінювання індустріальних лазерів: зростає їх середня потужність (до $10^4 \div 10^5$ Вт) і енергетична ефективність (до 20÷50 %),

підвищується оптична якість лазерного пучка, розширюється діапазон довжин хвиль випромінювання (у бік коротких хвиль до $0,3 \div 0,2$ мкм), досягається ультракоротка тривалість лазерних імпульсів ($10^{-13} \div 10^{-15}$ с), поліпшується компактність блока генерації (до 10 дм³/кВт); розвиваються гнучкі оптоволоконні системи доставки лазерного випромінювання до оброблюваного матеріалу.

Як всі високі технології, лазерна технологія відрізняється великою наукоємкістю і тому вимагає адекватних витрат на свій розвиток. Так, провідні лазерні фірми світу вкладають у розроблення лазерної техніки до 8 % своїх прибутків. У той же час до 40 % загального об'єму витрат на розроблення лазерної техніки (цивільного призначення) у провідних країнах Заходу поступає за рахунок державних (національних) і міждержавних програм і через організацію національних (міжнаціональних) лазерних центрів.

1.9. Плазмова обробка

Плазмова обробка – обробка матеріалів низькотемпературною плазмою, що генерується дуговими або високочастотними плазмотронами. При плазмовій обробці змінюється форма, розміри, структура оброблюваного матеріалу або стан його поверхні. Плазмова обробка включає розділове і поверхневе різання, нанесення покриттів, наплавлення, зварювання, руйнування гірських порід (плазмове буріння). Плазмова обробка набула широкого поширення унаслідок високої за промисловими стандартами температури плазми ($\sim 10^4$ К), великого діапазону регулювання потужності і можливості зосередження потоку плазми на оброблюваному виробі; при цьому ефекти плазмової обробки досягаються як тепловою, так і механічною дією плазми (бомбардуванням виробу частинками плазми, що рухаються з дуже високою швидкістю, – так званий швидкісний натиск плазмового потоку).

Питома потужність, передавана поверхні матеріалу плазмовою дугою, досягає $10^5 \div 10^6$ Вт/см², у разі плазмового струменя вона складає $10^3 \div 10^4$ Вт/см². У той же час тепловий потік, якщо це необхідно, може бути розосереджений,

забезпечуючи «м'який» рівномірний нагрів поверхні, що використовується при наплавленні і нанесенні покриттів.

Різання металів здійснюється стисненою плазмовою дугою, яка горить між анодом (металом, що розрізається) і катодом плазмового пальника. Стабілізація і стиснення струмового каналу дуги, що підвищує її температуру, здійснюються соплом пальника і обдуванням дуги потоком плазмоутворюючого газу (Ar, N₂, H₂, NH₄ і їх суміші). Для інтенсифікації різання металів використовується хімічно активна плазма. Наприклад, при різанні повітряною плазмою O₂, окиснюючи метал, дає додатковий енергетичний внесок у процес різання.

Плазмовою дугою ріжуть нержавіючі і хромонікелеві сталі, Cu, Al та інші метали і сплави, невіддатливі кисневому різанню. Висока продуктивність плазмового різання дозволяє застосовувати його в потокових безперервних виробничих процесах. Потужність установок досягає 150 кВт.

Неелектропровідні матеріали (бетони, граніт, тонколистові органічні матеріали) обробляють плазмовим струменем (дуга горить у соплі плазмового пальника між її електродами). Нанесення покриттів (напилення) проводиться для захисту деталей, що працюють при високих температурах, в агресивних середовищах або схильних до інтенсивної механічної дії. Матеріал покриття (тугоплавкі метали, оксиди, карбіди, силіциди, бориди та ін.) вводять у вигляді порошку або дроту в плазмовий струмінь, у якому він плавиться, розпилюється, набуває швидкості ~ 100÷200 м/с і у вигляді дрібних частинок (20÷100 мкм) наноситься на поверхню виробу.

Плазмові покриття відрізняються зниженою теплопровідністю і добре протистоять термічним ударам. Потужність установок для напилення складає 5÷30 кВт, максимальна продуктивність – 5÷10 кг напиленого матеріалу за годину. Для отримання порошків зі сферичною формою частинок, що застосовуються в порошковій металургії, у плазмовий струмінь вводять матеріал, частинки якого, розплавляючись, набувають під дією сил поверхневого натягнення сферичної форми. Розмір частинок може регулюватися в межах від декількох мікрометрів до 1 мм. Більш дрібні (ультрадисперсні) порошки з розмірами частинок 10 нм і

вище отримують випаровуванням початкового матеріалу в плазмі і подальшою його конденсацією.

Властивість плазмової дуги глибоко проникати в метал використовується для зварювання металів. Сприятлива форма утвореної ванни дозволяє зварювати достатньо товстий метал (10÷15 мм) без спеціальної обробки кромки. Зварювання плазмовою дугою відрізняється високою продуктивністю і, унаслідок великої стабільності горіння дуги, хорошою якістю. Малопотужна плазмова дуга на струмах 0,1÷40 А зручна для зварювання тонких листів (0,05 мм) при виготовленні мембран, сільфонів, теплообмінників з Та, Ті, Мо, W, Al.

Плазмотрон – плазмовий генератор, газорозрядний пристрій для отримання «низькотемпературної» ($T \gg 10^4$ К) плазми. Плазмотрон використовується головним чином у промисловості в технологічних цілях, але пристрої, аналогічні плазмотрону, застосовують і як плазмові двигуни. Початок широкого використання плазмотрона в промисловій і лабораторній практиці (і поява самого терміну «плазмотрон») відноситься до кінця 50-х – початку 60-х рр. ХХ ст., коли були розроблені ефективні з інженерної точки зору способи стабілізації високочастотного розряду і дугового розряду, а також способи ізоляції стінок камер, у яких відбуваються ці розряди, від їх теплової дії. Відповідно найбільшого поширення набули дугові і високочастотні плазмотрони.

Дуговий плазмотрон постійного струму складається з таких основних вузлів: одного (катода) або двох (катода і анода) електродів, розрядної камери і вузла подачі плазмоутворюючої речовини; розрядна камера може бути суміщена з електродами – так званими плазмотронами з порожнистим катодом (рідше використовуються дугові плазмотрони, що працюють на змінній напрузі; при частоті цієї напруги $\sim 10^5$ Гц їх відносять до високочастотних плазмотронів). Існують дугові плазмотрони з осьовим і коаксіальним розташуванням електродів, з тороїдальними електродами, з двостороннім «витіканням» плазми, з електродами, що витрачаються (рис. 1.13), і т. д.

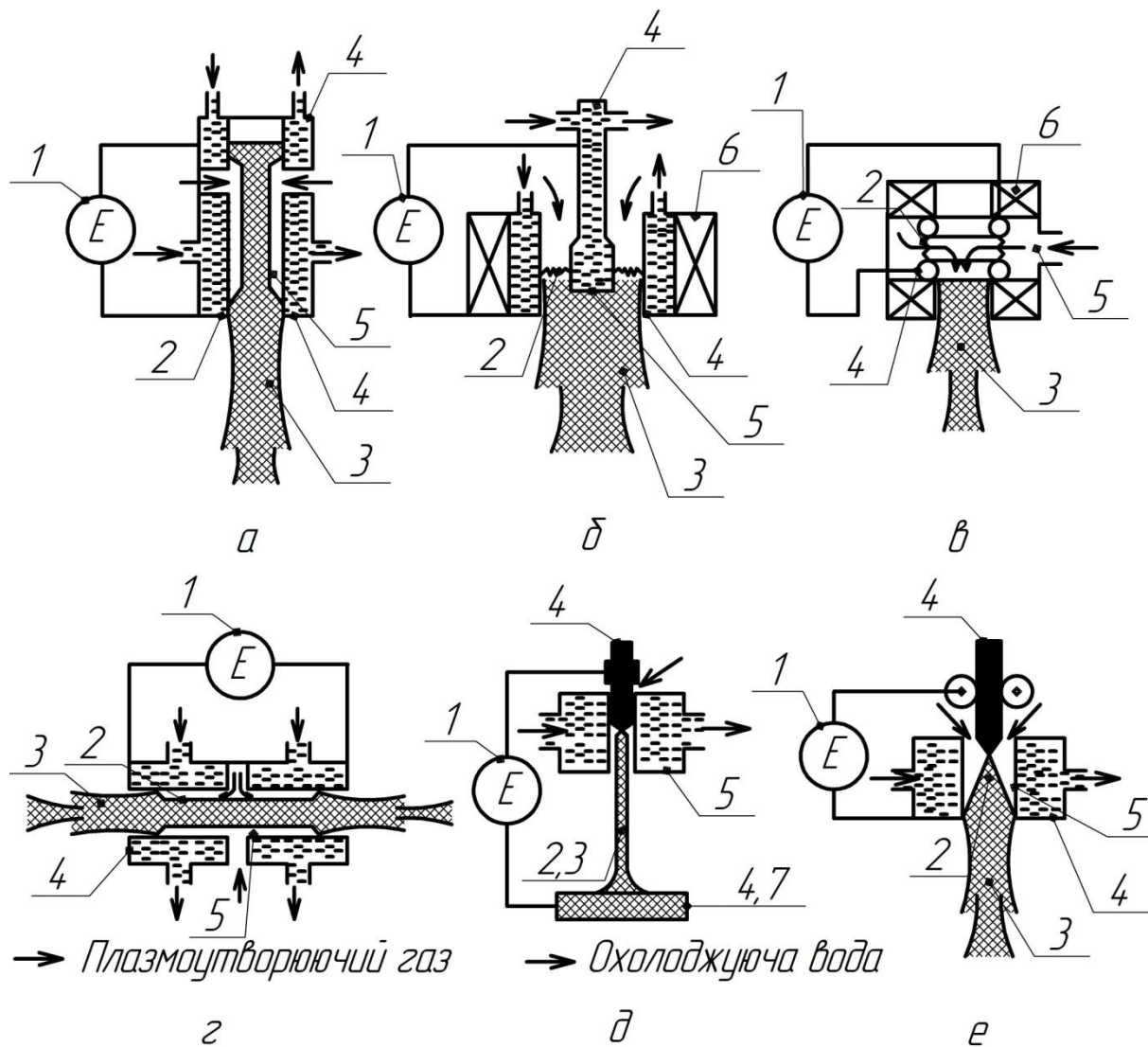


Рис. 1.13. Схема дугових плазмотронів:

a – осьовий; *б* – коаксіальний; *в* – з тороїдальними електродами;
г – двостороннього «витікання»; *д* – із зовнішньою плазмовою дугою; *е* – з електродами, що витрачаються (ерозійний);
 1 – джерело електроживлення; 2 – розряд; 3 – плазмовий струмінь; 4 – електрод; 5 – розрядна камера; 6 – соленоїд;
 7 – оброблюване тіло

Отвір розрядної камери, через який «витікає» плазма, називається соплом плазмотрона (у деяких типах дугових плазмотронів межею сопла є кільцевий або тороїдальний анод). Розрізняють дві групи дугових плазмотронів – для створення зовнішньої плазмової дуги (зазвичай називається плазмовою дугою) і плазмового струменя. У плазмотронах 1-ї групи дуговий розряд горить між катодом плазмотрона і оброблюваним тілом,

що служить анодом. Ці плазмотрони можуть мати як тільки катод, так і другий електрод – допоміжний анод, малопотужний розряд на який з катода (короткочасний або такий, що постійно горить) «підпалює» основну дугу. У плазмотронів 2-ї групи плазма, що створюється в розряді між катодом і анодом, «витікає» з розрядної камери у вигляді вузького довгого струменя. Стабілізація розряду в дугових плазматронах здійснюється магнітним полем, потоками газу і стінками розрядної камери і сопла. Один з поширених способів магнітної стабілізації плазмострумінних плазмотронів з анодом у формі кільця або тора, коаксіального катода полягає у створенні (за допомогою соленоїда) перпендикулярного до площини анода сильного магнітного поля, яке змушує струмовий канал дуги безперервно обертатися, оббігаючи анод. Тому переміщуються по колу анодні і катодні плями дуги, що запобігає розплавленню електродів (або їх інтенсивній ерозії, якщо вони виконані з тугоплавких матеріалів).

До способів газової стабілізації, теплоізоляції і стиснення дуги належить так зване «**закручування**» – газ подається в розрядну камеру по спіральних каналах, внаслідок чого утворюється газовий вихор, що обдуває стовп дуги і генерований плазмовий струмінь: шар більш холодного газу під дією відцентрових сил розташовується біля стінок камери, оберігаючи їх від контакту з дугою. У випадках, коли не вимагається сильного стиснення потоку плазми (наприклад, у деяких плазмотронах з плазмовою дугою, використовуваних для плавлення металу), стабілізуючий газовий потік не закручують, направляючи паралельно стовпу дуги, і не обтискають соплом (катод розташовують на самому зрізі сопла). Дуже часто стабілізуючий газ одночасно є і плазмоутворюючою речовиною. Застосовують також стабілізацію і стиснення дуги потоком води (з «закручуванням» або без нього).

Плазма дугових плазмотронів неминуче містить частинки речовини електродів унаслідок їх ерозії. Коли цей процес з технологічних міркувань корисний, його інтенсифікують (плазмотрон з електродами, що витрачаються); в інших випадках, навпаки, мінімізують, виготовляючи електроди з тугоплавких матеріалів (вольфрам, молібден, спеціальні сплави) і(або)

охладжуючи їх водою, що, крім того, збільшує термін служби електродів. Більш «чисту» плазму дають високочастотні плазмотрони. Плазмотрони з плазмовим струменем зазвичай використовують при термічній обробці металів, для нанесення покриттів, отримання порошків з частинками сферичної форми, у плазмохімічній технології та ін.; плазмотрони з зовнішньою дугою служать для обробки електропровідних матеріалів; плазмотрони з електродами, що витрачаються, застосовують при роботі в агресивних плазмоутворювальних середовищах (повітрі, воді та ін.) і за необхідності генерації металевої, вуглецевої і т. д. плазми з матеріалу електродів (наприклад, при карботермічному відновленні руд).

Потужність дугових плазмотронів складає $10^2 \div 10^7$ Вт; температура струменя на зрізі сопла – $3000 \div 25000$ К; швидкість закінчення струменя $1 \div 10^4$ м/с; промисловий к.к.д. $50 \div 90$ %; ресурс роботи (визначається ерозією електродів) досягає декількох сотень годин, у якості плазмоутворюючих речовин використовують повітря, N_2 , Ar, H_2 , NH_4 , O_2 , H_2O , рідкі і тверді вуглеводні, метали, пластмаси.

Високочастотний плазмотрон включає електромагнітну котушку-індуктор або електроди, підключені до джерела високочастотної енергії, розрядну камеру, вузол введення плазмоутворюючої речовини. Розрізняють індукційні, ємнісні, факельні плазмотрони, плазмотрони на коронному розряді і з короною високочастотною, а також надвисокочастотні плазмотрони (рис. 1.14).

Найбільшого поширення в техніці набули **індукційні високочастотні плазмотрони**, у яких плазмоутворюючий газ нагрівається вихровими струмами. Оскільки індукційний високочастотний розряд є безелектродним, ці плазмотрони використовують для нагріву активних газів (O_2 , Cl_2 , повітря та ін.), парів агресивних речовин (хлоридів, фторидів та ін.), а також інертних газів, якщо до плазмового струменя висуваються високі вимоги щодо чистоти. За допомогою індукційних плазмотронів отримують тонкодисперсні і особливо чисті порошкові матеріали на основі нітриду, бориду, карбідів та інших хімічних сполук. У плазмохімічних процесах об'єм розрядної камери таких плазмотронів може бути суміщений з реакційною зоною.

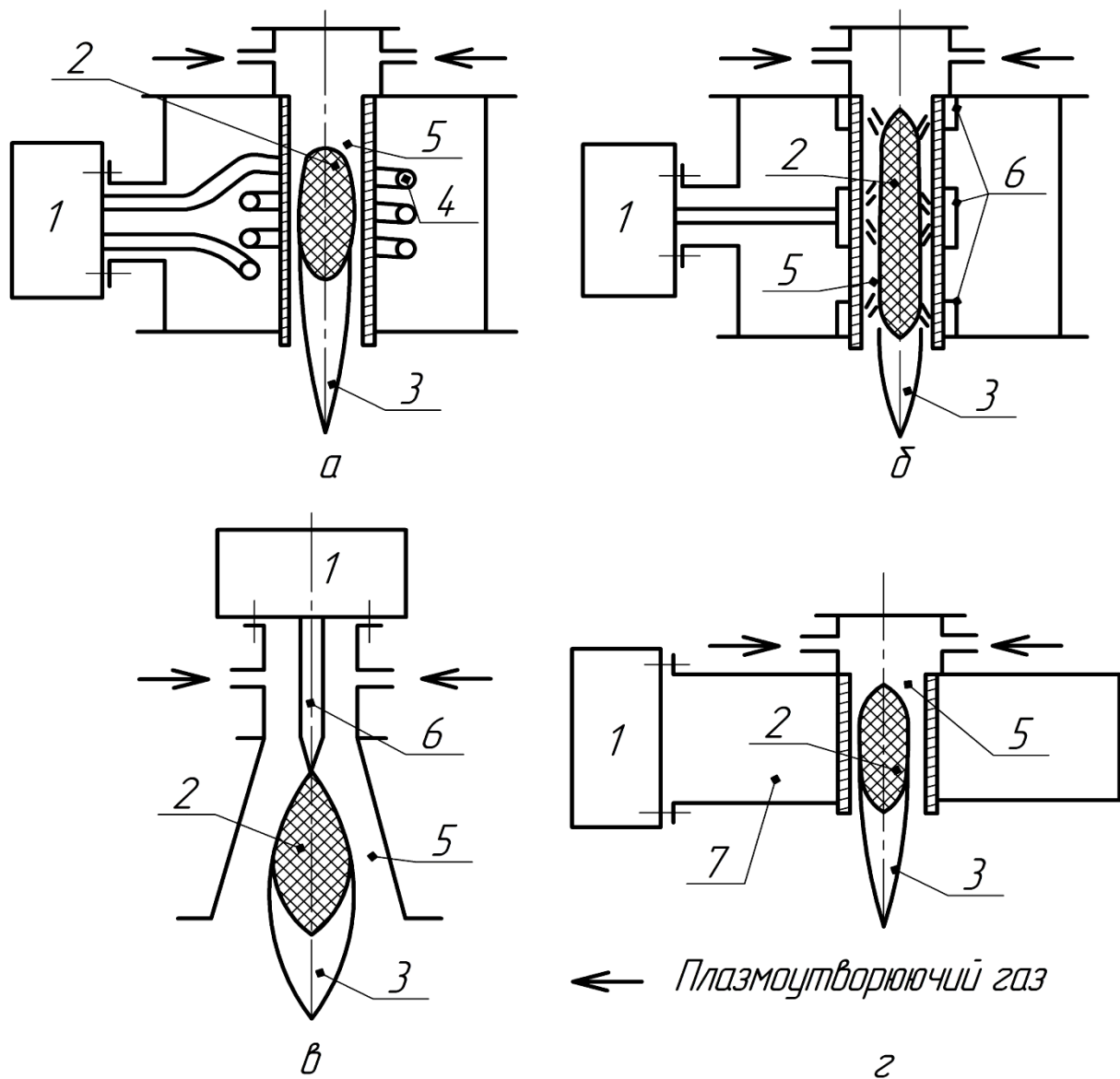


Рис. 1.14. Схеми високочастотних плазмотронів:
а – індукційний; *б* – ємнісний; *в* – факельний;
г – надвисокочастотний; 1 – джерело електроживлення;
 2 – розряд; 3 – плазмовий струмінь; 4 – індуктор; 5 – розрядна
 камера; 6 – електрод; 7 – хвилевід

Потужність плазмотрона досягає 1 МВт, температура в центрі розрядної камери і на початковій ділянці плазмового струменя $\sim 10^4$ К, швидкість «витікання» плазми $0 \div 10^3$ м/с, частоти – від декількох десятків тисяч герц до десятків мегагерц, промисловий к.к.д. $50 \div 80$ %, ресурс роботи до 3000 год. У надвисокочастотному плазмотроні робочі частоти складають тисячі і десятки тисяч мегагерц; у якості живлячих їх генераторів застосовуються магнетрони.

Високочастотні плазмотрони всіх типів, окрім індукційних, застосовуються головним чином у лабораторній практиці. У високочастотному плазмотроні, як і в дугових, часто використовують газове «закручування», що ізолює розряд від стінок камери. Це дозволяє виготовляти камери високочастотного плазмотрона з матеріалів з низькою термостійкістю (наприклад, із звичайного або органічного скла).

Для пуску плазмотрона, тобто збудження в ньому розряду, застосовують замикання електродів, підпал допоміжного дугового розряду, високовольтний пробій міжелектродного проміжку, інжекцію в розрядну камеру плазми та інші способи.

Основні тенденції розвитку плазматронів: розроблення спеціалізованих плазмотронів і плазмових реакторів для металургійної, хімічної промисловостей, підвищення потужності в одному агрегаті до $1 \div 10$ МВт, збільшення ресурсу роботи і т. д.

Плазмовий пальник – ручний дуговий плазмотрон для нанесення покриттів, різання, зварювання, наплавлення та інших процесів плазмової обробки. За принципом дії розрізняють дві групи плазмових пальників: для роботи *плазмовою дугою* і для роботи *плазмовим струменем*. При механізованій обробці плазмовий пальник закріплюється на спеціальній установці; для нанесення покриттів і наплавлення вона зазвичай оснащується пристроєм для подачі розпилюваного або наплавлюваного матеріалу (у вигляді порошку або дроту). Такий плазмовий пальник називається плазмовою головкою. Потужність плазмового пальника досягає 100 кВт, плазмоутворюючими газами служать Ar, He, N₂, NH₄, повітря і їх суміші. Для запалення дугового розряду на початку роботи необхідно замкнути зазор між катодом і анодом плазмового пальника (плазмовий струмінь) або між катодом і оброблюваним металом (плазмова дуга) або іншим чином порушити розряд.

1.10. Водоструминне різання

Інструментом водоструминного різання матеріалів є певним чином сформований струмінь рідини, що виходить із спеціального сопла діаметром $0,08 \div 0,5$ мм з понадзвуковою швидкістю (1000 м/с і більше) і забезпечує робочий тиск на

заготівку 400 МПа і більше. Оскільки відстань від зрізу сопла до поверхні матеріалу становить кілька міліметрів, тиск струменя перевищує межу міцності матеріалу – за рахунок цього і здійснюється різання.

Існують два способи водоструминного різання матеріалів:

- різання водою, або гідрорізання (рис. 1.15, *а*);
- гідроабразивне різання – вода плюс абразив (рис. 1.15, *б*).

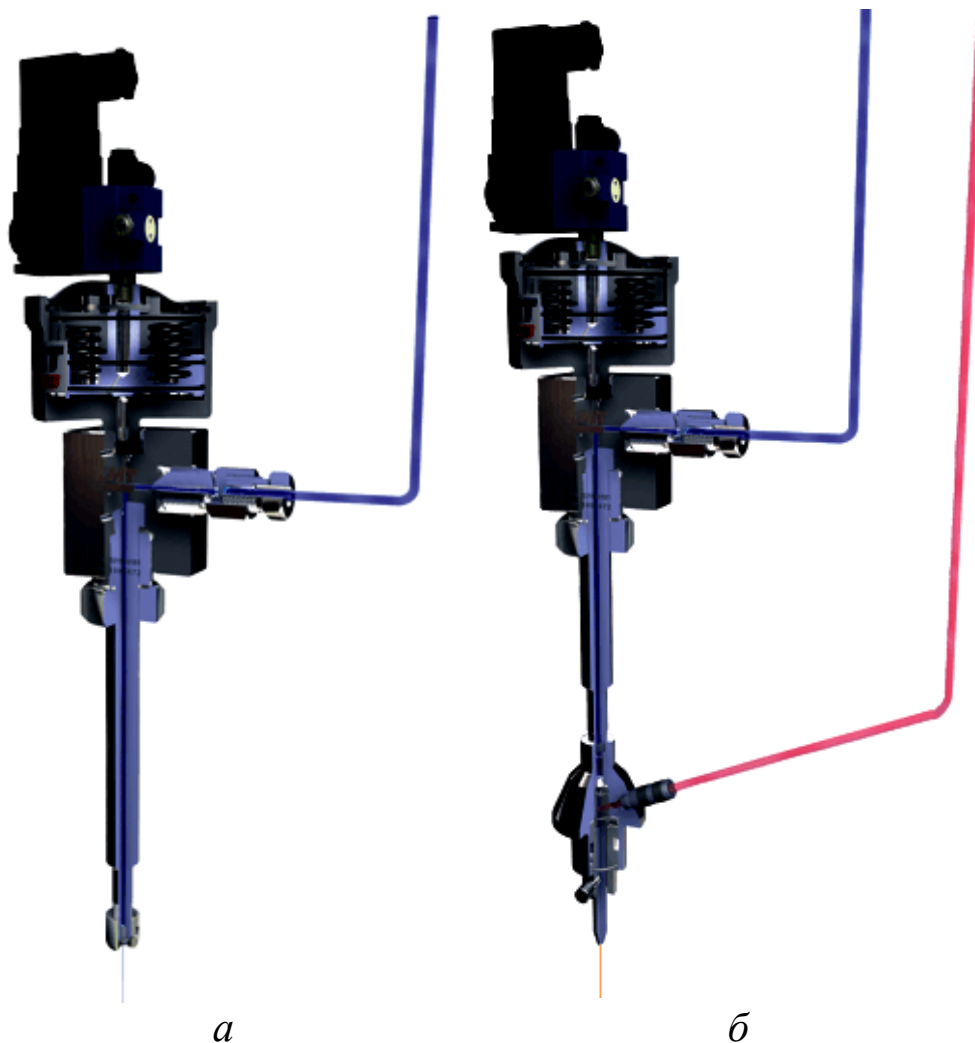


Рис. 1.15. Різання чистою водою (*а*) і гідроабразивне різання (*б*)

Гідрорізання застосовується для фігурного різання поролону, гуми, картону, шкіри, пароніту, пробки, технічних тканин та інших подібних неметалевих матеріалів.

Гідроабразивне різання використовується для виготовлення деталей з будь-яких марок сталі (конструкційної, високолегованої, жароміцної), кольорових металів і сплавів

(титану і титанових сплавів, алюмінієвих сплавів, міді, бронзи). А також для виготовлення деталей зі скла, оргскла, композитних матеріалів, пластмаси, кераміки, графіту, природного і штучного каменю (мармуру, граніту, керамограніту).

Наявність абразиву в струмені збільшує його технологічні можливості – рідинно-абразивною суспензією можна різати тверді і важкооброблювані матеріали значної товщини. Режими водоструминного різання, що здійснюється обома способами, можуть бути розширені за рахунок підведення до струменевої головки холодогенту, що сприяє утворенню в струмені крижинок, які надають йому абразивних властивостей.

При водоструминному різанні враховується і кут атаки – кут між напрямком струменя і оброблюваною поверхнею. Максимальна різальна здатність і продуктивність процесу досягаються при куті атаки в 90° .

Основні компоненти газорізального обладнання. У комплекс для водоструминного різання входять насос високого тиску; різальна головка; координатний стіл і приводи переміщень різальної головки; розводка високого тиску; система подачі абразиву (для гідроабразивного різання); система числового програмного керування. Додатково комплекс може оснащуватися пристроєм для запобігання зіткнень різальної головки з заготівкою; системою з декількох різальних головок; механічною системою попереднього просвердлювання; пасткою струменя води, що гасить її енергію і служить також для збору відпрацьованого абразиву, тощо.

Гідрорізальне обладнання має різний ступінь універсальності і автоматизації, у тому числі виготовляється і у вигляді роботизованих комплексів.

Насос високого тиску забезпечує створення надзвукового струменя рідини як різального інструменту. Розроблено універсальну принципову гідравлічну схему, де в якості підсилювача тиску використовується спеціальний мультиплікатор двосторонньої або односторонньої дії (рис. 1.16). Вибір компонування залежить від конкретних умов обробки (наприклад, від допустимої величини перепаду тиску, необхідної витрати рідини), що дозволяє досягти заданих результатів як за продуктивністю, так і за якістю. Крім того, використовуються

стандартні регулюючі, розподільні, контрольні та допоміжні гідравлічні пристрої.

Для обробки великогабаритних або окремо розташованих виробів в умовах заводу, порту, полігону, для виконання робіт під водою насос високого тиску може монтуватися на будь-якому транспортному засобі – електрокарі, автомобілі, судні. У цьому випадку підведення рідинного струменя до виробу, розташованого, як правило, на деякій відстані від насоса високого тиску, здійснюється за допомогою гнучкого шланга.

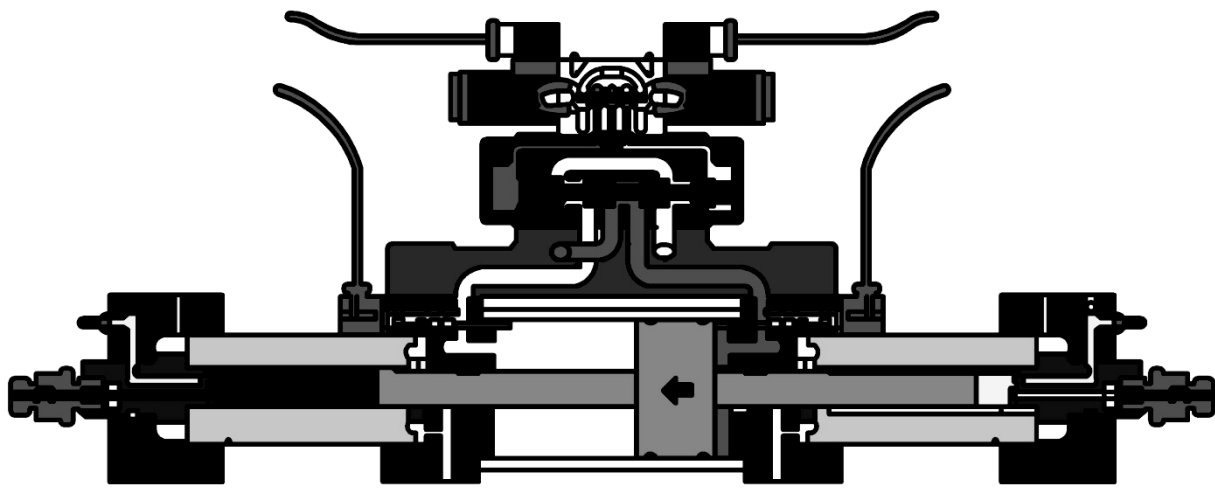


Рис. 1.16. Універсальна принципова гідравлічна схема

Різальна (струменева) головка здійснює остаточне формування високонапірного тонкого струменя як ріжучого інструменту за своїми геометричними і енергетичними параметрами. Конструктивні особливості струменевої головки (взаєморозташування деталей, характер їх з'єднання і герметизація), впливаючи на гідродинамічні характеристики і компактність формованого струменя, визначають якість і надійність її роботи.

Існує безліч конструкцій струменевих головок для гідрорізання матеріалів, що об'єктивно свідчить про різноманіття пропонованих до них експлуатаційних вимог і одночасно про відсутність оптимальних конструкцій. Наведемо таку класифікацію:

- струменеві головки з полішеними динамічними характеристиками для рідинної обробки матеріалів (забезпечені спеціальними конструктивними елементами);

- рідинно-абразивні струменеві головки. Найбільш досконалыми вважаються конструкції з вільним введенням абразиву в робочий струмінь рідини з мінімальними порушеннями їх гідродинамічних характеристик; струменеві головки з підведенням холодогенту з метою охолодження витікаючої рідини. У конструкцію введено канали для підведення холодогенту, призначеного для надання абразивних властивостей робочій рідині. Це дозволяє не тільки підсилити різальні можливості струменя за рахунок утворення крижинок у струмені, а й підвищити зносостійкість сопла завдяки утворенню замороженого шару на його поверхні;

- комбіновані соплові головки.

На рис. 1.17 показано принципові схеми різальних головок як для гідро-, так і для гідроабразивного різання.

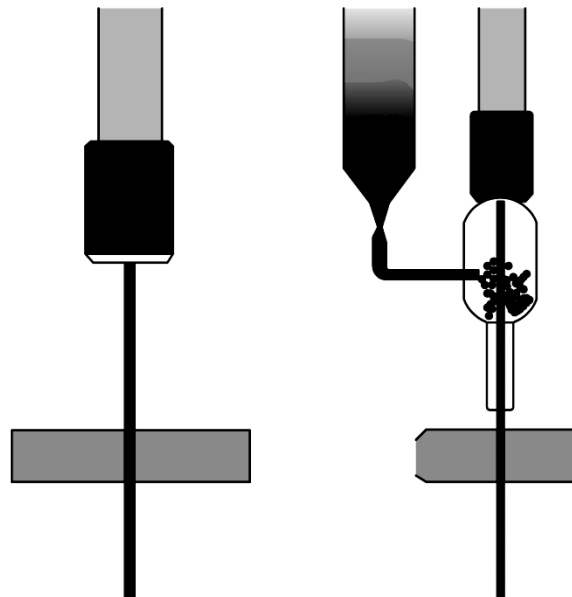


Рис. 1.17. Принципові схеми різальних головок для гідро- і для гідроабразивного різання

Опція – до чотирьох різальних головок, що працюють одночасно, – використовується в конструкції систем водоструминних установок, що випускаються практично всіма провідними світовими виробниками обладнання.

Формування надзвукового струменя рідини як різального інструменту здійснюється за допомогою сопла. Розроблено універсальну методику аналізу гідравлічних характеристик сопел

з різними профілями внутрішнього каналу. Теоретичні та експериментальні дослідження показали, що найбільш раціональним внутрішнім профілем сопла, що підвищує продуктивність водоструминної обробки різних матеріалів приблизно на 20 %, є катеноїдальний профіль.

Зазвичай сопла виготовляються зі штучних каменів – сапфіру, алмазу, корунду. Їх стійкість складає 250÷500 год. На рис. 1.18 показано різальну головку моделі Poser 3 американської компанії Flow International Corporation.

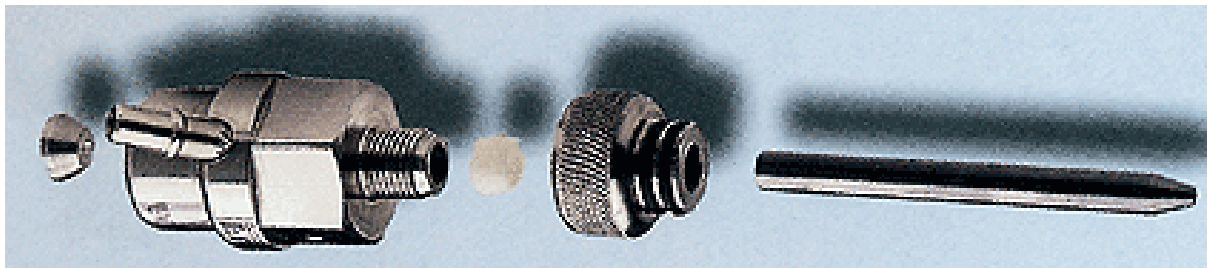


Рис. 1.18. Різальна головка моделі Poser 3

Розводка високого тиску. Вода під високим тиском подається від насоса високого тиску до різальної головки системою нерухомих і рухомих труб. Для забезпечення щільності з'єднань під час руху порталу та робочої головки використовуються спеціальні шарніри високого тиску або спіральні трубки спеціальної форми.

Система подачі абразиву. Використовуються дві системи подачі абразиву – вакуумна, що працює за принципом пульверизатора, і та, що працює під тиском. Абразив засипається в бункер, який знаходиться поруч з робочим столом, і подається до робочої головки по гнучких шлангах. У якості абразиву зазвичай використовують порошки твердих сплавів, карбідів, оксидів. Вибір абразиву залежить від виду і твердості матеріалу, розрізається. Так, для високолегованих сталей і титанових сплавів застосовують особливо тверді частинки гранату, для скла – відповідні фракції звичайного піску, для пластмас, армованих скло- або вуглецевими волокнами, частинки силікатного шлаку.

Основні переваги водоструминної обробки

1. *Нівелювання теплового впливу.* Генероване в процесі різання тепло практично миттєво уноситься водою. У результаті не відбувається помітного підвищення температури в заготівці. Ця характеристика є вирішальною при обробці особливо чутливих до нагрівання матеріалів. Невеликі сила (1÷100 Н) і температура (від +60 до +90 °С) у зоні різання виключають деформацію заготівки, оплавлення і пригорання матеріалу в прилеглій зоні. Слід зазначити, що жодна технологія, крім гідроабразивного різання, не може забезпечити відсутність термічного впливу на метал поблизу пропилу.

2. *Універсальність обробки.* Рідинно-абразивний струмінь особливо ефективний при обробці багатьох важкооброблюваних матеріалів, таких як, наприклад, титанові сплави, різні види високоміцних керамік і сталей, а також композитних матеріалів. При гідроабразивному різанні останніх не створюється розривів у структурі матеріалу, який, таким чином, зберігає свої первинні властивості. Саме за допомогою струменя води різуться різні сендвіч-конструкції.

3. *Здатність відтворювати складні контури і профілі.* При піскоструминній обробці можна відтворювати дуже складні форми або скоси під будь-яким кутом. Струмінь рідини за своїми технічними можливостями наближається до ідеального точкового інструменту, що дозволяє обробляти складний профіль з будь-яким радіусом закруглення, оскільки ширина зрізу становить 1,0÷3,0 мм. При різанні крихкого матеріалу – скла – гідроабразивна обробка дозволяє створювати неповторні іншими технологіями форми і контури; хоча водоструминна технологія і поступається алмазу, коли робляться прямі зрізи скла, зате жодна інша технологія не дозволяє отримувати складні контури безпосередньо в процесі різання.

4. *Хороша якість поверхні.* Можна отримувати фінішну поверхню з шорсткістю Ra 0,5÷1,5 мкм, тобто в багатьох випадках відпадає необхідність у додатковій обробці.

5. *Технологічність процесу.* Інструмент різання (струмінь води або вода плюс абразив) не потребує переточування; ударне навантаження на виріб мінімальне, відсутня зворотна реакція на різальний інструмент, оскільки між виробом і інструментом немає

безпосереднього контакту; різні операції (наприклад, свердління і різання) можна виконувати одним і тим самим інструментом; низьке тангенціальне зусилля на деталь дозволяє в ряді випадків обійтися без затискання цієї деталі; існує можливість різання на відстані близько 200 м від насоса, а також можливість різання від одного насоса високого тиску одночасно двома і більше різальними головками на одному столі або кількома головками на різних столах; різання можна здійснювати на висоті і на глибині до декількох сотень метрів, у тому числі і під водою.

6. *Економічність процесу.* Швидкість різання – висока. Швидкості різання різних матеріалів залежать від багатьох чинників, середні значення цих швидкостей для різних матеріалів наведено в табл. 1.1. Різання можна починати в будь-якій точці заготовки і при цьому не потрібно попередньо робити отвір. Мала ширина зрізу дозволяє економити дефіцитні матеріали при їх розкрої. Середнє споживання води в абразивно-рідинному різальному пристрої невелика – близько 3÷4 л/хв, незважаючи на високий тиск використання (400 МПа і більше).

7. *Автоматизація процесу.* Досить легко використовувати системи комп'ютерного керування, оптичні слідкуючі пристрої та повномасштабних шестикоординатних роботів.

8. *Доступність.* Використання таких відносно недорогих компонентів, як вода і, наприклад, кварцовий пісок у якості абразиву, робить процес доступним.

9. *Безпека.* Оскільки нема тепла, що накопичується при абразивно-рідинній струменевій обробці, процес є вибухо- і пожежобезпечним. Відсутні радіаційне випромінювання, небезпека вильоту шлакових або дрібнодисперсних частинок. Пил, що переноситься повітрям, фактично усунений. Рівень шуму коливається в межах 85÷95 дБ.

Таблиця 1.1

Швидкість водоструминного різання, м/хв

Найменування матеріалу	Товщина матеріалу, мм				
	5	10	20	50	100
Мармур	4,5÷6,0	2,0÷2,7	0,9÷1,2	0,3÷0,45	0,1÷0,15
Граніт	3,2÷4,0	1,5÷1,8	0,7÷0,8	0,2÷0,3	0,06÷0,1
Скло	5,8÷6,5	2,5÷3,0	1,1÷1,4	0,35÷0,5	0,1÷0,16
Алюміній	2,1÷2,8	1,0÷1,2	0,4÷0,5	0,12÷0,2	0,04÷0,07
Титан	1,0÷1,3	0,5÷0,6	0,2÷0,3	0,07÷0,1	0,01÷0,03
Нержавіюча сталь	0,7÷1,2	0,3÷0,5	0,12÷0,22	0,04÷0,07	0,01÷0,25

Недоліки водоструминної обробки. До недоліків технології гідрорізання можна віднести конструктивні труднощі, що виникають при створенні високого тиску рідини, досить низьку стійкість сопла і складність його виготовлення. Чинниками, що стримують практичне впровадження водоструминної техніки на підприємствах, є:

- висока енергоємність порівняно з рядом інших типів різання;
- невідповідність реальних характеристик заявленим (наприклад, менша швидкість струменя, що не дозволяє виконувати процес різання певних матеріалів);
- відсутність у деяких потенційних споживачів необхідного масштабу виробництва, що робить установку гідрорізального обладнання нерентабельною;
- досить висока вартість порівняно з іншим (наприклад, електромеханічним) обладнанням для різання.

Сфери застосування. За допомогою водоструминного різання (гідроабразивне різання і гідрорізання) можуть оброблятися практично всі матеріали: папір і картон, тканини, шкіра та гума, скло і кераміка, граніт і мармур, бетон і залізобетон, всі види полімерних матеріалів, у тому числі композиційні, фольговані і металізовані пластики, всі види металів і сплавів, включаючи важкооброблювані – нержавіючі і жароміцні сталі, тверді і титанові сплави.

Гідроабразивне різання:

- різання скла: скло – один з найбільш цікавих матеріалів для застосування гідроабразивного різання. Навіть при добре

відомих труднощах, через крихкість матеріалу, гідроабразивне різання дозволяє створювати неймовірні форми і контури. Ця технологія застосовується у сфері меблевих компонентів, тому що вона дозволяє вирізати навіть дуже складні контури. Сфера застосування, де гідроабразивне різання є абсолютним лідером, це різання спеціального скла, як наприклад, багатошарового армованого скла;

- різання металу: гідроабразивне різання пропонує величезну перевагу, що полягає в тому, що воно не змінює матеріал термічно поблизу пропилю; ніякі інші інноваційні технології такого рівня, як лазерне різання, не мають цієї властивості;

- різання каменю (різання граніту і мармуру), різання скла і різання плитки. У цій сфері водоструминне різання часто використовується для виробництва складних контурів з плоских плит. Завдяки дуже вузькому пропилю можна створювати інкрустації для виробництва декоративних та оздоблювальних матеріалів. Перш за все промисловим способом можна робити те, що раніше могло бути зроблено тільки за допомогою техніки оператора;

- різання композитних матеріалів: гідроабразивне різання не створює розривів у структурі матеріалу, який, таким чином, зберігає свої властивості. Так що зараз водоструминне різання – це єдино можливе рішення для різання деяких з цих матеріалів.

Різання водою (без застосування абразиву – *гідрорізання*):

- шкіряна і взуттєва промисловість (різання підошов, передків черевик і т. д.);

- різання паперу, картону, тканин;

- електронна промисловість: різання електронних плат для кіл (застосування водоструминного різання дозволило досягти розміру пропилю до 0,1 мм і забезпечити відсутність пилу, що зробило технологію різання водою переможцем у цій сфері). Застосування технології гідрорізання також знизило проблему розшарування матеріалу;

- автомобільна промисловість: різання фальш-стель, килимків і приладових дощечок, бамперів з пластика та ін. Оскільки складна форма цих виробів створюється з застосуванням високих температур, обрізання їх контуру здійснюється за допомогою

різальної головки з 6-ма ступенями свободи, які дозволяють головці виконати складний контур різання;

- харчова промисловість, особливо різання продуктів глибокої заморозки, різних видів твердих харчових продуктів, шоколаду.

Найбільше застосування гідроабразивне різання і гідрорізання знаходить у таких галузях промисловості:

- житлове і промислове будівництво – мозаїка, плити, плитка, тверда бруківка, бетон, гіпсові блоки, ізоляційні матеріали, мінеральні волокна, різання бетонних конструкцій для їх подальшого демонтажу, розчищення швів і т. д. Гідроабразивне різання часто використовується для виробництва складних контурів у мрамурі та граніті (вузький пропил дозволяє створювати інкрустації при виготовленні декору);

- каменеобробна промисловість;

- скляна промисловість – композиційне скло, армоване скло, оргскло;

- металолістове виробництво;

- виробництво обладнання – шестерні, виливки, компоненти, зроблені з високоякісної сталі, міді, алюмінію, титану і корозійностійких металів;

- авіабудівна і аерокосмічна промисловість – сплави алюмінію, титану, на хромо-нікель-кобальтовій основі, а також композитні матеріали, що використовуються для комплектуючих літаків і двигунів;

- транспорт – внутрішня обшивка, виконана з композитних матеріалів, диспетчерські щити, пластикова обшивка, захисне покриття, дзеркала заднього виду, прокладки;

- оборонна промисловість – утилізація застарілих зразків озброєнь (розрізання корпусів ракет, бойової техніки, суден і підводних човнів), розрізування корпусів снарядів і вимивання вибухових речовин;

- гумотехнічна промисловість;

- деревообробна промисловість – ламіновані дерев'яні панелі, шпон, тверда деревина;

- промисловість з виробництва пластмас;

- текстильна промисловість – картон, папір для друку, гофрований картон;

- обробка композиційних матеріалів;
- електропромисловість – слюда, целюлоза, композитна смола, друковані плати;
- харчова промисловість – випечені вироби, фрукти, швидкозаморожені продукти і риба.

На рис. 1.19 наведено приклади використання водоструминного різання для отримання виробів.

