

Міністерство освіти і науки України  
Донбаська державна машинобудівна академія (ДДМА)

# **ВИСОКІ ТЕХНОЛОГІЇ В МАШИНОБУДУВАННІ**

## **Конспект лекцій**

**для студентів спеціальності 133 «Галузеве машинобудування»**

Розглянуто і схвалено  
на засіданні кафедри  
«Комп'ютеризовані  
мехатронні системи,  
інструмент і технології»  
Протокол № 1 від 28 серпня 2018 р.

Краматорськ  
ДДМА  
2018

УДК 621.9.04

Високі технології в машинобудуванні: конспект лекцій для студентів спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» / уклад. : В. В. Калініченко. – Краматорськ : ДДМА, 2018. – 111 с.

Наведено стислий конспект лекцій з дисципліни «Високі технології в машинобудуванні» для здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня освітньо-професійної програми «Галузеве машинобудування» (професійні спрямування «Комп'ютеризовані мехатронні верстати та системи», «Комп'ютерно-інтегровані технології інструментального виробництва») та освітньо-наукової програми «Галузеве машинобудування» (наукове спрямування «Процеси механічної обробки, верстати та інструменти»).

Розглянуто і схвалено на засіданні кафедри «Комп'ютеризовані мехатронні системи, інструмент і технології» (протокол № 1 від 28 серпня 2018 р.).

Електронне навчальне видання

Укладач

В. В. Калініченко, доц.

## ЗМІСТ

|   |     |
|---|-----|
| ЛЕКЦІЯ 1. ПОНЯТТЯ ТА ОСНОВНІ ОЗНАКИ ВИСОКИХ ТЕХНОЛОГІЙ\ В МАШИНОБУДУВАННІ.....          | 4   |
| ЛЕКЦІЯ 2. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНОЇ ОБРОБКИ МАТЕРІАЛІВ .....             | 8   |
| ЛЕКЦІЯ 3. УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСОМ ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНОЇ ОБРОБКИ МАТЕРІАЛІВ .....                 | 15  |
| ЛЕКЦІЯ 4. ОСНОВНІ РІЗНОВИДИ ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНОЇ ОБРОБКИ МАТЕРІАЛІВ.....                    | 22  |
| ЛЕКЦІЯ 5. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ТА РІЗНОВИДИ ЕЛЕКТРОХІМІЧНОЇ ОБРОБКИ МАТЕРІАЛІВ ..... | 28  |
| ЛЕКЦІЯ 6. УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСОМ ЕЛЕКТРОХІМІЧНОЇ ОБРОБКИ МАТЕРІАЛІВ .....                  | 34  |
| ЛЕКЦІЯ 7. ЕЛЕКТРОХІМІЧНЕ АЛМАЗНЕ ЗАГОСТРЕННЯ ІНСТРУМЕНТУ ..                             | 40  |
| ЛЕКЦІЯ 8. ПЛАЗМОВА ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ.....  | 47  |
| ЛЕКЦІЯ 9. УЛЬТРАЗВУКОВА ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ.....   | 58  |
| ЛЕКЦІЯ 10. ЛАЗЕРНА ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ.....  | 66  |
| ЛЕКЦІЯ 11. ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВА ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ....                                  | 73  |
| ЛЕКЦІЯ 12. ОСАДЖЕННЯ ЗНОСОСТІЙКИХ ПОКРИТТІВ НА РІЗАЛЬНІ ІНСТРУМЕНТИ.....                | 83  |
| ЛЕКЦІЯ 13. ГЕНЕРАТИВНІ ПРОЦЕСИ ПРИСКОРЕНОГО ФОРМОУТВОРЕННЯ ВИРОБІВ.....                 | 98  |
| ЛІТЕРАТУРА.....   | 111 |

# ЛЕКЦІЯ 1.

## ПОНЯТТЯ ТА ОСНОВНІ ОЗНАКИ ВИСОКИХ ТЕХНОЛОГІЙ В МАШИНОБУДУВАННІ

*План.*

*1 Основні тенденції розвитку технологій машинобудування.  
Сутність поняття високих технологій в машинобудуванні.*

*2 Основні ознаки високих технологій в машинобудуванні.*

*СРС:* історичні передумови розробки та впровадження високих технологій в машинобудуванні.

*Література:* [1, с. 10–15; 2, с. 3–25].

*1.1 Основні тенденції розвитку технологій машинобудування.  
Сутність поняття високих технологій в машинобудуванні.*

*Промислові технології*, як основні принципи отримання виробів з заданими властивостями та надійної реалізації виробничих процесів, справляють вирішальний вплив на рівень розвитку виробництва та конкурентоздатність його продукції. Технології в наш час є головною рушійною силою конкурентної боротьби між промисловими підприємствами.

Кожен виріб машинобудування, що надходить на ринок, в умовах жорсткої конкуренції повинен відповідати постійно зростаючим вимогам споживачів до його функціональних, екологічних та естетичних властивостей. Тенденції підвищення вимог до якості виробів знайшли відображення у міжнародних стандартах якості ISO–9000. Отримання нового технічного рівня та високої якості виробів відповідно до світових стандартів, все частіше пов'язують з нетрадиційними конструкторськими та технологічними рішеннями, реалізація яких неможлива на основі *традиційних (конвенціональних) технологій*.

У зв'язку з цим в машинобудуванні все активніше розробляються та використовуються *нетрадиційні технології*, створенню яких передують накопичення результатів фундаментальних та прикладних наукових досліджень. На відміну від добре відомих традиційних, такі технології називають «наукомісткими технологіями», «технологіями на основі використання висококонцентрованих потоків енергії», «прецизійними технологіями», «ультрапрецизійними технологіями», «нанотехнологіями» тощо. Ці назви пов'язані з тією ознакою робочого процесу, що приймається у якості визначальної. Наприклад, якщо у якості визначальної ознаки приймається гранична точність обробки, що забезпечується робочим процесом, то, окрім звичайних процесів обробки, які забезпечують гранично припустиму точність обробки

від 100 до 5 мкм, виділяють робочі процеси **прецизійних технологій** (гранично припустима точність обробки від 10 мкм до 0,5 мкм), **ультрапрецизійних технологій** (гранично припустима точність обробки від 1 мкм до 0,001 мкм), **нанотехнологій** (гранично припустима точність обробки близько 1 нм). У більш широкому сенсі **нанотехнології** передбачають використання для отримання нових властивостей виробу фізичних ефектів матеріалів, що виявляють себе на нанорівні. До технологій **на основі використання висококонцентрованих потоків енергії** зараховують, наприклад, обробку матеріалів за допомогою енергії електричного розряду, плазми, електронного та лазерного променя, магнітного поля.

Незалежно від використаних назв, ці технології об'єктивно складають єдиний самостійний напрям у межах загальної технології машинобудування, сутність якого найповніше відображається у понятті **«високі технології»**.

Поняття «високі технології» у машинобудуванні склалося пізніше, ніж в інших галузях, наприклад, в електроніці та має свою специфіку. Оскільки домінуючим способом обробки деталей в машинобудуванні є механічна обробка (на початку поточного десятиліття у загальній структурі технологічного обладнання для обробки деталей машин близько 98 % становили металорізальні верстати (78 % – для лезової та 20 % – для абразивної обробки) та лише близько 2 % – обладнання для електрофізичної, електрохімічної, комбінованої обробки та інших технологічних способів), то усі технології, що базуються на використанні висококонцентрованих потоків енергії, можна віднести до високих технологій в машинобудуванні. Хоча багато з цих технологій відомі вже на протязі десятиліть, їхній потенціал ще далеко не повністю розкритий та використаний.