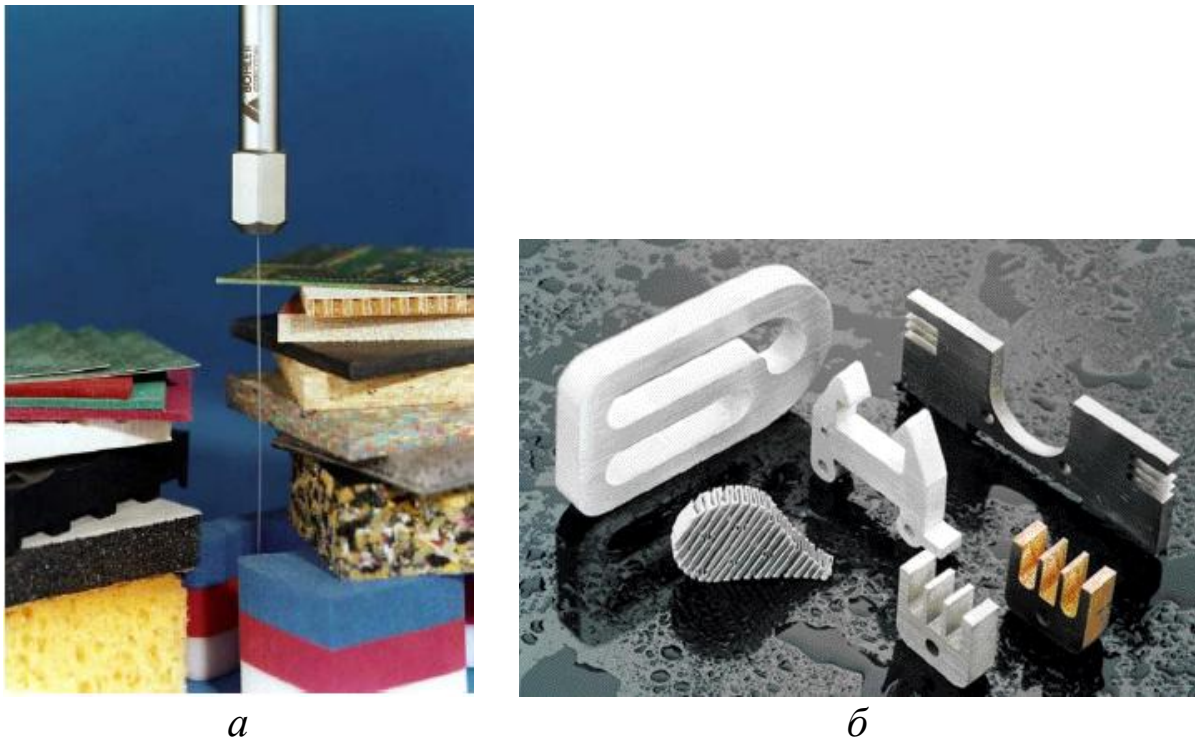


Рис. 1.19. Приклади використання водоструминного різання:
а – різні матеріали, які розрізаються за допомогою струменя чистої води; *б* – технічні деталі (різання струменем води з абразивом)

Ці приклади демонструють лише частину нескінченно широкого діапазону застосування технології водоструминного різання (гідроабразивного різання і гідрорізання), найбільш універсального серед існуючих методів обробки різанням.

1.11. Нанесення покриттів нітриду титану

Технології та обладнання синтезу покриттів нітриду титану добре освоєні промисловістю. Процеси їх синтезу екологічно чисті. Покриття хімічно інертні відносно чинників навколишнього середовища. Наприклад, їх застосування в якості зміцнювальних і декоративних покриттів економічно обґрунтоване. Сформувався цілий галузі в промисловості на основі практичного використання покриттів нітриду титану, а також нові наукові напрями за фізико-технологічними дослідженнями.

Нітрид титану – бінарна хімічна сполука титану з азотом. Ця сполука є *тугоплавкою фазою впровадження* (ТФВ) з широкою областю гомогенності. Специфіка нітриду титану, як і інших ТФВ на основі подвійних і потрійних нітридів і карбідів перехідних металів IVA і VA підгруп періодичної таблиці елементів, полягає в тому, що область гомогенності не збігається зі стехіометричним складом. Інша особливість всіх кристалічних ТФВ пов'язана з тим, що точний стехіометричний склад є скоріше винятком, ніж правилом. При синтезі нітриду титану будь-яким відомим способом спостерігаються значні відхилення від стехіометрії. Таким чином, широко використовуваний на практиці кристалічний нітрид титану у всіх станах (порошкоподібному, плівковому, у вигляді покриттів, монолітному) є практично завжди нестехіометричним.

Найбільшу популярність отримали покриття і плівки нітриду титану з обов'язковим дефіцитом по азоту. Після вивчення особливостей синтезу і властивостей, покриття нітриду титану можна сказати, що воно є світовим лідером за кількістю публікацій серед всіх ТФВ. Найпривабливішою властивістю нітриду титану є його висока твердість.

В історичному аспекті варто згадати, що перша індустріальна технологія синтезу високотвердих покриттів нітриду титану вакуумно-дуговим осадженням була розроблена в 70-х рр. XX ст. в СРСР. Організацією, що здійснила цю розробку, став Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут». Трудова біографія покриттів нітриду титану почалася зі зміцнення поверхні металорізального інструменту.

Вона ж започаткувала нову науково-технічну революцію в обробці металів різанням. Поняття «інструмент з покриттям» у всіх виробників асоціюється з золотистим кольором покриттів нітриду титану, осадженого на поверхню різального інструменту. Вражаюча твердість покриттів нітриду титану на рівні 69 ГПа була вже досягнута до кінця 1980-х рр. Нестримне заповнення нітридом титану ринку зміцнювальних покриттів, здавалося, ніщо не зупинить. Однак обмежувальним чинником для повномасштабного використання цих покриттів як зв'язуючих виявилася низька стійкість проти окиснення атмосферним киснем.

Різальна кромка інструменту в процесі різання металу може нагріватися до температур, достатніх для окисного зносу нітриду титану. Для боротьби з цим явищем було запропоновано легувати ці покриття алюмінієм (рис. 1.20). Позитивний ефект був досягнутий. З цієї причини покриття нітриду титаналюмінію (Ti, Al)N стали першою комерціалізованою альтернативою, що стала вже «класикою», покриттям нітриду титану. Був також виявлений приріст твердості і зниження коефіцієнта тертя при легуванні покриття нітриду титану вуглецем Ti(C, N). Покриття карбонітриду титану, також як альтернативні нітриду титану, почали займати свою ринкову нішу.

За наступні двадцять п'ять років були синтезовані покриття на основі інших перехідних металів: нітрид хрому (CrN), нітрид цирконію, нітрид ванадію, нітрид ніобію та ін. Масове застосування таких моношарових покриттів виділило їх у категорію універсальних. Незважаючи на обмежений перелік використовуваних універсальних високотвердих покриттів, у промисловості в умовах масового виробництва інструментів подібна ситуація влаштовувала всіх учасників ринку. Десятки компаній у всьому світі освоювали виробництво однотипного вакуумно-дугового обладнання для нанесення зміцнювальних покриттів нітриду титану.

Отже, до 1990 р. було лише одне по-справжньому комерційне зміцнювальне моношарове PVD-покриття – нітрид титану. Сформована ситуація на ринку інструменту почала докорінно змінюватися в перші роки нового тисячоліття.

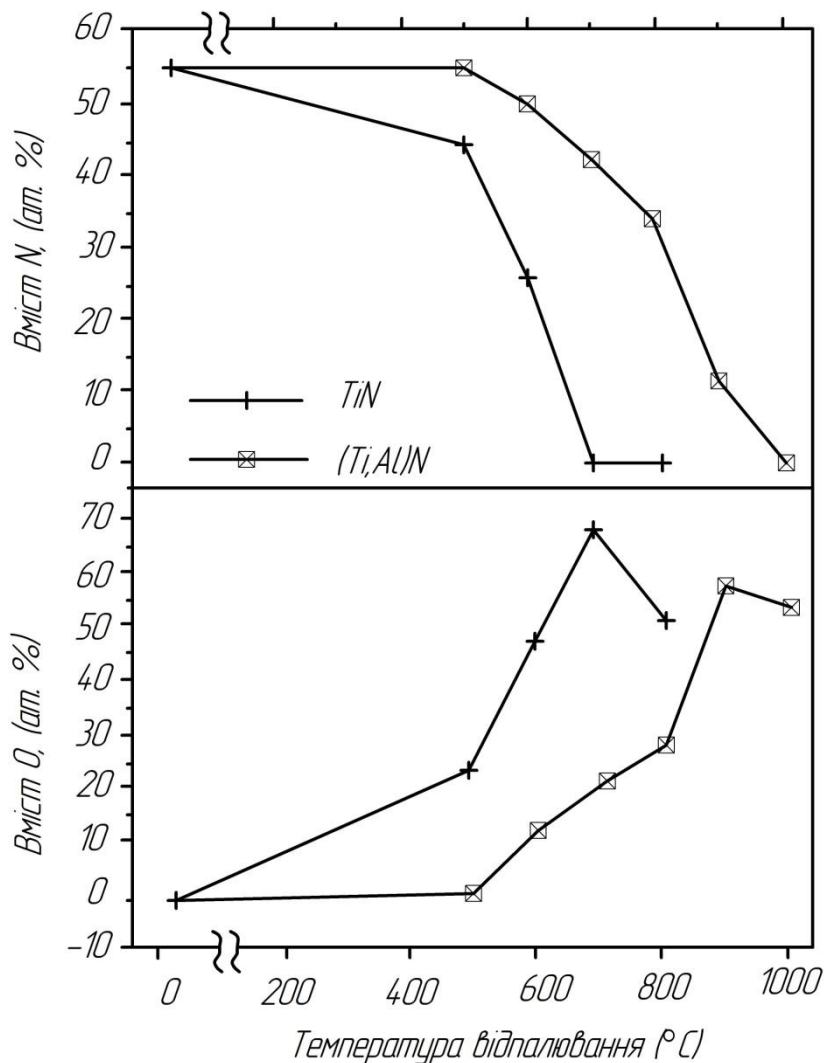


Рис. 1.20. Вміст азоту (а) і кисню (б) в покриттях TiN і (Ti, Al)N, що пройшли відпал при різних температурах (дані, що відповідають 25 °С, відносяться до свіжоосаджених покриттів, що не пройшли термообробку)

Споживачі, які накопичили великий досвід роботи з високотвердими покриттями, усвідомили, що в ряді випадків краще відмовитися від універсальних покриттів і почати використовувати покриття, спеціально призначені для вирішення конкретних завдань. Крім того, машинобудування почало освоювати для синтезу зміцнювальних покриттів спосіб магнетронного розпилення. Тому виник новий ринковий сегмент з використанням дрібно- і середньосерійного інструменту зі спеціальними зміцнювальними покриттями. Кількість таких покриттів вибухоподібно зростає за останні п'ятнадцять років (рис. 1.21).

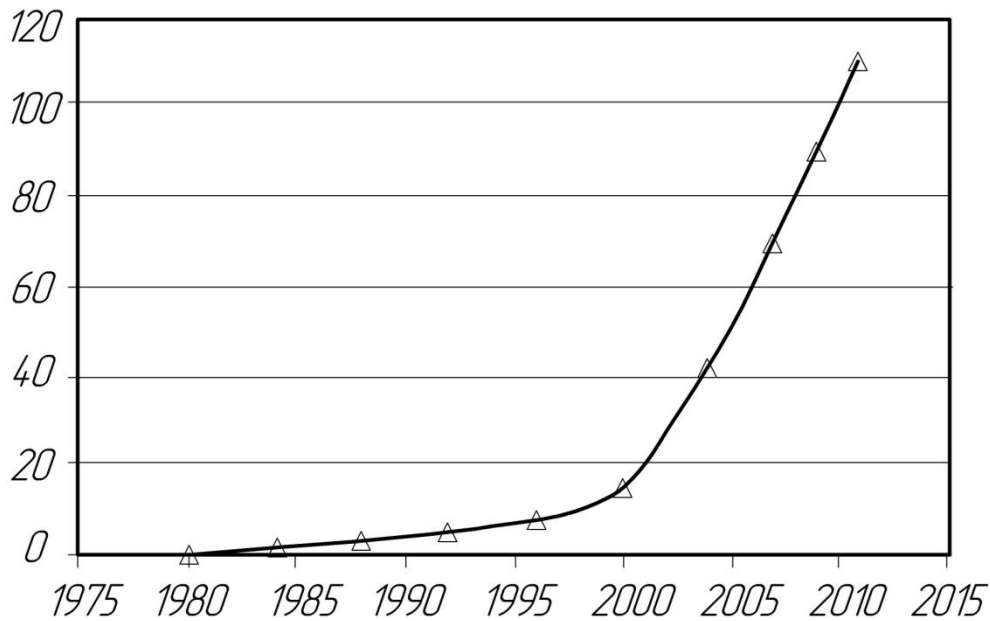


Рис. 1.21. Кількість видів зміцнювальних покриттів, доступних на інструментальному ринку протягом останніх сорока років

Новий клас покриттів – це надтверді багатокомпонентні наноструктурні покриття, які на сьогоднішній день синтезуються на основі нітридів і карбідів титану, цирконію, хрому, ванадію, молібдену, алюмінію, кремнію та ін.

Нові покриття стали не тільки багатокомпонентними і наноструктурними, але і багат шаровими, градієнтними, наношаруватими, нанокомпозитними та ін. Введення в промисловий оборот великої кількості нових видів покриттів спричинило інтенсивні технологічні дослідження в системах покриття-інструмент. Тому на сьогоднішній день не з усіх питань і явищ досягнуто розуміння на належному науковому рівні. У першу чергу це пов'язано з тим, що процеси механічної обробки самі по собі досить складні. У зв'язку з цим йде накопичення великого обсягу емпіричної інформації при сильному відставанні фундаментальних досліджень у цій сфері.

Наноструктурні покриття можна якісно охарактеризувати так. Наноструктура вважається одним з фазових станів твердого тіла разом з аморфним, грубозернистим кристалічним і монокристалічним. Наноструктурні покриття не є просто полікристалічними покриттями з ультрадисперсними розмірами зерен. Властивості наноструктурних покриттів відрізняються від властивостей мікроструктурних покриттів такого самого складу.

Міжзернові границі нанокристалічної структури є двовимірними дефектами цієї структури. Щільність границь може досягати 10^{19} см³. Саме висока щільність міжзернових границь трансформує мікрокристалічну структуру в новий тип структури – наноструктуру. Щоб отримати наноструктурний стан (середній розмір зерен, товщина шарів і т. д.), розмірність структурних елементів повинна знаходитися в наномасштабному діапазоні (менш ніж 100 нм). Виходячи з геометричних розмірів, за новим визначенням, Єврокомісія рекомендує вживати приставку «нано» до матеріалів (природного і штучного походження), які містять частинки у вільному вигляді, у вигляді груп або агломератів (тобто частки, зв'язані якимось стороннім матеріалом), як мінімум, 50 %, з яких має один з лінійних розмірів у межах від 1 до 100 нм. Геометричний розмір частинок не несе жодного фізичного або хімічного навантаження без прив'язки до конкретного матеріалу.

Перехід з мікрокристалічного стану в наноструктурний стан поки не вважають фазовим переходом. Розмірні ефекти на всіх властивостях проявляються поступово і поступово наростають зі зменшенням розміру зерен у покриттях. Проте всі без винятку експериментальні дослідження виконані на покриттях із значною дисперсією розмірів зерен. Цілком природно припустити, що дисперсія розмірів зерен повинна розмивати фазовий перехід, якщо такий є. Експерименти з виявлення розмірного ефекту, пов'язаного з фазовим переходом у тугоплавких фазах впровадження, які можна було провести на покриттях однакового хімічного, але різного гранулометричного складу, в найближчій перспективі не очікуються через неможливість їх синтезу.

Структурний елемент багатошарового або наносферового покриття складається з переміжних шарів у межах наномасштабної товщини кожного шару. Товщина шарів кожного з двох матеріалів не перевищує декількох десятків нанометрів. Як правило, такі наносферуваті композити є двофазними на основі бінарних нітридів або карбідів. Хоча ці системи можуть бути і багатокомпонентними. Найбільші успіхи досягнуті у сфері синтезу нанокомпозитних зміцнювальних покриттів. Найбільше за все досліджено надтверді нанокомпозитні системи: nc-TiN/a-Si₃N₄ (де nc означає нанокристалічний, а – рентгеноструктурно-

аморфний). Вперше до промислового застосування ці покриття довела компанія Hitachi Tool Engineering, Ltd. Вона використовувала для цих цілей спеціальну вакуумно-дугову установку з планарними катодами. Ряд властивостей нанокompозитів цієї системи, зокрема стійкість до окиснення, були поліпшені шляхом легування алюмінієм. Промисловістю починають освоюватися покриття елементного і фазового складу відповідної $nc-(Ti_{1-x}Al_x)N/a-Si_3N_4$.

Зміни, що відбулися на ринку зміцнювальних покриттів, звузили сферу використання нітриду титану як самостійного матеріалу. Самі дослідники, а також численні експерти стали відносити ці покриття до категорії «старомодних». У цій думці є частка істини, якщо враховувати ринкові перспективи покриттів нітриду титану тільки стосовно різального інструменту.

Перехід на наноструктурний рівень організації матеріалів дав поштовх до розвитку досліджень універсальних моношарових ($TiCN$, $TiAlN$, $AlTiN$, CrN та інші покриття) і вже широко поширених покриттів нітриду титану. Насамперед слід зазначити технологію нового покоління на основі пульсуючої плазми. Ця технологія дозволяє синтезувати надтверді наноструктурні покриття кубічного нітриду титану сильно нестехіометричного складу: $nc-TiNy_{\square}1-y$ (де nc – нанокристалічний стан, \square – структурна вакансія, y – вміст азоту, $1-y$ – концентрація структурних вакансій у підґратках азоту). Наноструктурні надтверді покриття нестехіометричного нітриду титану можна вже розглядати як покриття спеціального типу для експлуатації при температурах нижче температури відпускання більшості марок конструкційних сталей. Вони мають безальтернативну перспективу, наприклад для зміцнення інструменту холодного штампування, через свою економічність порівняно з іншими видами покриттів. Це стабільна ринкова ніша, у якій зміцнювальні покриття нітриду титану збережуть свою присутність.

Інший могутній напрямок – використання наноструктурного нітриду титану в нанокompозитних ($nc-TiN/a-Si_3N_4$) і наношаруватих (TiN/Ti , $TiN/TiAlN$, TiN/CrN та ін.) покриттях у якості структурних складових. Таким чином, можна стверджувати про зростаючу роль і значення нітриду титану в

наноструктурному матеріалознавстві зміцнювальних надтвердих покриттів.

Крім високої твердості, нітрид титану у вигляді моношарових покриттів має ще цілий набір заслужовуючих на увагу властивостей, які проявляються в ньому комбіновано. Тому його плівки і покриття демонструють поліфункціональні властивості. Конку rentів у цій ніші в нітриду титану практично нема. Отже, ринкові перспективи покриттів і плівок нітриду титану видаються дуже оптимістичними, якщо підходити до їх оцінки з урахуванням виявлених можливостей.

1.12. Тенденції розвитку технологій з'єднання матеріалів

Загальні тенденції при виготовленні технічної продукції. При виготовленні технічної продукції слід враховувати шість основних тенденцій: використання різноманіття матеріалів при конструюванні виробів, безперервне розширення номенклатури нових матеріалів, зростання автоматизації виробництва, розширення можливостей комп'ютерного моделювання, зростання вимог до ремонтпридатності виробів і можливості їх ефективної переробки (утилізації). З приводу кожної тенденції можна сформулювати такі зауваження.

1. Сучасна технічна продукція, така як інвестиційні товари (наприклад, будівельні конструкції, всі види транспортних засобів, установки і машини) або товари щоденного користування (побутові електроприлади, меблі та електронні пристрої) все частіше розробляються і виготовляються з безлічі різних матеріалів таким чином, щоб максимально поєднувати експлуатаційні характеристики та економічність. У результаті відповідного підбирання різні матеріали (у монолітному вигляді або в якості композитів) сьогодні використовуються не тільки в складі всього виробу, але також і в конструкції компонентів або окремих вузлів. Це можливо тільки в тому випадку, якщо застосовані матеріали можна з'єднати один з одним таким чином, щоб виконувалися всі експлуатаційні вимоги до цих сполук (міцність, в'язкість, корозійна стійкість і т. д.). Наприклад, в автомобілебудуванні використовуються такі матеріали, як сталь, алюміній, магній і пластик. У кузовах сучасних автомобілів (до

фарбування) застосовуються такі методи з'єднання: клейові шви, заклепувальні з'єднання, точкове зварювання, електрозварювання, лазерне зварювання і паяння. Все ширше використовуються спеціальні деталі, виконані з'єднанням різних листових матеріалів різної товщини з різними поверхневими покриттями.

2. На сьогодні матеріалами, використовуваними для виготовлення технічної продукції, є метали (зокрема чорні метали, а також сплави з алюмінію, магнію або титану для легких металевих конструкцій, нікелеві сплави для жаростійких або корозійностійких компонентів, мідь і її сплави для електричних компонентів, теплообмінників і т. д.), природні матеріали і пластмаси. Заслужують на увагу і розробки в галузі виробництва сталей підвищеної і надвисокої міцності. Однак для цих матеріалів необхідно розробляти відповідні зварювальні процеси і присадні матеріали, а також шляхом довгострокових випробувань доводити їх здатність витримувати тривалі навантаження. Подібні тенденції спостерігаються і у сфері пластмас. Наприклад, поєднання текстильних волокон з бетоном, волокон або наночастинок з пластмасами дозволяє отримувати якісно нові матеріали. Інтегрування їх у компоненти ставить завдання створення абсолютно нових технологій отримання з'єднань.

3. Одним з важливих аспектів виробництва є підвищення вимог до механізації або (що ще краще) автоматизації операцій отримання з'єднань для мінімізації вартості виготовлення. Це стосується не тільки традиційних процесів з'єднання (дугове зварювання, низько- і високотемпературне паяння і склеювання), але також і знов розроблених процесів (гібридні процеси, зварювання тертям з перемішуванням, лазерне і електроннопроменеве зварювання). З огляду на зростання зарплат, брак кваліфікованих кадрів, прагнення до зниження собівартості виробів методи механізації-автоматизації використовуються все частіше, особливо в промислово розвинених країнах. Дана тенденція буде зберігатися, а з огляду на науково-технічний прогрес застосування автоматизованих і роботизованих систем слід очікувати навіть у дрібносерійному і одиничному виробництві.

4. Протягом останніх років завдяки підвищенню потужності комп'ютерів і вдосконаленню математичного забезпечення можливості моделювання різних виробничих процесів значно розширювалися. Комп'ютерний супровід виробництва набуває все більшої важливості, зокрема дозволяючи прогнозувати експлуатаційні характеристики деталей (виробів), виготовлених з нових матеріалів, що в свою чергу стрімко розширює їх доступність і сфери застосування.

5. При розробленні нових матеріалів, відповідних процесів з'єднання і розрахунку вузлів (компонентів) необхідно враховувати можливість ремонту на самому ранньому етапі експлуатації виробу. Така необхідність може виникнути, якщо деталь виявляється дефектною при виготовленні, застосовується неправильно або довше, ніж передбачено ресурсом, а також якщо деталь виявляється пошкодженою через недосконалу конструкцію. З причин, пов'язаних з вартістю і проблемами захисту навколишнього середовища, такі деталі відразу ж повинні відправлятися на утилізацію. Хоча за наявності відповідних технологій несправні деталі часто можна знову зробити придатними до експлуатації.

6. Незважаючи на те, що сьогодні в більшості випадків економічно вигідніше замінити дефектну або пошкоджену деталь, ніж її відремонтувати, слід зазначити, що ця практика суперечить всім стратегіям збереження ресурсів.

Технології отримання з'єднань

Дугове зварювання металевим електродом є одним з найстаріших процесів зварювання разом з газовим зварюванням плавленням. Зварювання ручним електродом було вперше застосоване на початку ХХ ст., проте навіть сьогодні цей процес, як і раніше, є найбільш широко застосовуваним. Присадні матеріали є майже для всіх зварювальних металевих матеріалів і навіть для нових матеріалів вони можуть бути розроблені досить швидко. Оскільки цей процес практично не залежить ні від положення, у якому виконується зварювання, ні від умов навколишнього середовища, він залишається незамінним для збирання і ремонту. Недоліки дугового зварювання пов'язані зі складністю механізації процесу і з екологічними проблемами, що

змушує вживати особливих заходів для захисту здоров'я зварювальника. При серійному і масовому виробництві цей вид зварювання витісняється більш ефективними і екологічними процесами.

Можна стверджувати, що кількість витрачених присадних матеріалів, як і раніше, є характерним показником інтенсивності застосування способів зварювання. В останні роки частка зварювання ручними електродами постійно знижувалася, перш за все у всіх промислових країнах. Однак слід також зауважити, що використовується все більше способів, при яких застосовується мало присадних матеріалів або вони не застосовуються взагалі.

Іншими, широко вживаними процесами дугового зварювання металевим електродом є дугове зварювання електродом, що плавиться, у захисних газах, дугове зварювання під флюсом, дугове зварювання вольфрамовим електродом в інертних газах і плазмове зварювання.

Дугове зварювання електродом, що плавиться, у захисних газах використовується в якості напівмеханізованого, повністю механізованого або автоматичного процесу. Внаслідок модуляції електричного струму цей процес може бути адаптований до відповідних спеціальних вимог, які висувають до з'єднаних матеріалів, положення зварювання і т. д.

Останнім часом увагу фахівців привернули розробки, пов'язані з контрольованим енерговнеском, такі як «холодна» дуга або перенесення холодного металу. Ці процеси забезпечують контроль перенесення металу при зварюванні короткою дугою за рахунок зниження струму на етапі короткого замикання (рис. 1.22) або шляхом відведення дроту під час або відразу після перенесення металу (рис. 1.23). Ці розробки дозволяють виконувати зварювання з дуже низьким розбризкуванням, а також зварювання матеріалів, які витримують лише низький тепловнесок, таких як надміцні сталі або сталі з поверхневим покриттям (ці процеси також придатні для дугового паяння металевим електродом особливим способом).

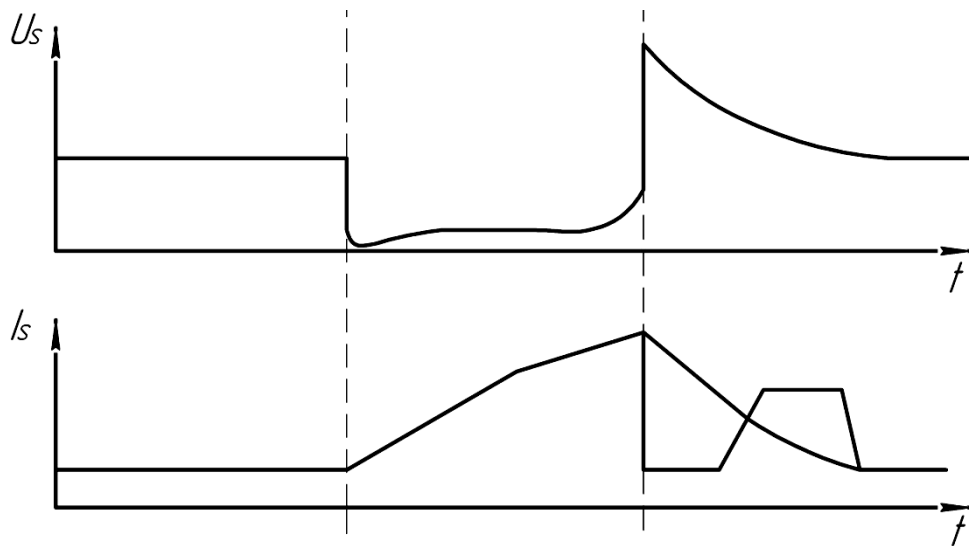


Рис. 1.22. «Електричний» принцип технології «холодної» дуги

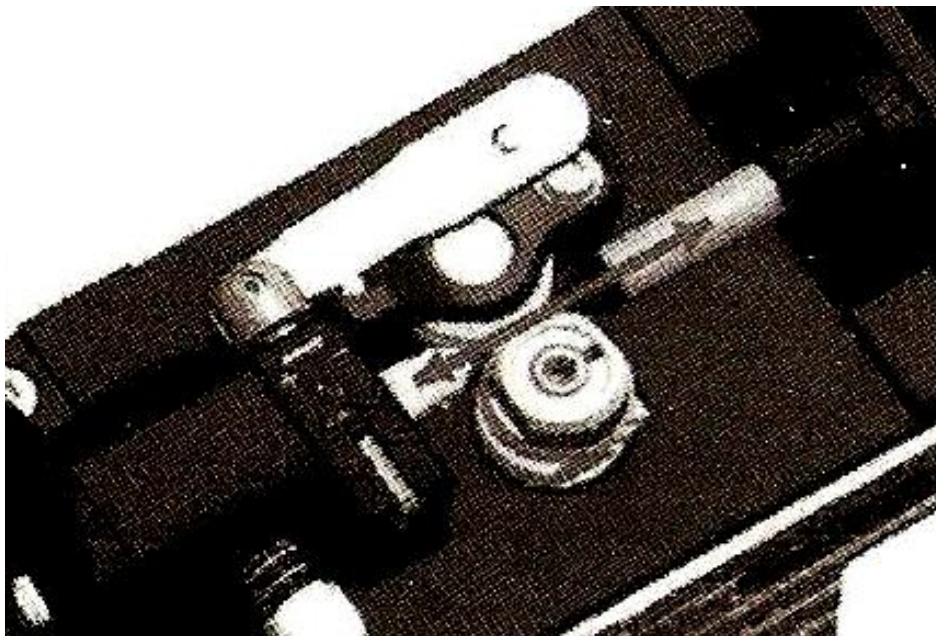


Рис. 1.23. Принцип поступально-поворотного переміщення електродного дроту

Лазерне та електронно-променеве зварювання. За останні роки променеві процеси отримали надзвичайний розвиток і використовуються в багатьох галузях машинобудування. Обидва процеси особливо придатні для використання в умовах повної механізації або автоматизації. До переваг електронно-променевого зварювання належить дуже висока щільність енергії і, таким чином, низький тепловнесок навіть у разі швів великої товщини (до 250 мм і вище). Великі вакуумні камери (до 630 м³)

дозволяють виконувати зварювання навіть компонентів машин великого розміру (рис. 1.24). Можливість розщеплення променя дозволяє виконувати кілька швів на одному компоненті одночасно. Слід зазначити, що є також і безвакуумні електронно-променеві методи, які знаходять все більш широке застосування в промисловості.



Рис. 1.24. Вакуумна камера для електронно-променевого зварювання великих виробів

Лазерне зварювання має ту величезну перевагу, що його можна використовувати поза вакуумом, але тільки в діапазоні товщини матеріалів до 20 мм. Це робить процес особливо придатним для виготовлення заготовок прецизійного розкрою зі сталей різної якості і матеріалів різної товщини. Ще однією перевагою, як і в випадку електронно-променевого зварювання, є низький тепловнесок у результаті високої щільності енергії. За наявності дистанційного керування можна використовувати ефект лазерного променя навіть на великій відстані між джерелом променя і положенням зварювання (до 500 мм), що в майбутньому буде все ширше застосовуватися в автомобілебудуванні (рис. 1.25).

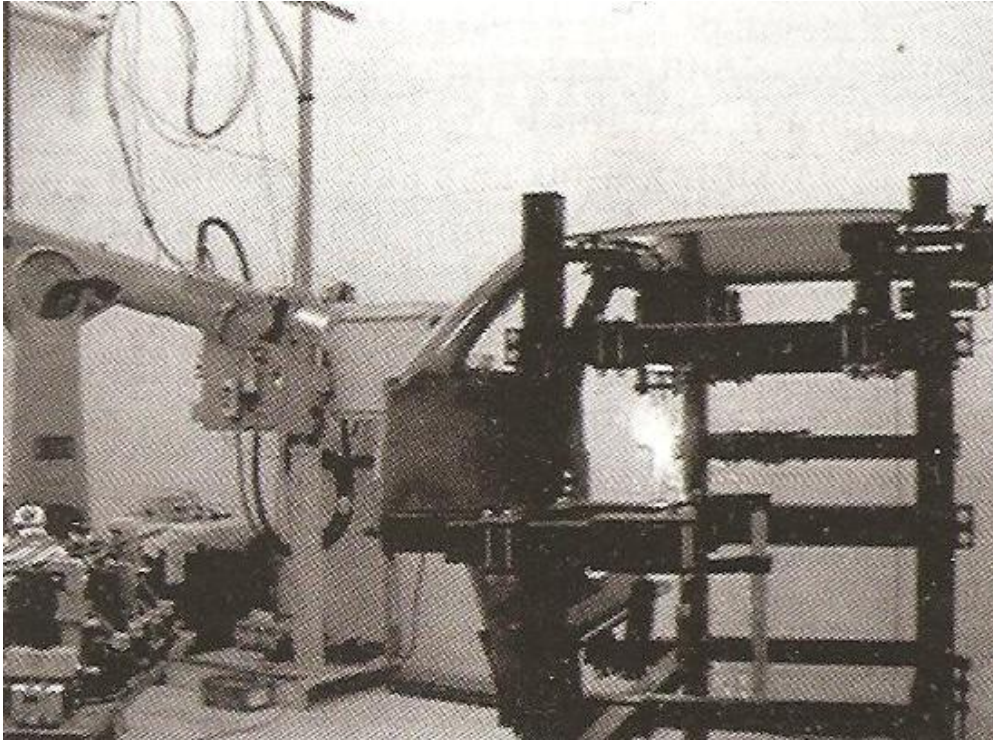


Рис. 1.25. Лазерне зварювання з дистанційним керуванням

При виконанні відповідних вимог (щодо світлопоглинання) лазерне зварювання може бути використане і при обробці пластмас.

Зварювання тертям і опором. В останні роки з'явилися ряд нових розробок, пов'язаних з процесами зварювання тертям і опором. У разі зварювання тертям нові розробки в галузі технології машин привели до використання бокового переміщення деталей, що зварюються, одна відносно одної, так що його можна використовувати для з'єднання великих перерізів, які не є симетричними при обертанні. Одним з особливих варіантів зварювання тертям є зварювання тертям з перемішуванням, яке, однак, зараз на практиці використовується виключно для алюмінію і його сплавів. Застосування методу для зварювання інших матеріалів (зокрема, сталі) проблематично у зв'язку з низькою стабільністю обертових інструментів (рис. 1.26).

Основною перевагою цих процесів є те, що зварювання виконується при температурах нижче температури плавлення матеріалу, що призводить тільки до невеликих металургійних змін у з'єднуваних основних матеріалах.



Рис. 1.26. Робочий інструмент для зварювання сталевих труб тертям з перемішуванням

Великі зусилля, які необхідно прикладати до виробів, є недоліком, і вимагають застосування дуже міцної оснастки. Зварювання тертям з перемішуванням використовується не тільки при будівництві рейкового транспорту і в аерокосмічній промисловості, але і для герметичної вварювання кришок у деталі гідравлічних керуючих пристроїв.

У галузі технологій зварювання опором ніяких особливих проривів останнім часом не спостерігалось. Тут постійно вдосконалюється обладнання, пристрої керування, включаючи комп'ютерні засоби, що робить різні варіанти цього процесу (стикове зварювання оплавленням, приварювання шпильок і т. д.) ще більш надійними.

Гібридні процеси зварювання. На сьогодні вже досягнуто серйозні успіхи щодо розроблення поєднань різних процесів зварювання, можна очікувати і подальших нововведень.

Поєднання дугового зварювання металевим електродом з лазерним зварюванням було впроваджено в практику особливо швидко (судно- і автомобілебудування). Це поєднання процесів (рис. 1.27) призводить до ідеального використання відповідних переваг – високої щільності енергії, глибокого проплавлення і високої швидкості зварювання за рахунок лазера, а також хорошої здатності закриття зазора і невеликої кількості несплавлень. За допомогою даного гібридного процесу можна

зварювати деталі більшої товщини, ніж при кожному процесі окремо, одне це виправдовує всі зусилля на розроблення і впровадження гібридних методів.

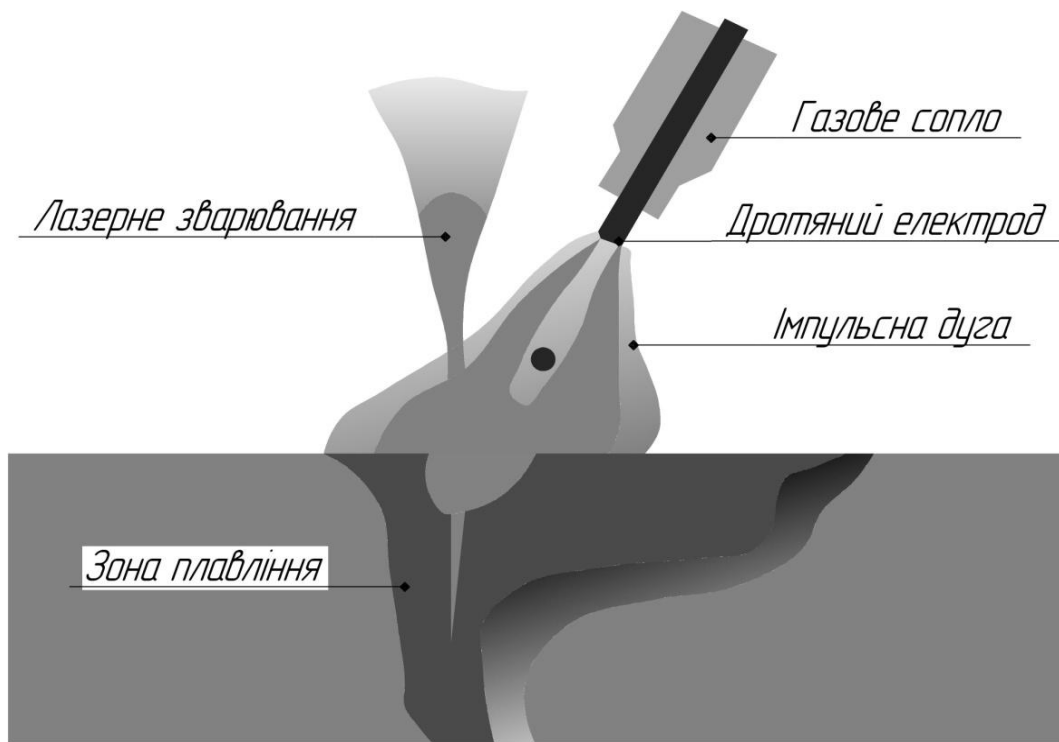


Рис. 1.27. Схема гібридного лазерно-дугового зварювання

Високо- і низькотемпературне паяння з використанням припою використовується в електротехнічній та електронній галузях, при виконанні робіт зі з'єднання мідних і цинкових труб або оцинкованих листів, а також у ювелірній промисловості. При низькотемпературному паянні використовуються припої з низькою температурою плавлення (нижче 350 °С). Через токсичний ефект припої, що містять свинець, як правило, не використовуються. Замість них застосовуються припої-замінники зі схожими властивостями і без будь-яких токсичних побічних ефектів, але вони поки придатні не для всіх випадків. Таким чином, розроблення ефективних низькотемпературних припоїв триває.

Високоміцні з'єднання металів отримують шляхом високотемпературного паяння, припої для якого виготовляють з різних металів і сплавів залежно від застосування і від матеріалів, що підлягають паянню. На додачу до газополум'яного паяння з використанням газокисневого полум'я, останнім часом набуває

широкого поширення дугове паяння з використанням згаданих вище технологій «холодної» дуги. Вона, зокрема, використовується в автомобільній промисловості для з'єднання оцинкованих листів при виготовленні кузовів.

Склеювання – метод «холодного» з'єднання як для пластмас, так і для металу. Склеювання має ряд серйозних переваг, особливо для з'єднання термочутливих матеріалів. Завдяки розробленню відповідних клеїв сьогодні можна виконувати з'єднання абсолютно різних матеріалів, здатних витримувати експлуатаційні навантаження протягом тривалого часу і в досить широких діапазонах температур. Однак використання клеїв при більш низьких або високих температурах (наприклад, нижче $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ або вище $+180\text{ }^{\circ}\text{C}$) як і раніше, проблематично. Однією з широко відомих сфер застосування є вклеювання вікон у машинах, проте все ширше починає застосовуватися склеювання конструкцій.

Механічне з'єднання – ще один процес «холодного» з'єднання матеріалів, особливо металів, більше відоме як клепання або клепання-штампування. Застосовується в основному для з'єднань, що зазнають впливу невеликих, переважно статичних, напружень. У цьому випадку покриття на поверхні залишаються значною мірою неушкодженими і корозійний захист зберігається. Цей спосіб знаходить також застосування при виготовленні виробів з алюмінію (наприклад, кухонного начиння і подібної продукції), а також в автомобільній промисловості, при виготовленні вентиляційних пристроїв і т. д.

Гібридні процеси отримання з'єднань. Як і в разі зварювальних процесів, можливі поєднання інших суміжних технологій з'єднання деталей між собою. В автомобільній промисловості сьогодні дуже поширено поєднання точкового зварювання опором зі склеюванням. Дана технологія об'єднує високу надійність з'єднань з підвищеною жорсткістю корпусу, покращує корозійний захист виробу і його життєздатність.

З огляду на розширене застосування алюмінієвих сплавів в автомобілебудуванні (з метою зниження маси) останнім часом набули актуальності з'єднання сталі з алюмінієм. Відповідними рішеннями є не тільки з'єднання на гвинтах, але також і механічне з'єднання і склеювання. Особливо цікавим і

перспективним є отримання з'єднання двох матеріалів за допомогою поєднання зварювання (з боку алюмінію) і паяння (з боку сталі). Цю операцію, з достатньою ефективністю і надійністю, можна виконати за допомогою електричної дуги.

Технології отримання мікроз'єднань. Незважаючи на те, що інформація про ці технології цікавить лише вузьке коло фахівців, без них не можна уявити побутову техніку, технологію розваг, техніку зв'язку або автомобілебудування. Також неможливо уявити, що може наступити кінець розроблення у цій галузі. Частка електроніки в нашому оточенні зростає і буде зростати далі. Електронні системи стають все більш складними, їх розміри зменшуються, а функціональні можливості доходять до немислимих меж. Кращим прикладом таких розробок є мобільні телефони, маленьке диво, що дозволяє користувачеві слухати музику, дивитися відеофільми, фотографувати і, ніби між іншим, дзвонити.

Ці розробки стали можливими, крім інших причин, також і завдяки постійному вдосконаленню технологій мікроз'єднань. Наслідуючи тенденцію мініатюризації електронних компонентів, технології отримання з'єднань адаптувалися до гранично малих розмірів. Ця тенденція не слабшає, хоча, в принципі, самі процеси ті самі: зварювання (опору і лазерне), низькотемпературне паяння, склеювання, механічне з'єднання і гібридні процеси.

Питання для самоконтролю

1. Дайте коротку характеристику технології лиття під тиском зі спінюванням.
2. В чому полягають переваги лиття спінених полімерів?
3. В чому різниця між хімічним та фізичним спінюванням?
4. В чому особливість мікростільникового спінювання?
5. Перерахуйте переваги технології MuCell.
6. Що лежить в основі обладнання для реалізації процесу MuCell?
7. Які наразі пропонуються альтернативи технології MuCell? Вкажіть їх переваги та недоліки.
8. Охарактеризуйте процес формування пінопластових моделей у контейнерних формах.

9. У чому полягає принцип роботи схеми вакуумного вібропресування?
10. У чому полягає процес лиття за газифікованими моделями?
11. У чому полягає процес лиття по крижаних моделях?
12. Які переваги надає досягнення стабільного віброущільнення піску до максимальної щільності при виготовленні форм?
13. У чому полягає основна причина низької працездатності алмазних кругів?
14. Що називають алмазно-іскровим шліфуванням?
15. У чому полягає процес алмазно-іскрового шліфування?
16. Вкажіть переваги та недоліки застосування алмазно-іскрового шліфування.
17. На використанні якого явища засновані електроерозійні методи обробки?
18. У чому полягає принцип роботи схеми електроерозійної обробки?
19. Яке призначення робочої рідини при електроерозійній обробці?
20. Які основні фази містить процес ерозії електродів?
21. Від чого залежить оброблюваність матеріалів електроерозійним методом?
22. Які існують кінематичні схеми електроерозійної обробки?
23. Перерахуйте види електроерозійних верстатів, що отримали найбільше застосування.
24. Який процес лежить в основі електрохімічного методу обробки?
25. Що таке електрополірування? У чому полягає принцип дії його схеми?
26. У яких випадках використовується електрополірування, чим воно характеризується?
27. Які різновиди електрохімічної обробки розрізняють? Охарактеризуйте їх.
28. При виконанні яких робіт використовується електрохімічна обробка в потоковому електроліті?
29. На чому засновані ультразвукові методи обробки? Що служить джерелом ультразвуку?

30. Які існують різновиди ультразвукових методів механічної обробки? Коротко охарактеризуйте їх.

31. Які процеси розуміють під променевими методами розмірної обробки?

32. Вкажіть основні різновиди променевих методів розмірної обробки.

33. Охарактеризуйте метод електронно-променевої обробки матеріалу.

34. Які матеріали можна обробляти за допомогою електронно-променевої обробки?

35. З яких основних компонентів складається установка для електронно-променевої обробки матеріалу?

36. Вкажіть переваги та недоліки від застосування електронно-променевої обробки матеріалу.

37. Коротко охарактеризуйте твердотільні лазери на люмінесціювальних твердих середовищах.

38. Коротко охарактеризуйте напівпровідникові лазери.

39. Коротко охарактеризуйте лазери на фарбниках.

40. Коротко охарактеризуйте газодинамічні лазери.

41. Коротко охарактеризуйте ексимерні лазери.

42. Коротко охарактеризуйте хімічні лазери.

43. Вкажіть основні відмінності та особливості волоконних лазерів.

44. Коротко охарактеризуйте лазери на вільних електронах.

45. У яких випадках доцільно застосовувати лазерне різання металів.

46. В яких режимах проводиться лазерне різання матеріалів? Коротко охарактеризуйте ці режими.

47. З яких компонентів складається сучасне устаткування для лазерного різання металу?

48. Які, на думку фахівців, існують напрями розвитку лазерної обробки?

49. У чому полягає процес плазмової обробки матеріалу?

50. Що таке плазмотрон та де він використовується?

51. З яких основних вузлів складається дуговий плазмотрон постійного струму?

52. Якими технічними параметрами характеризуються дугові плазмотрони?

53. З яких основних вузлів складається високочастотний плазмотрон?

54. Якими технічними параметрами характеризуються високочастотні плазмотрони?

55. Що таке плазмовий пальник, як здійснюється його класифікація за принципом дії?

56. У чому полягає процес водоструминного різання матеріалів?

57. Які існують способи водоструминного різання матеріалів? Коротко охарактеризуйте їх.

58. Вкажіть основні компоненти газорізального обладнання.

59. У чому полягають основні переваги водоструминної обробки матеріалів?

60. У чому полягають основні недоліки водоструминної обробки матеріалів?

61. Які матеріали можуть оброблятися за допомогою водоструминного різання?

62. В яких галузях промисловості знайшли найбільше застосування гідроабразивне різання і гідрорізання?

63. Охарактеризуйте технологію нанесення покриттів нітриду титану.

64. Які основні тенденції слід враховувати при виготовленні технічної продукції?

65. Коротко охарактеризуйте процес дугового зварювання металевим електродом.

66. Коротко охарактеризуйте процес дугового зварювання електродом, що плавиться, у захисних газах.

67. Коротко охарактеризуйте процес лазерного та електронно-променевого зварювання.

68. Коротко охарактеризуйте процес зварювання тертям і опором.

69. Коротко охарактеризуйте гібридні процеси зварювання.

70. Що таке склеювання? Вкажіть його переваги.

71. Що таке механічне з'єднання? У яких випадках воно застосовується?

72. Коротко охарактеризуйте технології отримання мікроз'єднань.

РОЗДІЛ 2

СУЧАСНІ МЕТОДИ ЗАХИСТУ ТА ВІДНОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ

2.1. Захисні покриття при гарячій обробці металів

Вихідні матеріали. Для приготування покриттів застосовують матеріали, що розрізняються за своєю природою, хімічним складом і впливом на властивості покриттів. Відмінності у хімічних складах і захисних властивостях сталей і сплавів, специфічні особливості різноманітних технологічних операцій гарячої обробки металів, безліч температурно-часових умов нагріву заготовок, а також використання в промисловості печей, що розрізняються за конструкцією і способом нагріву металу, обумовлюють досить велику номенклатуру матеріалів, які використовуються у складі покриттів.

Основні матеріали за їх природою умовно можна розділити на такі групи:

- 1) склоподібні і склокристалічні матеріали;
- 2) керамічні матеріали – чисті окисні (Al_2O_3 , ZrO_2 , MgO , Cr_2O_3), кераміка;

3) металеві матеріали і інтерметаліди, карбіди, нітриди і т. п.
До допоміжних матеріалів належать глина, зв'язуючі, поверхнево-активні речовини. Для приготування шлікера використовують суспендовані рідини: воду, ацетон, толуол та ін.

Склоутворювальні вихідні матеріали – емалеві фрити, силікатні стекла; ситали розробляють спеціально для придання покриттю заданих властивостей. В окремих випадках у якості склоутворювальних компонентів можна використовувати відходи виробництва скла, гірські породи, металургійні шлаки.

Емалеві фрити, стекла являють собою сплав окиснів металів. Основним склоутворювальним окиснем у силікатних емалях і стеклах є окисень кремнію SiO_2 . Для введення окисню кремнію до складу емалей використовують кварцовий пісок. Склоутворювачем є також борний ангідрид B_2O_3 . Цей компонент надає емалі багато цінних властивостей. До складу емалей

борний ангідрид вводять, додаючи в шихту буру або борну кислоту. Окисень алюмінію Al_2O_3 – амфотерний окисень, що, як правило, підвищує температуру розм'якшення і в'язкість фрити, знижує коефіцієнт теплового розширення скла і покриттів. Окисень алюмінію вводять у скло і фрити, додаючи в шихту глинозем, каолін, польовий шпат. До складу емалей можуть входити окисні лужних і лужноземельних металів.

Окисень барію BaO , склад якого може досягати 30÷40 %, вводять, додаючи в шихту вуглекислий або азотнокислий барій. Особливістю барієвих емалей є те, що вони порівняно зі свинцевими не відновлюються пічними газами. Окисень барію підвищує жаростійкість і знижує коефіцієнт теплового розширення емалей.

Окисень кальцію CaO є однією з основних складових стекол. Емалеві покриття зазвичай містять до 5÷10 % окисню кальцію.

Для введення до складу емалей окисню кальцію застосовують вуглекислий кальцій, крейду, вапняк.

Окисень магнію MgO підвищує температуру плавлення емалі, тому його вводять до складу емалевих фритт зазвичай у невеликих кількостях (1÷3 %), використовуючи магнезит $MgCO_3$ або доломіт $CaCO_3 \cdot MgCO_3$. Склокерамічні ситалові покриття містять 10÷20 % MgO .

Окисень натрію Na_2O , є одним з основних компонентів, що використовуються в якості плавнів для зниження в'язкості емалей. Окисень натрію помітно підвищує коефіцієнт лінійного розширення покриттів, тому його застосовують для отримання легкоплавких покриттів, що самовидаляють (обсипають). Він підвищує хімічну і корозійну активність розплавів.

Окисень натрію вводять до складу фрити, додаючи в шихту вуглекислий натрій Na_2CO_3 . Зазвичай використовують суху кальциновану соду, яка, на відміну від кристалічної соди, не містить води.

Окисень калію K_2O за впливом на властивості емалевих покриттів подібний до окисню натрію. Спільне введення в емалі окисню калію і натрію, взятих у співвідношенні 1:2, сильніше впливає на властивості покриттів, ніж введення рівної кількості кожного з зазначених компонентів окремо. Позитивний вплив

спільного введення окиснів калію і натрію на властивості стекол і емалей називають «ефектом двох лугів». Окисень калію вводять до складу шихти, використовуючи вуглекислий калій (поташ) і азотнокислий калій (селітру).

Окисень літію Li_2O помітно покращує плавкість і змочувальну здатність покриттів при порівняно невеликому його вмісті в емалі. Окисень літію застосовують для приготування склокристалічних (ситалових) покриттів з низьким коефіцієнтом теплового розширення. Його вводять у шихту, використовуючи вуглекислий літій.

У якості компонентів емалей, крім зазначених окиснів, застосовують також окисні цинку і свинцю, двоокисні титану і цирконію, п'ятиокисень фосфору і невеликі добавки поверхнево-активних окиснів, наприклад MoO_3 , V_2O_5 , для покращення змочування захисних металів розплавами покриттів.

У якості склоутворювальних матеріалів використовують також вулканічні гірські породи, відходи виробництва скла. Застосування скляного бою в якості сировини для виробництва скламастил вельми ефективно, оскільки дозволяє виключити плавку фритти. При використанні скляного бою в якості компонента емалевої шихти вдається скоротити час плавки, знизити втрати летких компонентів (фтору), зменшити витрату бури. Перспективними є суміші на основі фрит, скляного бою, вулканічних гірських порід, металургійних шлаків.

При дослідженні вулканічних гірських порід, металургійних шлаків у якості вихідних компонентів покриттів встановлена можливість використання, наприклад, базальту, трахіту, андезиту. За попередніми даними, собівартість покриттів на основі вулканічних гірських порід у 50÷100 разів нижче собівартості відомих покриттів на основі стекол.

Для приготування покриттів використовують також склокристалічні матеріали (ситали), які отримують кристалізацією скла спеціального складу. Склокристалічні матеріали мають рідкісне поєднання властивостей – висока жаростійкість, термостійкість, механічна міцність, хімічна стійкість. Маючи однакову природу з емалевими фритами, склокристалічні матеріали можуть підвищити жаростійкість покриттів і їх хімічну інертність до металу. Ситали з дуже

низьким коефіцієнтом теплового розширення полегшують видалення емалі з поверхні деталей і заготовок. Для приготування покриттів використовують як спеціально синтезовані склокристалічні матеріали, так і відходи скляної промисловості.

Керамічні матеріали. Їх можна розділити на три групи: оксидні, силікатні і безкисневі.

Оксидні керамічні матеріали складаються з чистих тугоплавких окиснів – Al_2O_3 , ZrO_2 , MgO . Ці окисні відрізняються високою температурою плавлення, хімічною інертністю.

Окисень алюмінію Al_2O_3 – один з найбільш хімічно стійких вогнетривких сполук. При $1705\div 1815$ °С окисень алюмінію стійкий до впливу всіх газів, стабільний до окиснювальної і сильно відновної атмосфер. Висока хімічна стійкість дозволяє використовувати окисень алюмінію в покриттях для створення на поверхні захищуваних сплавів термодифузійного бар'єра.

Порошок з окисню алюмінію часто додають при помелі емалей або вводять безпосередньо в готовий емалевий шлікер. Вміст окисню алюмінію в покриттях у ряді випадків досягає $80\div 90$ % по масі. Окисень алюмінію підвищує жаростійкість, знижує хімічну і корозійну активність покриттів.

У складі покриттів використовують як хімічно чистий, так і технічний глинозем.

Двоокисень цирконію ZrO_2 при температурі близько 1000 °С змінює моноклітичну форму кристалів на тетрагональну. Це перетворення супроводжується досить сильною зміною об'єму (~ 10 %). З огляду на це, а також коефіцієнтів теплового розширення захищуваного металу і покриття двоокисень цирконію використовують для отримання покриттів, що самовидаляють (обсипають). Цьому, можливо, сприяє і порівняно низька теплопровідність двоокисню цирконію. Крім технічного застосовують також хімічно чистий двоокисень цирконію.

Циркон $\text{ZrO}_2\cdot\text{SiO}_2$ використовують нарівні з двоокиснем цирконію завдяки низькому коефіцієнту теплового розширення і хімічній стійкості в розплавах металів і стекел.

Окисень магнію MgO виключно тугоплавкий, його температура плавлення перевищує 2800 °С. Окисневі магнію властиво порівняно висока теплопровідність і здатність відновлюватися при високих температурах у відновлювальній

атмосфері. Окисень магнію гігроскопічний, він може розчинятися у воді, тому для покриттів використовують кальцинований або прокалений окисень магнію. Додавання окисню магнію робить покриття інертними до сталей деяких марок, а також здатним до самовидалення.

Окисень хрому Cr_2O_3 застосовують для фарбування емалей у зеленій колір. У покриттях для захисту металів при їх гарячій обробці порошок окисню хрому застосовують у якості тугоплавкого наповнювача. Частинки окисню хрому добре змочуються емалевими розплавами, що сприятливо впливає на змочуваність і покривню здатність покриттів.

Шпінель $\text{MgO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ має низьку хімічну активність з окиснями, основними солями, шлаками і не зазнає змін аж до температури плавлення ($2134\text{ }^\circ\text{C}$); у покриття вводять під час помелу. Шпінель служить у якості інертної тугоплавкої добавки.

Для покриттів використовують керамічні матеріали, одержані спіканням пластичних мас, пластифікованих порошків на основі глини, корунду, кварцового піску, тальку, польового шпату, пегматиту і т. п. Вогнетривкі керамічні матеріали (алюмоселікатні, кремнеземисті, хромисті) вводять до складу покриттів у якості мелених добавок. Вони мають хімічну інертність, служать у якості тугоплавкого наповнювача в емалях.

Металеві матеріали, інтерметаліди, карбіди, нітриди.

Для додавання покриттям специфічних властивостей, наприклад борування, науглецювання поверхні металу, у них вводять іноді безкисневі тугоплавкі сполуки – карбіди, нітриди і т. д.

Карбід бору B_4C не окиснюється на повітрі до $982\text{ }^\circ\text{C}$. При більш високих температурах опір окисненню карбіду бору різко знижується. Введення карбіду бору до складу склоподібних покриттів для захисту при загартуванні інструментальних сталей (5ХНВ, 5ХНМ) сприяє підвищенню твердості поверхні сталі і збільшенню міцності зчеплення покриття з металом.

Карбід титану TiC добре змочується нікелем, хромом, кобальтом, залізом і утворює кермети з цими металами.

Карбід кремнію SiC стійкий в окиснювальній атмосфері при високих температурах за рахунок утворення плівки SiO_2 .

Нітрид бору BN має високу теплопровідність, повільно окиснюється до B_2O_3 при нагріванні в окиснювальній атмосфері.

Нітрид бору підвищує міцність зчеплення покриття і твердість поверхні металу.

Дисиліцид молібдену MoSi_2 має порівняно високу температуру плавлення ($1870\text{ }^\circ\text{C}$), високу стійкість у розпеченій атмосфері, широко використовується для захисту металів завдяки утворенню на поверхні плівки SiO_2 . Опір дисиліциду молібдену окисненню може різко знижуватися при нагріванні через забруднення плівки SiO_2 окиснем MoO_3 .

Дисиліцид молібдену використовують у покриттях у якості меленої добавки для захисту заготовок перед прокаткою і пресуванням, а також у шихті при плавці емалевих фрит.

Для приготування покриттів використовують порошкоподібні металеві матеріали – фероалюмінієвий сплав, алюмінієвий порошок, порошки залізу, титану та ін. Розміри частинок металевого порошку зазвичай не перевищують 100 мкм.

Робота з металевими порошками вимагає прийняття особливих заходів техніки безпеки, суворого дотримання правил та інструкцій, оскільки тонкодисперсний порошок, наприклад алюмінію, має високу хімічну активність, більшу спорідненість до кисню, легко вступає в реакцію з різними речовинами з виділенням теплоти.

Допоміжні матеріали використовують для додавання покриттям заданих технологічних і експлуатаційних властивостей. Для отримання шлікера (суспензії) використовують глину, яку вводять у якості меленої добавки при помелі суміші, наприклад з фрити, води і окисню хрому. Глина входить до складу більшості покриттів. Винятком є органосилікатні покриття, що містять кремнійорганічні лаки і органічні розчинники: ацетон, толуол і т. п. Суспендована здатність глини залежить в основному від її дисперсності і не визначається її складом. Жаростійкість покриттів залежить від складу і вогнетривкості глини. Каолініт є основною частиною більшості глин.

Замість каолінових глин також застосовують бентонітові, основою яких є мінерал монтморилоніт $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$. Бентоніти відрізняються високою суспендованою здатністю, сильно набухають у воді. Глина має велике значення для отримання стійкої суспензії. У якості суспендованої рідини

зазвичай використовують воду. Вода не повинна містити механічних домішок, забруднень і т. п. Для придання шлікеру хороших технологічних властивостей (покривної здатності, високого змочування і т. п.) у нього під час помелу або після помелу вводять поверхнево-активні речовини, електроліти, наприклад розчини бури, повареної солі, соди, поташу та ін.

Для підвищення механічної міцності покриттів, нанесених на деталі і заготовки, до складу шлікера вводять спеціальні зв'язуючі. Ефективними зв'язуючими є, наприклад, сульфітний луг і полівініловий спирт, який вводять у шлікер у вигляді 10-відсоткового водного розчину при помелі або додають у готову суспензію.

У якості зв'язуючих покриттів іноді використовують рідке скло. Недоліком його є висока хімічна активність при підвищених температурах. Взаємодія рідкого скла з захисним металом може супроводжуватися корозійними ушкодженнями поверхні деталей і напівфабрикатів.

Перспективним зв'язуючим покриттям може стати карбоксиметилцелюлоза.

Склад покриттів. Досвід застосування захисно-технологічних покриттів у серійному виробництві при штампуванні, прокатці, пресуванні, термообробці деталей і заготовок, аналіз запитів промисловості показують, що покриття як правило, використовують при вирішенні окремих завдань у складному технологічному циклі переробки металу і виробу. Однак захист металу є перспективним на всіх етапах гарячої обробки – від зливка до остаточно готових деталей.

Загальна вимога до всіх покриттів – забезпечення захисту поверхні деталей і заготовок від утворення окалини при їх нагріванні. Склад покриття підбирають таким чином, щоб при нагріванні на металі утворилася суцільна, стійка при заданій температурі плівка, яка надійно ізолює поверхню від контактів з навколишньою атмосферою. Крім того, покриття для якісних сталей, спеціальних сплавів повинні оберігати їх поверхню від знеуглецювання, вигоряння легуючих елементів, забруднення елементами додавання (киснем, азотом, воднем), міжкристалітної газової корозії.

Покриття не повинне знижувати фізико-механічні властивості і корозійну стійкість сталей і сплавів. Зміна властивостей сплавів у результаті взаємодії з пiчною атмосферою при нагріванні має бути мінімальною, допустимою при експлуатації деталей. У зв'язку з цим є актуальним питання про допустимі зміни в поверхневих шарах деталей і сплавів з покриттями після гарячої обробки. Покриття повинне мати задану в'язкість, щоб служити температуростійкою технологічною змазкою, що забезпечує максимальне зниження зусиль при деформації металів, витримувати високі тиски і температури, бути теплоізолятором заготовок і захищати штампи від перегріву, полегшувати видалення заготовок зі штампа.

Покриття повинні забезпечувати захист сталей і сплавів у широкому інтервалі температур (500÷2000 °C), мати високий опір дифузії атмосферних газів, бути хімічно інертними по відношенню до сталей і сплавів, що застосовуються в оснащенні. Висока якість захисту забезпечується при гарному змочуванні і задовільному зчепленні покриття з поверхнею деталей і заготовок у процесі їх нагріву і обробки тиском. Покриття має бути суцільним, без розривів і пор, міцним, еластичним, не руйнуватися при транспортуванні заготовок, їх завантаженні в піч, установленні в штамп і т. п.

Часто потрібно, щоб покриття було одноразової дії, тобто самовидалялося (обсипалося, відшаровувалося) з поверхні деталей після проведення тільки однієї операції. Але іноді одне покриття використовують на кількох операціях гарячої обробки.

Покриття повинні бути нетоксичними, пожегобезпечними і недефіцитними, забезпечувати малі їх витрати на одиницю площі, що захищає метал. Технологія приготування та нанесення покриттів повинна бути по можливості простою. Покриття, використовувані для захисту заготовок при їх гарячій обробці, за призначенням, хімічним складом і рядом властивостей відрізняються від покриттів, призначених для захисту деталей у процесі їх експлуатації. Щодо конкретних умов технології гарячої обробки металу, необхідно підбирати склад покриття, що має певні специфічні властивості. До специфічних властивостей покриттів можна віднести, наприклад, здатність повністю самовидалятися з поверхні деталей при їх охолодженні після

загартовування. Цінною властивістю склопокриттів є здатність при підвищених температурах утворювати на поверхні ковальських заготовок порівняно тонку плівку. Підбором в'язкості і товщини цієї плівки забезпечують зниження зусиль при штампуванні і пресуванні, підвищення точності штампованих деталей внаслідок поліпшення заповнення гравюри штампа. При розробленні складів покриттів слід враховувати температурно-часові режими нагріву деталей і заготовок, різні вимоги, що висуваються до якості їх поверхонь.

Склад покриття визначає його здатність переходити з твердого у в'язкий або рідкий стан при збільшенні температури і тривалості нагріву. Ця властивість помітно проявляється в силікатних емалевих покриттях, а також у покриттях, які мають склоподібні компоненти, легкоплавкі метали, окисні або солі металів.

Тривалість операцій гарячої обробки металу може змінюватися від десятків секунд при індукційному нагріві до десятків годин при нагріванні в полум'яних печах. Від хімічного складу покриттів залежить їх здатність швидко оплавлятися і утворювати захисну плівку, спікатися і при тривалому нагріванні несуттєво змінювати в'язкість.

Захисне покриття, що одночасно є мастилом, при прокатці сталі часто викликає проковзування заготовки у валках прокатного стану. Для усунення цього недоліку покриття видаляють з поверхні слябів, сутунок перед подачею їх у валки або вводять до складу покриття компоненти, що підвищують коефіцієнт тертя.

Склади покриттів. Більшість покриттів можна розділити:

- за призначенням, сферою застосування;
- складом.

За призначенням покриття поділяють на захисні, захисно-змащувальні і змащувальні.

Покриття поділяють за типом сплаву, який захищається, на покриття для титанових сплавів, жаростійких сплавів, корозійностійких сталей, інструментальних сталей і т. д. На практиці покриття часто поділяють на тугоплавкі і легкоплавкі.

Залежно від хімічного та фізико-мінералогічного складу покриття можна поділити на такі групи: 1) склоподібні (емалеві);

2) склокерамічні; 3) склометалеві; 4) органосилікатні; 5) захисні суміші і обмазки; 6) металеві; 7) системи покриттів (типу алітування + емаль).

Назва покриттів наведених груп вказує природу основних складових шару, що забезпечує захист металу при нагріванні.

Кожну з груп можна розділити на підгрупи залежно від вмісту компонентів, що визначають найважливіші властивості покриттів. Покриття 2, 3 і 5-ї груп іноді називають склокристалічними.

Склоподібні (емалеві) покриття. Силікатні емалі і стекла найчастіше застосовують при гарячому штампуванні, пресуванні, вальцюванні сталей і сплавів. Силікатні емалі використовують як захисні та захиснозмазувальні покриття, вони служать температуростійкими змазками при обробці металу тиском. Емалі та покриття на основі скла набули широкого поширення завдяки здатності склоподібних силікатів при нагріванні поступово і зворотно переходити з твердого стану не тільки в рідкий, але також і у в'язкий стан, при чому в'язкість можна регулювати зміною температури або складу покриття.

При визначенні класу скла (фрити, покриття) враховують склоутворювальний окисень – основний компонент покриття. Зазвичай основними склоутворювачами є окисні SiO_2 і V_2O_3 ; тому часто виділяють тільки два класи емалевих покриттів – силікатні і боратні. Досліджується також можливість створення і застосування кальційалюмінатних, фосфатних та деяких інших покриттів на основі склоутворювальних речовин.

Окисні лужних і лужноземельних металів при класифікації стекол враховувати не рекомендується. Але для більш точної характеристики складу покриття в його назві вказують лужні, лужноземельні окисні, що помітно впливають на властивості покриття, наприклад натрієвоборосилікатне покриття, барієвосилікатне покриття і т. п.

Повна назва складу фрити, скла включає перелік всіх компонентів. Окисні вказують у наступній послідовності: одновалентні, потім двовалентні в порядку зростання атомних номерів елементів по групах Li_2O , Na_2O , K_2O , BeO , MgO , CaO , SrO , BaO ; далі вказують ZnO , CdO , PbO . Окисні типу Me_mO_n розміщують за зростанням їх молярної концентрації в складі.

Силікатні покриття. Основним склоутворювальним компонентом у силікатних емалевих покриттях є двоокисень кремнію. До складу силікатних емалей входять зазвичай окисні лужних металів (Li_2O , Na_2O , K_2O), лужноземельних металів (MgO , CaO , BaO і PbO), а також окисні Al_2O_3 , ZnO_2 , TiO_2 , NiO_2 , V_2O_3 і деякі інші. Вміст лужних окиснів у складі силікатних емалей може перевищувати 20÷25 %. Високим вмістом лужних окиснів пояснюють порівняно невисокі захисні властивості силікатних покриттів. Такі склади відрізняються корозійною активністю щодо металу. Деякі склади можуть настільки активно взаємодіяти з захищуваним металом і його окиснями, що на поверхні заготовок і деталей утворюються дефекти у вигляді раковин, відшарків і т. п. Лужні окисні дуже знижують в'язкість силікатного розплаву. Тому покриття з високим вмістом окиснів Na_2O і K_2O є легкоплавкими, що враховують при підборі складів, що застосовуються в якості технологічних змазок.

Тугоплавкі силікатні покриття, що містять 96 % двоокисню кремнію, використовують для захисту і змащування при нагріванні до 2000÷2200 °С і обробці заготовок з тугоплавких металів і сплавів.

Для приготування силікатних покриттів часто використовують різні види скла. Основним компонентом багатьох силікатних покриттів є рідке скло (водний розчин силікату натрію Na_2SiO_3). Рідке скло вводять також у покриття в якості стабілізуючої добавки і зв'язуючого. Покриття з високим вмістом рідкого скла в результаті інтенсивного випаровування води при нагріванні відшаровуються від металу і руйнуються. Розплав силікату натрію при температурах вище 1000 °С активно взаємодіє зі сталлю і з окиснями заліза.

Електрохімічна взаємодія силікату натрію з поверхневими шарами сталевих заготовок є однією з головних причин зменшення товщини знеуглецьованого шару. Знеуглецьований метал роз'їдається високоугловим силікатним розплавом, внаслідок чого товщина видимого знеуглецьовання зменшується.

Боросилікатні покриття. Основними склоутворювальними компонентами в боросилікатних покриттях є двоокисень кремнію і борний ангідрид B_2O_3 . Порівняно з луговими силікатними покриттями боросилікатні склади забезпечують більшу

стабільність властивостей при нагріванні заготовок. Корозійна активність боросилікатних покриттів, навіть які містять лужні окисні, порівняно невелика. Ці покриття можна віднести до легкоплавких, вони мають широкий температурний інтервал розм'якшення, оскільки їх в'язкість відносно повільно зменшується при нагріванні і збільшується при охолодженні. Тому такі склади називають «довгими» – вони порівняно довго не тверднуть при зниженні температури заготовок.

Вміст борного ангідриду в боросилікатних покриттях може досягати 30÷40 % по масі. У якості модифікованих добавок використовують окисні CaO, BaO, MgO, Al₂O₃, ZrO₃. Завдяки низькому вмісту окиснів лужних металів помітно зменшується хімічна взаємодія розплаву покриття з захищуваними сплавами.

Для приготування боросилікатних покриттів використовують спеціальні фрити, а також боросилікатні стекла типу «пірекс».

Боросилікатні покриття застосовують для захисту від окиснення і в якості змазки при гарячій обробці тиском різних сталей і сплавів.

Бороалюмосилікатні і алюмоборосилікатні покриття. Основними склоуворювальними компонентами цих покриттів є окисни SiO₂, Al₂O₃ і борний ангідрид. Для покращення технологічних властивостей (розтікання, змочувальна здатність і т. п.) у покриття вводять BaO, CaO, MgO₂, ZrO, TiO₂, NiO, PbO, Cr₂O₃, а також окисні лужних металів.

Бороалюмосилікатні покриття мають гарну стійкість, хімічну інертність по відношенню до захищуваного металу при температурах нагріву заготовок і деталей до 1200÷1300 °С. Крім захисту сталей і сплавів від окиснення і газонасичення ці покриття забезпечують ефективне змащування при пресуванні і штампуванні заготовок.

Бороалюмосилікатні покриття готують зі спеціальних фрит. Рідше в цих цілях використовують технічне алкмосилікатне і боросилікатне скло. Для забезпечення високих захисних властивостей бороалюмосилікатних покриттів при роботі в умовах температур 1100÷1300 °С особливо ефективно застосовувати суміші фрит і стеклої різної тугоплавкості.

Використання сумішей фрит з різними властивостями дозволяє розширити температурний інтервал захисної дії покриттів і регулювати в'язкість шару.

Зміною співвідношення між фритами, що мають різні коефіцієнти лінійного розширення, регулюють коефіцієнт лінійного розширення покриттів, що важливо для отримання покриттів, що самовидають (обсипають).

Алюмосилікатні покриття. Основними склаутворювальними компонентами в цих покриттях є окисні SiO_2 , і Al_2O_3 . Покриття тугоплавкі, оскільки сумарний вміст у них SiO_2 , до Al_2O_3 часто досягає 75÷80 % по масі. Модифікуючими окиснями служать зазвичай BaO , CaO , MgO . Невеликі добавки борного ангідриду B_2O_3 сприятливо впливають на технологічність покриттів, покращують змочувальну здатність розплавів.

Алюмосилікатні покриття мають високу жаростійкість, хімічну інертність по відношенню до захищуваного металу. Низький коефіцієнт лінійного розширення, слабка взаємодія розплаву покриття з металом сприяють самовидаленню цих покриттів з поверхні деталей після проведення термообробки.

Склоподібні покриття на основі металургійних шлаків і гірських порід. З урахуванням невисокої вартості природних склоподібних матеріалів (базальту, андезиту, габра, трахіту і ін.) їх застосування в покриттях є перспективним. Гірські породи утворюють в'язкі силікатні розплави, інертні по відношенню до сталі. Але гірські породи дуже тугоплавкі. Для зниження тугоплавкості покриттів на основі гірських порід і для додавання покриттям гарних технологічних властивостей використовують емалеві фрити. Покриття, що містить 70÷90 % (по масі) андезиту і 10÷30 % фрити, забезпечує високу якість захисту сталей, мимовільно обсипається з поверхні металу при його охолодженні до кімнатної температури.

Склокерамічні покриття. Приготування склокерамічних покриттів засноване на методі зв'язування склаутворювальними розплавами тонкодисперсних керамічних частинок. Склоподібну і кристалічну керамічну фази можна вводити в покриття або приготуванням сумішей зі склаутворювальних фрит і кераміки, або кристалізацією (ситалізацією) фрит, стекол спеціального складу при їх нагріванні, або формуванням покриттів на основі

сумішей фрит і ситалів. Можливі також комбінації з трьох зазначених способів отримання склокерамічних покриттів. У якості кристалічної фази використовують чисті окисні Al_2O_3 , MgO , ZrO_2 , Cr_2O_3 , шпінелі, алюмосилікати, циркон, карбіди, боріди, силіциди та ін.; для отримання склофази – силікатні, боросилікатні, алюмосилікатні, бороалюмосилікатні та інші фрити і стекла. Основна відмінна особливість склокерамічних покриттів полягає в тому, що вони формуються при нагріванні з утворенням гетерогенної напіврозплавленої системи типу піросуспензій і піропаст. Останні служать у якості захисних шарів, тоді як зазвичай з піросуспензій і піропаст отримують жаростійкі покриття для захисту деталей машин у процесі їх тривалої експлуатації.

Кристалічні частинки в процесі роботи склокерамічних покриттів можуть зазнавати змін, розчинятися в склоподібному зв'язуючому. Зміна хімічного і фазового складу склокерамічних покриттів залежить від хімічного складу, кількісного співвідношення фаз, температури і тривалості нагріву, а також від складу навколишньої атмосфери. Тому при розробленні покриттів великого значення набуває вивчення якісних і кількісних змін у фазовому складі захисних шарів, дослідження взаємодії з підкладкою і фізико-хімічних властивостей покриттів. Слід прагнути отримувати покриття з високою жаростійкістю при мінімальному вмісті склофази, збереженні гарного змочування металу, суцільності, а також із заданими коефіцієнтами лінійного розширення, в'язкістю при порівняно невисокій температурі формування суцільного газонепроникного, хімічно інертного шару покриття. Настільки різні і частково суперечливі вимоги до покриттів для гарячої обробки металу зумовили створення нових склокерамічних покриттів.

Незважаючи на багато переваг, склоподібні емалі та покриття порівняно зі склокерамічними покриттями мають два недоліки:

- хімічна і корозійна активність склоподібних розплавів вище, ніж у склокерамічних покриттів;
- прагнення до підвищення хімічної інертності склоподібних розплавів неминуче потребує введення до їх складу тугоплавких компонентів, що завжди підвищує температуру

розм'якшення покриття. Підвищення тугоплавкості покриття зазвичай погіршує його технологічні і захисні властивості при температурах початку інтенсивного окиснення, зневуглицювання і газонасичення сплавів.

Застосування в покриттях склокристалічних матеріалів (ситалів) виявилось особливо ефективним, оскільки вдалося підвищити жаростійкість і захисні властивості при високих температурах практично без погіршення найважливіших технологічних властивостей (змочувальній здатності, розтікання), а також зберегти досить низьку температуру початку розм'якшення, тобто захисні властивості при невисоких температурах.

Ситали отримують кристалізацією стекол або склоутворювальних розплавів. У результаті кристалізації в об'ємі скла або розплаву утворюється дрібнозерниста рівномірна структура з цінними властивостями. Залежно від хімічного складу вихідного скла, фрити, розплаву, температури і тривалості термообробки змінюється склад виникаючих кристалічних фаз і хід процесу кристалізації. У результаті нагрівання вихідні склоутворювальні матеріали можуть перетворитися в кристалічні з високими фізико-механічними і фізико-хімічними властивостями. На практиці повної кристалізації вихідних стекол не досягається. Зазвичай ситали складаються з великої кількості дуже дрібних ($1\div 2$ мкм) кристалів, розділених найтоншим прошарком скла.

Цінні властивості ситалових покриттів обумовлені отриманням певних кристалічних фаз, рівномірно розподілених в захисному шарі. У якості кристалічних фаз у ситалових покриттях можуть виділятися β -сподумен ($\text{Li}_2\text{O}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 4\text{SiO}_2$), β -евкрипит ($\text{Li}_2\text{O}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$), α -кордієрит ($2\text{MgO}\cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 5\text{SiO}_2$), β -кристобаліт (SiO_2), α -тридиміт (SiO_2), β -кварц (SiO_2), силікати літію ($\text{Li}_2\text{O}\cdot\text{SiO}_2$, $\text{Li}_2\text{O}\cdot 2\text{SiO}_2$), алюмотитанат ($\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{TiO}_2$), шпінель ($\text{MgO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$), циркон ($\text{ZrO}_2\cdot\text{SiO}_2$), муліт ($3\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$), анортит ($\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$), сапфірин ($4\text{MgO}\cdot 5\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$), корунд ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) та ін. Ситалізація покриттів, введення при помелі в емалевий шлікер ситалів з відомими властивостями дозволяють отримувати хімічно інертні покриття з різними коефіцієнтами лінійного розширення. Ситали, що містять лужні

окисні, зокрема Li_2O , забезпечують отримання широкого інтервалу розм'якшення і працездатність покриттів у якості високотемпературних змазок при штампуванні, пресуванні заготовок. Іноді за рахунок ситал і фритт, що кристалізуються при нагріванні, можна значно прискорити процес самовидалення покриття з металу.

Склокерамічні покриття, що містять безкисневі сполуки і компоненти типу B_4C , SiC , C , ZrB_2 , TiB_2 , MoSi_2 , NiAl і ін., мають гарні технологічні властивості. Наприклад, покриття, що містять бориди, добре змочують сталь, розтікаються і міцно зчеплюються з металом: при цьому підвищується вміст бору в поверхневих шарах сталі. Покриття з додаванням графіту не тільки захищає сталь від окиснення і зневуглицювання при нагріванні, але також наповнюють вуглецем поверхню. У зв'язку з цим представляють інтерес роботи з застосування покриттів не тільки для захисту від окиснення при нагріванні, але одночасно і для хіміко-термічної обробки поверхні сталей і сплавів.

При короткочасному випалюванні силікатних емалей, у які додають компоненти MoSi_2 , CrSi_2 , TiB_2 , TiSi_2 , ZrB_2 , замітної взаємодії зазначених сполук з розплавленою фриттою не виявляється. Дослідження проводили при невисоких температурах випалу емалі до $850\div 900$ °С. При більш високих температурах і тривалих витримках можлива більш сильна направлена взаємодія безкисневих сполук як з емалевими розплавами, так і зі сплавами.

Склометалеві покриття. Деякі заводи застосовують склометалеве покриття на основі силікату натрію (рідке скло) і тонкодисперсного порошку металевого алюмінію. Це покриття наносять на штампувальні заготовки пензлем або зануренням з метою захисту їх поверхні від утворення окалини. За даними досліджень, при нагріванні титанових сплавів з покриттям з суміші рідкого скла з алюмінієвим порошком утворення окалини на заготовках уповільнюється. Однак газонасичення титану не знижується порівняно з нагріванням без покриття. На поверхні титану нерідко спостерігаються корозійні пошкодження. Рідке скло без металевого порошку алюмінію не забезпечує стабільного захисту титану. На поверхні заготовок утворюються

раковини, а газонасичення титану навіть більше, ніж при нагріві без покриття.

Позитивний вплив домішок металевих порошків на властивості покриттів неодноразово зазначалося в наукових роботах. Наприклад, при введенні 5÷10 % кремнію значно підвищується кислотостійкість емалей, а при введенні металевого цирконію – лугостійкість. Склометалеві покриття порівняно зі склоемалями мають більшу міцність, еластичність.

Склометалеві покриття для захисту металу при його гарячій обробці відрізняються від інших склометалевих покриттів насамперед тим, що при нагріванні захист металу забезпечує твердо-рідка гетерогенна система, металева складова якої має задану хімічну активність. Металева складова цих покриттів зазвичай має високу спорідненість з киснем. У процесі роботи покриття металеві добавки згорають, утворюються окисні, які були відсутні в початковому складі.

Для приготування склометалевих покриттів використовують зазвичай порошки алюмінію, заліза та ін., склофрити, керамічні матеріали. Активні метали, наприклад титан, виявляється важко ввести в деякі склоемалі в кількості більше 3÷5 % по масі. Задовільне покриття формується тільки при вмісті не більше 1÷2 % (по масі) металеві домішки. Ці труднощі можна подолати зменшенням вмісту в складі покриття склоподібної фази за рахунок введення хімічно інертних наповнювачів.

Доцільним є нанесення двох шарів. Перший (грунтовий) шар наносять у вигляді суспензії металевих частинок і скла і будь-якого зв'язуючого, щоб забезпечити зчеплення частинок між собою і з поверхнею деталей. Покривний (зовнішній) шар повинен ізолювати основний метал і грунтове покриття від впливу окисної атмосфери печі в процесі нагрівання. Покривний шар наносять розпиленням на попередньо просушений ґрунтовий шар.

Третій шар наносять, коли, наприклад, потрібна обробка деталей в умовах підвищеної вологості. Для третього шару рекомендується застосовувати водозахисне покриття з 25 % двоокисню кремнію і гідролізованого розчину етилсилікату. За даними досліджень у США, двошарові склометалеві покриття забезпечують захист проти точкової корозії сталеві поверхні при

звичайних умовах нагріву. Нанесення третього шару (у разі обробки деталей в умовах підвищеної вологості) може бути не обов'язковим, якщо використовувати в другому (покривному) шарі домішки з карбонатів, гідроксидів, окиснів або фторидів.

Прикладами склометалевих покриттів можуть служити склади, рекомендовані для запобігання як окиснення, так і науглецювання сталевих деталей при їх обробці при підвищених температурах (вище 600 °С). Покриття містять металеві частинки матеріалу, схильного до взаємодії з вуглецем і вуглецевмісними матеріалами, плавкі силікатні скломатеріали і їх суміші, температура розм'якшення яких близько 500; 575 і 800 °С, рідке скло та ін.

Металева складова покриттів є комбінацією частинок заліза, які втираються в основну суміш з силікату натрію, глини і води після її помелу у валковому млині протягом 15 хв. Для захисту від окиснення сталі, що містить 87 % Fe і 12 % Cr, а також для запобігання науглецювання при 600÷1300 °С прийнятною є така композиція покриттів:

- склад покриття для ґрунтового шару: силікат натрію – 175 см³, дистильована вода – 163 см³, силікат алюмінію (Al₂O₃·2SiO₂) – 33 г, скло (супер-флінт) – 245 г, залізо (суміш порошків) – 245 г;

- склад покриття для покривного шару (наносять на ґрунтовий шар після його висушування): силікат натрію – 120 см³, дистильована вода – 630 см³, вулканічна зольна глина – 30 г, скло (температура розм'якшення 575 °С) – 70 г, скло (температура розм'якшення 800 °С) – 70 г, нефелін (температура розм'якшення 950 °С) – 70 г.

Компоненти суміші подрібнюються в шаровому млині протягом 30 хв. Водозахисне покриття для третього шару готують перемішуванням суміші з синазоля, етилсилікату 40 і 3 % розчину HCl до освітлення (отримання прозорості).

Органосилікатні покриття. Органосилікатні покриття, що складаються зі склоутворювальних фрит і органічних полімерних матеріалів на основі теплостійких смол, на відміну від більшості інших покриттів, не містять води, а тому не викликають утворення іржі на простих низьколегованих сталях. Покриття використовують для захисту сталей, легко утворюючих іржу. До

переваг органосилікатних покриттів належить їх порівняно висока міцність, швидке висихання після нанесення, можливість захисту металів при невисоких температурах нагріву.

До органосилікатних належать зарубіжні покриття під назвою «Беркатект». Ці покриття призначені для захисту при термообробці тільки високоякісних сталей і сплавів. Покриття «Беркатект» забезпечує утворення газонепроникної плівки на поверхні металу, яка знижує або повністю усуває окиснення і утворення окалини. Покриття «Беркатект» рекомендується для захисту будь-яких металів, термічна обробка яких не перевищує 1250 °С. Покриття використовують для захисту жароміцних сплавів і сплавів з високим опором повзучості, які застосовують у газових турбінах. При газовій цементації служить маскуючим покриттям, при дуговому зварюванні сприяє отриманню більш чистого і однорідного зварного з'єднання. «Беркатект» рекомендується і в якості захисту заготовок при нагріванні під штампування, інструментальних сталей від знеуглецювання в процесі термообробки.

Поверхня металу, на яку наноситься «Беркатект», повинна бути вільна від сторонніх речовин (фарби, бруду, окиснів, окалин). Поверхня повинна бути блискучою, краще полірованою. Матова поверхня, одержувана в результаті дробоструминного очищення, часто абсолютно не придатна. Деталі, на які наносять покриття, необхідно повністю очищати від змазки, після чого їх не рекомендується чіпати руками без рукавичок. Перед нанесенням покриття деталі повинні бути абсолютно сухими.

Покриття можна наносити зануренням або напиленням. Найкращі результати досягаються при зануренні деталей простої конфігурації, наприклад плоских листів. Універсальним способом є напилення, яке можна застосовувати у будь-яких випадках. Для отримання рівномірного покриття необхідна рівномірна швидкість вилучення деталей, для чого рекомендується використовувати спеціальні пристосування. Слід зазначити, що при швидкому вилученні деталі утворюється більш товсте покриття, при повільному – більш тонке. При нанесенні декількох шарів покриттів, перш ніж нанести нове покриття, шар повністю просушують. Покриття не стікає з країв і не

накопичується біля основи деталі. Перед нанесенням суспензію необхідно ретельно перемішувати.

Покриття можна наносити напиленням так само, як лакофарбові покриття. Покриття напиленням наносять на деталі всіх розмірів і форм з подальшим швидким просушуванням. Перш ніж нанести нове покриття, слід ретельно перевірити, чи повністю вислохло попереднє. Повітря, що використовується при напиленні, повинно бути абсолютно сухим. При роботі з розчинниками рекомендується використовувати звичайне обладнання і камери для напилення з витяжною вентиляцією; при роботі з толуоловими розчинниками – спеціальне обладнання, наприклад камери для напилення, що обмиваються водою.

Товщина покриття впливає на його властивості. Покриття, які самовідшаровуються, зазвичай мають більшу товщину порівняно з тими, що не самовідшаровуються. Покриття має відшаровуватися при температурі нижче температури окиснення металу, тому оптимальну товщину покриття слід визначити експериментально. Так само як у склоподібних емалей, органосилікатне покриття, нанесене тонким шаром, не буде відшаровуватися, поки деталі не охолонуть, а в разі дуже тонкого шару покриття може не відшаровуватися зовсім. Занадто товстий шар відшаровується майже відразу після того, як деталі вивантажені з печі. У результаті поверхня металу піддається окисненню.

Істотним недоліком покриттів є вміст токсичних і вибухонебезпечних компонентів – толуолу, трихлоретану, трихлоретилену. Порівняльні випробування склоподібних емалей і покриттів типу «Беркатект» показали, що емалеві покриття нетоксичні, пожежобезпечні, більш прості за технологією приготування і нанесення.

Захисні суміші і обмазки. Ці покриття мають переваги, властиві ряду «простих» покриттів. Особливо ефективним є застосування «складних» покриттів, що складаються з суміші емалевих фрит різної тугоплавкості і домішок керамічних і металевих компонентів.

Для захисту заготовок від окиснення при нагріванні перед прокаткою на поверхню заготовок наносять «захисні суміші», що містять 30÷36 % H_3BO_3 , 5÷9 % SiO_2 , 1,5÷2 % бентоніту, 3÷4 %

полівінілацетатної емульсії, 44÷50 % води. Покриття, забезпечуючи захист від окиснення при нагріванні, після виконання технологічних операцій легко змиваються водою.

Для захисту металів від окиснення застосовують також склоподібні склади, що містять газоутворювачі, які спінюють покриття. У результаті покращується ефективність покриттів, які застосовуються в якості високотемпературних змащень, полегшуються процеси видалення покриттів з поверхні штампувальних заготовок.

Якість поверхні деталей (сталі У7А, У12А, ШХ10, 50ХФА і ін.) дещо покращується при нанесенні на заготовки покриття, що містить 4 ч. (по масі) рідкого скла, 2 ч. графіту і 0,5 ч. вогнетривкої глини.

Застосування деяких обмазок дещо знижує згоряння металу, однак застосування їх у металургійному виробництві пов'язано з технологічними труднощами.

Застосування захисних покриттів – змазок – є необхідним при виготовленні точних штамповок, пресових заготовок. У якості захисту сталі від окиснення і знеуглецювання досліджувалися двошарові покриття. Покриття для першого шару містило 70 ч. (по масі) деревного вугілля і 30 ч. вуглекислого барію, для другого – 70 ч. глини і 30 ч. піску. Велику кількість досліджень присвячено дослідженню покриттів для захисту при прокатці заготовок сталі ШХ15. Деякі зі складів знижували знеуглецювання сталі ШХ15 при нагріванні до 1200÷1300 °С, наприклад покриття на основі концентрованого розчину бури і каоліну. Практичного застосування більшість з розглянутих покриттів не знайшли.

Металеві покриття. Для захисту деталей і заготовок при їх гарячій обробці застосовують різні металеві покриття. Наприклад, відзначалася ефективність плакування заготовок м'якою сталлю, міддю, наплавлення на заготовки плазмовим методом тонких шарів жароміцного сплаву. Електролітичне осадження на деталі мідних покриттів дозволяє вберегти окремі ділянки сталевих валів, шестерень від науглецювання при хіміко-термічній обробці. Сталеві оболонки, які використовуються під час гарячої обробки заготовок з ніобію, молібдену, берилію і сплавів на їх основі, у процесі деформації

переходять у тонке металеве покриття, яке знижує окислення сплавів при охолодженні прокату, пресових заготовок після виконання технологічних операцій.

На практиці застосовують в основному металеві покриття на основі алюмінію, хрому та міді. Основне призначення покриття заготовок з високолегованої сталі м'якою міддю – зниження зусиль при обробці сталі тиском. Одночасно мідне покриття захищає сталеву поверхню від окислення при нагріванні.

Головною перевагою алюмінієвого покриття, яке на заготовки наносять методом дифузійного насичення, порівняно з іншими металевими покриттями є його висока жаростійкість. Покриття на основі алюмінію, отримані різними способами алітування сталей і сплавів, широко використовують у техніці для захисту деталей у процесі їх тривалої експлуатації. Алітування заготовок і деталей з метою захисту від окиснення при гарячій обробці може здійснюватися будь-яким відомим способом: у порошкових сумішах, у рідких середовищах, фарбуванням.

Алітування в сумішах, що містять порошки алюмінію або фероалюмінію, глинозему і галоїдні активатори, проводять у герметичних контейнерах при температурі $860 \div 950$ °С. Суміш для алітування може містити 98 % фероалюмінію і 2 % хлористого амонію або 40 % алюмінію, 68 % глинозему і 2 % хлористого амонію, або 63 % фероалюмінію, 35 % глинозему і 2 % хлористого амонію.

Алітування фарбуванням заготовок алюмінієвим шлікером з подальшим відпалом є менш трудомістким. У цьому випадку забезпечується можливість отримання покриттів з потрібними властивостями за рахунок зміни не тільки складу шлікера, але також режиму відпалу. Недоліком методу є необхідність відпалу заготовок у контрольованій атмосфері аргону.

Системи покриттів. Головна відмінна риса систем покриттів від всіх відомих способів захисту металу покриттями полягає в тому, що в системі покриттів працюють два захисні шари, причому одним з них може бути покриття, що застосовується для захисту виробів у процесі тривалої експлуатації, а іншим – покриття, призначене для нанесення на деталі і заготовки перед їх гарячою обробкою, термічною

обробкою і т. п. До таких покриттів можна віднести системи покриттів, що складаються з дифузійного шару і склоемалі.

Незважаючи на більш високу трудомісткість нанесення систем покриттів, їх застосування виправдовується високою якістю і надійністю захисту. Насичення поверхні деталей і заготовок супроводжується утворенням шару тугоплавких хімічно інертних сполук у поверхневих шарах металу. Механічні властивості цього шару досить високі, а тому ймовірність його пошкодження при транспортуванні, завантаженні заготовок у піч значно менше, ніж ймовірність пошкодження покривного шару.