Важливими передумовами розробки та впровадження високих технологій в машинобудуванні є:

- 1) постійне та неухильне підвищення вимог до технічного рівня та якості виробів;
- 2) мініатюризація виробів та необхідність отримання конструктивних елементів надмалих розмірів;
- 3) неухильне зростання граничної точності обробки;
- 4) широке використання матеріалів з підвищеними функціональними властивостями (корозійно-стійких та жароміцних сталей та сплавів, високотвердих термооброблених сталей, легованих чавунів, композитів, напівпровідникових матеріалів та ін.), обробка яких традиційними способами ускладнена або неможлива;
- 5) підвищення вимог до безпеки та екологічності виробництва.

Підсумувавши, можна сказати, що **високими технологіями в машинобудуванні** називають технології, які гарантують отримання виробів, що характеризуються при економічній доцільності новим рівнем

функціональних, естетичних та екологічних властивостей, за рахунок чого гарантується конкурентоздатність продукції.

## ***1.2 Основні ознаки високих технологій в машинобудуванні.***

Можна виділити наступні ***основні ознаки високих технологій в машинобудуванні.***

1 ***Наукомісткість.*** Головним змістом даної ознаки високих технологій є той факт, що вони базуються на новітніх результатах фундаментальних та прикладних наукових досліджень.

2 ***Системність.*** Така ознака, як системність, передбачає діалектичний взаємозв'язок та взаємодію усіх елементів технологічної системи, усіх основних процесів, явищ та складових.

3 ***Наявність фізичних та математичних моделей для структурно-параметричної оптимізації робочого процесу,*** автоматизація усіх етапів розробки та реалізації технології, використання комп'ютерного середовища у процесах конструювання та виготовлення виробів.

4 ***Високоєфективний робочий процес,*** що потенційно забезпечує функціональні властивості виробу. Тут великі можливості мають робочі процеси на основі використання електрофізичних, електрохімічних та інших явищ у поєднанні зі спеціальними властивостями інструменту та робочого середовища (приклад – електронно-променево плавлення, у якому інструментом є електронний промінь, робочим середовищем – вакуум, температура у кілька разів вища, ніж при традиційних методах нагрівання; процес забезпечує отримання надчистих матеріалів з небаченими фізико-механічними характеристиками).

5 ***Високий рівень технічного забезпечення,*** використання прецизійного обладнання, оснащення, інструменту, систем вимірювань та діагностики.

6 ***Використання нових матеріалів*** зі спеціальними фізико-механічними та технологічними властивостями.

7 ***Високий рівень кадрового забезпечення,*** спеціалізована підготовка персоналу.

8 ***Надійність.***

9 ***Екологічна чистота.***

Високі технології за своєю суттю є ***інтегрованими.*** Неухильно зростаючі вимоги до виробу та процесу його створення вимагають зростання обсягу технологічних інновацій. В сучасні процеси створення високотехнологічного виробу включається не одне новітнє технологічне рішення. У результаті раніше чітко розмежовані технології поєднуються та формують ***інтегрований технологічний процес.***

Розробка та реалізація інтегрованої технології стають можливими тоді, коли у кожній з поєднаних сфер науки, техніки, технології, матеріалознавства буде досягнутий необхідний новий рівень розвитку. Так було, наприклад, зі створенням синтетичних алмазів: теорія синтезу алмазів була запропонована ще у 30-их роках ХХ століття, та лише на початку 60-х років минулого сторіччя досягнення матеріалознавства, кристалографії, теплофізики, фізики і техніки високих тисків, інших наук створили необхідні умови для вирішення даної науково-технічної проблеми.

З урахуванням існуючого поділу технологій за потенціалом конкурентоздатності на нові, прогресивні, ключові, базові та такі, що витісняються, інтегровані високі технології можуть бути охарактеризовані як *прогресивні* та *ключові*. Саме інтегровані високі технології здатні забезпечити такий рівень функціональних, екологічних та естетичних властивостей виробів і таку продуктивність процесу його створення, які традиційними (базовими) технологіями забезпечити неможливо. Разом з тим, високі технології у порівнянні з традиційними мають більш вузьку сферу використання.

Можна виділити чотири *напрями створення високих технологій в машинобудуванні*, які відповідно базуються на:

- 1) вдосконаленні традиційних методів обробки матеріалів (наприклад, високошвидкісне та надшвидкісне різання);
- 2) використанні висококонцентрованих потоків енергії (наприклад, лазерна обробка матеріалів);
- 3) використанні комбінованих методів обробки на основі поєднання різних фізичних ефектів (наприклад, алмазне електрохімічне загострення твердосплавного інструменту);
- 4) використанні генеративних методів формоутворення виробів, що базуються не на зйомі, а на нарощуванні матеріалу виробу (наприклад, технології прискореного 3D-прототипування або нанесення тонкоплівкових зносостійких покриттів).

## ЛЕКЦІЯ 2. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНОЇ ОБРОБКИ МАТЕРІАЛІВ

### *План.*

*1 Фізичні основи процесу електроерозійної обробки матеріалів.  
Стадії перебігу процесу.*

*2 Електроіскровий та електроімпульсний режими електроерозійної обробки матеріалів.*

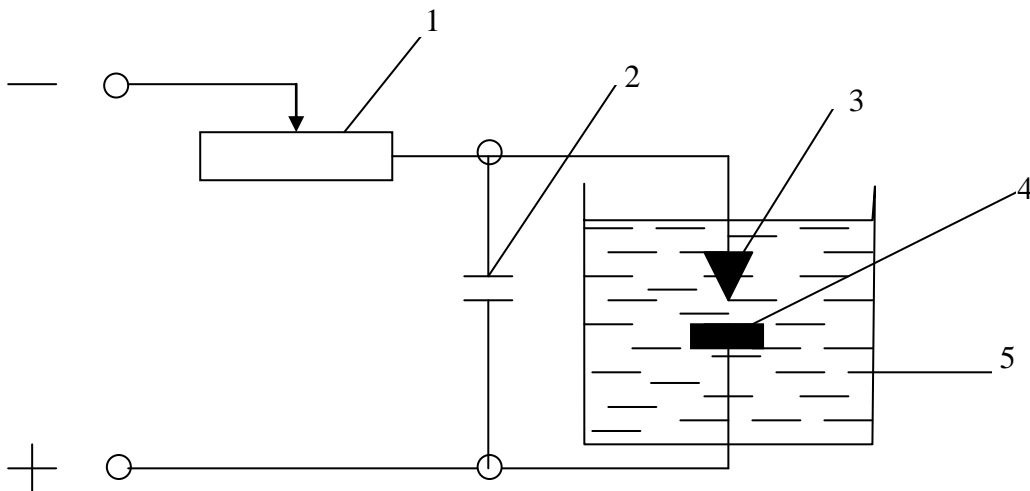
*3 Генератори імпульсів електричного струму для різних режимів електроерозійної обробки.*

*СРС: особливості різних типів генераторів імпульсів електричних розрядів в обладнанні для електроерозійної обробки.*

*Література: [3, с. 4–12; 5, с. 8–18, 6., с. 5–6].*

*2.1 Фізичні основи процесу електроерозійної обробки матеріалів.  
Стадії перебігу процесу.*

*Електроерозійною обробкою (ЕЕО) матеріалів називають процес, при якому формоутворення відбувається під дією електричних розрядів, що виникають при пропусканні імпульсного електричного струму в зазорі шириною 0,01...0,05 мм між електродом-інструментом та електродом-заготовкою. Принципова схема ЕЕО показана на рисунку 2.1.*