2.2. Високотемпературні покриття

Проблема збільшення довговічності деталей, вузлів і виробів є однією з найважливіших у машинобудуванні. Особливо гостро проблема довговічності важлива при проектуванні, розробленні, виробництві, експлуатації та ремонті високотемпературних авіаційних газових турбін.

Головною ознакою розвитку сучасних авіаційних двигунів є безперервне збільшення температури газу перед турбіною, зниження питомої маси, підвищення ступеня стиснення повітря в компресорі. Це веде до істотного збільшення напруженості лопаток турбін і компресорів, до ускладнення конструкції і збільшення вартості авіаційних двигунів.

Через високу термомеханічну напруженість лопатки турбін мають малі ресурси і значною мірою обмежують міжремонтний ресурс двигунів у цілому. Тому завдання розроблення і впровадження нових вискоелективних методів збільшення властивостей міцності, корозійної стійкості металів, сплавів, покриттів і виробів є найважливішим у вирішенні проблеми підвищення довговічності лопаток елементів газотурбінних двигунів.

Застосовувані на сьогодні методи нанесення захисних покриттів на лопатки газових турбін не завжди задовольняють висунуті до них вимоги.

Розвиток захисних покриттів для лопаток турбін газотурбінних двигунів значною мірою пов'язаний перш за все з ускладненням хімічного складу композицій, вдосконаленням

відомих і освоєнням нових технологічних процесів, заснованих на нових фізичних явищах або процесах, а також введенням термічної або термомеханічної обробки з метою зміни структури і властивостей відомих і новостворюваних покриттів. За останні роки розроблено ряд покриттів, які виявилися набагато більш ефективними, ніж покриття систем Ni-Al і Co-Al, що отримують шляхом додавання будь-яким способом алюмінію на поверхню підкладки з нікелем або кобальтом. Створення нових жаростійких металевих композицій базується насамперед на розвитку теорії інтегрування алюмінідів, термічної і хіміко-термічної обробки, дослідженні напруженого стану системи сплав-покриття. При цьому термічна обробка не повинна погіршувати властивостей покриттів.

На ряді двигунів досить широко використовуються *технології отримання дифузійних покриттів*, які, очевидно, залишаться найбільш поширеними ще тривалий час. До них належать насамперед технології порошкового і шлікерного алітування і алюмосиліцування, які забезпечують формування досить крихких покриттів, особливо при товщині приблизно більше 0,04 мм. Основною причиною крихкості є висока концентрація алюмінію в шарі покриттів. Через велику крихкість покриття швидко розтріскуються, і тріщини, проникаючи в лопатки турбін з покриттів, помітно знижують їх довговічність.

У деяких випадках розвиток тріщин суттєво гальмується в смугах ковзання, що виникають у досить пластичних прошарках металу, або частинками, що зміцнюють матеріали за механізмом дисперсійного твердіння або за окислювальним механізмом, коли окиснення металу біля вершини тріщини значно знижує концентрацію напружень і швидкість поширення тріщини, що закругляється.

Шлікерна технологія не дозволяє отримувати покриття з високою однорідністю по товщині, нерідко покриття містять дрібні розсіяні пори, мають знижену ерозійну стійкість. Однак зазначена технологія відрізняється досить високою екологічною чистотою, простотою і низькою трудомісткістю. Тому шлікерна технологія широко використовується при ремонті, а в ряді випадків і при серійному виробництві авіаційних двигунів.

Основним легуючим елементом високотемпературних покриттів зазвичай є алюміній. На основі бінарних систем Ni-Al, Co-Al, Fe-Al розроблено численні захисні покриття, які запропоновано для використання.

Другим найважливішим елементом жаростійких покриттів є хром, який присутній практично у всіх високотемпературних покриттях, що застосовуються для лопаток турбін. Якщо хром не вводять з середовища, використововуваного для нанесення покриття, то він зазвичай надходить у покриття з нікелевих, кобальтових або залізних сплавів, де хром присутній у якості одного з основних легуючих елементів. Потрійні системи Ni-Cr-Al, Co-Cr-Al, Fe-Cr-Al покладено в основу формування більшості промислових покриттів, рекомендованих для лопаток газових турбін.

Із неметалевих покриттів найбільш важливе значення має кремній, який вводиться для підвищення стійкості до сульфідної корозії і поліпшення адгезії окисної плівки при окисненні.

До шкідливих домішок у високотемпературних металевих покриттях слід віднести насамперед кисень, азот, кальцій, сірку.

Суттєвим обмеженням застосування тих чи інших систем покриттів є вартість і технологічність. Найбільш суттєві результати можуть бути досягнуті в галузі технології, а не у сфері передбачення довговічності, шляхом введення у відпрацьовані системи Me-Cr-Al-Y ряду додаткових елементів, таких як Ta, W, Hf, Si, Yb і ін.

Легуючі елементи у високотемпературних металевих покриттях можна розділити на три групи:

1) елементи, що забезпечують формування захисної окисної плівки з високими захисними властивостями (Al, Si, Cr);

2) мікролегуючі елементи, що забезпечують поліпшення адгезії окисної плівки при ізотермічному і циклічному окисненні (Hf, La, Ce, Zr, Y, Yb, Th, Er);

3) елементи, які гальмують дифузію і підвищують стабільність і жароміцність покриттів (Ta, Re, W, Nb).

У деяких композиціях можна зустріти платину, яку додають для збільшення стійкості покриттів до сульфідної корозії, наприклад на лопатках стаціонарних турбін.

Далеко не вичерпаними є можливості посилення комбінованих алюмінідних покриттів, для яких одним з основних принципів теорії легування є принцип багатокомпонентного легування, спрямований на вдосконалення гетерофазної будови, забезпечення високої стабільності фазових складових, зміцнення меж зерен матричного β -твердого розчину покриттів, а також меж зерен і поверхонь розділу інших фаз, на гальмування дифузійних процесів на межі розділу сплавів і покриттів і збільшення опору високотемпературного окиснення на межі з газовим середовищем. У жаростійких покриттях реалізація цих вимог досягається спрямованим комплексним легуванням, яке призводить до ускладнення складу, подрібнення структури частинок, що утворюються при термічній обробці, уповільнення процесів їх коагуляції при підвищених температурах внаслідок гальмування дифузійних процесів у структурі покриття. При створенні захисних покриттів застосовується таке багатокомпонентне легування, яке разом з утворенням необхідних структурних складових забезпечувало б підвищення їх термостабільності, зміцнення основних фазових складових, таких як β - і γ' -структури.

У покриттях зустрічається порівняно невелика кількість фаз, проте розпізнавання цих фаз, особливо в зоні дифузійної взаємодії елементів покриттів і захищаних сплавів, що захищають їх виділення, розшифрування результатів рентгеноструктурного і електронно-графічного аналізу представляють значні труднощі.

Важливою складовою металографії покриттів є діаграми стану подвійних, потрійних і складніших систем. На сьогодні побудовано більшість практично важливих діаграм стану систем, істотних уточнень зазнала важлива діаграма стану керамічної системи ZrO_2 - Y_2O_3 . При використанні діаграм стану слід мати на увазі, що жаростійкі покриття являють собою нерівноважні перехідні системи, у яких відбувається встановлення рівноважного стану протягом всього часу їх експлуатації при високих температурах, і цей процес у сукупності з іншими є одним з чинників, що визначають фазову і структурну стабільність високотемпературних покриттів.

Однак, незважаючи на нерівновісність, діаграми стану дозволяють визначити приблизний фазовий склад і вказати напрямки зміни кількості і складу фаз при переході системи сплав-покриття до стану рівноваги.

Велике значення надається структурі покриттів, яка разом зі складом є одним з основних чинників, що визначають їх міцність, пластичність, опір втомі, окиснення та інші фізико-хімічні та механічні властивості. Тому отримання оптимальної структури покриттів є важливою умовою забезпечення необхідних властивостей, необхідної довговічності системи сплав-покриття. У теплозахисних системах величина теплового потоку не є головним чинником, що обмежує довговічність, поки при зростанні температури до певних меж не будуть помітні фазові перетворення і процеси спікання, що істотно змінюють початковий стан системи і викликають розтріскування в керамічному шарі.

У якості основи високотемпературних покриттів для газових турбін зазвичай використовують алюмініди нікелю, іноді в сукупності з легованим твердим розчином та іншими немінучими фазовими складовими. Покриття залишаються крихкими до деякої певної температури нагріву, після чого спостерігається значне збільшення пластичності. При температурі вище крихкопластичного переходу покриття легко піддаються термомеханічній обробці, при якій досягається істотне поліпшення механічних властивостей внаслідок подрібнення зерен покриттів.

Вплив зернистості на властивості покриттів практично досліджено. Визначальний вплив на властивості покриттів має їх хімічний і фазовий склад, проте застосовувана структура покриттів, що використовуються для захисту лопаток газових турбін, не завжди оптимальна. Зазвичай покриття мають стовпчасту будову, яка визначається умовами утворення зародків і їх зростання в тому чи іншому середовищі. При збільшенні температури формування розмір зерен покриття зростає. Алюмінідні дифузійні покриття, сформовані при більш високих температурах, мають більше зерно, ніж покриття, сформовані при більш низькій температурі. У той же час великозерниста структура відрізняється меншою пластичністю і в'язкістю,

матеріали з великозернистою структурою мають меншу межу витривалості, ніж з дрібнозернистою.

Тому важливим напрямком поліпшення механічних властивостей покриттів є розроблення методів подрібнення зерен у структурі покриттів. Зазвичай подрібнення зерен у структурі матеріалів досягають шляхів модифікування, термічної обробки, пластичної деформації і подальшого рекристалізаційного відпалу. Холодна пластична деформація алюмінідних покриттів ускладнена, а модифікування дифузійних покриттів є проблематичним. Підвищену пластичність має мартенситна структура β -NiAl, проте вона нестійка при високих температурах. Хороші результати отримано при високотемпературному термомеханічному зміцненні алюмінідних покриттів віброгалтуванням при температурі вище температури крихкопластичного переходу покриттів.

Для покриттів з більш високим вихідним розміром зерна потрібно і більше значення деформації, необхідної для отримання еквівалентної дрібнозернистої структури. Наприклад, хромоалітування при температурі 1000, 1050 і 1200 °C забезпечує отримання структури з більшим середнім розміром зерна, ніж алітування при 900 і 950 °C.

При термомеханічному зміцненні на глибину шару захисного покриття відбувається кілька процесів: пластична деформація, збільшення щільності дислокацій і зміцнення, з одного боку, і збільшення динамічного віку і рекристалізація, з іншого боку. Механізм формування зародків нової рекристалізаційної структури залежить від кількості меж зерен вихідної структури покриттів. Зародки нових зерен утворюються головним чином на межах зерен вихідної структури покриттів або в безпосередній близькості від них. Тому за інших рівних умов зміцнення покриттів з вихідною більш крупнозернистою структурою менш ефективно, оскільки рекристалізована структура матиме більше зерно, ніж рекристалізована структура з вихідним більш дрібним зерном.

Основна фаза алюмінідних покриттів β -NiAl деформується переважно за механізмом двійникування, а двійники є дуже ефективними місцями утворення зародків нових зерен, що

збільшує ефект подрібнення структури при термомеханічній обробці покриттів.

При динамічній рекристалізації істотно прискорюється повернення деформації. Температура і швидкість локальної повторної гарячої пластичної деформації досить великі. Безперервно повторювана ударна деформація значно збільшує щільність дислокацій і формує їх стійкі конфігурації. Тому рушійна сила переміщення меж зерен з часом знижується і нові структури покриттів, які утворилися, досягають граничного розміру і більше не ростуть. Згодом відбувається нова стадія зародження зерен під час термомеханічної обробки покриттів.

Відбувається повторна рекристалізація з характерною для даних умов миттєвою швидкістю повзучості. У пластичному стані алюмінідних покриттів при температурі **високотемпературної термомеханічної обробки (ВТМО)** істотно зростає миттєва швидкість повзучості алюмінідів нікелю, тому для нового утворення зародків рекристалізованої структури проводиться додаткова деформація, після якої відбувається повторна рекристалізація, і т. д. Первинна рекристалізація протікає, очевидно, лише частково, одночасно з динамічним поверненням покриттів, тому в процесі термомеханічного зміцнення повна рекристалізація покриттів не відбувається. Спостерігається інтенсивне збільшення кількості нових дрібних зерен, утворення дуже дрібної субзернистої структури зовнішньої зони алюмінідних покриттів, створюється підвищена щільність дислокацій у шарі.

Таким чином, при високотемпературному термомеханічному зміцненні покриттів відбуваються постійно повторюване динамічне повернення деформації і рекристалізація, які перешкоджають утворенню мікротріщин у шарі в процесі ВТМО. Після ВТМО доцільно проведення відпалу покриттів для більш повного протікання первинної рекристалізації і стабілізації структури покриттів.

Для підвищення пластичності і тріщиностійкості відомих алюмінідних покриттів застосовуються різні технології термічної обробки деталей з захисними покриттями, які більшою чи меншою мірою зменшують вміст алюмінію в покриттях, забезпечують цілеспрямоване формування більш в'язких

гетерофазних структур з більш високою міцністю і пластичністю. Одночасно досягається сприятливий напружений стан системи сплав-покриття, при якому в покритті формуються стискальні залишкові напруження.

Найбільш розповсюдженим видом термічної обробки покриттів є *дифузний відпал* при температурах, що не перевищують гранично допустимих значень для металу лопаток в експлуатації (зазвичай $1000 \div 1050$ °С залежно від марки сплаву).

При використанні двостадійних технологій нанесення дифузійних комплексних покриттів зазвичай застосовують загартування і відпускання деталей з покриттями. До таких покриттів належать дифузійне хромування або нікельхромування з подальшим алітуванням або хромоалітуванням.

Інший напрямок підвищення пластичності і в'язкості руйнування відомих систем сплав-покриття пов'язаний зі зменшенням їх товщини до $0,030 \div 0,010$ мм, що забезпечує той чи інший міжремонтний ресурс лопаток турбін без розтріскування шару з подальшим відновленням тонких покриттів при ремонті.

Тонкі покриття мають малий запас алюмінію, легко пошкоджуються в експлуатації, особливо при сульфідній корозії, і не мають перспектив збільшення міжремонтного ресурсу без проведення комплексу операцій повного відновлення покриттів, оскільки порівняно швидко вичерпують свої захисні властивості. Тому при переході до гранично тонких для лопаток турбін покриттів особливо актуальною стає завдання значного підвищення захисних властивостей і стабільності хімічного і фазового складу покриттів при високотемпературному окисненні.

В останні роки на деяких авіаційних двигунах знайшли застосування *конденсовані покриття*, які отримують електронно-променевим випаровуванням або електродуговим плазмовим розпиленням спеціальних зливків сплавів, призначених для покриттів. Нерідко успішно використовуються комбінації способів у багастадійних технологіях, коли на лопатки спочатку наносять шар легованого сплаву або платини, танталу та інших металів, а потім проводять алітування або хромоалітування традиційними способами. Елементи підшару дуже впливають на склади покриттів, їх структуру і властивості.

Термічна обробка лопаток з комбінованими покриттями забезпечує формування двофазної, досить вузької і міцної структури, утворення стискальних напружень у поверхневому шарі.

На працездатність покриттів на лопатках турбін залежно від температури визначальний вплив мають повзучість, окиснення, гаряча корозія, термічна і механічна втома. Ці чинники обмежують довговічність лопаток турбін з покриттями.

Для забезпечення працездатності лопаток високотемпературних турбін ефективним є застосування **комбінованих теплозахисних покриттів**, які включають у себе шар металевого покриття і досить товстий (товщиною до 0,25 мм) шар стовпчикової або мікротріщинуватої кераміки з низькою теплопровідністю, отриманий методом електро-променевого напилення або плазмового осадження на повітрі чи в динамічному вакуумі. Електронно-променева технологія найповніше задовольняє вимоги, що висуваються до керамічних покриттів, забезпечує отримання оптимально стовпчикової структури, однак через недостатню автоматизацію процесів і нестабільність параметрів, які керують процесом напилення, не завжди отримують досить стабільні результати. Монокристали кераміки мають високу міцність (до 1688 МПа) і жорсткість. Стабілізація окиснем ітербію замість окисню ітрію дозволяє підвищити в'язкість кераміки.

Останні десятиліття основні зусилля дослідників спрямовані на підвищення циклічної довговічності теплозахисних систем, яка пов'язана з дією напружень і окиснення. Стискальні напруження, що утворюються при охолодженні, призводять до розтріскування металевго шару покриття і з цієї причини є більш шкідливими, ніж напруження розтягу. До іншого чинника, що знижує циклічну довговічність покриттів, який є основним, слід віднести окиснення металевго шару покриття під керамікою, що супроводжується відшаруванням кераміки, зміною теплового і напруженого стану на ділянці з керамікою, що відшарувалася, і зниженням працездатності конструкції.

Плазмова технологія напилення керамічних покриттів за останні роки розвивається найінтенсивніше. Нанесення керамічних покриттів у динамічному вакуумі забезпечує

отримання більш довговічних покриттів, ніж напилення на повітрі. Проблема отримання високоякісних плазмових покриттів багато в чому залежить від якості високодисперсного порошку кераміки $ZrO_2 \cdot (6\div 8)\% Y_2O_3$. Концентрація Y_2O_3 в кераміці повинна бути не менше 7 %, в іншому випадку температурний коефіцієнт лінійного розширення кераміки має значну анізотропію, що викликає напруження і тріщини в кераміці.

Істотне підвищення довговічності теплозахисної кераміки, яка отримується плазмовим напиленням, досягається шляхом створення мікротріщинуватої структури у формі дрібних стовпчастих керамічних сегментів за допомогою термічної обробки. Плазмові покриття з керамікою застосовуються переважно на соплових апаратах і в камерах згоряння двигунів.

Для зменшення швидкості надходження кисню до металу по мікротріщинах у кераміці розглядаються різні методи ущільнення кераміки, введення інших окиснів або навіть легко окиснювальних сульфідів, що забезпечує деяке «самозалікування» розтрісканих покриттів. Найбільш перспективним є формування тонких щільних багат шарових композицій у поверхневому шарі тріщинуватої кераміки, що мають гарну міцність і в'язкість руйнування. Прикладом такої стільникової конструкції є формування щільного тонкого керамічного шару $ZrO_2 \cdot 8\% Y_2O_3$, легованого 20 % Al_2O_3 , або формування аморфних плівок SiO_3 .

Стабільність теплозахисних покриттів у процесі експлуатації лопаток турбін знижується в результаті дії багатьох чинників, особливо ерозії і протікання окиснювальних процесів, що ведуть до дестабілізації кераміки і до сколювання керамічного шару.

Довговічність керамічних покриттів на лопатках турбін залежить від свободи деформацій, в'язкості шару на межі металевого і керамічного покриттів і опору металевій частині покриття високотемпературному окисненню.

Для успішного захисту від теплового потоку і підвищення опору лопаток руйнуванню від термічних навантажень теплозахисні покриття повинні мати гарну міцність і жароміцність металевого шару, високу стійкість до високотемпературного окиснення і гарячої корозії, стабільність

структури, гарну ерозійну стійкість, пластичність, в'язкість, мінімальну теплопровідність кераміки. З цією метою проводиться подальше удосконалення складу і будови покриттів, розробляються способи отримання аморфних структур керамічних шарів, створюються дифузійні бар'єри на межі розподілу металевого покриття з металом, а також на межі метал-кераміка, ведуться інтенсивні пошуки способів підвищення міцності адгезії кераміки до металу, поліпшуються механічні властивості як металевих, так і керамічних покриттів. Багато уваги приділяється глибокому вивченню механізмів руйнування металокерамічних композицій, дослідженню тривалої працездатності лопаток з шарами покриттів у тріщинках.

2.3. Газотермічне напилення

Підвищення надійності сучасних машин і механізмів, продовження їх ресурсу, а також їх реновація шляхом застосування новітніх технологій – один з найбільш пріоритетних напрямів розвитку техніки. У вирішенні цих питань значне місце відводиться захисним покриттям, а також способам їх нанесення, серед яких головне місце займають газотермічні процеси.

Терміном *газотермічне напилення* (ГТН) позначаються всі процеси нанесення покриттів з матеріалів у вигляді дроту, прутка або порошку, які не розкладаються при високих температурах. Вони вводяться у високотемпературну зону і розпилюються або струменем газу, або стисненим повітрям, при цьому утворюються дрібні частинки, які рухаються з великою швидкістю і потрапляють на заздалегідь підготовлену поверхню, де утворюють шар із заданими властивостями.

Процеси ГТН з повним правом можна віднести до сфери «високих технологій» і вже через це їх активно впроваджують у виробництво буквально всі промислово розвинені країни. За непрямою оцінкою (загальна кількість одиниць проданого устаткування), насиченість західноєвропейської промисловості установками для ГТН покриттів вище за насиченість підприємств країн СНД приблизно в 300÷400 разів. Характерно, що бурхливе впровадження техніки ГТН відбувається на фоні такого ж бурхливого витіснення «брудних» гальванічних технологій.

Робиться це, перш за все, з метою вирішення екологічних проблем.

Використання технологій ГТН покриттів, що існують на сьогодні, дозволяє значно знизити або ж зовсім виключити вплив на зношування деталей таких чинників, як ерозія, корозія (зокрема високотемпературна), кавітація та ін. Крім виконання чисто функцій антизносу, покриття можуть призначатися також для створення термобар'єрного шару, забезпечення електроізоляційних властивостей, поглинання випромінювання продуктів радіоактивного розпаду, забезпечення певних оптичних властивостей, реалізації селективного змочування, створення біологічно активних поверхневих властивостей і багато чого іншого. Зокрема завдяки ГТН за останні роки істотно збагатилася новими способами відновлення деталей практика ремонтного виробництва. ГТН, як один з найбільш прогресивних і високоефективних способів нанесення порошкових матеріалів, дозволив реалізувати в єдиному технологічному процесі одночасне відновлення геометричних розмірів і зміцнення деталей за рахунок підвищення зносостійкості їх робочих поверхонь, що в результаті призводить до зростання ресурсу виробу в цілому.

Залежно від джерела енергії для нагріву і транспортування частинок матеріалу покриття розрізняють декілька основних технологічних процесів, які сьогодні активно використовуються у світовій практиці: **високошвидкісне напилення**; **плазмове напилення** на повітрі з використанням таких плазмоутворюючих газів, як аргон, азот, гелій, повітря; **детонаційне** і **газополум'яне напилення**, а також **металізація електричної дуги** і **наплавлення**.

Вибір конкретного методу ГТН багато в чому залежить від призначення покриття і умов його роботи. Залежно від цих чинників змінюються вимоги щодо точності дотримання основних параметрів покриття – його складу, товщини, щільності і міцності зчеплення з підкладкою.

Високошвидкісне напилення. Високошвидкісне газополум'яне напилення по праву вважається найбільш сучасним з технологій напилення. У країнах Європи і Північної Америки високошвидкісне напилення практично витіснило гальваніку і методи вакуумного напилення в багатьох галузях.

Твердосплавні покриття, нанесені методами високошвидкісного напилення, за всіма показниками перевершують гальванічні покриття, процес створення яких визнаний надзвичайно канцерогенним.

На початку 80-х рр. ХХ ст. з'явилися установки високошвидкісного напилення, більш прості за конструкцією, із швидкістю газового потоку більше 2000 м/с. Щільність покриттів досягає 99 %. У якості матеріалу, що наноситься, використовують порошки карбідів, металокарбідів, сплавів на основі Ni, Cu та ін. Для збільшення швидкості частинок збільшують швидкість «витікання» продуктів згоряння шляхом підвищення тиску в камері згоряння до 1,0÷1,5 МПа, а в конструкцію соплового апарата вводять сопло Лавалю. На рис. 2.1 продано схему розпилювача системи високошвидкісного напилення.

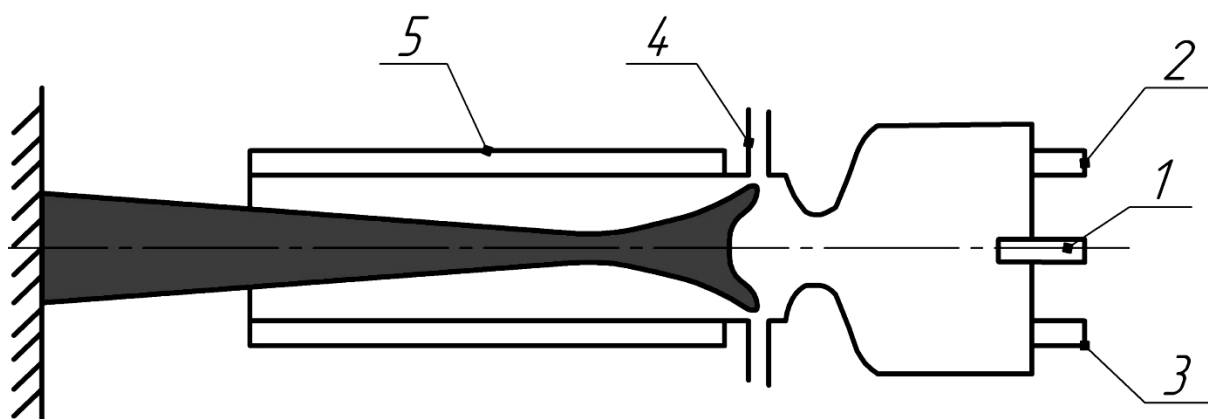


Рис. 2.1. Схема високошвидкісного порошкового розпилювача:
1 – подача порошку (осьова); 2 – подача кисню; 3 – подача палива; 4 – подача порошку (радіальна); 5 – стовбур

При газополум'яному дротяному напиленні в покритті міститься менше окиснів, ніж при порошковому напиленні. Це має особливо важливе значення для отримання щільних корозійностійких покриттів.

Проте відносно мала швидкість частинок при газополум'яному напиленні не забезпечує щільного формування покриттів. Поверхня частинок встигає окиснюватися. Особливість конструкції дротяного високошвидкісного

напилення розпилювача полягає в тому, що камера згоряння наближена до вихідного отвору сопла.

Збільшення швидкості частинок при меншій їх температурі дозволило знизити рівень окиснення частинок і підвищити щільність порошкового покриття. У порошкових розпилювачах високошвидкісного напилення першого і другого поколінь використовувалося циліндрове сопло (рис. 2.2, *а*).

Для систем першого покоління тиск у камері згоряння складав $0,3 \div 0,5$ МПа, швидкість частинок – 450 м/с. До таких систем належали Jet Cote, CDS, Top Gun 6, Diamond Jet і ін. Для систем другого покоління тиск у камері згоряння складав $0,6 \div 1,0$ МПа, швидкість частинок – 600÷650 м/с. Витрата порошку – 10 кг/год. У системах третього покоління застосовувалися розширювальні профільні сопла Лаваля (рис. 2.2, *б*). До таких систем належать установки високошвидкісного напилення ТСЗП-HVOF, GTV K2 та ін. Витрата порошку складає до 18 кг/год.

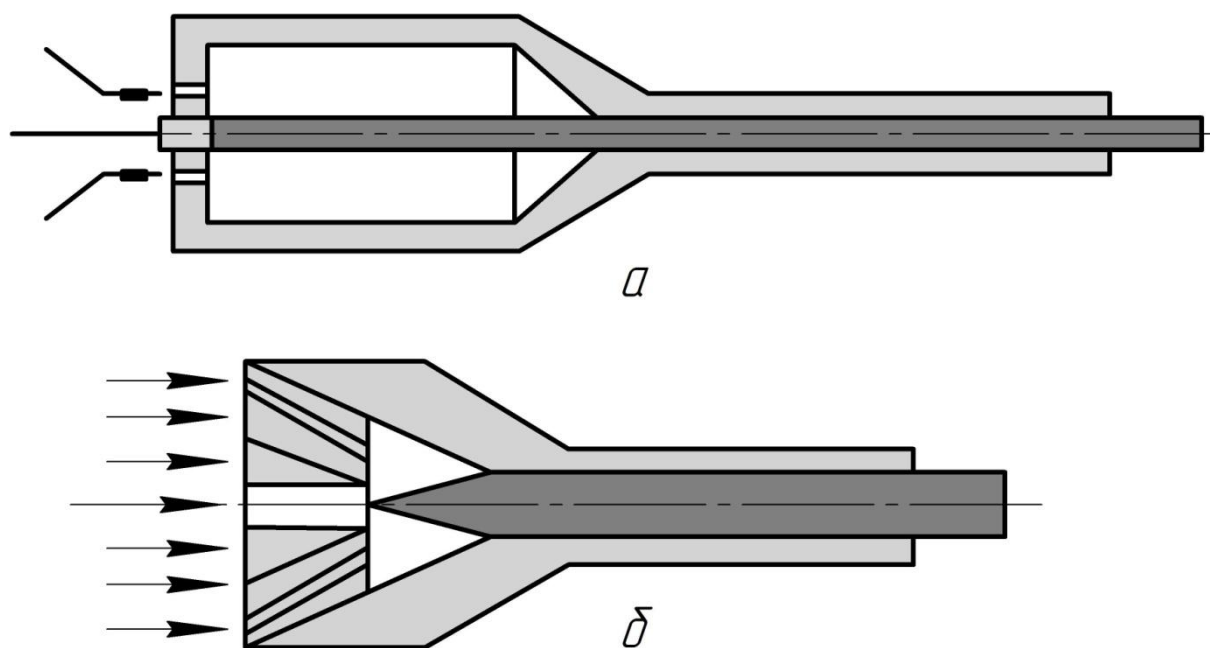


Рис. 2.2. Сопла, що використовуються при високошвидкісному напиленні: а – циліндрове; б – розширювальне (сопло Лаваля)

Плазмове напилення. Джерелом високої температури при плазмовому методі є плазмовий струмінь, який утворюється в спеціальних пальниках (плазмотронах). До плазмового пальника

підводять електричний струм від джерела живлення. При цьому через анод, виконаний у вигляді сопла, пропускають інертний газ (аргон), а в якості вторинного газу – водень, азот або гелій. При збудженні дуги між катодом і анодом (соплом) відбувається іонізація газу і утворення плазмового струменя. Порошковий матеріал розплавляється при потраплянні в плазмову дугу і кристалізується на поверхні деталі.

Для напилення може використовуватися практично будь-який порошковий матеріал – металеві сплави, металокераміка і кераміка. Швидкість «витікання» іонізованого газу з сопла плазмотрона складає $350\div 400$ м/с, а температура досягає 5500 °С. Напилюваний матеріал у вигляді порошку з розміром частинок $40\div 100$ мкм вводиться в струмінь плазми за допомогою транспортуючого газу (аргону) і пристрою дозованої подачі порошку (дозатора).

Швидкість частинок напилюваного матеріалу в струмені при підльоті до напилюваної поверхні досягає $80\div 100$ м/с. Можливість регулювання теплової потужності плазмового струменя дозволяє використовувати її як для напилення тугоплавких, так і легкоплавких матеріалів.

Вітчизняними підприємствами випускається більше 150 найменувань порошкових матеріалів для напилення. Процес плазмового напилення застосовується для ремонту і нанесення зносостійких покриттів на поверхні тіл обертання, що труться, плоских деталей зі складною геометричною формою. Широке застосування плазмова технологія знаходить у теплоенергетиці і металургії. У такий спосіб відновлюють лопатки турбін, автоклави, шнеки, підшипники ковзання.

Плазмовий метод напилення є найбільш універсальним серед решти методів ГТН. Істотна роль у промисловій реалізації цієї технології належить устаткуванню, основним елементом якого, можна сказати «серцем», є генератори потоку плазми. Останніми роками зусилля з вдосконалення устаткування для ГТН, головним чином, пов'язані з його оснащенням вимірювальними і керуючими цифровими пристроями. На базі цієї ідеології розробляються і випускаються нові типи наукоємкої плазмової апаратури.

Детонаційне напилення. *Детонаційно-газовий метод напилення* є одним з видів газотермічного нанесення покриттів, що використовують енергію горючих газів (в основному, пропан-бутану) у суміші з киснем, а також із стисненим повітрям (азотом, аргоном). Детонаційно-газовий метод, використовуючи енергію вибуху газових сумішей, є циклічним процесом, має високу питому потужність і значне спрощення перетворення енергії в корисну роботу.

Перевагами детонаційного методу напилення є:

- висока адгезія покриття (80÷250 МПа);
- низька пористість покриття (0,5÷1 %);
- відсутність деформації напилюваної деталі.

До недоліків слід віднести низьку продуктивність і недостатню надійність існуючого устаткування.

Технологія детонаційно-газового напилення дозволяє не тільки відновити робочі поверхні деталей, але і істотно підвищити їх експлуатаційний ресурс за рахунок застосування зносостійких матеріалів. Детонаційно-газовий спосіб дозволяє наносити покриття з металів, сплавів, окиснів і карбідів металів, композиційних порошків (плакованих і конгломерованих), а також механічних сумішей. Залежно від конструкції установки частота циклів може досягати 8÷10 Гц, але в більшості випадків вона складає 3÷4 Гц.

Процес детонаційного напилення характеризується значною кількістю технологічних параметрів. Основні з них:

- глибина завантаження порошку, тобто відстань від місця введення порошку до зрізу стовбура;
- співвідношення витрат газів (пального, кисню, азоту або повітря), тобто склад робочої вибухової суміші;
- ступінь заповнення стовбура – відношення сумарної витрати газу за один цикл до сумарного об'єму стовбура і камери змішування;
- витрата азоту для продування стовбура;
- товщина напилюваного шару за один цикл;
- дистанція напилення;
- хімічний і гранулометричний склад і спосіб виготовлення порошку.

Від глибини завантаження залежить час перебування частинок порошку усередині стовбура, повнота фізико-хімічної взаємодії з продуктами детонації. Склад суміші істотно впливає на енергетичні характеристики частинок порошку і визначає хімічну взаємодію напилюваного матеріалу з продуктами детонації.

Залежно від складу робочої суміші може відбуватися повне або неповне згоряння горючого газу. Оптимальною робочою сумішшю може бути суміш, близька до стехіометричної.

Товщина одиничного шару складає $5\div 20$ мкм. Дистанція напилення визначається з умови мінімальної дії на потік частинок відбитої від поверхні підкладки хвилі. Практично для стовбурів різного діаметра ця величина складає $150\div 200$ мм.

Установка для детонаційного поверхневого напилення (ДПН) є свого роду змішувачем, не представляючи з технічної точки зору нічого складного. Активне середовище насичується горючими газами – ацетилен як робочий газ, азот для стабілізації процесів утворення плівки і кисень як фундамент бурхливої і високотемпературної реакції. Потім проводиться уприскування порції напилюваного матеріалу, після чого електричний розряд виконує роль детонатора. Металевий порошок дисперговано (близько сотні частинок на 250 міліграм), а після вдування в газову суміш до моменту детонації він знаходиться у зваженому стані.

З розповсюдженням детонаційної хвилі відбувається послідовне перетворення активного середовища: розрив молекулярних зв'язків з виділенням великої кількості тепла. Підвищення загального рівня енергії значно спрощує дисоціацію наступних молекул.

Швидкість реакції для більшості газових сумішей значно перевищує швидкість звуку – ацетилено-кисневе середовище детонує в інтервалі $2\div 3$ тис. м/с. Хімічна реакція незмінно супроводжується виділенням тепла – до 3,5 тисяч градусів, що веде до теплового розширення. Очевидно, що при однаковому об'ємі ДПН-установки реактивне розширення активного середовища веде до негайного підвищення тиску. Таким чином, продукти реакції виходять із стовбура з силою в середньому в $1200\div 1500$ атм. При такому тиску переріз сопла має бути

достатньо великим, інакше детонаційна хвиля викличе не пластичну мікродеформацію, а серйозне пошкодження кристалітної структури.

Не дивлячись на удавану активність протікання хімічного перетворення керувати енергетичними показниками детонації легко і просто за допомогою зміни відсоткового співвідношення елементів активного середовища.

Здебільшого контроль базується на тепловіддачі реакції, яку можна зменшувати розбавленням газової суміші азотом (з цієї причини його часто називають просто розчинником) або збільшувати додаванням хімічно чистого окисника – кисню.

Перевищення певного температурного порогу веде до повної дисоціації продуктів детонації, наприклад при великій температурі відомий продукт горіння – вуглекислий газ – розпадається на вуглець і активний кисень, що підвищує загальний окиснювальний потенціал суміші. Вивільнення реактивних радикалів визначає ступінь взаємодії напилюваного порошку з активним середовищем. Якщо у зварюванні велике значення надається виключенню з реакції кисню, то напилення дуже часто вимагає безпосередньої участі кисню для утворення окисної плівки на напиленій поверхні.

Процес напилення. Детонаційна хвиля шляхом конвективних процесів за частки секунди розігріває частинки напилюваного матеріалу і надає їм вектор швидкісного руху. Після ініціації вибуху активне середовище розпадається протягом всього 0,5 мкс, далі близько 3 мкс детонаційна хвиля впливає на напилюваний порошок, нагріваючи і розгоняючи його. Ударна деформація, протягом якої і відбувається утворення поверхневої плівки, продовжується 10^{-7} с.

Очевидно, що ДПН належить до імпульсних технологій: за одну ітерацію напилюється покриття до 20 мкм товщиною, відповідно нарощування плівки відбувається за допомогою багатократних пострілів. Площа ударної деформації повністю залежить від параметрів стовбура, оскільки детонаційне напилення відрізняється мінімальним розсіюванням. Зміна форми стовбура веде до зміни плями. Таким чином, за допомогою насадок з мінімальною втратою порошку обробляються деталі будь-якої форми і розмірів.

Очевидно, що утворення поверхневої плівки супроводжується взаємодією різних твердофазних матеріалів. Замикання іонних зв'язків відбувається тільки при досягненні напилюваними матеріалами строго заданого енергетичного рівня, достатнього для розриву старих зв'язків (а також видалення поверхневих окиснів) і утворення нових, таких, що супроводжуються переходом на нижній енергетичний рівень. Взаємодія частинок порошку між собою обумовлюється попереднім нагрівом детонаційною хвилею і тепловим викидом у результаті ударної деформації, коли багато частинок просто розплющуються — у напиленому шарі виключаються пори і флуктуації щільності, а плівка копіює мікрорельєф поверхні. При дотриманні техпроцесу напилюваний матеріал набуває адгезії на рівні металу основи, чого більшість інших технологій гарантувати не може. Врешті-решт, детонаційне напилення дозволяє працювати з композиційними і тугоплавкими матеріалами, окиснями, формуючи поверхню на кераміці, склі і металі.

Для високотемпературних процесів характерне накопичення внутрішнього напруження в результаті охолодження напиленого шару. ДПН не є виключенням, проте в системі «підкладка-плівка» зазвичай спостерігається процес самозняття навантаження за рахунок розриву деяких зв'язків і, як наслідок, зниження адгезії.

Разом з тим показники зчеплення детонаційного напилення в 1,5 рази вищі, ніж в інших технологіях.

Типи напилених покриттів. Взаємодія підкладки і напилюваного матеріалу відбувається при відносно високих енергіях, що гарантує утворення множинних хімічних зв'язків як між частинками, так і з основним матеріалом. Поверхня, нанесена детонаційним методом, показує адгезію на рівні $0,7 \div 1,7$ т/см², при цьому пористість перевищує 2 % тільки при порушенні техпроцесу, викликаного екстремальною термічною дією.

Висока енергія пластичної деформації викликає зміцнення напилюваного шару до 13,5 Гн/м², за таблицею Віккерса. При таких показниках прецизійна фінішна обробка дає 14 квалітет шорсткості.

Врешті-решт, всі отримані покриття можна розділити на декілька типів залежно від передбачуваної експлуатації:

- *жаростійкі*. В основі порошку лежить карбід хрому і окисень магнію, які зв'язуються іонами нікелю. Крім того, одні виробничники використовують поверхневе окиснення титану і хрому, інші – складні окисні за типом ільменіту;

- *нержавіючі*. Основу напиленого шару складають легуючі компоненти (хром, нікель, молібден), які поверхнево окиснюються для кращого протистояння агресивному середовищу і підвищення на 5÷10 % міцності покриття;

- *зносоустійкі*. Кобальт або нікель зв'язують міцні або тугоплавкі метали. Відсотковим вмістом зв'язуючих компонентів регулюється ударна в'язкість, показники якої знаходяться у зворотній залежності від твердості і зносоустійкості. Нанесення титану і карбідів вольфраму дозволяє збільшити опірність ерозії і абразивному зношуванню, не дивлячись на підвищену температуру експлуатації.

Напилені детонаційним методом покриття відрізняються високою адгезією, квалітетом шорсткості і спрощеним контролем над властивостями поверхні. При цьому технічна реалізація проста, невибаглива і універсальна, а витратні матеріали дешеві і дуже поширені. Разом з тим широке розповсюдження ДПН на даний момент обмежене відсутністю повноцінних блоків керування. Не дивлячись на поважний вік детонаційної теорії, сьогодні все ще ведуться обширні дослідження, що відкривають нові особливості протікання процесів перетворення активного середовища і взаємодії порошків з основою. Звичайно, є зведені таблиці для настроювання устаткування, але в більшості виробничих випадків потрібне науково обґрунтоване коректування. І часто провести таке коректування, ґрунтуючись лише на теоретичних викладеннях, просто неможливо, настільки багатогранні процеси, що відбуваються.

Та все одно після настроювання ДПН-обладнання з повноцінним зворотним зв'язком протягом довгих років даватиме стабільні результати, причому за виробничими витратами цей процес дешевший, а за часом – швидший за інші технології.

Газополум'яний метод. Джерелом тепла при даному способі напилення виступає ацетиленокисневе полум'я, температура якого не перевищує 3000 °С. Використання газополум'яного методу характеризується відносною простотою

застосовуваного устаткування і вимагає наявності ацетилену і кисню. Матеріал, що розпилюється, потрапляючи у факел ацетиленокисневого полум'я пальника, розігрівається до температури, близької до температури плавлення, і розгоняється до швидкості 20÷30 м/с. При зіткненні з виробом розігріті частинки з'єднуються з поверхнею деталі і між собою, утворюючи достатньо щільне і рівномірне покриття.

За допомогою газополум'яних пальників проводять напилення полімерних матеріалів (пластмаси), металів (алюміній, бронза, бабіт, нікель і т. д.) і керамічних з'єднань (окисень титану, окисень алюмінію та ін.). Розрізняють два способи подачі напилюваного матеріалу в ацетиленокисневе полум'я пальників: у вигляді порошку і у вигляді дроту. Наприклад, у газополум'яному пальнику Castodyn-8000 фірми Castolin-Eutectic напилюваний матеріал подають у вигляді порошку.

Процес металізації відомий давно, і починаючи з 50-х рр. минулого сторіччя він широко застосовується для антикорозійного захисту металоконструкцій. Це відпрацьована технологія захисту від корозії поверхонь сталевих конструкцій і виробів з металів і сплавів.

Електродугова металізація. Процес металізації розпилюванням полягає в безперервному плавленні металу, розпилюванні його на найдрібніші частинки і нанесенні на підготовлену методом абразивно-струменевої обробки поверхню. Потрапляючи на поверхню, що металізується, частинки деформуються, нагромаджуються одна на одну і утворюють покриття металізації шаруватої будови (рис. 2.3). При цьому температура виробу під час напилення не перевищує 120 °С. При металізації зчеплення частинок з основою відбувається унаслідок шорсткості поверхні під дією молекулярних сил і носить в основному механічний (адгезійний) характер.

Основними недоліками металізації раніше вважалися велика пористість, недостатня адгезія і значні втрати металу при розпилюванні (що приводять до зростання ціни). Проте сучасні установки напилення дозволяють знизити пористість до 5÷7 %, забезпечити коефіцієнт використання матеріалу понад 70 %. Адгезія напиленого металу в багато разів перевищує адгезію лакофарбних і полімерних композицій.

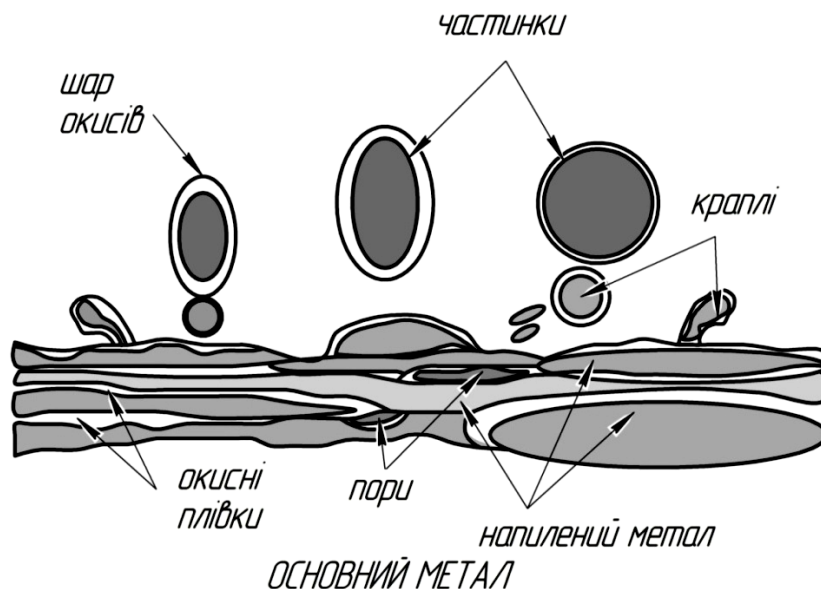


Рис. 2.3. Процес утворення металізаційного покриття

Для подальшого підвищення щільності і зменшення проникності покриттів використовуються різноманітні просочення, стійкі до дії агресивних середовищ, а також фарбування. Вартість нанесення металевих покриттів вже порівняна з вартістю якісних полімерних покриттів.

Електродугове напилення переважає серед інших способів ГТН і за такими показниками, як тепла ефективність, вартість напилюваних матеріалів, простота обслуговування. Так, витрата електроенергії на 1 кг матеріалу, що розпилюється, при напиленні електродуги складає приблизно 0,6 кВт/кг (при плазмовому напиленні енергетичні витрати складають 5÷7 кВт/кг для порошкового напилення, 2÷3 кВт/кг для дротяного напилення). Техніко-економічні оцінки показують, що відносна вартість покриттів електродуг у 3÷10 разів дешевша за покриття, що отримуються іншими способами ГТН при забезпеченні їх високої міцності.

Металізацію з подальшим фарбуванням, використовувану для захисту сталевих металоконструкцій, називають **комбінованим покриттям**. Термін служби таких покриттів істотно вищий, ніж сума термінів служби кожного шару окремо, тому їх слід застосовувати для довготривалого захисту від корозії сталевих конструкцій, які експлуатуватимуться в середньо- і сильноагресивних середовищах. Металізація в деяких випадках – єдиний і незамінний спосіб обертання конструкцій від корозії і

руйнування. У той час, як гальванічні покриття і цинкування, якісне лакофарбове або полімерне покриття можливо отримати тільки в заводських умовах, металізаційні покриття можна наносити як у заводських, так і в польових умовах, на монтажних майданчиках (рис. 2.4).