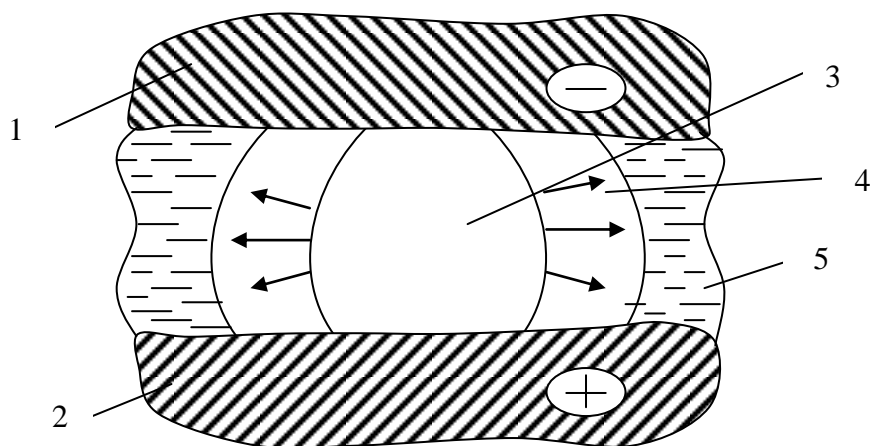
*1 – реостат; 2 – конденсатор; 3 – електрод-інструмент;  
4 – електрод-заготовка; 5 – діелектрична рідина.*

*Рисунок 2.1 – Принципова схема електроерозійної обробки*



Під дією електричних розрядів матеріал заготовки плавиться, випаровується і видаляється з міжелектродного зазору у рідкому або пароподібному стані. Такі процеси руйнування електродів називають електричною ерозією. У результаті ерозії в матеріалі заготовки утворюється заглиблення у формі сферичної лунки. Дистанційні частинки матеріалу охолоджуються діелектричною рідиною, що знаходиться у зазорі, та застигають у вигляді кульок. У якості діелектричної рідини використовують мастила, гас, дистильовану воду.

**Стадії перебігу процесу ЕЕО** представлені на рисунку 2.2.



1 – електрод-заготовка; 2 – електрод-інструмент; 3 – канал електропровідності; 4 – газовий пузир; 5 – діелектрична рідина

Рисунок 2.2 – Стадії перебігу процесу електроерозійної обробки

**Першою стадією** процесу ЕЕО є утворення між електродами **каналу електропровідності** (заповненої плазмою циліндричної області малого перетину зі щільністю струму  $8000 \dots 10000 \text{ А/мм}^2$ ), що виникає при досягненні на електродах **напруги пробоя**. Висока щільність струму, підтримувана протягом  $10^{-5} \dots 10^{-8} \text{ с}$ , забезпечує температуру на поверхні заготовки до  $10000 \dots 12000 \text{ }^\circ\text{C}$ . На межах каналу електропровідності відбувається плавлення металу, утворюються лунки.

**Друга стадія** процесу – утворення навколо каналу електропровідності **газового пузиря** з парів рідини та металів. Внаслідок високого (до  $2 \cdot 10^4 \text{ МПа}$ ) тиску канал електропровідності прагне розширитися. Внаслідок інерції газовий пузир і оточуюча його рідина спочатку є нерухомими, потім починається їхнє розширення.

**Третя стадія** процесу – **припинення розряду**, відрив ударної хвилі від газового пузиря і продовження його розширення за інерцією. Коли газовий пузир досягне максимально можливого розміру, тиск усередині нього різко падає і розплавлений метал, що міститься всередині пузиря, викидається у міжелектродний зазор.

Видалений метал охолоджується діелектричною рідиною, застигаючи у вигляді сферичних гранул діаметром 0,01...0,005 мм. У кожен наступний момент часу імпульс струму пробиває міжелектродний зазор у тому місці, де проміжок між електродами є найменшим.

Безперервне підведення імпульсів електричного струму та автоматичне зближення електрода-інструменту з електродом-заготовкою забезпечує продовження ерозії доти, доки не буде досягнуто заданого розміру заготовки або не буде видалено увесь метал заготовки у міжелектродному зазорі.

## ***2.2 Електроіскровий та електроімпульсний режими електроерозійної обробки матеріалів.***

***Режими ЕЕО характеризуються полярністю ввімкнення електродів та параметрами імпульсів електричного струму.***

Електричний розряд між електродами – це спрямований рух електронів від катода до анода. У зворотному напрямку переміщуються іони. Більш легкі електрони швидко досягають позитивно зарядженої поверхні заготовки, забезпечуючи зйом металу. Більшість важчих за електрони іонів не встигають досягти негативно зарядженого електрода і викликати видалення матеріалу з його поверхні. Тому зйом металу відбувається в основному з ***анода***, який, як правило, і вибирають у якості ***заготовки***. Кількість іонів, що досягають поверхні електрода-інструменту, визначає інтенсивність його зношування і точність обробки. Щоб іони не встигали досягти катода, формують ***імпульс меншої тривалості***, однак, при цьому зростає час обробки. ***Полярність*** ввімкнення електродів, при якій заготовка є анодом, називають прямою. Режим ЕЕО з прямою полярністю ввімкнення електродів називають ***електроіскровим режимом***.

При збільшеній тривалості імпульсів електричного струму зростає інтенсивність зйому металу з катода-інструменту потоком іонів. Можна підібрати такий час протікання струму, при якому частка зйому металу електронами складе незначну частину від загального обсягу видаленого з електродів матеріалу. У такому випадку у якості катода обирають заготовку. Полярність ввімкнення електродів, при якій анодом є інструмент, називають зворотною. Режим ЕЕО зі зворотною полярністю ввімкнення електродів називають ***електроімпульсним режимом***.

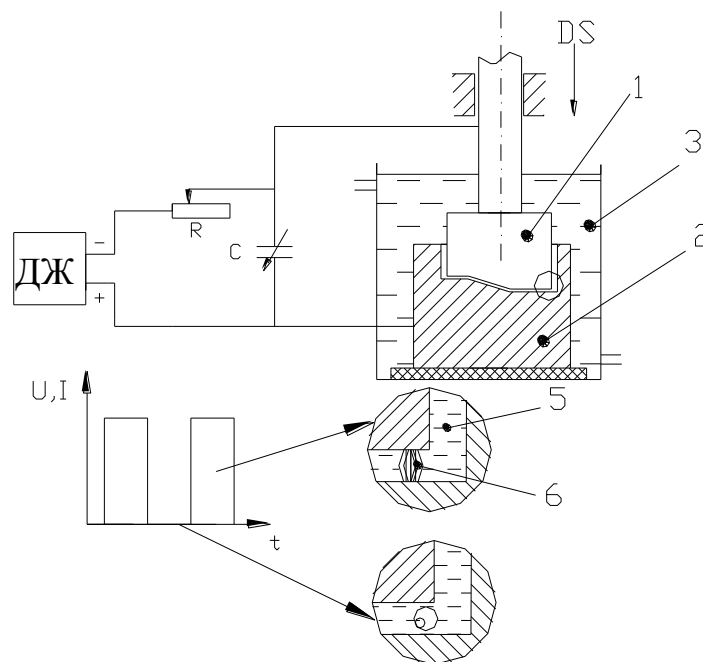
***Електроіскрові режими ЕЕО*** використовують при обробці твердих сплавів, важкооброблюваних матеріалів, обробці наскрізних та глухих отворів будь-якого поперечного перетину, отворів з криволінійними осями, вирізанні деталей, нарізанні зубів та різей, шліфуванні і тавруванні.

***Електроімпульсні режими ЕЕО*** використовують при обробці порожнин штампного оснащення з інструментальних сталей.

При чорновій ЕЕО використовують імпульси великої тривалості ( $10^{-1} \dots 10^{-4}$  с) і низької частоти, при чистовій ЕЕО – імпульси малої тривалості ( $10^{-4} \dots 10^{-7}$  с) і високої частоти.