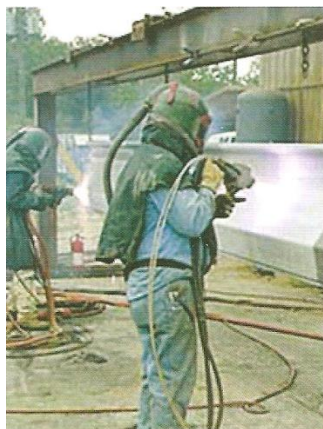


Рис. 2.4. Металізація сталевих мостових конструкцій у польових умовах

Основними антикорозійними матеріалами, що наносяться способом металізації на сталеві конструкції і вироби, є цинк, алюміній і їх сплави (рис. 2.5).



Рис. 2.5. Цинк-алюмінієве покриття металоконструкцій

Важливим чинником вважають протекторні властивості металізаційних покриттів – пошкоджене місце на покритті за рахунок гальванічного ефекту затягується іонами алюмінію або цинку, оберігаючи матеріал підкладки. Найбільш активним з погляду протекторного захисту вважається сплав алюмінію і магнію ($AlMg_5$).

Всі ці особливості дозволяють вважати металізацію найкращим вибором для відповідальних металоконструкцій за співвідношенням ціна/якість.

Антикорозійні покриття наносять, головним чином, металізаційними апаратами дротяного типу (установки для нанесення порошкових матеріалів використовуються рідше).

Принцип дії цих апаратів заснований на тому, що метал у вигляді дроту безперервно подають в апарат, там він плавиться газовим полум'ям або електричною дугою і потім розпилюється стисненим повітрям на найдрібніші частинки, які наносяться на поверхню. Принципова схема роботи металізатора зображена на рис. 2.6.

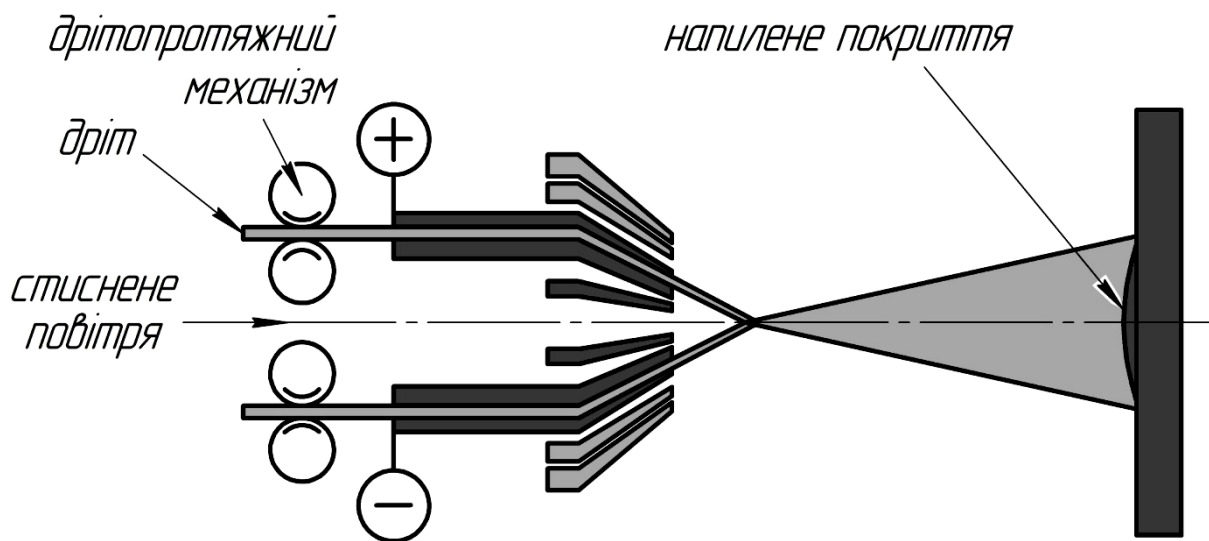


Рис. 2.6. Схема роботи металізатора

Особливості і переваги способів нанесення ГТН покриттів

Універсальність. Ніяким іншим способом не можна нанести покриття з таких різних матеріалів, як метали, сплави, окисні, карбіди, нітриди, бориди, пластмаси і комбінації матеріалів з температурою плавлення від $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $3500\text{ }^{\circ}\text{C}$ на

основу зі сталей, чавунів, кольорових металів без обмежень. Товщина шару від 0,1 мм до 15,0 мм. Оптимально – 0,5÷3,0 мм.

У якості підкладки можна використовувати також дерево, скло, пластмаси, кераміку, композиційні матеріали.

Легкість управління процесом отримання покриттів і їх складом. Енергетичні характеристики змінюються залежно від вимог технології в процесі отримання покриттів. Складом покриття і його службовими властивостями (твердість, корозійна стійкість, зносостійкість і ін.) можна управляти шляхом змішування різних матеріалів. Твердість покриття – величина керована в діапазоні 180 HB ÷ 64 HRC.

Відсутність термічних деформацій і яких-небудь структурних змін матеріалу деталі при напиленні, зважаючи на незначний нагрів. Температура деталі при нанесенні покриття не перевищує 100 °С, що дозволяє з упевненістю гарантувати відсутність яких-небудь структурних перетворень не тільки в масиві деталі, але навіть і в поверхневих шарах.

Розміри і маса деталей не обмежені. ГТН покриття можна наносити на будь-які об'єкти: мости, судна, трубопроводи, будівельні конструкції, котли, колінчасті вали, лопатки турбін і т. п.

Широкий діапазон температур і тиск, у якому можна проводити процеси ГТН, – у низькому вакуумі в спеціальній камері з контрольованою інертною атмосферою, у повітрі за нормальних умов, під водою.

Економне використання матеріалів і енергоресурсів. Часто при зносі поверхонь 0,1÷1,5 мм вага покриття складає лише частки відсотка ваги відновленої деталі. Припуски під подальшу обробку мінімальні і складають 10÷15 % товщини покриття. За рахунок цього час простоїв і витрати з обробки зведено до мінімуму. Поверхні можуть бути відновлені неодноразово. Вартість виконання робіт складає від 5 до 50 % вартості нового виробу, при цьому ресурс роботи напиленої деталі, як правило, не менше, ніж у нової, або істотно вище.

Можливість заміни дорогих конструкційних матеріалів дешевшими за рахунок нанесення спеціальних покриттів – зносостійких, корозійностійких, ерозійностійких, антифрикційних, жаростійких і інших покриттів, а також можливість створення деталей, основні робочі поверхні яких

зношуються значно повільніше, ніж основний матеріал початкової заготовки.

Матеріали для напилення. Для процесів ГТН застосовують велику кількість порошків з різних матеріалів з розміром частинок від 5 до 200 мкм. Використовують порошки загальнопромислового призначення і спеціалізовані. Спеціалізовані порошки випускають трьох класів: ОД – *особливо дрібні*; Д – *дрібні*; С – *середні*. Фракційний склад частинок у межах класу неоднаковий для різних груп матеріалів. Зазвичай клас ОД містить частинки фракцій $40 \div 100$ мкм, Д – $100 \div 280$ мкм, С – $280 \div 630$ мкм. Для напилення застосовують порошки двох типів: *однокомпонентні* і *дво-* або *багатокомпонентні*. Останні називають *композиційними порошками*.

Однокомпонентні порошки являють собою частинки з одного елемента (алюмінію, титану, молібдену та ін.) або сплави з різних елементів. Наприклад, Fe-C; M-Al; W-C; Ni-Cr; Ni-Cr-V-Si і ін. Структура частинок може бути як гомогенною, так і гетерогенною.

Зазвичай однокомпонентні порошки отримують розпилюванням розплавів або відновленням. У практиці ГТН застосовують, головним чином, однокомпонентні порошки. Їх перевага полягає в отриманні покриттів з однорідним хімічним складом і структурою.

Композиційні порошки складаються з двох або більш різних за властивостями компонентів, розділених між собою чіткою межею розділу. При газотермічному напиленні композиційними порошками забезпечується:

- отримання гетерогенних дрібнодисперсних структур з рівномірним розподілом компонентів;
- протікання екзотермічних реакцій між компонентами порошку;
- захист ядра напилюваної частинки плакуванням від взаємодії з газовою фазою та ін.

Композиційні порошки поділяються на дві групи: *екзотермічно реагуючі* і *термонеутральні*. У термонеутральних композиційних порошках екзотермічна реакція не протікає або її тепловий ефект нехтувально малий.

При газотермічному напиленні застосовують також різні типи дротяних матеріалів і стрижнів.

Дротяні матеріали використовують у вигляді дротів суцільного перетину, порошкових дротів з металевою оболонкою, порошкових дротів з органічною оболонкою. В основному використовують дроти загальнопромислового призначення або спеціалізовані.

Просочення і оплавлення покриттів

Просочення використовується для зміцнення газотермічних покриттів неорганічним матеріалом. Для цього на напилену поверхню різними способами наносять просочувальний матеріал. При розплавленні за рахунок капілярних сил матеріал проникає в несучільності покриття і забезпечує заповнення більшості сполучених відкритих несучільностей. Так, наприклад, поводяться мідь і більшість припоїв при просоченні покриттів з карбідів вольфраму.

Оплавлення є поширеним способом зміцнення покриття. Процес ведуть з місцевим або загальним нагрівом напиленого виробу до температури плавлення матеріалу покриття. Для збереження тонкої структури процес оплавлення необхідно вести так, щоб виключити зливання розплавлених частинок між собою. Оплавлення покриттів при температурах, близьких до солідуса, зберігає значну частину початкової структури напиленого матеріалу. Найлегше процес оплавлення реалізується в покриттях, напилених з самофлюсувальних матеріалів. Типовими представниками самофлюсувальних матеріалів є сплави на залізній, нікелевій або кобальтовій основі з добавками кремнію і бору. Окисні $B_2O_3-Cr_2O_3-SiO_2$ утворюють достатньо легкоплавкий шлак, що видаляється при оплавленні покриття.

Вплив газотермічного напилення на структуру і твердість поверхневого шару. У комплексі проблем підвищення надійності і довговічності машин особливе місце займає питання зносостійкості і, відповідно, твердості деталей. Для вирішення завдання підвищення експлуатаційних характеристик матеріалів привертають нові методи поверхневого зміцнення, наприклад різні способи газотермічного нанесення покриттів.

Методи газотермічного напилення дозволяють виготовляти деталі з біметалічних матеріалів з метою заміни дорогих

дефіцитних матеріалів дешевими. Газотермічне напилення значно змінює властивості напилюваних матеріалів. І хоча розроблені основні положення загальної теорії утворення покриттів, проте ефективність кожного методу і можливість використання конкретних покриттів, разом з іншими чинниками, значною мірою обумовлені наявністю інформації про зміни структури і властивостей даних матеріалів в умовах напилення.

Найбільш прості закономірності формування структури покриттів характерні для однокомпонентних покриттів. З метою підвищення зносостійкості, жаростійкості найбільш результативним є використання багатоконпонентних покриттів.

Очевидно, що для таких сплавів не завжди можна теоретично передбачити структуру і властивості покриття. Тому потрібне широке експериментальне вивчення структури і властивостей після напилення.

Так, покриття на кільце з чавуну наноситься методом дводротяної металізації з незалежною подачею дротів молібдену і сталі. Напилення з двох дротів різних матеріалів призводить до формування в шарі псевдосплаву, створеного частинками сталі 11X18M і молібдену.

Режим напилення характеризується такими параметрами:

- напруга на дузі – 40 В;
- сила струму – 400 А;
- тиск стисненого повітря – 0,5÷0,55 МПа;
- діаметр повітряного сопла – 8 мм.

Послідовне травлення шару на одну, а потім на іншу складову дозволяє чітко диференціювати в шарі частинки сталі і молібдену (рис. 2.7).

Утворення покриття послідовним упакуванням безлічі частинок, що сильно деформуються, створює шарувату структуру покриття. При цьому проявляється своєрідна особливість сталь-молібденового покриття, що повторюється у всіх поршневих кільцях: частинки сталі і молібдену розподілені в кожному поперечному перетині шару не рівномірно, а послідовно переміжними шарами. Такий розподіл частинок, очевидно, може бути обумовлений особливостями руху в газовому струмені частинок різної маси. У цілому ж по колу кільця за 20 проходів пальника формується досить однорідний розподіл частинок.

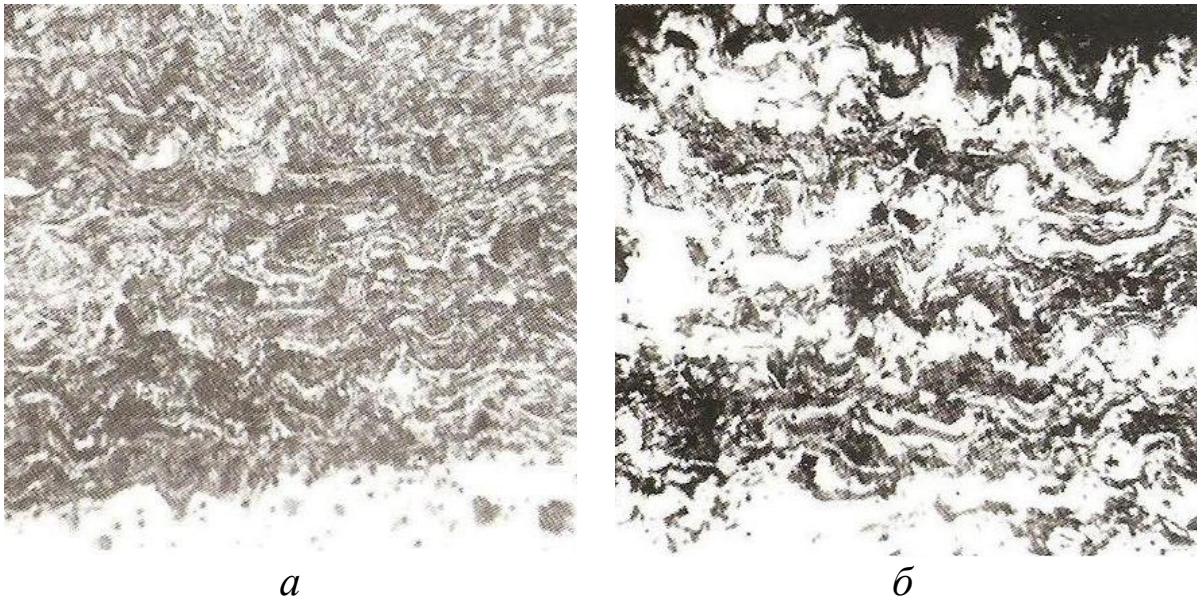


Рис. 2.7. Загальний вигляд напиленого шару:
a – повне травлення; *б* – травлення на молибден X115

Найважливішою характеристикою напиленого шару, що визначає успішну роботу покриття, є його зв'язок з поверхнею підкладки. Очевидно, що попередня дробоструминна обробка канавки забезпечує сприятливі умови для адгезії.

Виявлювана металографічно структура частинок молибдену демонструє їх дрібнозернистість. Крім того, структура свідчить про те, що частинки молибдену потрапили на підкладку в розплавленому стані і швидко кристалізувалися під тиском за рахунок тепловідведення вглиб металу підкладки або шару. Таким чином, швидкісна кристалізація під тиском сприяла створенню дрібнозернистої структури. Відомо, що наддрібне зерно, що утворюється в напилених частинках молибдену, повинне помітно підвищити його міцність і твердість. Проте спостережуване три-чотирикратне підвищення твердості частинок молибдену порівняно з початковим станом молибденового дроту навряд чи викликано тільки подрібненням зерна і наклепом частинок.

Структура частинок відповідає найбільшому насиченню молибдену домішками додавання. Основна маса частинок характеризується структурою пересиченого твердого розчину з початковими стадіями старіння. Що стосується структур частинок сталі, то це, в основному, частинки зі структурою

більш-менш рівномірно розподілених у матриці зернистих карбідів різної зернистості.

Основна маса частинок має структуру, подібну до структури деформованої сталі. Кристалізація під тиском приводить у кожен момент до утворення дрібнодисперсної аустенітної структури, оточеної тонкими прошарками рідкого розчину, який повинен перетворитися на карбідну складову.

2.4. Вакуумне напилення

Вакуумне напилення – перенесення частинок напилюваної речовини від джерела (місця її переведення в газову фазу) до поверхні деталі – здійснюється по прямолінійних траєкторіях при вакуумі 10^{-2} Па і нижче (**вакуумне випаровування**) і шляхом дифузійного і конвективного перенесення в плазмі при тиску 1 Па (**катодне розпилювання**) і $10^{-1} \div 10^{-2}$ Па (**магнетронне і іонно-плазмове розпилювання**). Методом вакуумного напилення наносять метали (Al, Au, Cu, Cr, Ni, V, Ti і ін.), сплави (наприклад, NiCr, CrNiSi), хімічні сполуки (силіциди, окисні, бориди, карбіди і ін.), скло складного складу, кермети.

Вакуумне напилення засноване на створенні направленого потоку частинок (атомів, молекул або кластерів) матеріалу, що наноситься, на поверхню виробів і їх конденсації. Процес включає декілька стадій: перехід напилюваної речовини або матеріалу з конденсованої фази в газову, перенесення молекул газової фази до поверхні виробу, конденсація їх на поверхню, утворення і зростання зародків, формування плівки.

Частка кожної з частинок напилюваної речовини при зіткненні з поверхнею деталі залежить від її енергії, температури поверхні і хімічної спорідненості матеріалів плівки і деталі. Атоми або молекули, що досягли поверхні, можуть або відбитися від неї, або адсорбуватися і через деякий час покинути її (десорбція), або адсорбуватися і утворювати на поверхні конденсат (конденсація). При високих енергіях частинок, великій температурі поверхні і малій хімічній спорідненості частинка відбивається поверхнею.

Температура поверхні деталі, вище за яку всі частинки відбиваються від неї і плівка не утворюється, називається

критичною температурою вакуумного напилення; її значення залежить від природи матеріалів плівки, поверхні деталі, від стану поверхні. При дуже малих потоках випаровуваних частинок, навіть якщо ці частинки на поверхні адсорбуються, але рідко зустрічаються з іншими такими самими частинками, вони десорбуються і не можуть утворювати зародки, тобто плівка не росте.

Критичною щільністю потоку випаровуваних частинок для даної температури поверхні називається найменша щільність, при якій частинки конденсуються і формують плівку. Структура напилених плівок залежить від властивостей матеріалу, стану і температури поверхні, швидкості напилення. Плівки можуть бути аморфними (склоподібними, наприклад окисні, Si), полікристалічними (метали, сплави, Si) або монокристалічними (наприклад, напівпровідникові плівки, отримані молекулярно-променевою епітаксією).

Для впорядкування структури і зменшення внутрішньої механічної напруги плівок, підвищення стабільності їх властивостей і поліпшення адгезії до поверхні виробу відразу ж після напилення без порушення вакууму проводять відпал плівок при температурах, що дещо перевищують температуру поверхні при напиленні. Часто за допомогою вакуумного напилення створюють багатошарові плівкові структури з різних матеріалів.

Установки вакуумного напилення

Для вакуумного напилення використовують технологічне устаткування періодичної, напівбезперервної і безперервної дії. Установки **періодичної дії** здійснюють один цикл нанесення плівок при заданій кількості завантажуваних виробів. Установки **безперервної дії** використовують при серійному і масовому виробництві. Вони бувають двох видів: **багатокамерні** і **багатопозиційні однокамерні**. Перші складаються з послідовно розташованих напилювальних модулів, у кожному з яких здійснюється напилення плівок певних матеріалів або їх термічна обробка і контроль. Модулі об'єднані між собою шлюзовими камерами і транспортуючим конвеєрним пристроєм. Багатопозиційні однокамерні установки містять декілька напилювальних постів (розташованих в одній вакуумній камері), що сполучаються транспортним пристроєм конвеєрного або

роторного типу. Основні вузли і системи установок для вакуумного напилення є самостійними пристроями, що виконують задані функції:

- створення вакууму;
- випаровування або розпилювання матеріалу плівок;
- контроль режимів вакуумного напилення і властивостей плівок;
- транспортування деталей;
- електроживлення.

Конструктивно звичайна установка для вакуумного напилення включає такі вузли:

- робочу камеру, у якій здійснюється напилення плівок;
- джерела випаровуваних або розпилюваних матеріалів з системами їх енергоживлення і пристроями керування;
- відкачувальну і газорозподільну системи, що забезпечують отримання необхідного вакууму і організацію газових потоків (складаються з насосів, клапанів, пасток, фланців і кришок, засобів вимірювання вакууму і швидкостей газових потоків);
- систему електроживлення і блокування всіх пристроїв і робочих вузлів установки;
- систему контролю і керування установкою вакуумного напилення, що забезпечує задані швидкість напилення, товщину плівок, температуру поверхні деталей, температуру відпалу, фізичні властивості плівок (містить набір датчиків, зв'язаних через керуючу мікропроцесорну ЕОМ з виконавчими механізмами і пристроями виведення інформації);
- транспортуючі пристрої, що забезпечують введення і виведення деталей у робочу камеру, точне розміщення їх на постах напилення і переведення з однієї позиції напилення на іншу при створенні багат шарової системи плівок;
- систему допоміжних пристроїв і технологічне оснащення (складаються з внутрішньокамерних екранів, заслінок, маніпуляторів, гідро- і пневмоприводів, пристроїв очищення газів).

Технології вакуумного напилення є надзвичайно енерговитратними, і тому багато компаній замінюють вакуумне напилення на більш продуктивне і менш витратне атмосферне плазмове напилення.

2.5. Електронно-променеві методи нанесення покриттів

Установки для технології *електронно-променевої порошкової металургії* (ЕППМ) створені на базі електронно-променевих плазмових гармат, які мають більший термін служби на два порядки порівняно з термокатодними гарматами, працюють при форвакуумі ($5 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст.) і в хімічно активних середовищах.

Новизна технології ЕППМ полягає в тому, що вперше вдалося реалізувати одночасно процеси порошкової металургії і класичної мікрометалургії в електронному промені безпосередньо на деталі.

Завдяки високій щільності потужності в промені ($10^4 \div 10^5$ Вт/см²), можливості оперативного керування енергетичними характеристиками променя і малому об'єму розплавленої ванни ($10 \div 20$ мм³) з'являється можливість керувати цими процесами, змінюючи потрібним чином не тільки інтегральну температуру ванни, але і швидкість її нагріву і охолодження в широких межах. Більш того, при використанні термореагуючих порошкових сумішей можна реалізувати саморозповсюджувальний синтез, ініційований електронним променем у мікрооб'ємі, і процес жидкофазного спікання з використанням продуктів синтезу.

Все це робить технологію ЕППМ універсальною, як у плані різноманіття функціональних властивостей порошкових покриттів, так і в плані нанесення покриттів будь-якої товщини, включаючи шаруваті і градієнтні, на деталі з будь-яких сплавів і будь-якої геометрії.

Пропонований метод електронно-променевої технології нанесення зносостійких покриттів із застосуванням інтерметалідів, окиснів, карбідів, нітридів, складних комплексних сполук (оксикарбонітридів) і композиційних порошків перевершує традиційні методи за якістю покриттів. Створення якісних покриттів з високим комплексом фізико-механічних характеристик обумовлено технологічними особливостями, властивими тільки даній технології:

- поєднання таких чинників, як сильно збуджений стан електронної підсистеми композицій, що наносяться, під дією

електронного променя, зокрема тугоплавких сполук, і надшвидка кристалізація з рідкого стану, що дозволяє сформувати цілу гамму нерівноважних фаз з нанокристалічною структурою, які утворюються і зберігаються в покритті, що наноситься;

- можливість у процесі нанесення покриттів створювати об'ємно-змцнені покриття на основі тугоплавких сполук з металевою матрицею (матеріали майбутнього), покриття на основі керамічних і інтерметалевих матеріалів і їх композицій.

Техніко-економічні переваги. Технологія ЕППМ дозволяє отримувати нові градієнтні покриття електроконтактів довільної товщини, цілеспрямовано і в широких межах змінювати їх хімічний склад, структуру і основні службові властивості: твердість, зносостійкість, термостійкість і т. д. При ЕППМ досягаються:

- рафінування матеріалу покриття від легколетких домішок;
- подрібнення структури покриття за рахунок швидкої кристалізації рідкометалевої ванни;
- повна утилізація наплавлюваного порошку;
- мінімальні повідки і викривлення наплавляємої деталі;
- мінімальна пористість покриттів (< 0,5 %);
- велика товщина покриттів (до 20 мм).

Пропонована технологія є екологічно безпечною.

Сфери застосування:

- автотракторна техніка (коленвали, розподілвали, клапани, поршні, штовхачі, зуби ковшів екскаваторів, відвали бульдозерів і ін.);
- металургія (фурми, кристалізатори, валки гарячої і холодної прокатки, торцеві ущільнення);
- енергетика (електроди високовольтних вимикачів, лопатки парових і газових турбін, замкова арматура);
- гірничовидобувна техніка (бурильний інструмент, вали, штоки, втулки, робочі органи дробильного устаткування);
- нафтогазовидобувна промисловість (замкова арматура, захисні сорочки термопар);
- залізничний і судноплавний транспорт;
- машинобудування;
- авіа- та ракетобудування.

Електронно-променеві установки для нанесення жаростійких і теплозахисних покриттів на лопатки газотурбінних двигунів. Істотне поліпшення характеристик сучасних авіаційних, транспортних і стаціонарних газотурбінних двигунів і установок досягається шляхом нанесення на робочі лопатки турбін високотемпературних жаростійких і теплозахисних покриттів (рис. 2.8), зокрема двошарових покриттів метал-кераміка:

- металевий шар у двошаровому покритті метал-кераміка містить нікель (Ni), кобальт (Co), залізо (Fe) або їх поєднання в якості основи, а хром (Cr), алюміній (Al) і ітрій (Y) у якості легуючих добавок;

- керамічний шар у двошаровому покритті метал-кераміка складається з діоксиду цирконію (ZrO_2), стабілізованого 6,5÷8 % окисню ітрію (Y_2O_3).



a



б

Рис. 2.8. Лопатки турбін з високотемпературними захисними покриттями: *a* – робоча лопатка GTX1001В після нанесення жаростійкого металевого шару Co-Ni-Cr-Al-Y; *б* – лопатка після нанесення зовнішнього керамічного шару (ZrO_2 - Y_2O_3)

На рис. 2.9 зображено газотурбінний двигун ДН-80 виробництва ДП НПКГ "Зоря-Машпроект" (м. Миколаїв, Україна) з робочими лопатками з двошаровим захисним покриттям метал-кераміка.



Рис. 2.9. Газотурбінний двигун ДН-80 з робочими лопатками з двошаровим захисним покриттям метал-кераміка

У межах двошарового покриття метал-кераміка товщина жаростійкого металевого шару складає від 90 до 120 мкм, а зовнішнього керамічного – від 40 до 90 мкм для зміцнювального покриття і від 110 до 250 мкм і більше для теплозахисного. Технологія нанесення двошарового захисного покриття метал-кераміка є багатоопераційною. Для нанесення на робочі лопатки жаростійкого металевого шару призначена електронно-променева установка УЕ-193 (рис. 2.10).

Контроль якості металевого шару покриття лопаток турбін включає візуальну і інструментальну оцінку стану поверхні цього покриття, перевірку адгезії покриття з підкладкою шляхом випробування на вигин дослідних зразків, визначення рівня залишкової напруги за методом Алмена, рентгенівський флуоресцентний аналіз хімічного складу покриття (на дослідних зразках після їх термообробки у вакуумі разом з покритими лопатками), капілярну дефектоскопію лопаток.



Рис. 2.10. Електронно-променева установка UE-193 для нанесення металевих жаростійких і корозійностійких захисних покриттів на лопатки турбін осадженням з парової фази у вакуумі

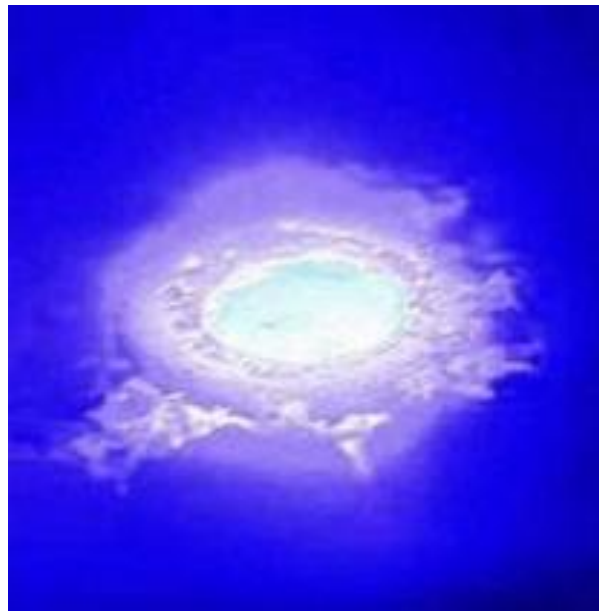
Для нанесення зовнішнього керамічного шару на лопатки турбін з металевим шаром призначена електронно-променева установка UE-137 або UE-187. На рис. 2.11, а зображена електронно-променева установка UE-137 для нанесення на робочі лопатки турбін керамічних покриттів шляхом осадження з парової фази у вакуумі, зокрема покриттів з частково стабілізованого діоксиду цирконію ($ZrO_2-Y_2O_3$); на рис. 2.11, б – один з випарників кераміки в роботі.

Відповідно до вимог Технічних умов на основний матеріал лопаток після нанесення на лопатки зовнішнього керамічного шару покриття лопатки піддають остаточній термообробці у вакуумі – старінню, а потім здійснюють контроль якості цих лопаток з оформленням паспорта якості.

Для оцінки якості двошарових захисних покриттів метал-кераміка на етапі опрацювання технології їх нанесення застосовуються методи оптичної мікроскопії, скануючої і трансмісійної мікроскопії, сучасні методи хімічного аналізу, а також пічні термоциклічні випробування і випробування на газодинамічному стенді на пропалення.



а



б

Рис. 2.11. Нанесення на лопатки турбін додаткового зовнішнього керамічного шару поверх жаростійкого металевого з формуванням двошарового захисного покриття метал-кераміка

Для робочих лопаток турбін із захисними покриттями в сучасних газотурбінних двигунах і установках розроблена відповідна технологічна документація, що включає технологічний процес нанесення на робочі лопатки турбін захисних покриттів шляхом осадження з парової фази у вакуумі на електронно-променевих установках.

Кожна з цих установок забезпечена декількома електронними гарматами, що формують первинний плоскосиметричний електронний пучок з його подальшим перетворенням в вісесиметричний за допомогою електромагнітного поля. Електромагнітна система перетворення плоскосиметричного електронного пучка у вісесиметричний і керування ним виконана у вигляді єдиного блока. Установки забезпечені напівпровідниковим джерелом живлення електронних гармат потужністю 250 кВт з тиристорним керуванням (прискорююча напруга $20 \div 25$ кВ). Системи керування установок комп'ютеризовані, забезпечують автоматичну стабілізацію струму електронних пучків і прискорюючої напруги гармат, стабілізацію рівня поверхні ванни випаровуваного матеріалу або рівня поверхні ванни

вирощуваного зливка цього матеріалу, контроль температури поверхні конденсації.

Установки забезпечують рівномірне осадження парової фази за профілем пера лопаток, відтворюваність хімічного складу і товщину осаджуваного покриття, можливість ведення процесу випаровування матеріалу покриття протягом тривалого часу і з високою продуктивністю. Так, наприклад, в установці УЕ-193 при одночасній роботі всіх чотирьох випарників сумарна швидкість випаровування складає 15 кг/год. Електронно-променеві установки для нанесення на лопатки турбін захисних покриттів осадженням з парової фази у вакуумі поставляються «під ключ». Методом електронно-променевого переплавлення у вакуумі виготовляються і поставляються високоякісні зливки з жаростійких сплавів $MeCrAlY$ діаметром 68,5 мм і завдовжки 400 мм, а також зливки з частково стабілізованого діокисню цирконію (з домішкою HfO_2 або без нього) діаметром 68,5 мм, завдовжки 50 і 200 мм, які використовують у якості початкового матеріалу покриття (рис. 2.12).



Рис. 2.12. Зливки жаростійких сплавів $MeCrAlY$ і зливки частково стабілізованого діокисню цирконію

Технологія ремонту лопаток турбін включає очищення лопаток від продуктів згоряння і корозії, відновну термообробку у вакуумі, відновлення профілю пера лопатки традиційними методами зварювання і наплавлення з подальшим доведенням механічною і електрохімічною обробками; відновлення аеродинамічного профілю пера електронно-променевими

методами; фінішну термообробку у вакуумі і виконання повного спектра контролю лопаток турбін перед нанесенням захисних покриттів; нанесення самих цих покриттів осадженням з парової фази у вакуумі.

Багатокомпонентні жаростійкі і корозійностійкі покриття Me-Cr-Al-Y (де Me – металева основа, у якості якої застосовуються Ni, Co і їх поєднання) лопаток турбін дозволяють збільшити їх експлуатаційну довговічність у 2÷3 рази (рис. 2.13).

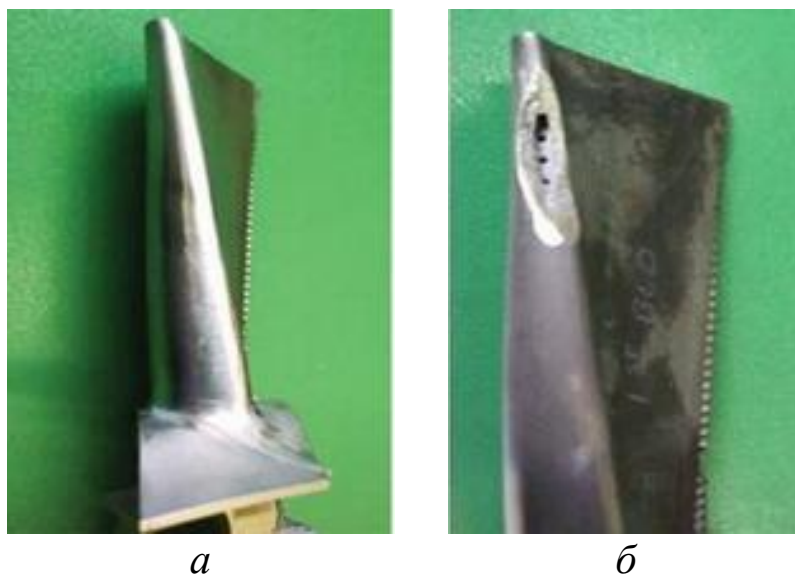


Рис. 2.13. Відремонтована (а) лопатка турбіни і фрагмент цієї лопатки в початковому стані (б) з пошкодженням

Теплозахисні покриття метал-кераміка (Me-Cr-Al-Y/ZrO₂-Y₂O₃) дозволяють збільшити допустиму температуру газу перед турбіною, зменшити витрату палива і поліпшити екологічні показники роботи енергосилової установки.

Продуктивність електронно-променевого устаткування для нанесення покриттів залежить від типорозміру деталей, на які наносяться покриття, товщини наносимого покриття, що наноситься, і складає, наприклад, 6÷10 великорозмірних лопаток промислових турбін за зміну і 35÷50 малорозмірних робочих лопаток авіаційних газотурбінних двигунів за зміну.

Для повного технологічного циклу підготовки і нанесення покриттів, термічної обробки покритих виробів необхідні опалювальні приміщення в межах єдиного цеху з сумарною виробничою площею 1500 м².

Необхідна робоча сила при економічно виправданій двозмінній роботі (допускається оперативна тризмінна робота) складає: інженерно-технічних працівників – 5÷6, виробничих працівників – 16.

Термін окупності при двозмінній роботі і повному завантаженні устаткування і апаратури не перевищує трьох років.

Промислово освоєний, сертифікований за ISO 9001 інтегрований технологічний процес нанесення покриттів на лопатки турбін, захищений патентами. Технологічний процес і електронно-променевої установки для його реалізації пройшли багаторічну перевірку в умовах промислового виробництва в Україні, Росії, США та інших країнах.

2.6. Технологія нанесення тврдосплавних покриттів

Значне підвищення працездатності багатьох виробів досягається шляхом нанесення на їх поверхні покриттів на основі з'єднань вольфраму і титану. Застосування таких покриттів дозволяє в декілька разів збільшити зносостійкість виробів, а також сконструювати принципово нові види інструментів і вузлів тертя. За допомогою даної технології на поверхню виробів або інструментів наноситься покриття твердого матеріалу (карбиду вольфраму), дане покриття можна наносити на будь-які типи сталі. Товщина покриття, що наноситься, регулюється в межах від 2 до 40 мкм.

До сучасного і відновлюваного устаткування та інструменту висуваються високі вимоги, потрібна висока твердість і поверхневий опір зносу частин і компонентів устаткування. Існує декілька типів нанесення зміцнювальних покриттів.

У сфері дослідження технології нанесення твердих сплавів із зміцнювальними і протизносними властивостями (рис. 2.14) визначено ряд способів:

- гальванічне покриття твердими матеріалами;
- плазмове покриття або метод напилення;
- електроерозійне покриття карбідом вольфраму.

Сила адгезії покриттів перших двох варіантів незадовільна у разі важких навантажень, оскільки покриття масштабні і можуть бути нестійкими, проте в разі третього способу можна наносити

покриття карбіду вольфраму лише на поверхні, схильні до прямого зносу або на особливо навантажені робочі зони.

Властивості твёрдосплавного покриття. Покриття бездоганне і стійко приєднується до матеріалу основи і утримується таким чином, що протистоїть будь-яким механічним діям. Ні ударні навантаження, ні вигини, ні тертя або ударне стиснення навіть частково не видалять покриття. Це може бути зроблено тільки направленим абразивним зносом або шліфуванням; оброблені ділянки можуть бути перешліфовані алмазним або карборундовим абразивним інструментом. Сталь основи не «відпускається» покриттям, що наноситься, а навпаки, це підвищує її твердість у граничній зоні.



Рис. 2.14. Нанесення твёрдосплавних покриттів

У разі деяких марок сплавів покриття карбіду вольфраму проникає крізь матеріал основи. Покриття (рис. 2.15) отримує твердість до 82 HRC, відсутнє спотворення геометрії виробу, сам процес нанесення фактично проходить без нагріву.

Покриття – високотермостійке, із значним опором зносу. Поверхня гладка і не має направленої структури; хороша насиченість покриття буде гарантована при середній шорсткості від 2 до 9 мкм.



Рис. 2.15. Структура покриття

Матеріали і їх підготовка. Відповідний для покриття матеріал – будь-яка м'яка або легована сталь, а також інші типи сталі, включаючи високоміцні. Поверхня для обробки повинна бути чистою, без домішок і слідів стороннього металу. Аномальні і окисні покриття повинні бути видалені повністю. Поверхні, що поліруються або шліфуються, повинні бути знежиреними. Якщо покриття карбиду вольфраму наноситься на забруднену поверхню, то висока адгезія не зможе бути отримана, і покриття так само не буде рівномірним.

Метод нанесення. Карбід вольфраму – твёрдосплавне покриття, яке наноситься за принципом серії розрядів, подібно до електроерозії. Електрод з карбиду вольфраму підключається до позитивного полюса в низьковольтній системі з розрядником і регулюванням напруги і потужності. Електрод закріплюється в коливальній штанзі вібратора. Закріплений у вібраторі електрод приходить у контакт з робочою зоною. Робоча зона підключається до негативного полюса. Через контакт електрода з робочою зоною утворюється область, яка гарантує плавлення і перенесення електрода без утворення окиснів. За допомогою ручного переміщення вібратора ця область безперервно збільшується разом з коливальним рухом електрода, виконуючим покриття.

Товщина покриття, що наноситься, не може бути перевищена до тих пір, поки не буде досягнута необхідна

насиченість. Далі поглинання матеріалу електрода вже не відбувається. Досяжна товщина покриття настільки точна, що не потрібна подальша обробка. У разі потреби поверхня може бути відполірована або перешліфована. Процес покриття настільки простий, що може бути виконаний фахівцем-інструментальником без досвіду роботи.

Приклади використання і сфери можливого застосування покриттів:

- авіатехніка, військове устаткування і зброя;
- автомобілі і приладдя;
- автоматичні лінії, лінії розливу і закупорювання пляшок;
- судна і їх устаткування;
- годинники і хронологічні прилади;
- комп'ютери і машини для офісу;
- столові прилади, ножиці, ножі;
- електричні домашні прилади;
- електродвигуни, трансформатори;
- кіно- і фотографічні апарати, проектори;
- загальні металеві товари для домашнього господарства і промисловості;
- лампи, пристрої займання;
- вимірники і вимірювальні прилади;
- мотоцикли і велосипеди;
- прикраси та іграшки, упаковка;
- порцеляна, скло і кераміка;
- профілі і труби, екструзія;
- радіо, програвачі, плівкові реєстратори і телебачення;
- гвинти, спеціальне кріплення і залізний товар;
- швейні і в'язальні машини;
- телефонні і сигнальні апарати;
- мийні і пральні машини;
- дротяне і кабельне виробництво;
- інструментальне виробництво, інструмент, металообробка і т. д.

Сфери застосування на виробництві. Виробничі інструменти схильні до зносу – штампи, молотки, ударний інструмент, формувальний і технологічний інструмент – пресформи для лиття пластмас, гуми, смол, форми для лиття

металу, вирубні штампи, різальний інструмент для металу, пластмас і деревини. Розгортки, фрези, свердла, багатолезовий інструмент, мітчики, плашки, прошивки і т. д.

Середній ефект досягає 250÷550 % ефективного підвищення стійкості інструменту і життєздатності інструменту і устаткування, особливо штампів.

На відміну від інших видів і способів нанесення покриттів, **електроконтактне спікання** дозволяє сформуванню на деталях робочий шар завтовшки 0,5÷2,5 мм. Отримання зносостійких композиційних покриттів спіканням електроконтакту порошків найбільш конкурентоздатне на інструментах, на робочі поверхні яких з технічних причин практично неможливо провести напаявання різальних твердосплавних пластин за відомими технологіями. До таких виробів відносяться складнопрофільні інструменти, складнопрофільні робочі органи різних дробарок і ціла гамма дискових відрізних інструментів. Проте необхідно виконати ряд вимог:

- забезпечити твердість покриття не нижче 82÷85 HRC;
- забезпечити надійну зчіплюваність порошкового покриття з поверхнею підкладки;
- величина нанесеного покриття повинна задовольняти умови максимальної зносостійкості для заданої операції.

Так, наприклад, була розроблена технологія нанесення зносостійкого композиційного покриття на установці, змонтованій на базі токарного верстата (рис. 2.16).

Глибоке регулювання потужності, необхідної для досягнення температур порядку 1500÷2000 °С, забезпечується тиристорним керуванням напруги на первинній обмотці силового трансформатора. Експериментальні дані показують, що глибина перехідного дифузійного шару досягає 0,1÷0,15 мм, що говорить про хорошу зчіплюваність покриття з підкладкою. Результати показані на рис. 2.17.

Розроблена технологія належить до маловідхідних і ресурсозберігаючих. З'являється можливість без застосування складних прес-форм виконати твердосплавні теплостійкі покриття на складнопрофільні інструменти і робочі органи дробильних установок для подрібнення гірських порід і сільгосппродукції.

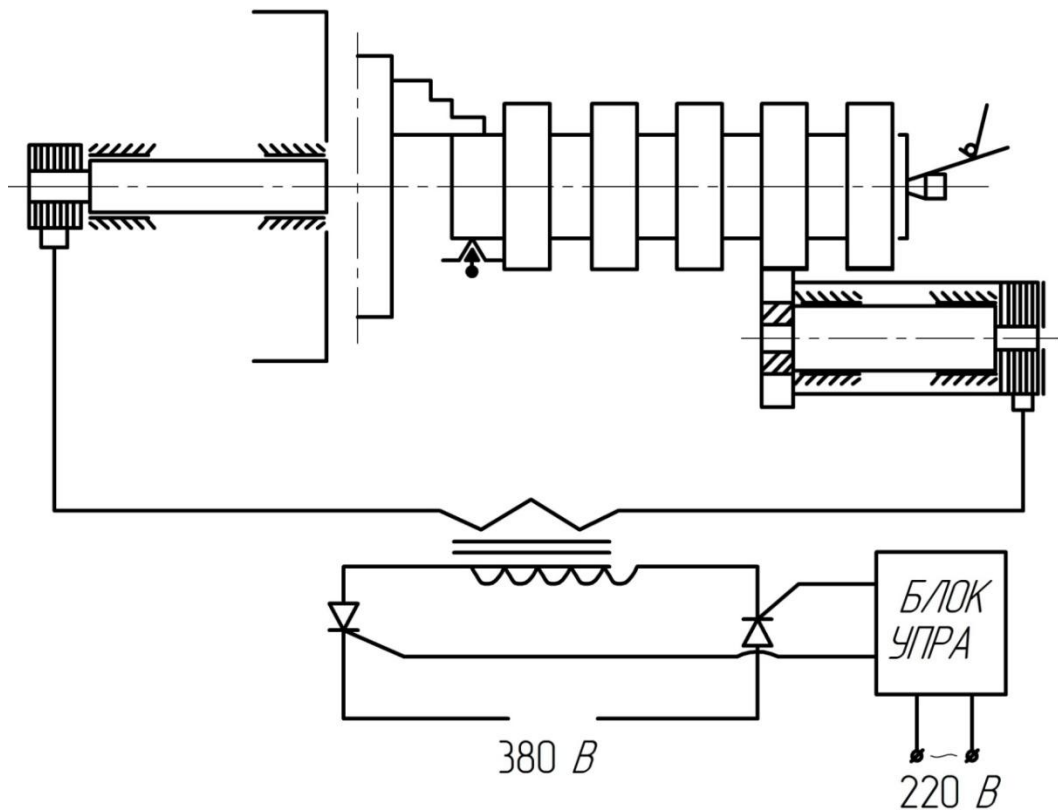


Рис. 2.16. Принципова схема установки для нанесення покриттів електроконтактним методом

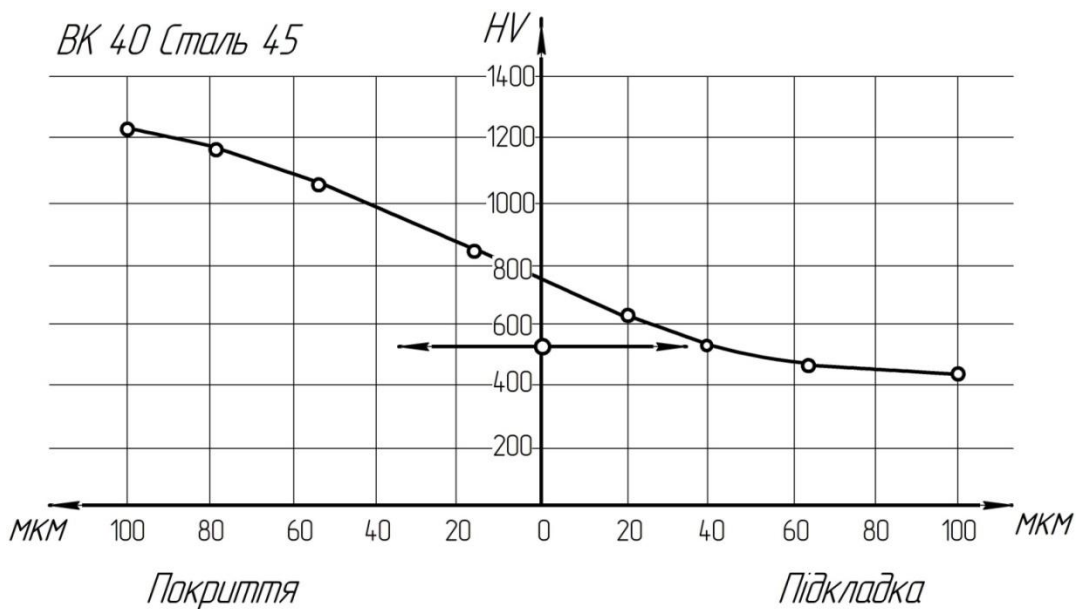


Рис. 2.17. Зміна значень мікротвердості «покриття – підкладка»

Результати випробувань показують, що ресурс дробарок з робочими органами, виготовленими за новою технологією,

збільшився в 10÷12 раз порівняно з традиційними матеріалами з загартованих сталей типу ШХ15, 65Г.