### 2.3 Генератори імпульсів електричного струму для різних режимів електроерозійної обробки.

Для ЕЕО на електроіскрових режимах традиційно використовують верстати, оснащені  $RC$ -генераторами імпульсів електричного струму, що складаються із зарядного та розрядного контурів (рисунок 2.3). Конденсатор  $C$  через резистор  $R$  заряджається від джерела постійного струму  $4$  з напругою 100...200 В. Коли напруга на конденсаторі досягає пробійної величини, між електродами  $1$  та  $2$  виникає іскровий розряд. Після розряду конденсатор знову заряджається, і цикл повторюється. Опір  $R$  в ланцюзі заряду значно більше опору контуру розряду, і розряд відбувається швидше, ніж заряд, що викликає виділення у міжелектродному зазорі імпульсу великої потужності, що призводить до ерозії електродів. Така схема не забезпечує стійкості ерозійного процесу і призводить до великого зносу електрода-інструменту.



- 1 – електрод-інструмент; 2 – електрод-заготовка;  
 3 – діелектрична рідина; 4 – джерело струму;  
 5 – міжелектродний зазор; 6 – канал електропровідності

Рисунок 2.3 – Схема  $RC$ -генератора імпульсів електричного струму

У  $RC$ -генераторах значна частина енергії втрачається на нагрівання резистора та інші втрати, коефіцієнт корисної дії (ККД) зазвичай не перевищує 25 %, потужність обмежується 5...7 кВт. Використовують їх в основному для чистової обробки.

У  $RCL$ -генераторі імпульсів електричного струму (рисунок 2.4) у зарядний ланцюг введено індуктивний опір  $L$ , що дозволяє зарядити конденсатор до напруги, що перевищує напругу джерела живлення ДЖ або дорівнює їй. При цьому збільшуються амплітуда і потужність імпульсу струму та продуктивність ЕЕО. ККД  $RCL$ -генераторів на 20...25 % перевищує ККД  $RC$ -генераторів.

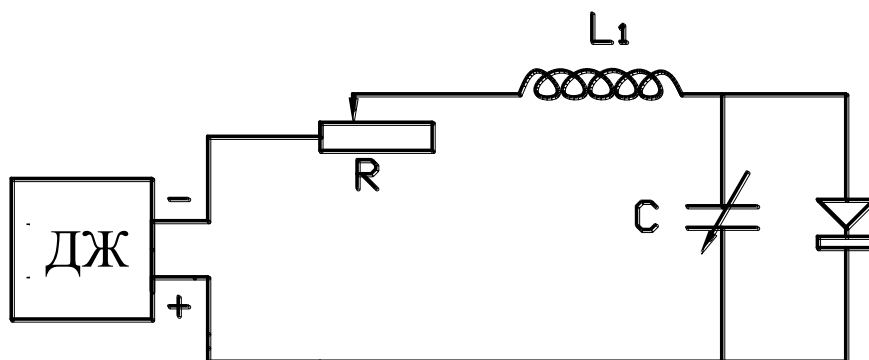


Рисунок 2.4 – Схема  $RCL$ -генератора імпульсів електричного струму

Індуктивний опір можна ввести одночасно у ланцюгах заряду і розряду. У  $RCLL$ -генераторах імпульсів електричного струму (рисунок 2.5) енергія імпульсу збільшується, підвищуючи продуктивність обробки в порівнянні з  $RCL$ -генераторами на 10...15%, і знижуючи знос інструменту також на 10...15%.

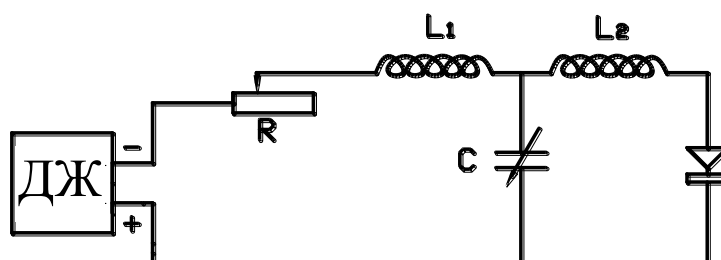


Рисунок 2.5 – Схема  $RCLL$ -генератора імпульсів електричного струму

$RC$ -,  $RCL$ - та  $RCLL$ -генератори імпульсів електричного струму належать до релаксаційних конденсаторних генераторів, що виробляють несиметричні знакозмінні імпульси, амплітуда, тривалість і частота яких визначається станом межелектродного зазору.

**Переваги релаксаційних конденсаторних генераторів** – простота устрою, невисока вартість, широкий діапазон режимів обробки; недоліки – невисокий ККД, мала продуктивність обробки, обмежена можливість підвищення потужності.

Для підвищення ККД обробки і потужності імпульсів створені генератори без струмообмежувального резистора, наприклад, з електромагнітним вібратором (ЕМВ), якір якого жорстко пов'язаний з електродом-інструментом (рисунок 2.6). При ввімкненні електричного струму якір притягається до сердечника і переміщує електрод-інструмент від заготовки, ланцюг розривається і відбувається заряджання конденсатора  $C$  від джерела живлення ДЖ. Коли конденсатор заряджений, струм у обмотці вібратора припиняється, якір відскакує від сердечника і електрод-інструмент повертається до заготовки. У момент наближення відбувається розряд. Вібратор коливається синхронно зі зміною напруги генератора, що ускладнює його налаштування, тому схема використовується для якогось одного режиму. Завдяки великій потужності імпульсів такі генератори використовують при чорновій ЕЕО.

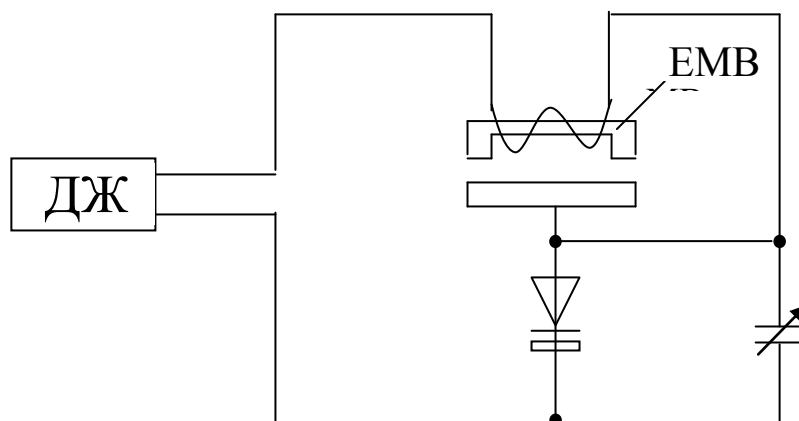
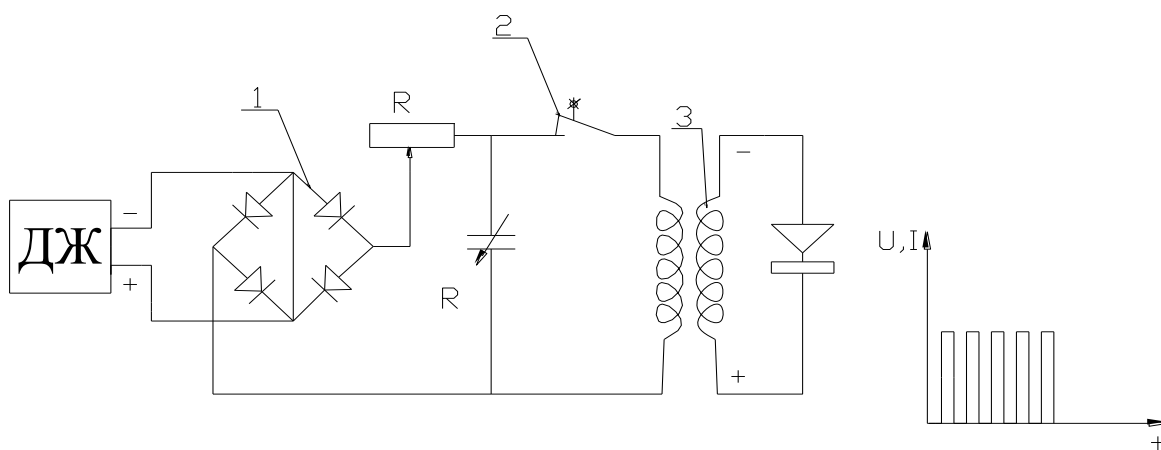


Рисунок 2.6 – Схема генератора імпульсів електричного струму з електромагнітним вібратором

На рисунку 2.7 наведено схему високочастотного генератора імпульсів електричного струму. Конденсатор  $3$  заряджається від джерела постійного струму високої напруги. Під час заряду струм через тиратрон  $2$  не проходить (тиратрон замкнений). Коли ж напруга на конденсаторі досягає певного значення, блок управління тиратрона подає на його сітку запальний імпульс, тиратрон відкривається і конденсатор розряджається на первинну обмотку імпульсного трансформатора. Останній забезпечує отримання імпульсного струму від одиниць до тисяч ампер при напрузі 30...300 В. Частота імпульсів становить 100...150 кГц.

Використання високочастотних імпульсів дозволяє збільшити продуктивність ЕЕО у 30...50 разів при одночасному збільшенні точності та забезпеченні мінімального зносу електрода-інструменту.



*1 – випрямний міст; 2 – переривач (тіратрон);  
3 – імпульсний трансформатор*

*Рисунок 2.7 – Схема високочастотного генератора імпульсів електричного струму*

### ЛЕКЦІЯ 3. УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСОМ ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНОЇ ОБРОБКИ МАТЕРІАЛІВ

*План.*

*1 Структурна схема управління процесом електроерозійної обробки матеріалів.*

*2 Управління продуктивністю електроерозійної обробки матеріалів.*

*3 Управління точністю електроерозійної обробки матеріалів.*

*4 Управління якістю поверхневого шару при електроерозійній обробці матеріалів.*

*5 Енергомісткість електроерозійної обробки матеріалів.*

*Література:* [3, с. 16–45; 5, с. 18–24; 6, с. 6–7].

*3.1 Структурна схема управління процесом електроерозійної обробки матеріалів.*

На рисунку 3.1 наведено структурну схему управління процесом електроерозійної обробки матеріалів.



*Рисунок 3.1 – Структурна схема управління процесом електроерозійної обробки матеріалів*

### 3.2 Управління продуктивністю електроерозійної обробки матеріалів.

У загальному випадку **продуктивність**  $Q$  електроерозійної обробки (ЕЕО) матеріалів визначається за формулою:

$$Q = \Psi \cdot a \cdot A_i \cdot f, \frac{\text{кг}}{\text{с}},$$

де  $\Psi$  – коефіцієнт, що враховує кількість холостих імпульсів;  $\Psi = \frac{f}{f_i}$  (тут

$f_i$  – частота імпульсів, вироблених генератором);

$a$  – об'єм металу, знятого одним або кількома імпульсами з сумарною енергією 1 Дж,  $\frac{\text{кг}}{\text{Дж}}$ .

$A_i$  – енергія імпульсу, Дж;

$f$  – частота імпульсів, що викликають ерозію, Гц;

Для отримання високопродуктивного режиму необхідно, щоб коефіцієнт  $\Psi$  був якомога ближчим до одиниці, тобто щоб якомога більше імпульсів брало участь у процесі ерозії. При малій частоті імпульсів  $\Psi = 0,85$ , а при високій –  $\Psi = 0,75$ .

Ввівши коефіцієнт  $k = \Psi \cdot a$  та виразивши частоту імпульсу через його тривалість  $f = \frac{1}{q \cdot \tau_i}$ , отримаємо залежність:

$$Q = \frac{k \cdot A_i}{q \cdot \tau_i},$$

де  $q$  – шпаруватість (відношення періоду слідування імпульсу до його тривалості);

$k$  – експериментально визначений коефіцієнт, що залежить від виду і стану діелектричної рідини, умов її прокачування, матеріалу та розмірів електродів, характеристик імпульсів;

$\tau_i$  – тривалість імпульсу електричного струму, с.

Таким чином, продуктивність ЕЕО залежить від частки корисної енергії імпульсу електричного струму, його потужності, частоти проходження робочих імпульсів, енергії імпульсів, їхнього числа і часу дії, тобто від потужності, реалізованої у міжелектродному зазорі.

У першому наближенні енергію імпульсу  $A_i$  можна розрахувати за середнім значенням сили струму  $J_{\text{сер}}$  та напруги  $U_{\text{сер}}$ :

$$A_{\text{сер}} = J_{\text{сер}} \cdot U_{\text{сер}} \cdot \tau_i.$$

Тоді продуктивність ЕЕО дорівнює:



$$Q = \frac{k \cdot I_{\text{сер}} \cdot U_{\text{сер}}}{g}$$

**Середнє значення напруги пробою**  $U_{\text{сер}} = (0,5 \dots 0,7) \cdot U_0$ , де  $U_0$  – напруга холостого ходу при розімкнених електродах. Напругу  $U_0$  легко контролювати у процесі обробки.

При електроіскровому режимі приймають  $U_0 = 40 \dots 180$  В, при електроімпульсному –  $U_0 = 18 \dots 36$  В.

**Середню силу струму** визначають через силу струму  $I_{\text{к}}$  при короткому замиканні електродів:  $I_{\text{сер}} = (0,5 \dots 0,75) \cdot I_{\text{к}}$ . Силу струму короткого замикання можна встановлювати і контролювати за допомогою приладів верстата. Її вибирають в залежності від оброблюваного матеріалу та необхідної шорсткості обробленої поверхні. При чорновій обробці сталей  $I_{\text{к}} = 20 \dots 120$  А, при чистовій обробці сталей –  $I_{\text{к}} = 0,5 \dots 5$  А, при обробці твердих сплавів –  $I_{\text{к}} = 0,05 \dots 0,2$  А.

**Тривалість імпульсу** при чорновій обробці становить  $\tau_i = 10^{-1} \dots 10^{-7}$  с, а при чистовій –  $\tau_i = 10^{-4} \dots 10^{-7}$  с.

**Форма імпульсів** підбирається такою, щоб при певних параметрах імпульсу отримати найбільше заглиблення на поверхні заготовки, тобто досягти найбільш ефективного використання підведеної до зони обробки енергії. У робочому діапазоні режимів вибирають певне відношення максимального значення сили струму імпульсу до його тривалості.

В залежності від режимів ЕЕО продуктивність процесу може змінюватися у досить широких межах. Так, при малих енергіях і тривалості імпульсів, їхній високій частоті, що є характерним для чистових режимів, продуктивність обробки становить  $20 \dots 800$  мм<sup>3</sup>/хв; при роботі на чорнових режимах (більша енергія і тривалість імпульсів, менша частота їхнього слідування) можна досягти продуктивності  $12000 \dots 25000$  мм<sup>3</sup>/хв.

У технічній літературі наводяться емпіричні рівняння для розрахунку продуктивності при конкретних операціях ЕЕО. Наприклад, для ЕЕО жароміцного сплаву мідним електродом-інструментом у середовищі гасу емпірична розрахункова залежність має вигляд:

$$Q = 0,022 I^{0,66} \cdot U^{1,5} \cdot C^{0,66},$$

де  $C$  – ємність конденсатора.

Таким чином, підвищити продуктивність обробки можна за рахунок підбору оптимального поєднання чинників, що дозволяють збільшити частку корисної енергії імпульсу, його потужність і частоту. Для цього необхідно досягти оптимального співвідношення між максимальним значенням сили струму  $I_{\text{max}}$  імпульсу та його тривалістю  $\tau_i$ .

Для чорнових операцій використовують імпульси з енергією понад 1 Дж, для чистових – від 0,1 до 1 Дж, для оздоблювальних – до 0,1 Дж.