Дискові відрізні інструменти, призначені для різання гірських порід (таких, як гранит, мармур і ін.), з покриттям, нанесеним електроконтактним спіканням порошків, практично повністю замінюють алмазні інструменти. Проте вартість інструменту з покриттям у 3÷4 рази нижче за алмазний.

У технології електроконтактного спікання інструментальних твёрдосплавних порошків використовуються в основному композиції на основі карбиду вольфраму і кобальту. При подачі електричного струму в наступній за ущільненням порошку стадії спікання відбувається остаточне формування структури сплаву. На цій стадії протікають такі процеси:

- перекристалізація карбиду вольфраму через рідку фазу;
- зрощення сусідніх зерен унаслідок переважного зростання одного зерна за рахунок інших;
- розвиток контактів між зернами з прагненням до утворення характерних для даної системи двограних кутів;
- зчеплення (адгезія) зерен, що мали контакти і отримали в процесі перегрупування під час ущільнення орієнтування, що задовольняє вимогу двогранного кута.

Формування покриттів здійснюється в декілька стадій. Спочатку проводиться локальне електроконтактне розігрівання поверхні зразка. У процесі подачі порошку відбувається часткове розплавлення карбиду вольфраму у виріб. На цій стадії частково формується адгезійний шар, що визначає надалі міцність зчеплення покриття з поверхнею деталі або інструменту. Міцність на відрив при струмі 2 кА складає 30...112 МПа в напрямі, перпендикулярному до поверхні покриття. Подальше нарощування шару здійснюється за схемою «покриття-покриття» і залежить вже від теплофізичних властивостей матеріалу покриття.

Дослідження показують, що навіть при високих значеннях струмів (2÷5 кА) процес нарощування покриття практично припиняється, досягнувши товщини 2,0÷2,5 мм. Напикання порошку здійснюється на таких режимах:

- напруга 3,0÷5,0 В;
- тиск 40÷60 МПа;
- сила струму 1,5÷2,0 кА залежно від складу порошку;

- пористість шару $8 \div 12$ %;
- твердість HRC $80 \div 85$.

Рекомендовані матеріали порошку:

- наплавлювальні тверді сплави, зокрема стеліти (на основі карбїду вольфраму і кобальту), ренїти (на основі сплаву вольфраму і вуглецю евтектичного складу); сормайти (на основі залїза-хрому-марганцю-нікелю-титану та інших металів, карбїдів і нїтридів металів);

- порошкові суміші, зокрема вокари (суміш вольфраму з вуглецем різних співвідношень), боридні суміші;

- подрїбнені порошки сплавів типу У40Х28НС2ВМ (на основі високолегованих сталей, що містять титан, хром, молібден, нікель і т. д.).

Теплофізичний аналіз системи зразок-покриття при застосуванні електроконтактного нагрїву дозволяє припустити, що на відміну, наприклад, від плазмового методу або зварювання, поверхня виробу нагрївається сильніше, ніж матеріал покриття. Теплоота видїляється, головним чином, у місцях контакту зерен карбїду вольфраму з поверхнею зразка.

Для надїйного протїкання процесу в цьому випадку потрібний певний зазор між електродом і деталлю, який забезпечується практично шорсткою поверхнею ролика. Таким чином, спочатку ефект від введення струму в систему полягає в різкому, стрибкоподібному підвищенні температури поверхневого шару деталі і одночасному механїчному додаванні частинок карбїду вольфраму.

Аналіз дифузійної зони показує, що яскраво виражена текстура спостерїгається тільки з боку покриття. На поверхні зразка не виявлено помітних зон деформації, а отже, тепловий режим дозволяє формувати покриття на готових до роботи складнопрофільних деталях і інструментах без подальшої їх додаткової механїчної обробки.

2.7. Відновно-зміцнювальне наплавлення

Інтенсифікація виробництва разом із застосуванням найсучаснішого обладнання потребує підвищення надїйності і довговічності робочих органів машин і агрегатів.

Одним з найбільш ефективних і доступних способів підвищення довговічності деталей є наплавлення робочих поверхонь матеріалами, що надають шару металу з особливими властивостями високого опору абразивному і гідроабразивному зносу, антикорозійної стійкості, окалинотійкості і т. п.

Поняття наплавлення, зміцнення, відновлення, реставрація на слуху вже багато десятків років. Начебто і говорити про це інженерно-технічним працівникам нетактовно, але обставини свідчать про інше. Вирішуючи основне завдання свого виробництва, фахівці і керівники не завжди згадують, що дуже часто зношену деталь, а то і цілий вузол, можна відновити наплавленням або напиленням, що завжди економить кошти і, як правило, збільшує термін служби деталі в десятки разів, що знову ж таки знижує майбутні витрати на ремонт, тому що збільшується міжремонтний період.

Більш ніж 100-річний світовий досвід застосування зварювання і наплавлення визначив цілу гамму способів наплавлення (це тільки невелика частина):

- автоматичне електродугове під флюсом, у середовищі захисного газу;
- напівавтоматичне електродугове під флюсом, у середовищі захисного газу, відкритою дугою;
- ручне електродугове стрижневими електродами;
- ручне і автоматичне електродом, що не плавиться (вольфрамовий, графітовий);
- плазмове наплавлення і напилення;
- ручне газоплазмове наплавлення присадочними прутками і порошками;
- автоматичне газополум'яне напилювання;
- детонаційне напилення;
- наплавлення лазерним променем;
- іонно-плазмове напилення та ін.

Застосування відновно-зміцнювального наплавлення нічим не обмежено. Воно є прийнятним і в сільському господарстві, і в космосі.

На сьогодні для зміцнення деталей наплавленням і напиленням використовують сотні марок наплавлювальних матеріалів: електроди з легуючим покриттям, суцільні і

порошкові стрічки і дроти, механічні суміші, литі прутки і порошки, спечені порошки, трубчасті присадочні прутки з наповнювачем, металокерамічні прутки, стрічки і т. п. Наплавлювальні матеріали виготовляються на основі заліза, нікелю, кобальту, міді або їх сплавів, легованих вуглецем, бором, хромом, вольфрамом, титаном, ванадієм, молібденом та іншими елементами. Зносостійкість наплавленого металу визначається складом, твердістю, кристалічним станом сплаву і надлишкової фази (карбідів, боридів, карбоборидів і т. п.), орієнтацією надлишкової фази відносно діючих навантажень, швидкістю охолодження металу при наплавленні і в деяких випадках режимом термообробки.

У результаті навіть цього екскурсу в наплавлення видно, що воно є досить прийнятним способом економії коштів і робочого часу. Але слід зазначити, що позитивний ефект може бути отриманий тільки за умови ретельного підбору матеріалу і технології.

Вибір конкретної технології відновлення і зміцнення деталей необхідно обґрунтувати техніко-економічними показниками і, природно, головним показником – прибутком. А для цього необхідно врахувати таке:

- умови роботи деталі;
- термін служби деталі (міжремонтний період);
- маса і геометричні розміри деталі;
- тип (марка) металу деталі;
- потреба в деталях на певний термін (місяць, рік);
- наявність на ринку наплавлювального матеріалу, що забезпечує необхідні експлуатаційні характеристики спрямованого (напиленого) металу;
- оснащеність підприємства необхідним обладнанням;
- обсяги наплавленого металу для визначення технології і ступеня механізації (автоматизації);
- і, найголовніше, наявність необхідних фахівців і їх професійна підготовка.

Для виготовлення прес-форм застосовується велика кількість сталей, сплавів і чавунів, різні методи їх хіміко-термічної обробки. Для наплавлення прес-форм застосовуються різні методи і відповідно різні наплавлювальні матеріали.

Плазмово-дугове наплавлення з застосуванням інертного плазмоутворюючого газу є одним з найбільш перспективних методів виплавки штампів і прес-форм.

Ефективність впровадження плазмодугових процесів багато в чому залежить від конструкції плазмотрона. Плазмовий пальник складається з трьох основних вузлів: електродного, соплового і корпусу. Відомо, що соплова частина пальника є найбільш теплонавантаженою частиною, від форми, конструкції і співвідношення розмірів якої залежить як працездатність плазмотрона, так і його технологічні можливості. Однак при цьому процесі наплавлення вирішальну роль відіграє конструкція електродного вузла плазмотрона.

Широко використовується на виробництві для відновлення і зміцнення різних деталей установка, що має плазмотрон з кільцевим електродом, що не плавиться. З огляду на те, що кільцевий електрод, що не плавиться, виготовлений з міді, вага плазмотрона досить велика (до 3 кг). Крім того, електрод витримує струми до 180 А, що недостатньо для ефективного нагріву електрода, що плавиться.

Відома також установка плазмового наплавлення, що має плазмотрон зі стрижневим електродом, що не плавиться. Електрод, що не плавиться, виготовлений з вольфраму і може витримувати значно більші струми, ніж мідний електрод. Однак у даному технічному рішенні для ефективного нагріву електрода, що плавиться, необхідно збільшувати струм плазмової дуги, що призводить до зростання тепловнеску у виріб, збільшення глибини проплавлення основного металу і збільшення його частки в наплавленому металу. Крім того, нагрів електрода, що плавиться, виявляється більш інтенсивним з того боку, з якого розташовано електрод, що не плавиться, що в разі застосування порошкового дроту веде до пропалів його оболонки, просипання шихти і, як наслідок, засмічення плазмотрона, погіршення якості наплавлення.

Проведені дослідження особливостей конструкцій електродно-соплових вузлів плазмотронів дозволили знайти оптимальне рішення цього питання. Розроблений плазмотрон (рис. 2.18) має три стрижневі електроди, що не плавляться, розташованих по колу навколо електрода, що плавиться, під

кутом 120° , що забезпечує рівномірний нагрів електрода, що плавиться.

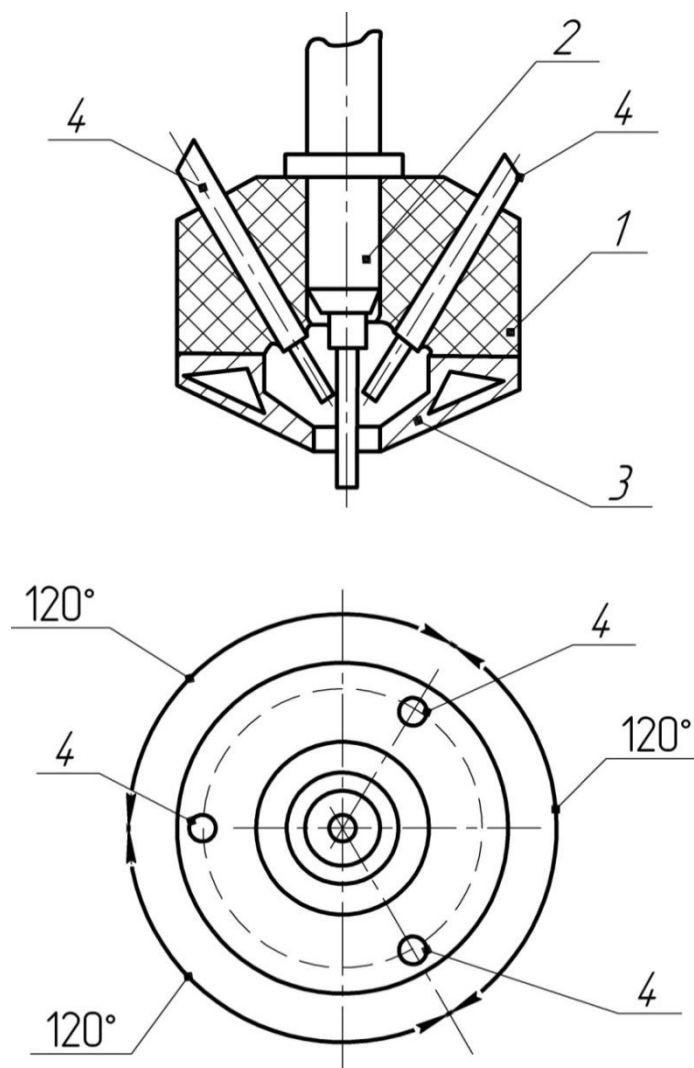


Рис. 2.18. Схема розробленого плазмотрона:

1 – корпус; 2 – мундштук для подачі електрода, що плавиться;
3 – плазмоутворювальне сопло; 4 – стрижневі електроди, що не плавляться

Плазмові дуги горять між електродами, що не плавляться, плазмотрона. Нагрівання електрода, що плавиться, стає значно ефективнішим за рахунок утворення на ньому активних плям дуг електродів, що не плавляться. Утворення цих плям показано на рис. 2.19 для випадку зворотної полярності. При прямій полярності дуги електрода, що не плавиться, струм цієї дуги буде йти з електрода, що не плавиться, на сопло, з електрода, що не

плавиться, – на виріб, з електрода, що не плавиться, – на електрод, що плавиться, і з електрода, що плавиться, – на виріб.

Це обумовлено особливостями конструкції розробленої установки плазмового наплавлення (що включає в себе і плазмотрон), завдяки якій стає можливим вести плазмове наплавлення не тільки автоматом, але і напівавтоматом, де електрод, що плавиться (після його проходження по гнучкому боудену і пальнику), викривляється (рис. 2.20).

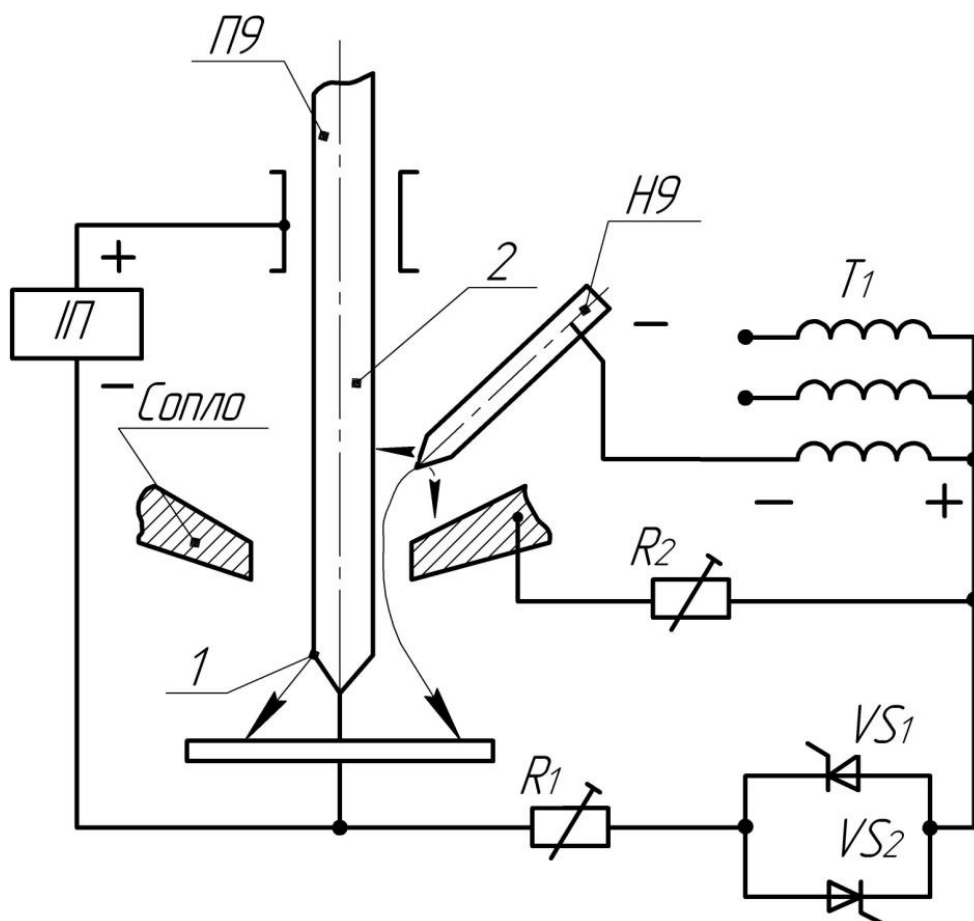


Рис. 2.19. Схема утворення активної плями дуги (1, 2) на поверхні електрода, що плавиться, при зворотній полярності його дуги

Дана конструкція плазмотрона дозволила зменшити глибину проплавлення основного металу, тому що струм дуги, що горить між електродами, що не плавляться, і виробом, малий, а з сопла плазмотрона (при запропонованому технічному рішенні) виходить потік сильно іонізованого газу від дуг, що горять всередині плазмотрона. Це призводить до того, що дуга горить в умовах

змушеної іонізації, з надлишком вільних носіїв зарядів. У цих умовах забезпечується її розширення, охоплення дугою більшої площі поверхні наплавлюваного виробу, зниження щільності теплового потоку у виріб. У результаті цього отримується наплавлений валик великої ширини з малою глибиною проплавлення основного металу.

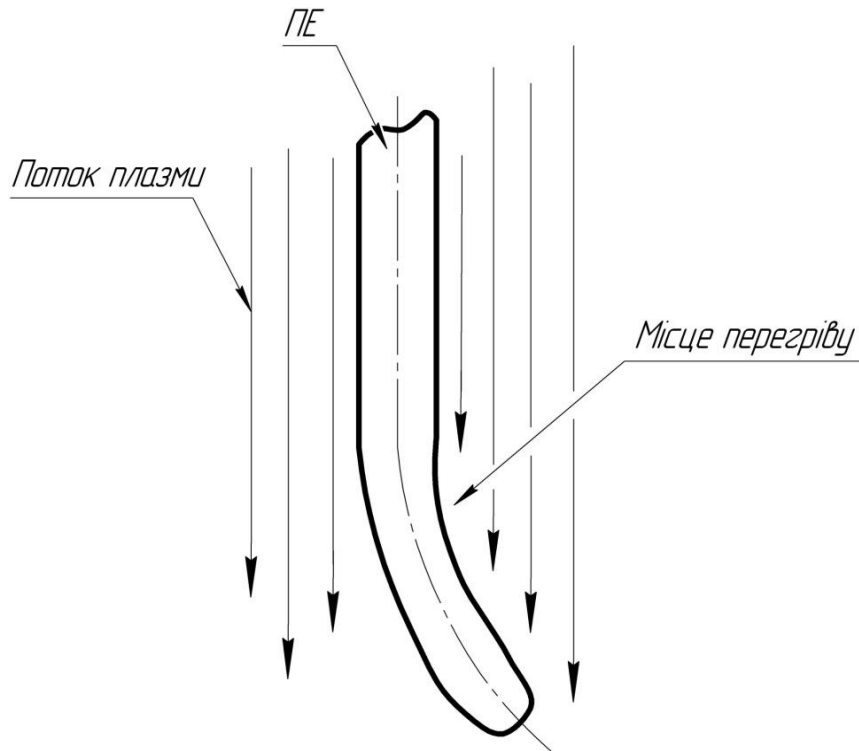


Рис. 2.20. Схема нагріву електрода, що плавиться, плазмовою дугою при його викривленні

2.8. Технологія термопружнопластичної деформації металу

Термопружнопластичне деформування металу (ТПД) – це сукупність виконаних у єдиному технологічному циклі операцій нагріву, пластичного деформування та охолодження. Ефект ТПД – створення особливого структурного і фазового стану, при якому метал відрізняється високою міцністю і підвищеною пластичністю. Метод ТПД застосовується і для відновлення зношених поверхонь, і для їх зміцнення.

Для відновлення поверхні отворів сталевих і чавунних термічно необроблених деталей з метою зменшення їх діаметрів

застосовують *місцевий нагрів*. Цей метод заснований на тому, що при нагріванні внутрішньої поверхні деталі метал у зоні нагріву буде розширюватися, а навколишня його холодна маса буде перешкоджати цьому розширенню. У результаті на границі гарячої та холодної зони виникнуть внутрішні напруження. Як тільки вони перевищать межу пружності, то викличуть пластичну деформацію нагрітого металу. Чим вище буде перепад температур на границі між гарячою і холодною зоною металу, тим більшу деформацію деталі слід очікувати.

Наприклад, при відновленні розмірів отворів маховика, що втратив щільність посадки на валу, стінки отвору швидко нагрівають до температури $700 \div 800$ °С вузькою смугою на глибину $10 \div 15$ мм. Потім маховик охолоджують на повітрі, у результаті чого діаметр отвору зменшується на $0,2 \div 0,3$ мм.

При відновленні цим способом поверхонь отворів корпусних деталей з вуглецевих сталей нагрівання здійснюють до $340 \div 450$ °С зі швидкістю $5 \div 20$ град/с, а до $750 \div 770$ °С зі швидкістю $50 \div 100$ град/с, охолодження спреєром зі швидкістю $150 \div 250$ град/с при тривалості процесу $30 \div 45$ с. У результаті деформації діаметр отвору в 250 мм зменшується на $0,70 \div 0,75$ мм.

Можливо відновлення деталей загартуванням за рахунок різниці питомої ваги різних структур, а також завдяки деформацій від теплових і структурних напружень. Наприклад, так відновлюють загартуванням в олії посадочний отвір розподільної шестерні двигуна. Дослідження можливості відновлення деталей типу «порожній циліндр» (рис. 2.21) поверхневим нагріванням зі швидким подальшим охолодженням показало, що при висоті деталі більше її діаметра зменшується висота і збільшується діаметр, а при висоті деталі менше діаметра збільшується висота і зменшується діаметр.

Не виявлено закономірності вищеописаних способів відновлення деталей, що стримує їх поширення в ремонтному виробництві. У зв'язку з тим, що деталі типу «порожній циліндр» зношуються як по зовнішніх, так і по внутрішніх циліндричних поверхнях, мають різні співвідношення геометричних параметрів, різний характер і величину зносу, то для відновлення і зміцнення кожного умовного класу деталей слід застосовувати свій спосіб ТПД. Однак разом з перевагами способу ТПД йому притаманний

і ряд недоліків: підпалини після механічної обробки, викликані нерівномірністю зміни лінійних розмірів; наявність мікротріщин, викликаних складним напружено-деформованим станом. Притаманні даному методу відновлення деталей недоліки є наслідком нераціональних режимів ТПД.

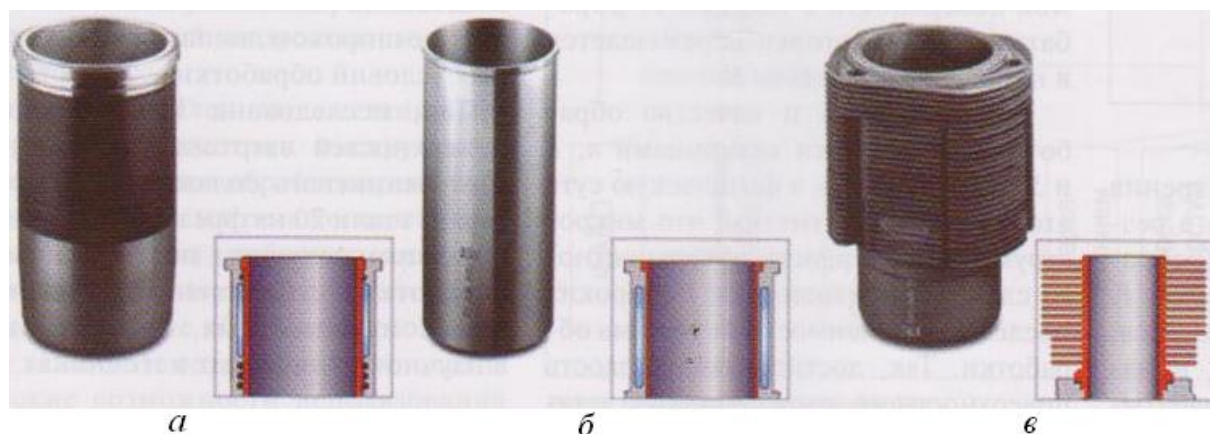


Рис. 2.21. Відновлення деталей типу «порожній циліндр»:
а – мокра гільза циліндра; *б* – суха гільза циліндра; *в* – гільза з повітряним охолодженням

Теоретичні та експериментальні дослідження ТПД як способу відновлення і зміцнення деталей дозволяють скласти загальну схему технологічного процесу стосовно сталевих і чавунних деталей типу «порожній циліндр», широко застосовуваним у сільському господарстві.

Проаналізувавши схеми технологічних процесів відновлення поршневих пальців, гільз циліндрів і досліджень отримання залишкових деформацій для інших деталей типу «порожній циліндр», можна виявити багато спільних елементів для них. Виділивши відмінні елементи в кожній зі схем, є можливість створення єдиної структурної технологічної схеми для відновлення деталей ТПД.

Перспективи процесу ТПД металу. Подальше дослідження даного способу відновлення і зміцнення деталей необхідно вести як у науковому, так і в практичному напрямках.

У науковому плані необхідно вдосконалювати механіко-математичну (детерміністичну) модель процесу ТПД для залізовуглецевих сплавів; включити в повну деформацію складову від фазових і структурних перетворень; врахувати в

моделі поліморфне $\gamma \rightarrow \alpha$ перетворення заліза, а потім загартування на мартенсит для відновлення зовнішніх циліндричних поверхонь; прорахувати напружено-деформований стан деталі типу «порожній циліндр» при нагріванні вище фазових перетворень і охолодженні зі швидкістю нижче критичної для відновлення внутрішніх циліндричних поверхонь.

Частина деталей типу «порожній циліндр» сільськогосподарської техніки виготовляють з кольорових металів (алюмінієві сплави, бронза, латунь та інші матеріали). Існуюча наразі механіко-математична модель відновлення деталей ТПД для залізобуглецевих сплавів створювалася на основі моделі з локальним рухомим джерелом теплоти, створеної для зварювання алюмінієвих сплавів, яка пройшла успішну апробацію в інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України. Тому можна припустити, що алюмінієві втулки, корпусні деталі шестеренних насосів і т. д. (рис. 2.22) будуть деформуватися всередину з використанням способу ТПД.



Рис. 2.22. Відновлення деталей за допомогою способу ТПД

Питання отримання залишкових деформацій вимагає свого оригінального технологічного рішення з урахуванням великих відмінностей фізико-механічних і теплофізичних властивостей (коефіцієнти теплопровідності і температурного лінійного розширення, межі текучості матеріалів при різних температурах та ін.) алюмінієвих і залізобуглецевих сплавів.

У практичному плані необхідно перенести розроблені технології відновлення поршневих пальців і гільз циліндрів для дизелів сільськогосподарської техніки на дизельні двигуни, що

експлуатуються в інших галузях народного господарства, зокрема на тепловозо- і судноремонтних заводах. Через високу вартість запасних частин особливо перспективним є відновлення цих деталей для імпортової техніки. Існує можливість отримання залишкових деформацій, достатніх для компенсації зносу і наступної механічної обробки втулок плунжерних пар, посадочних місць корпусних деталей, круглих плашок для нарізування різьби та інших деталей типу «порожній циліндр» із залізовуглецевих сплавів, але для яких зважаючи на великий обсяг експериментальних досліджень не були розроблені технологічні процеси їх відновлення.

У процесі дослідження проблеми відновлення деталей ТПД з'явилася можливість не тільки їх відновлювати, але й зміцнювати. Даний процес розглядається як різновид термомеханічної обробки. Однак процес ТПД відрізняється від класичних схем високотемпературною термомеханічною обробкою, при якій деформування аустеніту здійснюють вище температури рекристалізації, а потім швидко охолоджують, і низькотемпературною термомеханічною обробкою, при якій деформацію аустеніту здійснюють нижче температури рекристалізації з подальшим охолодженням на мартенсит тим, що процес деформування металу здійснюють протягом усього процесу нагрівання та охолодження, причому, як правило, за рахунок внутрішніх обмежувачів самої відновлюваної деталі, а величина деформації дорівнює не 30 %, як при високотемпературній термомеханічній обробці, а $2 \div 3$ %.

ТПД – це сукупність виконаних у єдиному технологічному циклі в різній послідовності операцій пластичного деформування, нагрівання та охолодження сплавів, що як зазнають, так і не зазнають фазових перетворень. Особливість ТПД полягає в тому, що одночасний вплив деформування і термічної обробки створює особливий структурний, а часто і фазовий стан сплавів, що відрізняється високою міцністю і підвищеною пластичністю. Змінюючи послідовність операцій деформування і термічної обробки та їх конкретні режими (температура нагрівання, ступінь, швидкість і температура деформування, швидкість нагрівання та охолодження, тривалість ізотермічних витримок і т. д.), можна керувати величиною залишкової деформації,

напружено-деформованим станом, структурою та властивостями в широкому діапазоні значень.

Отримувані після ТПД високі фізико-механічні та експлуатаційні властивості деталей могли б використовувати практики-термісти. Зокрема доцільно використовувати даний спосіб для термічної обробки труб газової і нафтової промисловості.

2.9. Термоциклічна технологія зміцнення

Працездатність циліндричних деталей, наприклад важкого колінчастого вала або бурової труби, залежить від здатності опорної поверхні протистояти зносу.

Шийки вала контактують з вкладишами з антифрикційного сплаву. Режим тертя граничний. На сьогодні вали зміцнюють переважно азотуванням, що з урахуванням ваги вала (> 1000 кг) є енергетично витратним процесом. Знос поверхні бурильної труби внаслідок тертя об абразивну породу на стінках свердловини послаблює її міцність і часто є причиною аварій.

Зважаючи на це, була розроблена і використовується **термоциклічна електролітно-плазмова технологія зміцнення (ТЦЕПТ)** поверхні великогабаритних виробів, яка забезпечує виконання суперечливих вимог, що висуваються до виробів. Наприклад, щодо бурових труб – це підвищений опір абразивного зносу і здатність матеріалу протистояти руйнуванню при знакозмінних динамічних навантаженнях.

На поверхні виробу ТЦЕПТ забезпечує формування ділянок (рис. 2.23), що мають товщину твердого шару $6\div 10$ мм. Ці ділянки протистоять абразивному зносу, а не зміцнені проміжки між твердими ділянками служать для релаксації напружень.

Система твердих (до 60 HRC) ділянок на зношуваній поверхні бурової труби (штанги) забезпечує багаторазове підвищення зносостійкості і міцності виробу. Промислові випробування, проведені на Інгулецькому ГОКс (м. Кривий Ріг), показали, що з використанням ТЦЕПТ працездатність бурових штанг верстата СБШ-250 МНА була збільшена у $2\div 3$ рази. Установка для ТЦЕПТ бурових штанг забезпечує продуктивність

до 5 пог. м труби на годину при встановленій потужності перетворювача електричної енергії 40 кВА.

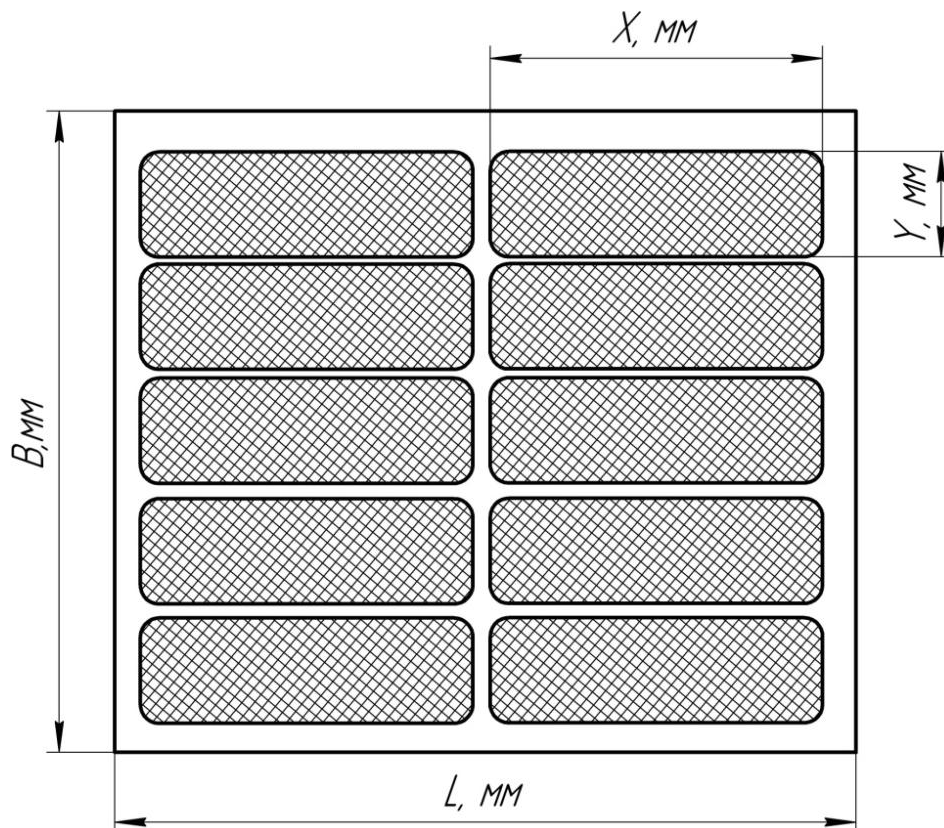


Рис. 2.23. Схема розміщення твердих ділянок на поверхні циліндричного виробу

ТЦЕПТ застосовується також і для зміцнення шийок вала, наприклад корінних і шатунних шийок колінчастого вала. На поверхні шийки вала створюються прямокутні тверді ділянки, орієнтовані своєю довгою частиною перпендикулярно до напрямку руху. При передачі навантаження на вал, внаслідок наявного бар'єра по межі твердості, його поверхня нагрівається нерівномірно. Це призводить до збільшення об'єму матеріалу твердої ділянки і утворення рельєфу на поверхні. Навантаження сприймають тверді ділянки поверхні вала. Між ділянками формуються западини, які містять змащувальні речовини і працюють як гідродинамічні клини. Система твердих ділянок веде до утворення на поверхні рельєфу, який забезпечує гідродинамічне змащення, сприймає зношувальні навантаження і забезпечує стискальні напруження в поверхневому шарі виробу. М'які ділянки поверхні забезпечують релаксацію напружень, що

утворюються при експлуатації. Дана конструкція опорної поверхні вала має такі переваги:

- забезпечує еластичність і пружність передачі функціонального навантаження на поверхню вкладиша підшипника ковзання;

- демпфірує вібраційні навантаження;

- забезпечує рідинний режим тертя навіть при невеликих швидкостях переміщення;

- виключає розрив розділової рідинної плівки і безпосередній контакт поверхонь тертя при імпульсних навантаженнях.

Ці переваги дозволяють істотно підвищити ефективність роботи машини, де використовуються вали, зміцнені ТЦЕПТ.

Термоциклічна технологія. Сутність технології полягає в тому, що нагрівання поверхні здійснюється електричними розрядами в плазмовому шарі між поверхнею виробу і електродом з водного розчину солі лужного металу.

Для обробки великогабаритних виробів розроблена універсальна установка, яка складається зі спеціалізованих навісних нагрівачів, бака з насосною станцією, джерела електричного живлення, пульта керування і маніпулятора.

Виріб фіксується в маніпуляторі, нагрівач встановлюється на зміцнювальну поверхню. На цій установці за командою з пульта здійснюється періодичний нагрів ділянок поверхні та охолодження, а потім поворот виробу. У процесі періодичного повторення технології (нагрівання/охолодження/поворот) на поверхні виробу формується система зміцнених ділянок з твердим шаром у вигляді прямокутних лінз. На рис. 2.24 наведено вигляд навісного пристрою для зміцнювальної обробки циліндричних деталей.

Аналогічна схема нагрівача була прийнята для зміцнення поверхні бурової штанги (замка, муфти) і опорних шийок колінчастого вала. Навісний нагрівач містить опори 1, які за допомогою корпусної рамки 2 і кронштейнів 3 забезпечують фіксування нагрівача 4, 5 відносно циліндричної поверхні зміцнюваного виробу. Електролітний нагрівач базується на планці 6, яка має можливість переміщення відносно

зміцнювальної поверхні. Електроліт і електричний струм підводяться до нагрівача через штуцери 7 і 8.

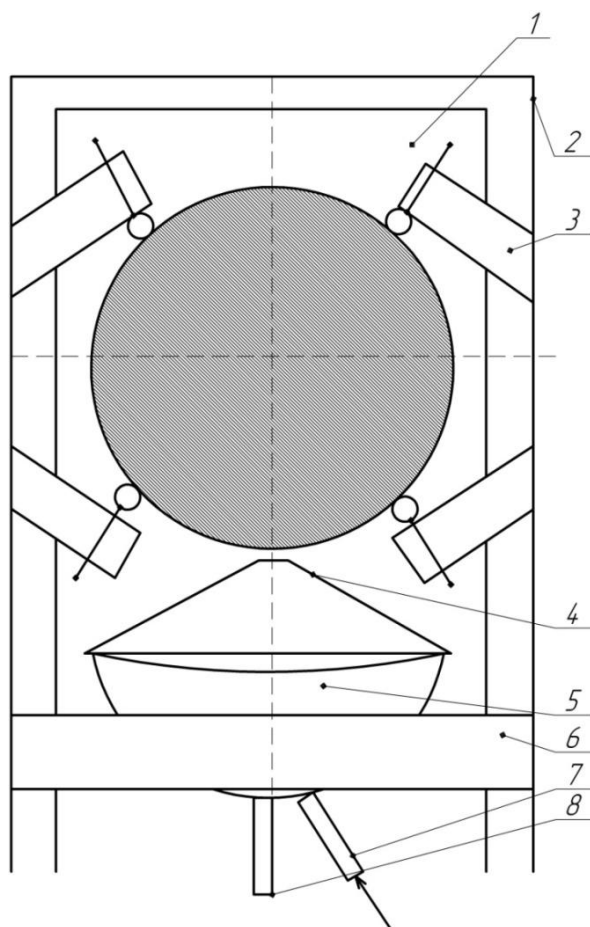


Рис. 2.24. Схема навісного нагрівача циліндричних поверхонь

Цей пристрій для ТЦЕПТ можна застосовувати для зміцнення циліндричних поверхонь важких валів і бурових труб.

ТЦЕПТ забезпечує на поверхні виробу систему твердих ділянок, що мають твердість залежно від вмісту вуглецю $50 \div 60$ НРС. Ці ділянки можуть мати форму кола, квадрата або овала.

Експериментальні роботи, проведені на плоских заготовках (сталь 45), показали, що система твердих включень підвищує допустиме навантаження на виріб (при однакових прогинах) на $30 \div 40$ %. Це обумовлено збільшенням об'єму загартованих ділянок і створенням у виробі стискальних напружень.

Принципові особливості нагрівача для електролітно-плазмової обробки наведені на рис. 2.25. Нагрівач містить металевий анод з характерним розміром D_a і наскрізними

отворами для протікання електроліту до поверхні виробу-катода. Електроліт у нагрівачі стискається діелектричними стінками на дистанції H до діаметра вихідного сопла D_k . Швидкість електроліту збільшується пропорційно відношенню площі отворів в аноді і площі сопла.

В об'ємі електроліту між електродами мають місце перехресні ефекти. З одного боку, електричне поле створює в текучому середовищі об'ємні сили механічної природи «пондеромоторні сили». Ці сили в рівняннях гідродинаміки додаються до сил інерційної, гравітаційної, баричної і в'язкої природи. З іншого боку, гідродинамічні потоки середовища, зарядженого електрикою зі щільністю ρ , утворюють електричні струми конвекції. Нагрівання електроліту є наслідком дифузійного міграційного струму, а також випромінювання. У нагрівачі має місце переважно конвективний механізм провідності, що пояснює низькі втрати на нагрів електроліту.

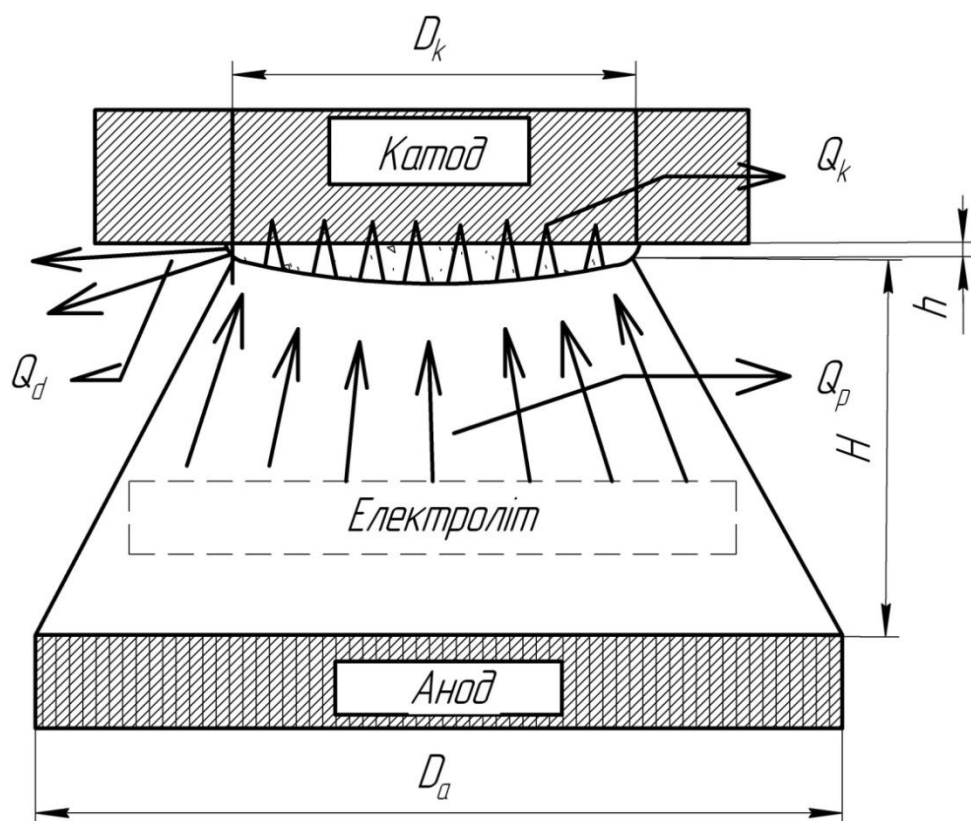


Рис. 2.25. Схема електролітно-плазмового нагрівача

Основні витрати енергії йдуть на випаровування, нагрівання електроліту (формування плазмового шару) і нагрівання поверхні

виробу електричними розрядами. Розподілені плівкові розряди мають низьку температуру газу і високу температуру електронів. Вони мають дифузійну прив'язку до поверхні рідкого електрода-анода.

Ефективність ТЦЕПТ. Електролітно-плазмова обробка 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.

При здійсненні нагріву електричні розряди в плазмовому шарі створюють на металевій поверхні локальні зони високого тиску і температури, у яких відбуваються процеси крихкого руйнування неметалевих і органічних плівок і відшарування пухких забруднень. Це забезпечує можливість суміщення процесів очищення поверхні виробу і нагріву її до необхідної температури.

Розроблені нагрівачі для електролітно-плазмової обробки забезпечують керування щільністю потужності на поверхні, що нагрівається, у діапазоні $10^2 \div 10^5$ Вт/см², що розширює сферу застосування технології очищення від забруднень до термоциклювання і нагріву типу лазерного.

Різні режими ТЦЕПТ забезпечують на поверхні виробу тверді ділянки, що мають шар товщиною від 0,5 до 10 мм. Періодично змінюючи щільність потужності нагріву електричним струмом, можна отримувати загартовані шари товщиною 0,5; 1,5; 4; 6; 7; 8 і 9 мм. Сумарний нагрів протягом 70 с забезпечує товщину загартованого шару 9 мм. Періодичне підвищення і зниження напруги електричного потенціалу дозволяє чергувати високу щільність потужності нагріву поверхні з низькою, і в результаті отримати середню швидкість нагріву поверхневого шару виробу в діапазоні $25 \div 150$ °C/с. Підключення електричного потенціалу напругою U_o в момент охолодження поверхні виробу дозволяє знизити швидкість охолодження і створює можливість гартування виробів, які виготовлені зі сплаву з високим вмістом вуглецю. Аналіз результатів експерименту показує, що чергування включення електричного потенціалу при напрузі $U_v = 320$ В і $U_n = 200$ В забезпечує прогрівання поверхні виробу на глибину до 10 мм.

При цьому максимальна твердість поверхневого шару (900 кг/мм^2) практично не залежить від товщини зміцненого шару. Твердість зміцненого шару виробу плавно знижується від максимальної (900 кг/мм^2) до твердості основи ($250\div 300 \text{ кг/мм}^2$) і, як правило, не залежить від часу нагріву. Періодична зміна величини напруги електричного поля між поверхнями рідкого електрода забезпечує керування електролітно-плазмовим нагрівом і створення необхідних режимів нагрівання та охолодження для формування гартівних структур.

Експериментальні роботи показали, що залежно від технологічних режимів можна отримувати на поверхні виробу загартовані шари, які мають товщину від 0,3 до 10 мм і твердість до 68 HRC. Розміщення термічно оброблених шарів на поверхні виробу залежить від швидкості, траєкторії переміщення електролітних нагрівачів відносно зміцнювальної поверхні та конструктивних особливостей самих нагрівачів.

Устаткування для ТЦЕПТ, як правило, комплектується зі стандартних маніпуляторів і перетворювачів електричної енергії, а нестандартне обладнання (нагрівачі і пульт керування) може бути навісним, знімним і переносним. Досвід промислового використання обладнання підтвердив високу ефективність ТЦЕПТ.

Наприклад, при зміцненні важких колінчастих валів витрати на впровадження технології окупуються після зміцнення 10÷20 валів, що становить 2÷3 тижні. Технологія є енергозберігаючою і екологічно чистою, 80÷85 % електричної енергії витрачається безпосередньо на нагрівання ділянок поверхні. ТЦЕПТ піддаються тільки зношувальні поверхні без нагріву всього виробу.

2.10. Технології вибухового плакування і зміцнення

У результаті силового впливу, що утворюється під час вибуху, у матеріалі заготовки виникають збурення різної природи, які призводять до фазових перетворень, незворотних пластичних деформацій, оборотного збільшення об'єму матеріалу під дією теплоти, виділюваної при ударному стисненні, утворення сполук і руйнувань. При різних схемах імпульсного впливу може бути

досягнуто завдання формоутворення, зміцнення, з'єднання, дроблення і порушення суцільності.

Характер та інтенсивність імпульсного впливу на заготівку навіть в одному процесі можуть істотно відрізнятися і відкривають можливості для зміни геометричних, механічних, фізичних і інших властивостей. Збурення, що поширюються з певними кінцевими швидкостями у вигляді хвиль напружень (навантаження, розвантаження, а також відбитих), утворюють у заготівці області збурень, які з плином часу розширюються. Кожній області збурень відповідає напружено-деформований стан, що характеризується тензором напружень і тензором деформацій і визначається природою збурення.

Поблизу безпосередньої дії імпульсного силового чинника зароджується область збурень навантаження, яка з часом поширюється з кінцевою швидкістю. У момент часу, коли припиняється збільшення деформації, починається процес розвантаження. Збурення, що відповідають процесу розвантаження, поширюються в навантажувальному матеріалі з кінцевою швидкістю у вигляді хвилі розвантаження. Утворюється вторинна область збурень хвилі розвантаження, розташована всередині області збурень навантаження. При виході хвилі напружень на поверхню або при взаємодії хвиль напружень у тілі виникає явище відбиття. Відбита хвиля навантаження, поширюючись у зворотному напрямку, утворює вторинну область збурень відбитої хвилі. При переході фронту хвилі напружень з однієї області збурень в іншу переміщення частинок середовища є безперервними за умови збереження суцільності середовища.

На додачу до цього, процес надалі супроводжується впливом продуктів детонації, що розширюються, безпосередньо або через передавальне середовище на оброблюваний матеріал, викликаючи додаткову деформацію.

Високі енергетичні параметри і імпульсний характер вибухового навантаження у своєму елементарному доповненні надзвичайно багатогранні і різноманітні, і не всі його аспекти вивчено. У процесах гідровибухового штампування, крім необхідної формозміни, досягається значне зміцнення оброблюваної заготівки, а в ряді випадків відбувається і

зварювання оброблюваної заготовки з матрицею. Процес зварювання вибухом також супроводжується зміцненням, пластичною деформацією і формозміною. У процесі вибухового пресування, крім зварювання тертям, що виникає при адіабатичних стисненнях частинок і їх рідиннофазного спікання, відбуваються і мікропроцеси зварювання вибухом частинок.

При виборі і обґрунтуванні процесів обробки для конкретних умов виробництва, можливо, енергетично оптимальним є той процес, який за інших рівних умов забезпечує найменші витрати енергії, необхідної для отримання заданих фізико-механічних властивостей виробів з необхідними експлуатаційними властивостями.

Для переходу від елементарних процесів вибухової металообробки до реальних і виявлення принципово нових необхідно перейти до розгляду процесів, що використовують високоенергетичні джерела енергії і явищ, які супроводжують процес впливу вибуху на оброблюваний матеріал.

Ударно-хвильовий характер вибухового навантаження обумовлює ряд фізичних явищ, не властивих статичному навантаженню: виникнення високих температур на фронті потужної ударної хвилі з утворенням високотемпературних фаз, поліморфних перетворень, подрібнення зерен і утворення двійникових дефектів; утворення кумулятивних струменів; «множинне» відколювання при впливі ударних хвиль високої амплітуди; спікання, руйнування, деформація і зварювання. Ці фізичні явища можуть знайти застосування в *технологіях*: 1) швидкої кристалізації; 2) отримання аморфних матеріалів; 3) модифікованого впливу ударних хвиль; 4) отримання тонких і плівкових покриттів; 5) плакування, зміцнення і зварювання. Великі можливості для створення нових технологій вибухової обробки містять процеси, параметри яких відповідають граничним, характерним для кожного з процесів.

В останні роки інтерес проявляють до методу швидкої кристалізації, суть якого полягає в охолодженні розплавленого металу зі швидкістю близько одного мільйона градусів у секунду. Швидко охолоджені сплави порівняно гомогенні, оскільки для утворення і зростання великих зерен не вистачає часу. Матеріали з гомогенною структурою міцні і мають високі температури

плавлення. Швидка кристалізація може викликати утворення метастабільних фаз: кристалічних аморфних, менш стійких фаз, що утворюються при повільному охолодженні. Метастабільні фази мають ряд нетривіальних властивостей. Наприклад, швидкокристалізуючі алюмінієві сплави мають питому міцність, що дорівнює або перевищує міцність титанових сплавів при помірних і високих температурах. Вони також надзвичайно корозійностійкі. Швидкоохолоджені алюмінієві сплави здатні замінити титан у деталях компресорів газотурбінних двигунів, чавун у гальмівних дисках автомобільних коліс, чавунні корпуси букс залізничних вагонів і т. д.

Існують кілька методів отримання швидкоохолоджених сплавів. Найпростіший з них – *надтверде загартування*, при якому краплі розплавленого металу викидаються на охолоджуючу поверхню. Інший метод – розпорошення: дрібнорозпилені краплі охолоджуються інертним газом. Розроблено установку, у якій тонкий струмінь розплаву падає на швидкообертальний диск, який розбиває його на краплі і викидає їх у холодну атмосферу. За допомогою цього методу одержують дрібнодисперсні порошки швидкоохолодженого сплаву, які потім спресовуються шляхом гарячого пресування.

Більш ефективно здійснити процес динамічного загартування з використанням вибухових речовин. Для цього порошок або зміцнювану деталь метають зарядом вибухової речовини на охолоджену поверхню рідини або металу. При зіткненні тіла, що метають, зі швидкістю близько 2,5÷3 тис. м/с відбувається швидке охолодження і ударно-хвильове стиснення з утворенням метастабільних фаз.

Процес можна здійснити так. У порожнині, утвореній у високоміцному сплаві, розташовуються вибухова речовина і середовище, що метає. Під час вибуху заряду середовище, що метає, розганяється, і при зіткненні з охолоджувальною поверхнею відбуваються процеси, характерні для швидкої кристалізації.

Тиск, необхідний для утворення метастабільної фази, відповідає сотням мілібар, і його можна досягти лише при швидкостях зіткнення, що перевищують у декілька разів швидкість звуку в повітрі. Досягти цього можна при

використанні імпульсних джерел енергії. Ряд процесів вибухової металообробки (різання, зварювання) пов'язаний з утворенням кумулятивних струменів в оброблюваних матеріалах.

Це явище можна використовувати для отримання аморфних матеріалів. Відомо, що швидкість падіння температури при зіткненні тіла, що метають, з поверхнею іншого матеріалу при швидкостях зіткнення близько 1000 мс^{-1} в інтервалі температур $700 \div 350^\circ \text{C}$ становить до $3,5 \cdot 10^6$ град/с. При таких градієнтах температур відбувається отримання аморфних матеріалів з розплавів. Такі параметри зіткнення характерні для процесів зварювання вибухом, і ряд дослідників, що вивчають структури зони з'єднання зварених вибухом заготовок, виявили у звареному шві включення аморфного металу. Очевидно, утворення аморфних структур відбувається з розплавленого металу. Тобто зіткнення тіла, що метають, з підкладкою повинно призводити до розплавлення зони контакту схильного до обробки матеріалу.

На деяких режимах зварювання вибухом у зонах, прилеглих до зварного шва, утворюються литі включення. Останні знижують якість і міцність зварного з'єднання і є вкрай небажаними. Для утворення шару з аморфного матеріалу або такого, що має велику кількість аморфних складових, режими зіткнення повинні забезпечити розплавлення приконттактних шарів і високу швидкість охолодження. Кількість литих включень збільшується зі зростанням швидкості детонації, а отже, і швидкості точки контакту. Граничне значення швидкості точки контакту приймається в межах зони хвилеутворення. Величина зварювального зазора і параметр зварювання відповідає максимальній швидкості зіткнення. Як правило, при таких режимах зварювання не відбувається, а утворюється псевдоаморфний шар, що має ряд унікальних властивостей.

Таким чином, на стику процесів зварювання вибухом і вибухового зміцнення для ряду матеріалів можливий процес швидкої кристалізації. І цей процес, імовірно, дає можливість отримання монометалу з поверхневою структурою і властивостями, характерними для біметалів. Інтенсифікувати і стабілізувати процес нанесення покриттів з псевдоаморфною структурою можливо шляхом надання зміцнювальній поверхні підкладки рельєфу, що забезпечує утворення зустрічних

кумулятивних струменів з розплавленого металу і окислів. Наприклад, рельєф може бути трикутного (рис. 2.26), трапецієдального та інших профілів. При зіткненні струменів утворюється дрібнодисперсна плівка і розпил струменів на масивне тіло підкладки. У таких умовах швидкість охолодження компонентів кумулятивних струменів досягає 10^6 °C/с і створюються умови для швидкої кристалізації.

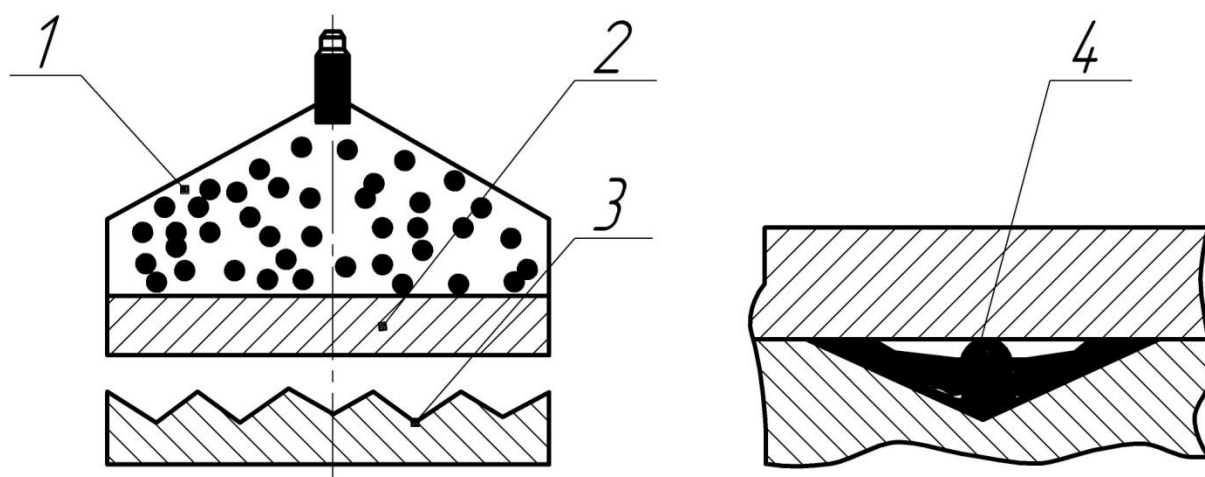


Рис. 2.26. Схема зміцнення з утворенням кумулятивних струменів:

1 – вибухова речовина; 2 – ударник; 3 – зміцнюючий виріб підкладки; 4 – струмінь

У процесах саморозповсюджувального високотемпературного синтезу (СВС) питання фіксації проміжних продуктів при протіканні багатостадійній реакції у хвилі СВС вирішується при швидкостях охолодження $10^4 \div 10^5$ К/с, близьких до швидкостей високошвидкісного гартування. За цих умов відбувається отримання метастабільних структур і станів речовини з особливими властивостями. Необхідну швидкість охолодження можна забезпечити при використанні високошвидкісного струменя води, спрямованого перпендикулярно до фронту хвилі синтезу.

Використання ефекту множинного відколювання в методах вибухової обробки відкриває нові можливості у сфері отримання тонких і плівкових покриттів товщиною близько 100 нм і менше.

Покриття, отримані в процесі спільної пластичної деформації при зварюванні вибухом, за своєю міцністю

зчеплення з підкладкою перевершують всі існуючі методи плакування. Це дає можливість використовувати отримані таким чином деталі з захисними покриттями в умовах динамічного навантаження. Крім того, покриття мають корозійну стійкість, антифрикційність, вологостійкість, теплопровідність, зносостійкість.

Певні труднощі виникають при нанесенні покриттів товщиною менше 1 мм. У цьому випадку відбувається деформація, викривлення, розриви і т. д. плакувального шару, але, що особливо істотно, потрібний заряд вибухової речовини за своєю геометрією менше від критичного діаметра детонації. Для вирішення проблеми зварювання використовують додаткові пластини-супутники, до яких приклеюють фольгу з плакувального матеріалу. Як правило, після зварювання через наявність хвиль розтягування відбувається відрив пластини-супутника. Якість плакувального шару визначається технологією склеювання. Крім склеювання покриття на пластину-супутник можна наносити будь-яким іншим методом напилення: хімічним і т. д. При зіткненні з підкладкою відбувається перенесення матеріалу покриття на останню. Міцність зчеплення при цьому перевершує вихідну з пластиною-супутником. Для отримання покриттів з графіту, а також графітових плівок на пластину-супутник покриття може наноситися графітовим стрижнем натиранням. Для отримання плівок необхідно розчинити підкладку.

Для нанесення порошків на метали ударними хвилями застосовують схеми, аналогічні односторонньому пресуванню. Процес метання пористого (або сипкого) шару, як правило, при теоретичному аналізі розбивають на два етапи. Вважається, що на першому етапі розгін відбувається в ударній хвилі, сильно ущільнюючи речовину, переводячи її в близький до компактного стан. На другому етапі продукти детонації далі прискорюють спресований пористий шар. Між вибуховою речовиною і порошком використовують захисний шар. Нанесення порошкових покриттів на металевій основі ударно-хвильовою обробкою проводиться як у твердому, так і рідкому стані. Зміна механізму формування шарів від твердого до рідиннофазного визначається значеннями швидкості зіткнення порошку з

підкладкою і швидкістю ковзання ударної хвилі уздовж підкладки. Для процесу у твердій фазі шар покриття складається зі спресованих, деформованих і зварених між собою частинок вихідного порошку, а міцність його зчеплення близька до міцності моноліту. Зіткнення порошку зі швидкістю, що перевищує критичну, призводить до утворення шарів з рідкої фази з формуванням литих структур і міцністю зчеплення на рівні моноліту. Товщина шарів може досягати $10 \div 100$ нм.

Монолітна металева підкладка при імпульсній обробці залишається холодною. Рідиннофазне формування поверхневих шарів можна розглядати як динамічне загартування з рідкого стану. Даному методу притаманний ряд особливостей: плавлення порошкового матеріалу відбувається з високою швидкістю нагріву, що дозволяє уникнути вигорання і окиснення елементів при обробці високолегованих і порошкових сумішей; висока швидкість фізико-хімічних реакцій в ударному фронті дозволяє отримувати шари з метастабільних фаз або пересичених розчинів і з'єднань з сумішею порошків безпосередньо за час обробки; переведення металу порошку в розплавлений стан і його охолодження зі швидкістю близько 1 млн градусів у секунду створює умови для швидкої кристалізації.

У процесі зварювання вибухом на режимах $r < r_{\min}$ і $r > r_{\max}$ (r – параметр зварювання) з'єднання зварювальних матеріалів не відбувається, але, тим не менш, на співударних поверхнях утворюється тонкий металевий шар. При $r < r_{\min}$ основний механізм утворення покриття пов'язаний з фрикційною взаємодією співударних поверхонь, а при $r > r_{\max}$, коли тиск у зоні контакту перевищує $2 \cdot \sigma_m$ (σ_m – межа плинності), спостерігається множинний відкол від співударної поверхні пластини, що метають. У результаті цього відбувається зіткнення і зварювання частинок металу, що відкололися, з поверхнею підкладки, потім додаткове зачеканювання відколотих частинок у поверхню ударом плакуючої пластини і відскакування останньої.

З'єднання не відбувається і в тому випадку, коли отримане з'єднання руйнується хвилями розвантаження внаслідок того, що в процесі деформації металу в зоні з'єднання велика кількість енергії переходить у тепло, і найбільш деформовані поверхні ділянки розплавляються, а потім тверднуть при відведенні тепла

в навколишній шар металу. Під час руху точки контакту зона високих тисків змінюється зоною розтягуючих напружень. Коли розплавлена ділянка металу не встигає затвердіти, відбувається руйнування зони з'єднання. Зона перемішування розплавлених при зіткненні металів залишається на одній з поверхонь.

Стабільне отримання покриттів товщиною $10 \div 100$ нм доцільніше здійснювати при $r < r_{\min}$ і активації фрикційної взаємодії. Це досягається шляхом забезпечення ковзання плакувального шару по підкладці. Для цього розміщують заряд на торцевій поверхні плакувальної заготовки або плакувальну заготовку виготовляють у вигляді клину.

За своєю суттю процес близький до процесів фрикційного латунювання, бронзування і міднення сталевих поверхонь. Мета процесу – збереження деталей від схоплювання при обробці, зменшення зносу в подальшій роботі – захисне покриття перед складанням. У шарі, який містить мідь, можна порушити вибіркоче перенесення.

Зручно в технологічному відношенні наносити покриття, використовуючи клейові склади. На пластину-супутник наноситься клей, наприклад силікатний або рідке скло. На клей наноситься плакувальний шар порошку необхідного складу. При зіткненні з плакованою поверхнею шар порошку переноситься на останню. Затверділий клей відлітає.

Взаємодія падаючої і відбитої ударних хвиль у навантажуваному матеріалі призводить до виникнення наростаючих розтягувальних напружень, які можуть призвести до руйнування, так званого відколу. На це явище найбільше впливають форма хвилі напруження і граничне значення руйнівного напруження δ_g навантажуваного матеріалу. Положення тріщини відколу в суцільному матеріалі або місця розшарування в шаруватому залежить від форми хвилі напружень. При поширенні хвилі в матеріалі крутість кривої $\delta(t)$ за фронтом хвилі зменшується зі збільшенням товщини навантажуваного полі- або мономатеріалу δ , що призводить до збільшення товщини відколу Δ . При поширенні хвилі напружень великої інтенсивності $\delta > 2 \cdot \delta_g$ виникає множинне відколювання – кілька послідовних один за іншим паралельних відколів.

Модифікуючий вплив ударних хвиль використовується для інтенсифікації дифузійних процесів у технологіях хіміко-термічної обробки. Оскільки дифузія відбувається шляхом послідовного переміщення окремих атомів, то для руху будь-якого даного атома у твердому тілі обов'язковим є придбання ним певної енергії активації.

Встановлено, що будь-який чинник, що сприяє збільшенню вихідної енергії атома, тим самим сприяє зменшенню тієї додаткової енергії, яка необхідна для активації атома при дифузії. Чинниками, що сприяють спрямованому потоку речовини, є градієнт температури, градієнт напружень, градієнт електричного поля і т. д.

Оцінка коефіцієнта дифузії при впливі ударних хвиль пов'язана з великими труднощами, що полягають у тому, що час процесу надзвичайно замалий і важко виділити цей ефект у чистому вигляді. Проходження ударної хвилі неминуче пов'язане з підвищенням температури, зміною дефектності кристалічної структури, дією температурного поля після розвантаження, концентраційною неоднорідністю і з іншими чинниками.

Істотний вплив на коефіцієнт самодифузії має швидкість деформації при пластичній деформації. Збільшення швидкості деформації від 10^{-4} до $2 \cdot 10^{-6}$ с^{-1} при температурі 750 $^{\circ}\text{C}$ призводить до збільшення коефіцієнта у 2500 разів. Аномальне прискорення дифузії в різних поєднаннях металів і парі залізо-вуглець спостерігається при імпульсній деформації зі швидкістю 20 с^{-1} , а також при імпульсному зварюванні зі швидкістю 10^2 с^{-1} . Отримані значення для самодифузії перевершують коефіцієнт дифузії заліза в рідкому стані. У діапазоні швидкостей від 10^{-2} до 10^2 с^{-1} також відмічається збільшення коефіцієнта дифузії, яке пов'язується з підвищенням середньої концентрації вакансій.

Однією зі сфер застосування вибухової обробки може стати модифікуючий вплив ударних хвиль і швидкісної деформації на матеріал, який надалі буде підданий хіміко-термічній та іншим видам обробки. Після вибухового навантаження більшість металів переходять в активований стан, і ряд процесів хіміко-термічної обробки та нанесення захисних покриттів (цементация, борирування, алітування, азотування та ін.) протікає значно швидше при тих самих показниках якості.

Далі розглянемо технологічну придатність явища відколювання. У процесах вибухової обробки, не пов'язаних з операціями дроблення і руйнування, виникнення відколу – небажане явище. Зазвичай для запобігання відколюванню відбивну поверхню матеріалу безпосередньо спирають на інше тіло, що поглинає енергію. Запобігання відколюванню здійснюється і шляхом використання затискних плит і мастик. При цьому відкольні елементи, поглинаючі значну кількість енергії, можуть бути використані для виконання ряду допоміжних операцій.

Корисне застосування відколювання – це перш за все поділ шаруватих виробів для їх утилізації після виконання свого призначення. Для цього на зовнішню поверхню наносять шар вибухової речовини, параметри якої вибирають таким чином, щоб руйнування сталося по поверхні розділу.

При з'єднанні багат шарових виробів між собою методами зварювання плавленням великі технологічні труднощі виникають при розшаруванні пакета в результаті термічного нагріву електричною дугою. Бажано забезпечити монолітність кромки і щільне, без зчеплення, прилягання шарів виробу. Вирішити цю проблему можливо наступним чином (рис. 2.27).

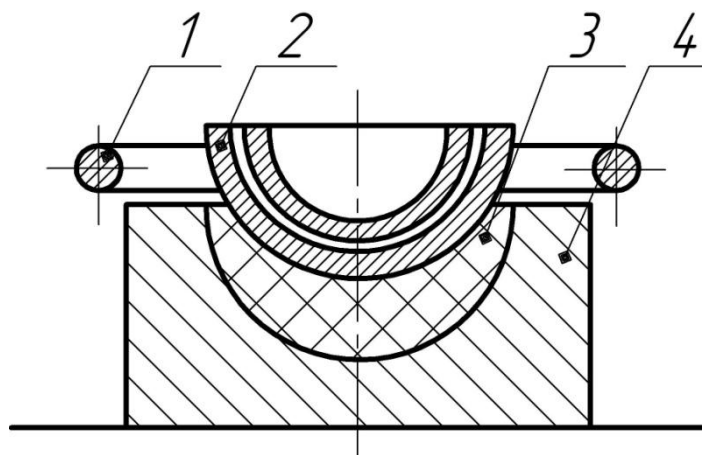


Рис. 2.27. Схема отримання виробів з монолітними кромками:
1 – вибухова речовина; 2 – шарувата заготовка; 3 – прокладка;
4 – матриця

Попередньо виготовлені заготовки 1 збирають у пакет і деформують до отримання заданої конфігурації днища 2. Потім

проводять розшарування кромки днища 2. Для цього днище встановлюють у матрицю 3 так, щоб кромки днища 2 виступали над площиною верхнього торця матриці 3, для чого в порожнині матриці встановлюють прокладку 4. Після цього по зовнішньому периметру кромки днища 2 розміщують кільцевий заряд вибухової речовини 5 і здійснюють його ініціювання.

У результаті дії вибуху відбувається розшарування шарів багатошарового днища 2 біля його кромки. Після цього багатошарове днище встановлюють у матрицю 3 і виконують зварювання вибухом кромки днища з калібруванням і ущільненням шарів.

Таким чином, ефект відколювання знаходить застосування як функціональний і інтенсифікуючий чинник і пов'язаний з обробкою і створенням шаруватих виробів і використанням шаруватості як конструктивного, так і технологічного прийомів. Цей метод знайшов застосування при виготовленні шаруватих посудин високого тиску (рис. 2.28).



Рис. 2.28. Посудина високого тиску

Сам процес зварювання вибухом може знайти застосування не тільки для плакування пластин і циліндричних оболонок, але і для плакування і зміцнення поверхонь деталей складної конфігурації.

У зв'язку з розвитком виробництва спеціальних профілів, одержуваних методом екструзії, з'явилася можливість виготовлення корпусів букс залізничних вагонів з алюмінієвих сплавів, підвищена корозійна стійкість яких дозволяє виключити витрати на антикорозійну обробку, скоротити ремонти через корозію, знизити масу ходових частин вагонів на 20÷30 %. Однак

алюмінієві сплави не мають достатніх антифрикційних властивостей, тому доцільно поверхні алюмінієвого корпусу букси, що контактують зі сталевими поверхнями з'єднаних деталей, виготовляти також зі сталі. Порівняно з іншими відомими способами нанесення сталевих покриттів на робочі поверхні алюмінієвих деталей спосіб нанесення покриттів на основі вибухового плакування акумулює в собі цілий ряд переваг: міцне зварне з'єднання металів по всій поверхні, збереження структурних характеристик плакованого металу у зв'язку з повною відсутністю теплового впливу на нього, отримання покриттів підвищеної зносостійкості, обумовленої процесами зміцнення зварюваних матеріалів у зоні контакту, причому зносостійкість зростає в глибину покриття.

Освоєно процес плакування корпусів букс зносостійкими сталевими пластинами. Корпуси букс залізничних вагонів виготовлено з алюмінієво-магнієвого сплаву. У процесі експлуатації знос приливків корпусів букс становив $30 \div 40$ мм (пара тертя сталь-алюмінієвий сплав). Для запобігання зносу рекомендовано плакувати приливки корпусу букс пластинами з вуглецевої сталі товщиною $4 \div 6$ мм. Міцність плакувального шару на зсув повинна знаходитися в межах $12 \div 15$ МПа. Процеси напилення, наплавлення, накатування роликками не забезпечували необхідних параметрів плакувального шару. Тому було прийнято рішення апробувати процес зварювання вибухом.

Алюміній і залізо утворюють при взаємодії хімічне з'єднання, тому метали цієї групи важко піддаються зварюванню всіх видів, у тому числі і вибухом, який здійснюється в досить вузькому діапазоні параметрів зіткнення. Крім того, у даному випадку процес зварювання вибухом ускладнений рядом причин. Насамперед, це мала площа зварювальних поверхонь. І якщо довжина приливка вкладається в область стійкого режиму зварювання, то ширини 40 мм недостатньо. Корпус букси містить два приливки, відстань між якими 150 мм. Цю відстань повітряна ударна хвиля проходить приблизно за $4,5 \cdot 10^{-4}$ с. Тому при одночасному плакуванні двох приливків синхронізація підриву двох зарядів повинна знаходитися в межах $(1,5 \div 2) \cdot 10^{-4}$ с. Крім того, відбувається деформація корпусу букси і поширення хвильових збурень по металу при ударно-хвильовому навантаженні.

Урахування всіх цих чинників дозволив вирішити завдання плакування прилиwkів корпусів букс сталевими пластинами. Сталеві пластини попередньо плакувалися пластинами з технічно чистого алюмінію. Товщина шару алюмінію була підібрана з умов мінімального видавлювання металу на кромках і подальшим зведенням до мінімуму параметра зварювання r (відношення маси вибухової речовини до маси приварюваної пластини). Це практично виключило крайові непровари. Для усунення непроварів у початковій зоні процесу, пов'язаного з відсутністю косоного співудару в цій зоні і очищення зварюваних поверхонь, застосовували схему зварювання вибухом з відгином кута пластини. Біметал сталь-алюміній ($2000 \times 40 \times 4 \times 2$ мм) приварювали до прилиwkів корпусів букс. Режим зварювання підбирали з умов забезпечення необхідної міцності зварного з'єднання і мінімальної деформації прилиwkів і корпусу букси в цілому, тобто параметр зварювання $r=0,6$ і швидкість зіткнення $500 \div 600 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ відповідали мінімальним.

При динамічному навантаженні заготовок корпусів, які отримано видавлюванням, деформації не спостерігалось. В оброблених виникала еліпсність внутрішнього отвору. Тому при вибуховому плакуванні готових виробів необхідно було використовувати розтискні оправлення, що перешкоджають деформації корпусу та гасіння заломлених і відбитих ударних хвиль, що призводять до зниження міцності зварного з'єднання або навіть до відриву плакувального шару.

Отримані зварні з'єднання піддавали стандартним випробуванням на відрив і зріз. Розрив зразків, вирізаних по всій поверхні зварного шва, відбувався по менш міцному матеріалу, що свідчить про високу якість зварного з'єднання. Була виготовлена дослідна партія корпусів букс з прилиwками, плакованими сталевими пластинами, і відправлена на експлуатаційні випробування. Один із зразків з пластиною, привареною до одного з прилиwkів (для наочності), наведено на рис. 2.29. Не менш ефективним є безпосереднє вибухове зміцнення прилиwkів алюмінієвих корпусів або ударною хвилею, або ударом твердого тіла, що метається, вибухом. Процес зміцнення накладним зарядом вибухової речовини (ударною хвилею) технічно більш простий і легко здійснюваний.

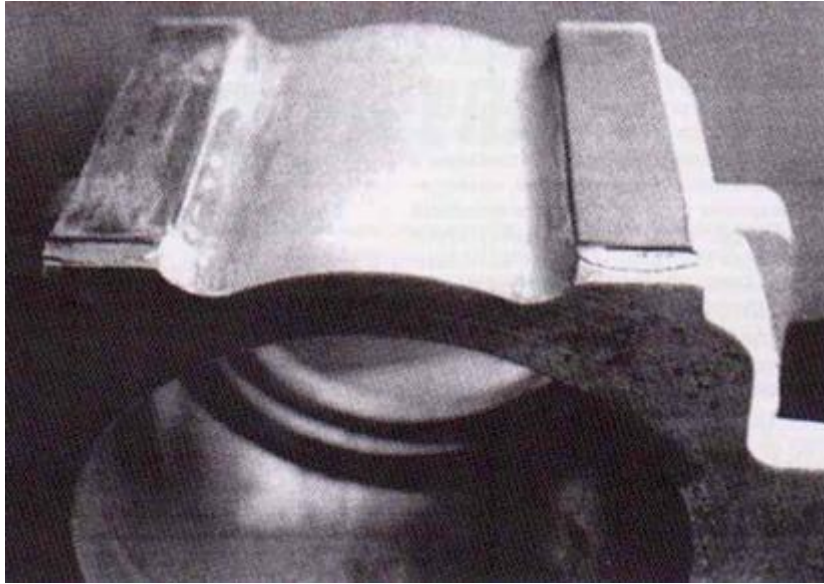


Рис. 2.29. Корпус букси з привареними сталевими пластинами

У цьому випадку в кілька разів знижується трудомісткість процесу, оскільки відпадає необхідність у виготовленні біметалевих сталюалюмінієвих пластин і відгину їх кута. Виключаються операції установлення дистанційних елементів і плакувальних пластин. Після зміцнення твердість приливку по всій товщині приливка зростає на $40\div 45\%$, межа плинності – на 50% , а межа міцності – на $10\div 15\%$ і приблизно відповідає властивостям вуглецевої сталі 20. Більш високі показники міцності і твердості досягаються при зміцненні прилиwkів ударом твердого тіла, що метається, вибухом, при параметрах зіткнення, які забезпечують розплавлення поверхневого шару приливка корпусу букси, без утворення зварного з'єднання. Тобто параметри зіткнення лежать за межею параметрів зварювання вибухом (швидкість детонації вибухової речовини більш ніж в 1,3 разу перевершує швидкість звуку алюмінієво-магнієвого сплаву), але і не досягають параметрів зміцнення вибухом. При додаванні поверхні приливка корпусу букси рельєфу, що забезпечує утворення зустрічних кумулятивних струменів з розплавленого алюмінієво-магнієвого сплаву при зіткненні з пластиною, що метається, утворюється мікрошар з мікротвердістю, що відповідає твердості титанових сплавів. У таких умовах швидкість охолодження зустрічних кумулятивних струменів досягає порядку 1 млн градусів у секунду і створюються умови для протікання процесу швидкої кристалізації.

Питання для самоконтролю

1. Які вихідні матеріали застосовуються для приготування захисних покриттів при гарячій обробці металів?
2. Коротко охарактеризуйте склоутворювальні вихідні матеріали для приготування захисних покриттів при гарячій обробці металів.
3. Коротко охарактеризуйте керамічні вихідні матеріали для приготування захисних покриттів при гарячій обробці металів.
4. З якою метою використовують допоміжні матеріали при приготуванні захисних покриттів при гарячій обробці металів?
5. Які вимоги висуваються до складу захисного покриття при гарячій обробці металів?
6. Як здійснюється класифікація складів покриття при гарячій обробці металів?
7. Коротко охарактеризуйте склоподібні (емалеві) покриття.
8. Коротко охарактеризуйте силікатні покриття.
9. Коротко охарактеризуйте боросилікатні покриття.
10. Коротко охарактеризуйте бороалюмосилікатні і алюмоборосилікатні покриття.
11. Коротко охарактеризуйте алюмосилікатні покриття.
12. Коротко охарактеризуйте склоподібні покриття на основі металургійних шлаків і гірських порід.
13. Коротко охарактеризуйте склокерамічні покриття.
14. Коротко охарактеризуйте склометалеві покриття.
15. Коротко охарактеризуйте органосилікатні покриття.
16. Які переваги мають покриття металу на основі захисних сумішей і обмазки?
17. Коротко охарактеризуйте металеві покриття.
18. У чому полягає головна відмінна риса систем покриттів від всіх відомих способів захисту металу покриттями?
19. Коротко охарактеризуйте технології отримання дифузійних покриттів.
20. Вкажіть основні легуючі елементи високотемпературних покриттів.
21. На які групи можна розділити легуючі елементи у високотемпературних металевих покриттях?

22. Які процеси відбуваються при термомеханічному зміцненні на глибину шару захисного покриття?
23. Який вид термічної обробки покриттів є найбільш розповсюдженим?
24. Як можуть бути отримані конденсовані покриття?
25. Які чинники мають визначальний вплив на працездатність покриттів на лопатках турбін залежно від температури?
26. Коротко охарактеризуйте комбіновані теплозахисні покриття.
27. Як досягається істотне підвищення довговічності теплозахисної кераміки, яка отримується плазмовим напиленням?
28. Від яких основних чинників залежить довговічність керамічних покриттів на лопатках турбін?
29. Які процеси нанесення покриттів позначаються терміном газотермічне напилення?
30. Які існують методи газотермічного напилення поверхонь?
31. Коротко охарактеризуйте метод високошвидкісного напилення.
32. Коротко охарактеризуйте метод плазмового напилення.
33. Коротко охарактеризуйте детонаційно-газовий метод напилення.
34. Вкажіть переваги та недоліки детонаційно-газового методу напилення.
35. Якими технологічними параметрами характеризується процес детонаційного напилення?
36. Як здійснюється процес детонаційного напилення покриттів?
37. Коротко охарактеризуйте газополум'яний метод напилення.
38. У чому полягає процес утворення металізаційного покриття?
39. Вкажіть особливості і переваги способів нанесення газотермічного напилення покриттів.
40. Що забезпечується при газотермічному напиленні композиційними порошками?
41. Як здійснюється процес просочення покриттів?

42. Як здійснюється процес оплавлення покриттів?
43. Охарактеризуйте вплив газотермічного напилення на структуру і твердість поверхневого шару.
44. Що являє собою процес вакуумного напилення? Які стадії він в себе включає?
45. Що називається критичною температурою вакуумного напилення?
46. Що називається критичною щільністю потоку випаровуваних частинок для даної температури поверхні?
47. Яке технологічне устаткування використовують для вакуумного напилення?
48. З яких конструктивних вузлів складається установка для вакуумного напилення?
49. Які технологічні особливості властиві технології електронно-променевої порошкової металургії?
50. Вкажіть техніко-економічні переваги технології електронно-променевої порошкової металургії.
51. Вкажіть сфери застосування технології електронно-променевої порошкової металургії.
52. Охарактеризуйте властивості твердосплавного покриття.
53. Вкажіть приклади використання і область можливого застосування твердосплавних покриттів.
54. Охарактеризуйте технологію електроконтактного спікання.
55. Вкажіть відомі вам способи відновно-зміцнювального наплавлення.
56. Які техніко-економічні показники слід враховувати при виборі технології відновлення і зміцнення деталей?
57. Коротко охарактеризуйте технологію термопружнопластичного деформування металу.
58. У яких випадках для відновлення поверхні застосовують метод місцевого нагріву? На чому заснований даний метод?
59. У чому полягає сутність термоциклічної електродіодно-плазмової технології зміцнення?
60. У чому полягає сутність технологій вибухового плакування і зміцнення?

РОЗДІЛ 3

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ОСНОВИ БЕЗПЕКИ ПРИ ОБРОБЦІ МАТЕРІАЛІВ

3.1. Охорона праці при обробці матеріалів різанням

Постійно працюючі металообробні верстати повинні бути встановлені на міцних фундаментах або загальній основі підлоги, ретельно вивірені і закріплені. Всі верстати (постійні або переносні) обслуговуються тільки закріпленими за ними особами. Вимкнення верстата є обов'язковим при зміні інструменту, установленні, закріпленні і знятті заготовки, ремонті, чищенні, змащуванні і прибиранні верстата.

При обробці на верстатах важких деталей, наприклад блоків циліндрів двигунів, необхідно користуватися підйомними засобами.

Верстати, робота на яких призводить до утворення осколків, стружки або іскри, обладнують зручними в експлуатації запобіжними пристроями з досить міцним склом або іншим прозорим матеріалом для спостереження за процесом обробки. Якщо за технічними умовами запобіжні щитки поставити неможливо, то на верстатах працюють у захисних окулярах.

Металообробні верстати та інше обладнання встановлюють у приміщеннях таким чином, щоб вони не захащували головні проходи і двері. Відстань між окремими верстатами має бути не менше 0,8 м, цього достатньо для проходу працівників при обслуговуванні та ремонті верстатів.

Необхідно захищати ремінні та зубчасті передачі; всі виступаючі рухомі частини верстатів, що знаходяться на висоті до 2 м від підлоги; оброблювані рухомі предмети, що виходять за габарити верстата.

Стружку від верстата не можна прибирати руками, для цього використовують щітки і гачки.

Висоту укладання виробів у штабелі визначають виходячи зі стійкості штабеля і зручності користування. Максимальна висота штабелів – 1,5 м.

Все експлуатоване обладнання має знаходитися в повній справності. За його станом здійснюється постійний контроль з боку технічного керівництва. При прийманні з ремонту в акті необхідно вказати наявність на верстаті всіх захисних пристроїв і їх справність. Робота на несправних верстатах і з несправними огородженнями забороняється.

Верстатники повинні працювати в добре застебнутому одязі.

Волосся, особливо в жінок, має бути закрито головним убором (кашкетом, косинкою, беретом, сіткою та ін.).

При обробці пруткового матеріалу на револьверних верстатах і токарних автоматах виступаючі за шпindelь частини прутків огорожуються. Зачищення деталей наждачним полотном, затисненим руками, забороняється.

Необхідно стежити за надійністю кріплення заготовок (деталей), яке багато в чому залежить від стану центрів і центрових отворів і відповідності центрів виконуваний роботі. При роботі зі зношеними центрами і неправильно виконаними центровими отворами оброблювана заготовка під дією сил різання може бути вирвана з центрів.

Виправлення шліфувальних кругів здійснюють алмазами, алмазно-металевими олівцями або алмазозамінниками (металевими зірочками, кругами, брусками з карбїду кремнію або дисками). Виправлення кругів зубилом або яким-небудь іншим слюсарним інструментом є неприпустимим. Забороняється також при обробці деталей шліфувальними кругами застосовувати важелі для збільшення тиску на круг. При установленні на шпindelі шліфувального верстата двох кругів їх діаметри не повинні відрізнятись більш ніж на 10 %. Для роботи можна використовувати тільки випробувані на міцність круги; різці, фрези та інший різальний інструмент повинен бути надійно закріпленій.

Перед початком роботи необхідно перевірити верстат на холостому ходу і тільки потім надійно закріпити заготовку і приступити до її обробки. Забороняється спиратися на верстат, класти на нього інструменти, заготовки та готові вироби.

При обробці деревних матеріалів на круглопилкових верстатах для подовжнього розпилювання, рейсмусових, чотиристоронніх подовжньо-фрезерних (стругальних) і деяких

інших верстатах велику небезпеку становить зворотний викид з верстата заготовок або обрізків. Тому верстати повинні бути забезпечені противикидними пристроями, а верстатник при подачі заготовок повинен перебувати збоку від місця подачі.

Лезовий інструмент повинен бути ретельно і правильно заточений, а пили і фрези правильно розведені і захищені кожухами від випадкового дотику.

При обробці деревних матеріалів і пластиків утворюється багато пилу. Робочі місця повинні бути забезпечені припливно-витяжною або витяжною вентиляцією. Через високу температуру різання також виділяються отрутні гази, особливо при обробці пластиків. У цих випадках можливе застосування респіраторів.

Утворені в результаті обробки матеріалів стружку й тирсу необхідно регулярно прибирати з робочого місця. Стрічкові пили для розпилювання металу захищають по всій довжині стрічки міцними смугами або бугелями.

Верстати з металу і дерева для слюсарних робіт повинні мати жорстку і міцну конструкцію і бути досить масивними, щоб не хитатися і не вібрувати при роботі на них. Верхню кришку верстата роблять з добре пригнаних дошок товщиною $40 \div 50$ мм, які оббивають листовим залізом. Ширина двосторонніх верстатів складає $1,2 \div 1,5$ м. У середині верстата передбачають сітку заввишки $0,8$ м для запобігання пораненню працівників від відлітаючих при рубленні шматочків металу. Ширина односторонніх верстатів складає $0,6 \div 0,8$ м. З точки зору безпеки кращими є одномісні верстати, але для економії площі ремонтні виробництва часто обладнують багатомісними верстакими. Висота верстатів має бути такою, щоб губки лещат перебували на рівні ліктя працівника.

Стелажі для зберігання деталей повинні мати невеликий ухил полиць всередину і бути зручними по висоті для укладання деталей.

Підлогу на робочому місці слюсаря обладнують ґратчастим настилом з відстанню між планками $25 \div 30$ мм.

Ураження електричним струмом може відбутися в разі дотику до металевих частин обладнання, які через неякісну ізоляцію електропроводки або ненадійне заземлення можуть опинитися під напругою.

У сухих приміщеннях небезпечним для людини вважається напруга вище 36 В. Смертельною є сила струму 0,1 А, а струм 0,05 А викликає судомне скорочення м'язів, що не дозволяє людині відірватися від джерела вражаючої напруги.

Для попередження ураження працівників електричним струмом необхідно передбачити надійне заземлення всіх частин обладнання, які можуть виявитися під напругою, здійснити якісну ізоляцію з'єднаних проводів і захистити всі доступні для дотику струмопровідні частини обладнання.

У разі перерви в подачі електричного струму або виходу з ладу однієї фази всі споживачі електричного струму і електродвигуни повинні бути негайно вимкненими.

При загорянні проводів або електроприладів слід негайно їх знеструмити і гасити сухим вуглекислотним вогнегасником і покривалом з азбесту. Застосовувати воду забороняється.

Іскри статичної електрики, що виникають при терті, дробленні, перемішуванні порошків, при переливанні рідин, можуть бути джерелом пожежі і вибуху. Для відведення статичної електрики всі металеві частини апаратів повинні бути заземленими.

При ураженні електричним струмом необхідно вимкнути прилад або відірвати провід від людини неструмопровідним предметом (палицею), перевірити пульс потерпілого і приступити в разі потреби до штучного дихання, повідомити про те, що трапилося, у медпункт.

При отриманні травми на виробництві потерпілому має бути негайно надана медична допомога. Перша допомога, що надається на виробництві, полягає в зупинці кровотечі, перев'язці рани або опіку, звільненні потерпілого від дії електричного струму, проведенні штучного дихання та ін. В аптечці першої допомоги на кожній ділянці або в кожній бригаді повинні бути йод, бинти, нашатирний спирт, марганцево-кислий калій, жгут і ін.

При запаленні слизової оболонки очей слід накласти на очі пов'язку (вату), змочену в холодній воді або в 2-відсотковому розчині борної кислоти і перевести постраждалого в темне приміщення.

Перша допомога при опіках полягає в змазуванні обпеченої ділянки спиртом або розчином марганцево-кислого калію з наступним накладенням пов'язки з будь-яким несолоним жиром.

При важких опіках одяг і взуття потрібно знімати обережно, краще їх розрізати; після накладення пов'язки потерпілого необхідно відправити до лікарні.

При отруєнні отрутними газами перша допомога полягає у видаленні постраждалого з загазованого приміщення. При отруєнні отрутними газами з'являється головний біль, запаморочення, нудота, блювота, втрачається свідомість. У цих випадках потерпілого укладають на свіжому повітрі, розстібають одяг, дають нюхати нашатирний спирт, розтирають шкіру, дають подихати киснем і за необхідності роблять штучне дихання. При отруєнні свинцем і його сполуками в роті з'являється присмак металу, язик набуває білуватого кольору. При отруєнні свинцем промивають шлунок 1-відсотковим розчином англійської або глауберової солі.

При обробці пластмас і деревини виникає можливість появи пожежі або вибуху, яка визначається як чинниками присутності легкозаймистих матеріалів (стружки, тирси, лаків, фарб та ін.), так і недотриманням норм пожежної безпеки (несвоєчасне прибирання відходів, несправність в роботі витяжної вентиляції, несправності у роботі електрообладнання та ін.).

Для попередження виникнення пожеж забороняється курити на робочих місцях, користуватися відкритим вогнем або виконувати операції, які можуть викликати появу іскор.

При видаленні стружки і тирси необхідно особливо ретельно змитати (або видаляти пилососом) їх з елементів електрообладнання. Забороняється сушити спецодяг, лісоматеріали та інші горючі предмети на приладах опалення, виробничих та опалювальних печах. Робочі місця, де є підвищена небезпека виникнення пожежі, мають бути забезпечені вогнегасниками, ящиками з піском і ємностями з водою.

Обтиральні матеріали, ганчірки і т.п., що були у вжитку, просочені горючими речовинами, необхідно складати в спеціальні металеві ящики з кришками. Мастильні матеріали, горючі рідини, хімікати повинні зберігатися в спеціальних ізольованих приміщеннях або металевих ящиках і шафах.

Дотримання вимог охорони праці є обов'язком кожного працівника. Таким чином, раціональна організація робочих місць, введення передової технології, дотримання правил трудового розпорядку, дотримання правил охорони праці, виробничої санітарії і протипожежної безпеки дозволять добитися на підприємствах роботи без травматизму.

3.2. Охорона праці при хімічній та гальванічній обробці матеріалів

Основні процеси хімічної та електрохімічної обробки здійснюються у ваннах, заповнених різними розчинами кислот, лугів, солей і їх сумішами. Технологічний процес супроводжується виділеннями в повітряне середовище аерозолів сірчаної та соляної кислот, їдких лугів, оксиду азоту, парів азотної і соляної кислот, ціаністого водню та інших шкідливих речовин. Такі операції, як шліфування, полірування, гідропіскоструминна і дробоструминна обробка, галтування, гарцування, супроводжуються виділенням пилу.

Нормалізація повітряного середовища в цехах гальванопокриттів може бути досягнута шляхом використання технологічних заходів і раціонального застосування вентиляції. Так, укриття поверхонь розчинів у ваннах пластмасовими кульками або піною дозволяє істотно знизити виділення шкідливих речовин з поверхні розчинів і скоротити витрату вентиляційного повітря.

Висока токсичність шкідливих речовин, що виділяються, викликає необхідність створення пристроїв місцевої витяжної вентиляції від більшості ванн травлення і гальванопокриття.