При малій потужності кількість розплавленого металу є невеликою, зі зростанням потужності вона зростає, але при цьому збільшується і кількість продуктів обробки (металевих частинок і газів) у міжелектродному зазорі. У міру поглиблення отвору ускладнюється видалення продуктів обробки та надходження свіжої рідини до міжелектродного зазору. Наявність великої кількості електропровідних частинок застиглому металу викликає зростання питомої частки імпульсів, енергія яких витрачається не на ерозію електродів, а на вторинне розплавлення металевих частинок-продуктів обробки, внаслідок чого знижується коефіцієнт  $\Psi$  та продуктивність обробки. Для запобігання таким «паразитним» імпульсам використовують примусове прокачування рідини крізь міжелектродний зазор під тиском 100...200 кПа. Прокачування використовують і при періодичному припиненні процесу з виведенням електрода-інструменту із заготовки; з тією ж метою використовують вібрацію електродів, їхнє обертання тощо. При виведенні електрода-інструменту забруднена рідина видаляється з зони обробки, а до неї надходить свіжа.

На питому частку корисного використання енергії імпульсу та його граничну потужність впливають також властивості діелектричної рідини. Для кожного виду ЕЕО використовують оптимальні діелектричні рідини. Так, при ЕЕО з малою енергією імпульсу високу продуктивність забезпечує дистильована вода, гас; при грубих електроімпульсних режимах використовують мастила, дизельне пальне з високою температурою спалаху (до 200 °С).

У процесі обробки робоча рідина забруднюється, змінює свій склад та в'язкість, що призводить до зниження числа робочих імпульсів та продуктивності обробки. Для підтримки високої продуктивності робочу рідину необхідно періодично міняти.

### ***3.3 Управління точністю електроерозійної обробки матеріалів.***

На ***точність*** виготовлення деталей при електроерозійній обробці (ЕЕО) матеріалів впливають:

- 1 точність виготовлення електрода-інструменту;
- 2 знос електрода-інструменту внаслідок дії ерозії;
- 3 похибка форми і розмірів заглиблень на заготовці відносно електрода-інструменту.

У процесі обробки форма та розміри електрода-інструменту порушуються через його зношування. Остаточний профіль заглиблення формується незношеною ділянкою електрода-інструменту, тому електрод-інструмент виготовляють на 1...2 квалітети точнішим за поверхні деталей.

Допуски на розміри електрода-інструменту зазвичай дорівнюють 0,015...0,1 мм.

Знос електрода-інструменту на різних його ділянках є різним, що пов'язано з коливанням числа імпульсів на різних ділянках профілю або з різними умовами виведення продуктів обробки з міжелектродного зазору.

Знос електрода-інструменту у відсотках від об'єму знятого з заготовки металу становить:

3 при прошиванні сталей на електроіскровому режимі мідними та латунними електродами – 30...95 %;

4 при обробці на електроімпульсному режимі мідно-графітовими електродами-інструментами – 0,1 ... 0,4 %;

5 при електроконтактній обробці у рідині – 10...40 %;

6 при електроконтактному розрізанні на повітрі – до 30 %.

У якості способів зниження впливу зносу електродів-інструментів на точність обробки можна назвати:

1) виготовлення інструментів з матеріалів, стійких до ерозії (вольфрам, міднографітові та коксографітові композиції);

2) заміна зношених ділянок електрода-інструменту шляхом його поздовжнього переміщення або заміна всього інструменту;

3) правлення та калібрування робочої частини електрода-інструменту;

4) робота за схемами розрізання та шліфування, при яких знос електрода-інструменту компенсується подачею.

На сучасному рівні розвитку ЕЕО точність виготовлення деталей при електроіскровому режимі обробки профільним електродом-інструментом досягає 6...7-го квалітету, непрофільованим – 5...6-го квалітету; при електроімпульсному режимі точність виготовлення деталей відповідає 9...11-му квалітету; при електроконтактній обробці у рідинному середовищі (шліфування) – 7...8-му квалітету; при обробці на повітрі (розрізання) – 16...17-му квалітету.

### ***3.4 Управління якістю поверхневого шару при електроерозійній обробці матеріалів.***

Оброблена у результаті ЕЕО поверхня формується з доволіно розташованих лунок, що взаємно перекриваються, створюючи характерні нерівності. Розміри лунок залежать від матеріалу електродів, зростають зі зростанням енергії та зменшенням частоти імпульсів.

***Шорсткість обробленої поверхні*** після ЕЕО на електроіскровому режимі становить: при обробці твердих сплавів –  $R_a = 0,2...0,3$  мкм; при обробці сталей  $R_a = 0,3 ... 0,6$  мкм. Після ЕЕО на електроімпульсному режимі висота нерівностей обробленої поверхні становить  $R_z = 20...40$  мкм;

при розрізанні –  $R_z = 80...200$  мкм; при електроерозійному легуванні вона становить  $R_z = 10...200$  мкм, зростаючи зі збільшенням товщини нанесеного шару.

Величину параметра шорсткості  $R_z$  поверхні, обробленої у результаті ЕЕО, визначають за формулою:

$$R_z = \frac{\beta^2 \cdot k_m \cdot \sqrt{A_i}}{3},$$

де  $\beta$  – коефіцієнт перекриття лунок ерозії ( $2 \geq \beta \geq 1$ );

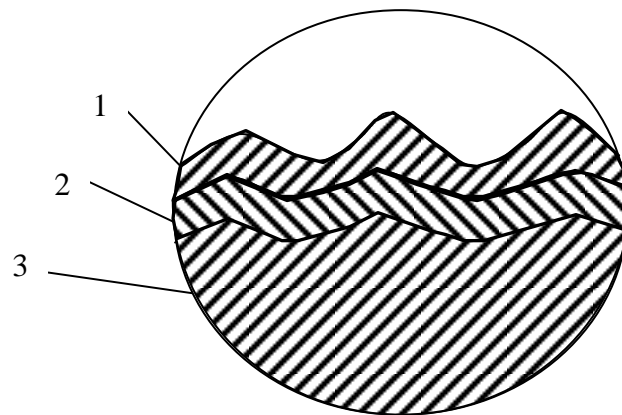
$k_m$  – коефіцієнт, що залежить від властивостей матеріалу.

**Структура поверхневого шару матеріалу** після ЕЕО представлена на рисунку 3.1 та включає:

1) так званий «білий» шар (у ньому спостерігаються хіміко-термічні перетворення, містяться продукти діелектричного робочого середовища і елементи, що входять до складу електрода-інструменту; у сталевих деталях у цьому шарі містяться карбіди заліза, які сприяють зміцненню поверхні);

2) **перехідний шар**, у якому мають місце тільки термічні зміни;

3) **незмінний матеріал заготовки**.



1 – «білий шар»; 2 – перехідний шар; 3 – незмінний матеріал заготовки

*Рисунок 3.1 – Структура поверхневого шару матеріалу після електроерозійної обробки*

**Товщина зміненого шару** значно перевищує висоту нерівностей і залежить від теплофізичних властивостей та температури фазових перетворень матеріалу заготовки. Для сталевих заготовок вона становить: при чорновій обробці на електроімпульсному режимі –  $0,1...0,4$  мм, при чистовій обробці на електроіскровому режимі –  $0,04...0,1$  мм.

**Позитивні фактори впливу ЕЕО** на якість обробленої поверхні та експлуатаційні властивості деталей:

- підвищення твердості поверхні при в'язкій серцевині;
- велика кількість лунок на обробленій поверхні, що сприяє утриманню мастила;
- підвищення втомної міцності в порівнянні зі шліфуванням за рахунок плавного сполучення лунок.

**Негативні фактори впливу ЕЕО** на якість обробленої поверхні та експлуатаційні властивості деталей:

- поява залишкових напружень розтягу і, внаслідок цього – тріщин у поверхневому шарі;
- труднощі у отриманні поверхні малої шорсткості.