Найбільш широке застосування в сучасних цехах знаходять місцеві витяжні пристрої типу бортових відсмоктувачів. При ширині ванн більше 1,2 м слід застосовувати відсмоктувачі, активовані припливними струменями. При цьому підвищується ефективність відсмоктування і потрібні значно менші витрати повітря. Рекомендовані швидкості всмоктування повітря наведено в табл. 3.1.

Для уловлювання шкідливих речовин, що виділяються з поверхні оброблюваних деталей при вийманні їх з ванни,

застосовуються відсмоктувальні панелі, встановлені на рівні, на якому підвішено вийняті з ванни деталі.

Таблиця 3.1

Рекомендовані швидкості всмоктування повітря

Виконувана операція	Шкідливі виділення	Швидкість всмоктування, м/с
<i>Термічна обробка</i>		
Загартування і відпускання в масляній ванні	Пари мастила і продукти його розкладання	0,3
Загартування в селітровій ванні при температурі 400÷700 °С	Аерозоль селітри, тепло	0,3
Загартування в соляній ванні при температурі 350÷1100 °С	Аерозоль солі, тепло	0,5
Свинцювання при 400 °С	Пари та аерозоль свинцю	1,5
Цианування в солях при 800÷900 °С	Пари та аерозоль свинцю	1,5
<i>Гальванічна обробка металів</i>		
Кадміювання ціаністе або сріблення, міднення ціаністе	Пари синильної кислоти	1,5
Знежирення:		
- бензином	Пари бензину	0,5
- хлорованими вуглеводнями	Пари вуглеводнів	0,7
- електродітичне	Аерозолі лугів	0,5
Травлення:		
- азотною кислотою	Пари азотної кислоти	1,0
- соляною кислотою	Пари хлористого водню	0,7
Хромування	Аерозолі ангідриду хромової кислоти	1,5
Цинкування ціаністе	Пари синильної кислоти	1,5
<i>Інші операції</i>		
Піскоструминне очищення	Силікатний пил	1,5
Металізація напиленням	Аерозолі металів	1,5
Паяння свинцем	Пари та аерозолі свинцю	0,5÷0,7
Операції з особливо токсичними речовинами	Берилій, телур, радіоактивні речовини	2÷3
Розфасування сипких матеріалів, змішування	Пил	0,5÷1,2

При великих габаритних розмірах оброблюваних предметів, коли ванни обслуговуються мостовими кранами, видалення парів, що виділяються, біля місць їх утворення стає складним. У цьому випадку застосовують загальнообмінну вентиляцію з видаленням забрудненого повітря з верхньої зони даховими вентиляторами.

При припливно-витяжній вентиляції обсяг припливного повітря має бути менше витяжки з ванного відділення на 5 %, якщо воно примикає до приміщень, які не мають виділень шкідливих речовин, і сполучається з ними дверима або іншими прорізами. У разі, коли ця кількість повітря в суміжному приміщенні більше, ніж одноразовий повітрообмін, необхідно передбачати примусову подачу повітря в суміжне приміщення з розрахунку компенсації 5 % розрахункового повітрообміну в гальванічному або травильному відділенні.

Приготування розчинів для травлення поверхні металів і полімерів пов'язано з використанням їдких речовин, тому працівники зобов'язані користуватися запобіжними окулярами, гумовими рукавичками, чоботами і прогумованими фартухами.

При приготуванні розчинів сірчаної кислоти необхідно доливати кислоту до води тонким струменем при безперервному перемішуванні, щоб не було місцевого перегріву і викиду кислоти.

При ураженні слизових оболонок або шкіри кислотами рекомендується промивання водою і 2÷3-відсотковим розчином питної соди, при ураженні лугами – рясне промивання водою і 1÷2-відсотковим розчином борної кислоти.

Підготовку металевого натрію для натрійнафталінового комплексу з метою уникнення опіку слід проводити в порцеляновій ступці під шаром гасу ножем з кольорового металу. У разі потрапляння металевого натрію на шкіру слід промити уражене місце великою кількістю води, обробити 5-відсотковим розчином борної кислоти і змастити маззю від опіків.

Працівники, які використовують кислоти, луги, купоросне мастило, каустичну соду та інші аналогічні рідини, щоб уникнути опіків очей і тіла, повинні працювати в запобіжних окулярах, рукавицях і відповідному спеціальному одязі.

При роботі з леткими розчинниками надягають респіратори (РПГ-67, РУ-60М, «Пелюсток», «Сніжок»), а при роботі з токсичними речовинами – протигази (ЗПС-80, ЗП2-60, ЗН4-72, ЗН8-72 та ін.), спецодяг та взуття. Захист шкірного покриву здійснюється нанесенням на шкіру захисних паст і кремів.

Всі працівники повинні знати склади, з якими їм доводиться контактувати, а також ознаки ураження хімічними речовинами, дії і порядок застосування різних протиотрут, правила надання першої допомоги.

3.3. Охорона праці при зварюванні та паянні матеріалів

До електрозварювальних і наплавних робіт допускаються особи не молодше 18 років, що пройшли медичний огляд і спеціальне навчання, мають посвідчення на право виконання зазначених робіт і групу з електробезпеки не нижче другої.

Всі зварники, що виконують дугове і газове зварювання, повинні щорічно проходити перевірку знань на своїх підприємствах з продовженням терміну дії посвідчення на право виконання зварювальних робіт.

Дугове зварювання. Правильне і раціональне розміщення робочого місця зварника має велике значення в підвищенні безпеки зварювальних робіт, продуктивності праці і якості зварювання. З метою захисту зварників, підсобних і допоміжних працівників від променевої енергії палаючих поблизу зварювальних дуг у постійних місцях зварювання для кожного зварника влаштовують окремі кабінки площею [2×2 або 2×3] м (без урахування площі, зайнятої обладнанням) і висотою 1,8÷2 м. Для поліпшення вентиляції стіни кабінки не доводять до підлоги на 15÷20 см. Матеріалом стін кабінки може служити тонке залізо, фанера, брезент, покриття вогнестійким складом або інші вогнестійкі матеріали. Дверний отвір, як правило, закривається брезентовою завісою на кільцях. Стіни фарбують у світлі матові тони.

При ручному дуговому зварюванні в кабінці зварника встановлюють зварювальний стіл або кондуктор, настінну полицю для дрібного інструменту і пристосувань, стілець зі

спинкою та інше обладнання. Кабіна обладнується місцевою вентиляцією.

Для оберігання очей і обличчя зварника від шкідливого впливу дуги необхідно використовувати щитки або маски зі спеціальними світлофільтрами залежно від сили зварювального струму: Е-1 при силі струму до 75 А, Е-2 при 75÷200 А, Е-3 – 200÷400А, а також ЕС-100, ЕС-300, ЕС-500.

З метою унеможливлення потрапляння під напругу при заміні електродів зварник зобов'язаний користуватися сухими брезентовими рукавичками, які одночасно захищають його руки від розплавленого металу і променевої енергії дуги.

Велике значення для безпеки зварника має перевірка правильності проведення проводів до зварювальних постів і обладнання. Прокладання проводів до зварювальних машин по підлозі або землі, а також іншим способом, при якому проводи не захищені ізоляцією і доступні для дотику, не дозволяється. Струм від зварювальних агрегатів до місця зварювання передається гнучкими ізольованими проводами, найчастіше марки ПРГД.

Перед початком робіт електрозварник зобов'язаний надіти спеціальний одяг – брезентовий костюм, черевики і головний убір.

При зварюванні і наплавленні деталей під флюсом режим роботи повинен бути таким, щоб зварювальна дуга була повністю закрита шаром флюсу. Вилучають флюс флюсовідсмоктувачами, совками і шкребками. Зварювальну дугу при вібродуговому наплавленні і зварюванні закривають спеціальними пристроями, у яких має бути передбачено оглядове вікно зі світлофільтром потрібної щільності.

Газове зварювання. При виконанні газового зварювання дотримуються тих самих правил безпеки, що і при дуговому. Однак при газовому зварюванні необхідно стежити, щоб в радіусі 5 м від робочого місця були відсутні горючі матеріали. Зварювання ємностей дозволяється виконувати лише при видаленні з них слідів легкозаймистих речовин і при відкритих люках і пробках.

У місцях зберігання і розкриття барабанів з карбідом кальцію заборонено курити і застосовувати інструмент, що дає при ударі іскри. Барабани з карбідом зберігають у сухих

прохолодних приміщеннях. Розтин барабана дозволяється тільки латунним ножом.

Ацетилен при зіткненні з міддю утворює вибухові речовини, тому застосовувати мідні інструменти при розтині карбіду і мідні припої при ремонті ацетиленової апаратури не можна. Ацетиленові генератори розташовують на відстані не менше 10 м від відкритого вогню.

Балони з газами зберігають і транспортують тільки з накрученими на їхні горловини запобіжними ковпаками і заглушками на бічних штуцерах вентилів. При транспортуванні балонів не допускаються поштовхи і удари. Переносити балони на руках забороняється. До місця зварювальних робіт балони доставляють на спеціальних візках або носилках.

Балони з газом встановлюють у приміщенні не ближче ніж на 1 м від радіаторів опалення та не ближче ніж на 10 м від пальників та інших джерел тепла з відкритим вогнем. Заборонено зберігати балони з киснем в одному приміщенні з балонами горючого газу, з барабанами карбіду кальцію, лаками, мастилами і фарбами. При виявленні на балоні або вентилі слідів жиру або мастила балон негайно повертають на склад. Сусідство мастила і кисню може призвести до вибуху.

З метою безпеки під час експлуатації кисневі балони фарбують у синій колір, ацетиленові – у білий, а балони з пропан-бутановою сумішшю – у червоний.

При газовому зварюванні і різанні металів зварювальне полум'я шкідливо діє на сітчасту і судинну оболонку очей. Небезпеку для очей представляють також бризки розплавленого металу і шлаку. Тому газозварники повинні працювати в захисних окулярах зі спеціальними світлофільтрами, що обираються залежно від потужності зварювального полум'я. Для підсобних працівників рекомендуються окуляри зі світлофільтрами марки Г-1, для газозварників і газорізальників, які працюють з апаратурою середньої потужності, – світлофільтри Г-2, а при роботі з більш потужною апаратурою – світлофільтри Г-3. Окуляри повинні щільно прилягати до обличчя. Від бризків розплавленого металу та іскор світлофільтр рекомендується захищати простим змінним склом. При

зварюванні кольорових металів, латуні і свинцю його необхідно вести в респіраторах.

Щоб уникнути опіків від бризків розплавленого металу штани необхідно носити навипуск, куртку – застібати на всі гудзики. Для зварювальних робіт використовуються костюми з брезентової парусини з комбінованим просоченням. Працювати можна тільки в цілому, сухому, непромасленому спецодязі. Кишені куртки закривають клапанами, кінці рукавів зав'язують шнурками. Після роботи спецодяг необхідно просушувати.

Після закінчення роботи воду з генераторів і водяних затворів слід зливати. Після закінчення роботи необхідно повністю розрядити генератор, вийняти завантажувальний пристрій, злити з промивача мул, всі частини апарата ретельно промити водою і очистити від нальотів вапна. Очищення від мулу можна робити тільки латунними скребками.

Не рідше одного разу на місяць генератори і водяні затвори розбирають для капітальної очищення.

Карбід кальцію необхідно зберігати в сухих, добре провітрюваних приміщеннях. Склади мають бути забезпечені вогнегасниками та ящиками з піском. Барабани з карбідом кальцію дозволяється зберігати як у горизонтальному, так і у вертикальному положеннях. Розкривати барабани слід латунним зубилом і дерев'яним молотком або спеціальним ножом.

Під час роботи шланги необхідно оберігати від дотику зі струмопровідними проводами, нагрітими предметами, мастильними та жировими матеріалами, від потрапляння на них іскор і бризків розплавленого металу. Шланги, прокладені в проходах і проїздах, необхідно підвішувати або захищати спеціальними коробами. У разі загоряння шланга його слід швидко перегнути біля палаючого місця з боку редуктора або генератора, закрити вентиль редуктора або кран на газопідвідній трубці водяного затвора.

Перед запалюванням пальника і різака необхідно перевірити щільність з'єднань і незасміченість сопла наконечника. При запаленні спочатку відкривають кисневий вентиль на пальнику або різаку, а потім – ацетиленовий; при гасінні – навпаки. Поблизу робочого місця необхідно мати відро з чистою водою

для охолодження мундштуків пальника або різака, що перегріваються.

При зворотному ударі полум'я необхідно негайно перекрити ацетиленовий вентиль пальника або різака, а потім кисневий. Після кожного зворотного удару пальник або різак необхідно охолодити в чистій холодній воді, а вихідні канали мундштуків і наконечників прочистити латунними і дерев'яними голками. У разі несправності кисневого або ацетиленового вентиля пальник або різак слід здати в ремонт.

При виконанні газозварювальних робіт необхідно дотримуватися правил пожежної безпеки. Відповідальність за забезпечення заходів пожежної безпеки при проведенні вогневих робіт несе начальник цеху, ділянки, завідувач майстерні або лабораторії, де будуть проводитися вогневі роботи. Допускати до проведення вогневих робіт осіб, які не пройшли технічному за правилами пожежної безпеки, забороняється.

Газозварники і газорізьальники повинні мати спеціальні кваліфікаційні посвідчення на право допуску їх до виконання вогневих робіт.

Місце проведення вогневих робіт необхідно забезпечити засобами пожежогасіння – ящиками з піском, вогнегасниками, лопатами, відрами та ін. Всі працівники, зайняті на вогневих роботах, повинні вміти користуватися первинними засобами пожежогасіння. У приміщеннях газополум'яної обробки металів забороняється зберігання легкозаймистих і горючих матеріалів.

При проведенні паяльних робіт на працівників можуть впливати шкідливі і небезпечні чинники, до яких належать: підвищена запиленість і загазованість повітря робочої зони; ультрафіолетове, видиме та інфрачервоне випромінювання джерела нагріву і нагрітої деталі; електромагнітні поля, іонізуючі випромінювання, шум, ультразвук.

При паянні, напиленні, виплавленні припоїв у навколишнє повітря можуть надходити аерозолі, що містять у складі твердої фази окисні різних металів (марганцю, хрому, нікелю, міді, титану, алюмінію, заліза) та інші сполуки, а також токсичні гази (окисень вуглецю, озон, фтористі, хлористі, бромисті сполуки, окисні азоту та ін.). У складі аерозолів можуть бути складові флюсів і припоїв, що містять свинець, кадмій, цинк, олово,

вуглеводні. Вплив на організм шкідливих речовин, що виділяються, може стати причиною захворювань і отруєнь.

Для зниження концентрації шкідливих речовин на робочих місцях паяльників необхідно застосовувати місцеві відсмоктувачі.

Спецодяг, спецвзуття, засоби індивідуального захисту органів дихання, очей і голови повинні видаватися працівникам відповідно до умов виконуваної роботи і типових норм. Для захисту шкіри рук від впливу сенсibilізуючих речовин, що входять до складу флюсів, необхідно застосовувати захисні мазі і пасти, казеїнову пасту і біологічні рукавички. З метою пожежотехнічної безпеки концентрація легкозаймистих і горючих речовин не повинна перевищувати 50 % нижньої межі вибуховості.

3.4. Охорона праці при обробці матеріалів тиском і пресуванням

Повітря робочої зони цехів обробки металів тиском характеризується відхиленнями від складу, найбільш сприятливого для дихання людини, оскільки технологічні процеси, що проводяться в них, супроводжуються виділенням у повітря шкідливих речовин: пил окиснів (при прокатці), гази – продукти згоряння мастила і неповного згоряння палива в нагрівальних печах (при прокатці, куванні, штампуванні). Внаслідок видалення окалини, проведення розділових і формувальних операцій спостерігається поява в повітрі дрібних металевих частинок. Гази утворюють з повітрям суміші, а тверді частинки – аерозолі.

У виробництві працівники знаходяться поруч з нагрівальними пристроями, нагрітими до високих температур заготовками і штампами, зазнаючи теплового опромінення від цих джерел. При прокатці можливі опіки і пошкодження відлітаючою окалиною і дрібними частинками металу.

Тенденція збільшення продуктивності, зростання потужностей і швидкодійності сучасного технологічного обладнання супроводжується небажаним побічним ефектом – посиленням вібрацій, а машини обробки металів тиском і без цього належать до віброактивних.

У цехах є також чинники, що викликають шуми механічного походження, – це ударні процеси формування. У свою чергу випуск пари або стисненого повітря з циліндрів молотів можна розглядати як аеродинамічні джерела шуму.

Одним з найнебезпечніших виробничих чинників обробки тиском є можливе захоплення рук і одягу рухомими частинами машин. На виробництві насамперед необхідно забезпечити електробезпеку. Заземлення машин перевіряється дуже часто, оскільки воно може бути порушено у зв'язку з вібраціями. Широке застосування маніпуляторів, механічних рук гостро поставило питання ретельної ізоляції струмопровідних комунікацій шляхом встановлення огорож, а також розміщення їх на відповідній висоті.

Однією з основних умов здорової і продуктивної праці є створення системи вентиляції, спрямованої на забезпечення чистоти повітря в робочій зоні приміщень. Найбільш ефективним способом захисту від теплоти в цехах є екранування і водяні завіси біля робочих вікон нагрівальних пристроїв.

При переробці пластмас методом лиття під тиском, методом екструзії і методом пресування, крім шкідливих впливів, характерних для обробки металів, додаються додаткові чинники: частинки пилу пластмасового виробництва, окиснюючись, можуть розігріватися до температури займання, що може призвести до самозаймання, а також вибуху пилу; виділення особливо токсичних речовин (хлоровані вуглеводні, сполуки свинцю, феноли, формальдегід, окисень вуглецю), що викликають важкі отруєння і зміни в нервовій системі, крові, судинах і печінці; накопичення статичних зарядів як на металевих частинах обладнання, так і на поверхнях перероблюваних пластмас, що призводить до появи іскрових розрядів, що є джерелами займання горючих речовин, пожеж, вибухів.

У загальному випадку при обробці матеріалів тиском і пресуванням небезпечні і шкідливі чинники можна поділити:

- на механічні, що характеризуються кінетичною і потенційною енергією і механічним впливом на людину: кінетична енергія рухомих і обертових елементів, потенційна енергія тіл (у тому числі людей, що знаходяться на висоті), шуми

(інфразвук, ультразвук), вібрації (загальні і локальні), статичне навантаження, домішки нетоксичного пилу в повітрі та ін.;

- термічні, що характеризуються тепловою енергією та аномальною температурою: температура нагрітих і охолоджених предметів і поверхонь, температура відкритого вогню, а також пожежі, хімічні реакції, вологість повітря, його рухливість і ін.;

- електричні (електричний струм, електростатична електрика, іонізуючі випромінювання, іонізація повітря та ін.);

- електромагнітні (включаючи весь спектр випромінювання);

- хімічні: їдкі, отрутні, вогне- та вибухонебезпечні речовини, порушення газового складу повітря та ін.;

- психофізіологічні: втома, стрес, незручність робочого місця.

Всі ці чинники можуть призвести до аварії, пожежі, вибуху, травматизму, загального і професійного захворювання, нервово-психічних і фізичних навантажень. У ливарних цехах з метою боротьби з запиленістю, газо- і пароутворенням всі їх джерела ізолюються і забезпечуються місцевою витяжною вентиляцією. Влаштується також механічна загальнообмінна припливно-витяжна або припливна вентиляція, поєднана з природною аерацією через ліхтарі та віконні прорізи цехів. Поблизу плавильних печей монтуються індивідуальні витяжні парасолі.

Прогресивним заходом щодо поліпшення умов праці є створення спеціальних тунелів, у яких забезпечуються вільні проходи; встановлюються конвеєри і здійснюється припливно-витяжна вентиляція. Для зменшення впливу на працівників теплоти в ливарних цехах широко застосовуються установки повітряного душування робочих місць, а також місцевої витяжної вентиляції.

Використовуються різні теплоізоляційні пристрої плавильних печей і металевих форм.

З метою зниження шуму і вібрацій у ливарному виробництві пневматичні машини замінюють гідравлічними; вихлопні клапани машин виводять за межі виробничих приміщень; влаштовують віброізолюючі фундаменти і прокладки; застосовують спеціальні глушники та амортизатори. У необхідних випадках використовують засоби індивідуального захисту.

Існує кілька методів боротьби з вібраціями: заміна кулачкових і кривошипних механізмів рівномірно обертальними, а також механізмами з гідроприводом; переведення процесів кування і штампування з молотів і кривошипних пресів на гідравлічні преси. Для забезпечення динамічного гасіння вібрацій обладнання ковальсько-пресових цехів встановлюється на фундаментах з амортизаторами підвісного типу або у вигляді еластичних опор. Це сприяє захисту навколишніх будинків від вібрацій, підвищує точність обробки на металорізальному обладнанні.

Проводяться заходи щодо боротьби з шумом: установлення більш спокійного, неударного обладнання; заміна зворотно-поступального руху механізмів обертальним; застосування металополімерних зубчастих передач та ін. Чітко встановлюється небезпечна зона в просторі навколо рухомих елементів.

Рішення важливого завдання сучасного машинобудування з проведення комплексної механізації і автоматизації виробництва призводить до введення дистанційного керування обладнанням – як одиничним, так і в роботизованих комплексах. Таким чином, з'явилася можливість виведення оператора з небезпечної зони.

У цехах обробки металів тиском з метою створення нормальних метеорологічних умов забезпечується інтенсивна аерація будівель. Гази, що відходять, як і в металургійних цехах, очищаються різними методами. Вода в цих цехах широко використовується для гідрознепилення, охолодження різних вузлів машин і теплоізоляції нагрівальних печей. Отже, обов'язково створюються водоочисні споруди. Крім того, можуть застосовуватися різні охолоджувальні емульсії, наприклад для станів холодної прокатки тонких листів. Для емульсій влаштовують спеціальну каналізаційну систему з відповідними очисними пристроями.

Основні заходи захисту від ураження електричним струмом при проведенні робіт у ливарних цехах: струмопровідні частини до обладнання повинні бути недоступними для випадкового дотику, що досягається їх ізоляцією, розміщенням на недоступних висотах і установленням огорожень; усунення можливості ураження при появі напруги на корпусах устаткування, для чого забезпечується подвійна ізоляція або

встановлюється електрозахист; організація безпечної експлуатації обладнання та інструменту. Про помічені несправності в обладнанні, інструменті і електропроводці слід негайно повідомити фахівцям.

Крім загальнотехнічних і організаційних заходів з техніки безпеки застосовують також індивідуальні засоби захисту, особливо при обробці пластмас тиском і пресуванням.

3.5. Охорона праці при склеюванні та фарбуванні

При роботі з клеями слід дотримуватися максимальної обережності; неакуратність, неуважність, недостатнє знайомство з приладами, апаратами і властивостями речовин, з якими ведуться роботи, можуть стати причиною нещасного випадку.

На робочому місці дозволяється виконувати тільки ту роботу, яка доручена і роз'яснена. Забороняється відволікатися сторонніми справами, приймати їжу, пити воду, курити, використовувати хімічний посуд як харчовий. Категорично забороняється пробувати на смак і нюхати хімічні реактиви. Це викликано тим, що застосовувані для клеїв компоненти токсичні, вибухо- і пожежонебезпечні.

Токсичність клеїв на основі фенолформальдегідних олігомерів визначається концентрацією вільного фенолу і парів формальдегіду, які виділяються в повітря при нанесенні і затвердінні клейової композиції і подразнюють слизові оболонки очей і шкіри.

При контакті з рідкими епоксидними смолами можливе виникнення дерматиту (почервоніння шкірних покривів, свербіж), який проходить після припинення контакту зі смолою.

Крім того, при нагріванні епоксидних смол з них виділяються епіхлоргідрин і толуол, які мають шкідливий вплив на нервову систему і печінку. Ще більшу небезпеку для здоров'я представляють отверджувачі, що застосовуються для епоксидних клеїв. Ангідриди дикарбонових кислот (малеїновий, фталевий та ін.) викликають подразнення слизових оболонок верхніх дихальних шляхів і очей (сльозотеча, почервоніння, набряк, гнійне запалення). При контакті з ними на шкірі спостерігається

почервоніння і утворення пухирів, що нагадують опік. Найменшу токсичність з них має метилтетрагідрофталевий ангідрид.

Небезпека впливу отверджувачів амінного типу полягає в їх високій токсичності, гранично допустимі концентрації (ГДК) для них складають $1\div 2$ мг/м³. Поліетиленполіамін, етилендіамін, гексаметилендіамін та інші аміни викликають зміни в центральній нервовій системі, легенях і печінці. При потраплянні на шкіру з'являється подразнення, аж до утворення виразкового дерматиту, а на слизових оболонках подразнення супроводжується гнійним запаленням.

Дуже велику токсичність мають поліуретанові клеї, основу яких складає толуїлендіізоціанат (продукт 102-Т). Робота з цією речовиною вимагає особливої уваги. При випадковому потраплянні її на шкіру необхідно протерти це місце ватним тампоном, змоченим етилцелозольвом або спиртом, після цього шкіру промивають водою з милом.

Застосування для видалення продукту 102-Т інших органічних розчинників (ацетону, етилацетату) небажано, вони самі становлять небезпеку, оскільки проникають через шкіру в кров. Для видалення пролитого продукту 102-Т з підлоги його засипають тирсою або піском для всмоктування, після їх видалення підлогу промивають розчином аміаку і гарячою водою з милом.

Для деяких клеїв (марок ЛН, ТМ-60, ПММ) у якості розчинника застосовується дихлоретан. Це отруйна рідина з характерним солодкуватим запахом. Має наркотичну дію і викликає зміни в печінці, нирках та інших органах, всмоктується через шкіру.

Поліефірні клеї зазвичай містять легкі мономери: стирол, метилметакрилат та інші, які беруть участь у процесі сополімеризації. Ці мономери пожежонебезпечні і дуже токсичні, вони подразнюють слизові оболонки очей і верхніх дихальних шляхів. Особливу обережність слід проявляти при роботі з ініціаторами: вони можуть вибухнути в результаті нагрівання або удару, не можна також змішувати ініціатор і прискорювач. Спочатку слід змішати ініціатор зі смолою, а потім додати прискорювач; або ініціатор змішати з однією порцією смоли, а прискорювач – з іншою, і потім обидві порції перемішати разом.

Зберігати перекиси слід без доступу повітря, оберігаючи від прямого сонячного опромінення і нагрівання.

Всі роботи з речовинами, що мають високу токсичність, слід проводити в спеціально обладнаних приміщеннях при працюючій витяжній вентиляції, швидкість руху повітря біля відкритих створок витяжних шаф і місцевих відсмоктувачів має бути не менше 0,7 м/с. У разі непередбаченого вимкнення вентиляційної установки роботу слід по можливості припинити, надіти перевірений індивідуальний протигаз і повідомити майстру чи начальнику зміни. Всі роботи зі шкідливими речовинами слід проводити в застебнутому халаті, користуватися гумовими рукавичками і прогумованим фартухом, у ряді випадків надягати захисні окуляри або маски.

Для виконання операцій, що супроводжуються утворенням пилу в повітрі (введення порошкоподібних наповнювачів і затверджувачів, піскоструминна обробка), працівник повинен, крім того, користуватися ще й протипиловим респіратором і надягати на голову шапочку або косинку.

Органічні розчинники, що застосовуються для клеїв, крім токсичності ще легко спалахують і утворюють з повітрям вибухонебезпечні суміші. Пожежа і вибух можуть статися при знежирюванні деталей легкозаймистими рідинами – ЛЗР (бензин, ацетон, спирт), при приготуванні клеїв, натрійнафталінового комплексу і при підготовці наповнювача – алюмінієвою пудрою.

Працівники, які безпосередньо стикаються з клейовою композицією, повинні бути ознайомлені з пожежонебезпекою і отрутістю компонентів, що входять до складу клею.

Самозаймання ЛЗР може відбуватися не тільки після нагрівання їх до певної температури у відкритому посуді, але і в разі, якщо ці рідини потраплять на гарячі поверхні. Тому для запобігання пожежі та вибуху забороняється зберігати і використовувати в роботі ЛЗР поблизу вогню і нагрівальних приладів. Зберігати і розливати ЛЗР слід в ізольованих приміщеннях, обладнаних припливно-витяжною вентиляцією у вибухобезпечному виконанні.

У разі займання горючої рідини необхідно вимкнути нагрівальні прилади і вентиляцію, керуючись протипожежною інструкцією, приступити до гасіння пожежі. Підходи до

протипожежного інвентарю: ящиків з піском, водопровідних кранів, вогнегасників, азбестової ковдри і електрощитів – повинні бути завжди вільними.

Необхідно пам'ятати, що підготовка поверхні склеюваних полімерних матеріалів зазвичай пов'язана з їх зашкурюванням, тому гранично допустима концентрація (мг/м³) пилу різних пластмас у повітрі робочої зони приміщення не повинна перевищувати: для поліетилену, поліпропілену і фторопласту – 10, для полівінілхлориду, амінопластів і фенопласту – 6, для склопластиків – 4. Це викликано тим, що при тривалому впливі на органи дихання пилу різних полімерних матеріалів спостерігається ураження бронхів, легенів, виникнення хвороби печінки, нирок, змін в нервовій системі. Прибирання запилених ділянок і устаткування повинно проводитися за допомогою промислових пилососів або вологим способом не рідше одного разу в зміну.

Всі працівники, які виконують лакофарбові роботи (маляри, шпаклювальники та ін.), повинні періодично проходити медичний огляд. Особи, які не пройшли огляд, підлітки до 18 років, вагітні жінки і матері-годувальниці до робіт з лакофарбовими рідинами не допускаються.

При нанесенні лакофарбових покриттів за допомогою фарбопультів, пістолетів-розпилювачів працівники повинні користуватися окулярами і респіраторами РМП-62. Забороняється фарбувати деталі розпилюванням і готувати лакофарбові склади в загальних виробничих приміщеннях.

Транспортування лакофарбових матеріалів, ацетону та інших розчинників має проводитися в герметично закритій тарі. Переносити розчинники та легкозаймісті речовини у відкритій або скляній тарі забороняється.

При підготовці поверхонь під нанесення лаків і фарб способами, при яких виділяється велика кількість пилу, застосовують окуляри і протипилові респіратори Ф-62Ш, У-2К або РУ-60М.

Особливих запобіжних заходів слід вживати при дотику з етиловим бензином, який містить тетраетилсвинець і є отруйним. Забруднені етилованим бензином цементно-бетонні і асфальтобетонні покриття знезаражують кашицею хлорного

вапна, змиваною водою через 15÷20 хв після нанесення на забруднені місця. Для дерев'яних підлог таку операцію здійснюють двічі.

Знезаражувати етилований бензин сухим хлорним вапном забороняється. Забруднені етилованим бензином обтиральні матеріали, ганчір'я і тирсу збирають у металеву тару з щільними кришками, а потім спалюють з вживанням певних запобіжних заходів.

Етиловий бензин не можна використовувати для освітлення, а також для паяльних ламп, бензорізів, для чищення одягу, промивання деталей та інших цілей.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Алаи, С.И. Технология конструкционных материалов [Текст]: учебник / С.И. Алаи, П.М. Григорьев, А.Н. Ростовцев; под общ. ред. А.Н. Ростовцева. – М.: Просвещение, 1986. – 302 с.
2. Алов, А.А. Основы теории процессов сварки и пайки [Текст] / А.А. Алов. – М.: Машиностроение, 1984. – 272 с.
3. Алферов, Ж.И. Наноматериалы и нанотехнологии [Текст] / Ж.И. Алферов, П.С. Копьев, Р.А. Сурис и др. // Нано- и микросистемная техника. – 2003. – №8. – С. 3-13.
4. Андриевский, Р.А. Наноструктурные материалы [Текст]: учеб. пособие / Р.А. Андриевский, А.В. Рагуля. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 117 с.
5. Аппен, А.А. Температуроустойчивые неорганические покрытия [Текст] / А.А. Аппен. – Л.: Наука, 1967. – 297 с.
6. Арзамасов, Б.Н. Конструкционные материалы [Текст]: справочник / Б.Н. Арзамасов. – М.: Машиностроение, 1990. – 688 с.
7. Бартл, Д. Технология химической и электрохимической обработки поверхностей [Текст] / Д. Бартл, О. Мудрох. – М.: Машиностроение, 1991. – 712 с.
8. Белая книга по нанотехнологиям: Исследования в области наночастиц, наноструктур и нанокompозитов в Российской Федерации [Текст]. – М.: Издательство ЛКИ, 2008. – 344 с.
9. Берштейн, М.Л. Термомеханическая обработка металлов и сплавов [Текст] / М.Л. Берштейн. – М.: Metallургия, 1968. – Т. 1, 2.
10. Валиев, Р.З. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией [Текст] / Р.З. Валиев, И.В. Александров. – М.: Логос, 2000. – 272 с.
11. Вегманн, Х. Плазменная резка как эффективный процесс обработки [Текст] / Х. Вегманн, М. Холтхаус, Ф.Й. Гестхуйзен // Мир техники и технологий. – 2010. – №10 (107). – С. 26-29.
12. Власов, А.Ф. Безопасность при работе на металлорежущих станках [Текст] / А.Ф. Власов. – М.: Машиностроение, 1987. – 121 с.

13. Высокотемпературные материалы и покрытия для газовых турбин [Текст] / Н.В. Абраимов. – М.: Машиностроение, 1993. – 336 с.

14. Гецов, Л.Б. Сопротивление усталости жаропрочных сплавов с покрытиями [Текст] / Л.Б. Гецов, А.И. Рыбников, И.С. Малашенко и др. // Проблемы прочности. – 1990. – № 5. – С. 51-56.

15. Головин, Ю.И. Введение в нанотехнологию [Текст] / Ю.И. Головин. – М.: Изд-во «Машиностроение-1», 2003. – 112 с.

16. Григорьянц, А.Г. Методы поверхностной лазерной обработки [Текст] / А.Г. Григорьянц, А.И. Сафонов. – М.: Высш. шк., 1987. – 191 с.

17. Грилихес, С.Я. Обезжиривание, травление и пассивирование металлов [Текст] / С.Я. Грилихес. – Л.: Машиностроение, 1987. – 112 с.

18. Грилихес, С.Я. Электролитические и химические покрытия [Текст] / С.Я. Грилихес, К.И. Тихонов. – Л.: Химия, 1990. – 288 с.

19. Гуца, А. Вакуумное напыление [Текст] / А. Гуца // Мир техники и технологий. – 2009. – №10 (95). – С. 50-51.

20. Гуца, А. Детонационное напыление [Текст] / А. Гуца // Мир техники и технологий. – 2010. – №1 (98). – С. 50-51.

21. Дорошенко, В.С. Газодинамическое уплотнение формовочных материалов и способ контроля процесса формовки [Текст] / В.С. Дорошенко // Мир техники и технологий. – 2013. – №2 (135). – С. 60-66.

22. Дриц, М.Е. Технология конструкционных материалов и материаловедение [Текст]: учеб. для вузов / М.Е. Дриц, М.А. Москалев. – М.: Высш. шк., 1990. – 447 с.

23. Дряхлов, Е. Литьё под давлением со вспениванием [Текст] / Е. Дряхлов // Мир техники и технологий. – 2009. – № 9 (94). – С. 57-60.

24. Дряхлов, Е. Литьё под давлением крупногабаритных деталей [Текст] / Е. Дряхлов // Мир техники и технологий. – 2010. – №5 (102). – С. 16-19.

25. Драгобецкий, В.В. Новые технологии взрывного плакирования и упрочнения [Текст] / В.В. Драгобецкий // Мир техники и технологий. – 2013. – №5. – С. 60-63.

26. Драгобецкий, В.В. Новые технологии взрывного плакирования и упрочнения [Текст] / В.В. Драгобецкий // Мир техники и технологий. – 2013. – №6 (139). – С. 60-66.

27. Дорошенко, В.С. Газодинамический баланс в песчаной форме при литье по газифицируемым моделям [Текст] / В.С. Дорошенко, К.Х. Бердыев // Мир техники и технологий. – 2013. – №7 (140). – С. 64-67.

28. Дорошенко, В.С. Технология литья металла по пенопластовым моделям [Текст] / В.С. Дорошенко // Мир техники и технологий. – 2008. – №7 (80). – С. 52-53.

29. Дубинин, Г.Н. Диффузионное хромирование сплавов [Текст] / Г.Н. Дубинин. – М.: Машиностроение, 1964. – 451 с.

30. Жаростойкость конструкционных материалов энергомашиностроения [Текст] / Под ред. В.В. Митора. – Л.: ЦКТИ, 1978. – 235 с.

31. Злобин, Г.П. Формование изделий из порошков твёрдых сплавов [Текст] / Г.П. Злобин. – М.: Metallurgy, 1980. – 224 с.

32. Золотухин, И.В. Новые направления физического материаловедения [Текст] / И.В. Золотухин, Ю.Е. Калинин, О.В. Стогней. – Воронеж: Изд-во ВГУ, 2000. – 360 с.

33. Каримов, Ш.А. Технология нанесения твердосплавных покрытий [Текст] / Ш.А. Каримов, С.М. Тимофеев // Мир техники и технологий. – 2008. – №6 (79). – С. 56-57.

34. Карпинос, Д.М. Композиционные материалы [Текст]: справочник / Д.М. Карпинос. – К.: Наук. думка, 1985. – С. 373-474.

35. Клоц, М.У. Травление, полирование и пассивирование нержавеющей сталей [Текст] / М.У. Клоц. – Л.: ЛДНТП, 1985. – 23 с.

36. Клячкин, Я.Л. Сварка цветных металлов и их сплавов [Текст] / Я.Л. Клячкин. – М.: Машиностроение, 1984. – 335 с.

37. Кобаяши, А. Обработка пластмасс резанием [Текст] / А. Кобаяши. – М.: Машиностроение, 1984. – 192 с.

38. Ковальченко, М.С. Теоретические основы горячей обработки пористых материалов давлением [Текст] / М.С. Ковальченко. – К.: Наук. думка, 1980. – 239 с.

39. Ковалева, А.В. Композиционные материалы в технике и исследование возможностей получения изделий из разнородных

материалов в литейном производстве [Текст]: учеб. пособие / А.В. Ковалева, А.А. Чёрный. – Пенза: Пензенский гос. ун-т, 2008. – 161 с.

40. Корягин, С.И. Способы обработки материалов [Текст]: учеб. пособие / С.И. Корягин, И.В. Пименов, В.К. Худяков; Калинингр. ун-т. – Калининград, 2000. – 448 с.

41. Кочергин, К.А. Контактная сварка [Текст] / К.А. Кочергин. – Л.: Машиностроение, 1987. – 240 с.

42. Кривоухов, В.А. Обработка резанием титановых сплавов [Текст] / В.А. Кривоухов, А.Д. Чубаров. – М.: Машиностроение, 1990. – 180 с.

43. Лаворко, П.К. Оксидные покрытия металлов [Текст] / П.К. Лаворко. – М.: Машгиз, 1993. – 186 с.

44. Любченко, А.П. Влияние газотермического напыления на структуру и твёрдость поверхностного слоя [Текст] / А.П. Любченко, Д.Б. Глушкова, В.П. Тарабанова и др. // Мир техники и технологий. – 2009. – №12 (97). – С. 32-33.

45. Ляхович, Л.С. Многокомпонентные диффузионные покрытия [Текст] / Л.С. Ляхович, Л.Г. Ворошкин, Г.Г. Панич и др. – Минск: Наука и техника, 1974. – 288 с.

46. Макаренко, Н.А. Восстановление и упрочнение штампов и пресс-форм [Текст] / Н.А. Макаренко, К.А. Кондратов // Мир техники и технологий. – 2009. – № 1 (86). – С. 20-21.

47. Мартовой, П. Газотермическое напыление – любимыми материалами, на любую основу [Текст] / П. Мартовой // Мир техники и технологий. – 2010. – №2 (99). – С. 12-16.

48. Молодык, Н.В. Восстановление деталей машин [Текст] / Н.В. Молодык, А.С. Зенкин. – М.: Машиностроение, 1989. – 480 с.

49. Москвитин, М.И. Физико-химические основы процессов склеивания и прилипания [Текст] / М.И. Москвитин. – М.: Лесная промышленность, 1974. – 321 с.

50. Нектасов, С.С. Технология материалов [Текст] / С.С. Нектасов, Г.М. Зильберман. – М.: Машиностроение, 1984. – 280 с.

51. Никитин, В.И. Коррозия и защита лопаток газовых турбин [Текст] / В.И. Никитин. – Л.: Машиностроение, 1987. – 272 с.

52. Поважук, Г.М. Техника безопасности при сварочных работах [Текст] / Г.М. Поважук. – К.: Высшая школа, 1986. – 94 с.
53. Подураев, В.Н. Резание труднообрабатываемых материалов [Текст] / В.Н. Подураев. – М.: Высш. шк., 1974. – 590 с.
54. Романов, П.П. Технология вакуумного напыления [Текст] / П.П. Романов // Мир техники и технологий. – 2010. – №3 (100). – С. 18-19.
55. Соколов, И.И. Газовая сварка и резка металлов [Текст] / И.И. Соколов. – М.: Высш. шк., 1991. – 320 с.
56. Солнцев, С.С. Защитные покрытия металлов при нагреве [Текст]: справочное пособие / С.С. Солнцев. – 2-е изд., доп. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. – 248 с.
57. Скороход, В.В. Фізико-хімічна кінетика в наноструктурних системах [Текст] / В.В. Скороход, І.В. Уваріва, А.В. Рагуля. – К.: Академперіодика, 2001. – 180 с.
58. Справочная книга по охране труда в машиностроении [Текст] / под ред. О.Н. Русака. – Л.: Машиностроение, 1989. – 541 с.
59. Стрелов, К.К. Теоретические основы технологии огнеупорных материалов [Текст] / К.К. Стрелов, И.Д. Кащеев. – М.: Металлургия, 1996. – 332 с.
60. Суворов, И.К. Обработка металлов давлением [Текст] / И.К. Суворов. – М.: Высшая школа, 1993. – 383 с.
61. Тамарин, Ю.А. Жаростойкие диффузионные покрытия лопаток ГТД [Текст] / Ю.А. Тамарин. – М.: Машиностроение, 1978. – 136 с.
62. Технология конструкционных материалов [Текст] / под ред. Г.А. Прейса. – К.: Высш. шк., 1984. – 359 с.
63. Третьяков, В.И. Основы металловедения и технология производства спеченных твёрдых сплавов [Текст] / В.И. Третьяков. – М.: Металлургия, 1976. – 527 с.
64. Тюрин, Ю.Н. Ресурсосберегающая термоциклическая технология упрочнения поверхности крупногабаритных изделий [Текст] / Ю.Н. Тюрин, М.Л. Жадкевич, С.И. Головенко // Мир техники и технологий. – 2008. – №7 (80). – С. 48-51.
65. Хаюров, С.С. Термическая и химикотермическая обработка металлов и сплавов с использованием ионных и лазерных пучков [Текст] / С.С. Хаюров // Итоги науки и техники.

Сер. «Металловедение и термич. обработка металлов». – М.: ВИНТИ, 1990. – Т. 24. – С. 167-221.

66. Хренов, К.К. Сварка, резка и пайка металлов [Текст] / К.К. Хренов. – М.: Машиностроение, 1993. – 512 с.

67. Хромов, В.Н. ТПД как технология восстановления деталей типа «полый цилиндр» [Текст] / В.Н. Хромов // Мир техники и технологий. – 2009. – №6 (91). – С. 46-47.

68. Шулаев, В.М. Прошлое, настоящее и будущее покрытий нитрида титана [Текст] / В.М. Шулаев // Мир техники и технологий. – 2012. – №11 (132). – С. 68-70.

69. Ягодкин, Ю.Д. Ионно-лучевая обработка металлов и сплавов [Текст] / Ю.Д. Ягодкин // Итоги науки и техники сер. «Металловедение и термическая обработка металлов». – М.: ВИНТИ, 1980. – Т. 14. – С.142-185.

70. Andrievski R.A. In Nanosruciured Materials, Science and Technology [Text] / R.A. Andrievski // Kluver Academic, Dordrecht. – 1998. – P. 263-268.

71. Awasthi, K. Synthesis of carbon nanotubes [Text] / K. Awasthi, O. Srivastava // J. Nanosci. Nanotechnol. – 2005. – Vol. 5. – N. 10. – P. 1616-1636.

72. Birringer, R. Nanocrystalline materials: an approach to novel solid structure with gas-like disorder [Text] / R. Birringer, H. Gleiter, P. Marquard // Phys. Lett. – 1984. – № 102. – P. 365-369.

73. Cerwick, H. Tandem MAG welding with the PZ 6105 R. [Text] / H. Cerwick // Svetsaren, – 2000. – Vol. 54. – N. 1. – P. 37.

74. Chaki, T.K. Effects of Co Cr Al Y coating on microstructural stability and creep behaviour of a nickel-base superalloy [Text] / T.K. Chaki, A.K. Singht, K. Sadananda // Thin Solid Films, 1989. – Vol. 168. – P. 207-220.

75. Gleiter, H. Nanostructured materials: basic concepts and microstructure [Text] / H. Gleiter // Acta mater. – 2000. – Vol. 48. – P. 1-29.

76. Godfrey, T.M. Proceedings of the 9th World Conference of Titanium [Text] / T.M. Godfrey et al. – Russia, S.-Petersburg. – 1999. – Vol. 3. – P. 1868-1875.

77. Groza, J.R. International Developments in Rapid Consolidation Techniques and Commercial Status [Text] / J.R. Groza

// Fine and Ultrafine Nanopowders. – New York. – 1998. – P. 205-211.

78. Kieback, B. The structure and microhardness evolution in submicrocrystalline molybdenum processed by severe plastic deformation followed by annealing [Text] / B. Kieback, K.V. Ivanov et. al. // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2003. – Vol. 21. – P. 69-73.

79. Lundin, M. Tandem Wire MAG welding of C-Mn Steels [Text] / M. Lundin. – SIMR Joining Technology Centre. – SIMR, NIM. – 2000. – P. 549.

80. Mayo, M.J. In Nanostructured Materials. Science and Technology [Text] / M.J. Mayo // Kluwer Academic. Dordrecht. – 1998. – P. 361-371.

81. Nanostructured Materials. Science and Technology [Text]. – Proc. of NATO ASI // Ed. by G.M. Chow and N.I. Noscova. – Dordrecht, Boston, London: Kluwer Acad. Publ. – 1998. – Vol. 50. – P. 457.

82. Rapid Prototyping & manufacturing: fundamentals of stereolithography [Text] / Ed. P.F. Jacobs. – SME, Dearborn, 1992.

83. Riece, R. Hot forming of ceramics [Text] / R. Riece. – In: Ultrafine Grain Ceramics. New York: Syracuse University Press, 1970. – P. 203-249.

84. Segal, V. Severe plastic deformation: simple shear versus pure shear [Text] / V. Segal // Materials Science and Engineering. – 2002. – Vol. 338. – P. 331-344.

85. Sherby, O.D. Superplasticity – Recent + advanced and future directions [Text] / O.D. Sherby, J. Wadsworth // Progress in Materials Sciences. – 1989. – Vol. 33. – P. 169-221.