### **3.5 Енергомісткість електроерозійної обробки матеріалів.**

ЕЕО у електроіскровому режимі відбувається при відносно малій енергії імпульсів. Об'єм металу, що видаляється за кожен імпульс, є невеликим, а глибина лунки – незначною. Це дозволяє отримати поверхні високої точності та малої шорсткості при невисокій продуктивності. Однак, цей процес є досить енергоємним. Енергоємність ЕЕО на електроіскровому режимі є на порядок вищою у порівнянні з аналогічними операціями механічної обробки.

## ЛЕКЦІЯ 4. ОСНОВНІ РІЗНОВИДИ ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНОЇ ОБРОБКИ МАТЕРІАЛІВ

### *План.*

- 1 Електроерозійне прошивання.*
- 2 Електроконтактна обробка.*
- 3 Електроерозійне розрізання та вирізання заготовок дротяним електродом.*
- 4 Електроерозійне шліфування.*
- 5 Електроерозійне зміцнення.*
- 6 Загальні переваги та недоліки електроерозійної обробки матеріалів.*

*СРС:* обладнання, робочі рідини та електроди-інструменти для електроерозійної обробки матеріалів. Системи подачі та очищення робочої рідини.

*Література:* [3, с. 45–75; 5, с. 24, с. 28–33; 6, с. 5–13, с. 15–21, с. 30–36].

### *4.1 Електроерозійне прошивання.*

Технологічна схема електроерозійного прошивання розглядалася у лекції 2.

До основних операцій електроерозійного прошивання належать:

- обробка внутрішніх порожнин і отворів у деталях штампового оснащення з інструментальних сталей і твердих сплавів;
- прошивання отворів і систем отворів довільного перетину у важкооброблюваних матеріалах;
- обробка фасонних ступінчастих внутрішніх та зовнішніх поверхонь;
- обробка отворів з криволінійною віссю;
- обробка з'єднувальних каналів у корпусних деталях гідроапаратури;
- видалення уламків свердел, мітчиків та інших інструментів з отворів;
- нарізання різи на заготовках з твердих сплавів та загартованих сталей;
- виготовлення сіток, хвилеводів, гребінок та інших деталей радіоелектронної промисловості;
- маркування деталей.

Прошивання може здійснюватись як прямим, так і зворотним копіюванням. При прямому копіюванні електрод-інструмент знаходиться

над заготовкою, при зворотному – заготовка розташовується над електродом-інструментом.

#### 4.2 Електроконтактна обробка.

**Електроконтактна обробка (ЕКО)** заснована на руйнуванні металу заготовки в результаті одночасного механічного та теплового впливу або в результаті тільки одного теплового впливу, що призводить до розплавлення, часткового випаровування і видалення розм'якшеного металу із зони обробки. Схема електроконтактного точіння (шліфування) деталі електродом-інструментом у вигляді диску, що обертається, наведена на рисунку 4.1.

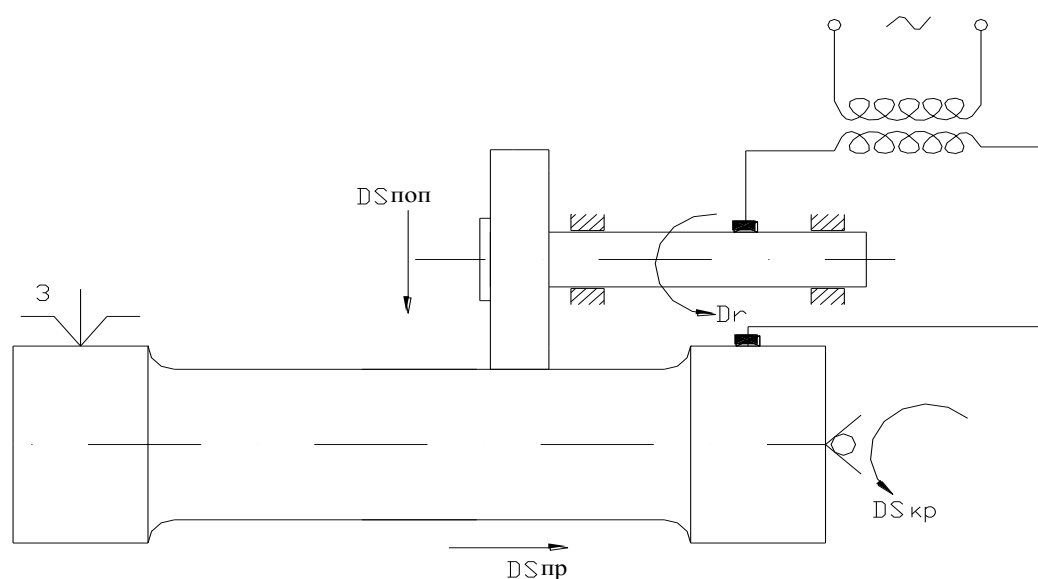


Рисунок 4.1 - Схема електроконтактного точіння (шліфування) електродом-інструментом у вигляді диску, що обертається

Теплота, необхідна для розплавлення та видалення металу заготовки, виділяється в результаті наступних процесів:

- короткочасного горіння дуг між нерівностями заготовки та інструменту;
- нагрівання металу заготовки внаслідок проходження електричного струму крізь опору контакту;
- розігрівання металу заготовки при терті електрода по заготовці.

При ЕКО між заготовкою та інструментом протікає електричний струм силою  $I = 10...25$  А. При напрузі  $U \leq 12$  В тиск у зоні обробки становить 1,0...1,5 МПа (технологічна схема електроконтактного загострення інструменту). При  $U > 12$  В тиск у зоні обробки відсутній і переважає режим оплавлення металу заготовки.

Найбільшого поширення набув режим ЕКО з напругою  $U > 12$  В, при якому переважає виділення теплоти за рахунок множинних дугових розрядів між інструментом та заготовкою. Збільшенню числа контактів, що призводять до утворення розрядів, сприяють вібрації, які супроводжують процес ЕКО.

Електроконтактну обробку проводять при постійному або змінному електричному струмі мідними або чавунними електродами. Неробочі поверхні електродів покривають діелектричним шаром епоксидно-карбідної композиції, що перешкоджає виникненню небажаних контактів та сприяє видаленню з поверхні дефектного шару глибиною 0,2...0,3 мм. Менша ерозія інструменту порівняно з ерозією заготовки при ЕКЗ пояснюється інтенсивним впливом охолоджуючих середовищ (стиснене повітря, вода, содовий розчин) та швидким обертанням електрода-інструменту (швидкість обертання досягає 60 м/с).

ЕКО може проводитися у повітряному або рідинному середовищі. За схемою ЕКО може виконуватися точіння, шліфування, свердлення, розрізання, обробка плоских та фасонних поверхонь, зачищення ливникових задирок тощо.

**Режими** ЕКО поділяються на жорсткі та м'які режими.

**Жорсткі режими ЕКО** забезпечують найбільший зйом металу (наприклад, при розрізанні заготовок діаметром 50...90 мм зі сталі 12Х18Н10Т при  $U = 23$  В,  $I = 2,3$  А продуктивність обробки становить  $Q = 130...200$  см<sup>3</sup>/хв) і при цьому – утворення дефектного шару значної глибини.

У результаті обробки на м'яких режимах ЕКО знімається значно менше металу (наприклад, при обробці титанових сплавів при  $U = 12$  В,  $I = 500$  А продуктивність обробки становить  $Q \leq 6,7$  см<sup>3</sup>/хв), але забезпечується отримання більш якісної обробленої поверхні (параметр шорсткості  $R_a = 0,16...0,63$  мкм при глибині дефектного шару 0,02...0,05 мм).

У даний час найбільш поширеною є ЕКО на жорстких режимах, що використовується для зачищення злитків, виливків, розрізання прокату тощо.

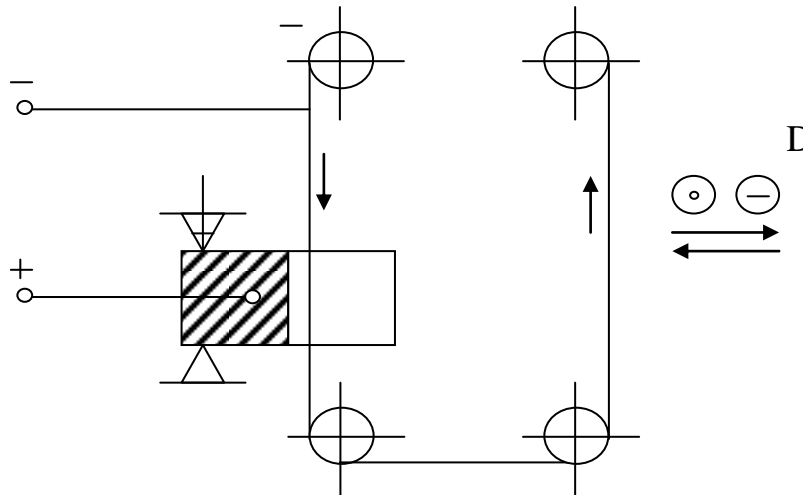
У якості обладнання для ЕКО використовують або спеціальні верстати, або універсальні верстати, спеціально модернізовані під задачу виконання електроконтактної обробки.

#### ***4.3 Електроерозійне розрізання та вирізання заготовок дротяним електродом.***

***Електроерозійне розрізання заготовки дротяним електродом здійснюється*** на електроіскровому режимі. У якості електрода-інструменту при цьому слугує мідний або латунний дріт діаметром



0,02...0,3 мм, що переміщується у різних напрямках відносно заготовки і одночасно (для забезпечення рівномірного зносу) перемотується з однієї котушки на іншу. Схема електроерозійного розрізання (вирізання) заготовки представлена на рисунку 4.2. Електроерозійне розрізання (вирізання) заготовок здійснюється у ванні з діелектричною рідиною.



*Рисунок 4.2 – Схема електроерозійного розрізання (вирізання) заготовки дротяним електродом*

Областями використання даного технологічного різновиду ЕЕО є:

- 1) вирізання фасонних отворів у матрицях штампів та прес-форм з твердих сплавів;
- 2) розрізання заготовок з твердих сплавів, вольфрамових сплавів та інших матеріалів;
- 3) вирізання вузьких наскрізних щілин.

#### **4.4 Електроерозійне шліфування.**

Для шліфування дрібних отворів, наприклад у твёрдосплавних фільтрах та волоках використовується електроерозійне шліфування. Електродом-інструментом при електроерозійному шліфуванні є непрофільований дріт, який вводять у попередньо оброблений отвір заготовки.

Загальна схема електроерозійного шліфування представлена на рисунку 4.3.

Напрямок обертання дротяного електрод-інструменту на рисунку 4.3 вказано стрілкою А. Електрод-інструмент і заготовку підключають до генератора імпульсів електричного струму. Переміщуючи дріт перпендикулярно до його осі (у напрямку стрілки В), можна регулювати діаметр отвору. За рахунок перемотування дроту (у напрямку

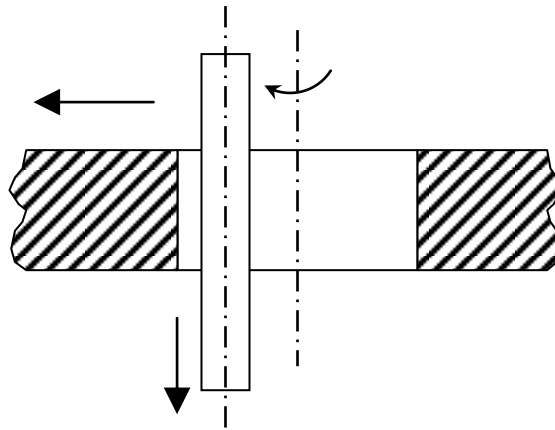


Рисунок 4.3 – Загальна схема електроерозійного шліфування

стрілки Б) вдається практично виключити вплив її зносу на точність обробленого отвору. Таким методом отримують поверхні деталей з похибкою у кілька мікрметрів та шорсткістю  $R_a = 0,2...0,3$  мкм.

#### 4.5 Електроерозійне зміцнення.

**Електроерозійне зміцнення**, що включає легування та нарощування поверхні заготовки, зазвичай здійснюють на повітрі. Частинки розплавленого металу електрода-інструменту на повітрі не встигають охолонути і осідають на поверхні заготовки, утворюючи на ній шар сплаву, насиченого легуючими елементами електрода-інструменту. Крім того, нанесений на заготовку шар є загартованим до високої твердості і за рахунок цього має підвищену зносостійкість.

В залежності від призначення деталей, що виготовляються, використовують кілька видів електроерозійного зміцнення:

- 1) зміцнення з одночасним нарощуванням значного шару металу для відновлення зношених ділянок деталі;
- 2) зміцнення з нанесенням тонких покриттів з благородних металів, наприклад покриттів зі срібла для електроконтактів;
- 3) зміцнення без зміни розмірів деталі (при цьому прагнуть до зміцнення поверхні деталі за рахунок зміни складу та фізико-хімічних властивостей матеріалу поверхневого шару, а весь нанесений шар знімають на наступній операції).

Областями використання електроерозійного зміцнення (електроіскрового легування) є:

- 1) зміцнення лез сталевих інструментів;
- 2) відновлення зношених деталей;
- 3) підвищення зносостійкості сполучених елементів конструкцій;
- 4) нанесення на електричні контакти матеріалів з малим електричним опором, наприклад срібла.

Процес *електроіскрового легування*, при якому електрод-інструмент додатково отримує поздовжні та крутильні коливання ультразвукової частоти, називають *електроакустичним легуванням*. Коливання електрода-інструменту при електроакустичному легуванні забезпечують додаткове зміцнення легованого поверхневого шару заготовки.

#### **4.6 Загальні переваги та недоліки електроерозійної обробки матеріалів.**

*Електроерозійна обробка* (ЕЕО) матеріалів характеризується такими загальними перевагами:

1) вихідний енергоносій (електроенергія) не перетворюється на силову енергію, а реалізується у зоні обробки безпосередньо, тобто не потрібні відповідні ланки кінематичного ланцюга верстата, у результаті чого верстат значно спрощується, а процес стає більш мобільним;

2) обробка здійснюється без помітних механічних зусиль на інструмент і силового впливу на заготовку, що виключає необхідність передачі значних механічних зусиль через технологічну систему;

3) відсутня необхідність використання спеціальних інструментів, більш твердих, ніж оброблюваний матеріал. Інструмент для ЕЕО простіший та дешевший за інструменти, що використовуються при традиційних способах обробки (фрези, протяжки, штампи);

4) продуктивність обробки не залежить від твердості та в'язкості оброблюваного матеріалу, що важливо в умовах використання важкооброблюваних матеріалів;

5) ЕЕО надає широкі можливості реалізації різних технологічних схем формоутворення як непрофільованим, так і профільованим електродом, зокрема, копіювання форми електрода на поверхні заготовки при простому поступальному русі електрода-інструменту, що дозволяє отримати, як при штампуванні, різноманітні отвори, порожнини, стяжки та інші вироби складної форми;

6) ЕЕО дозволяє виконати технологічні операції, які неможливо виконати іншими способами (наприклад, обробка глибоких отворів у важкооброблюваних матеріалах, обробка отворів з зігнутою віссю).

***Недоліки електроерозійної обробки*** (ЕЕО):

1) підвищена порівняно з обробкою різанням енергомісткість;

2) можливість використання тільки для обробки електропровідних матеріалів;

3) необхідність збирання та утилізації відходів.

## ЛЕКЦІЯ 5. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ТА РІЗНОВИДИ ЕЛЕКТРОХІМІЧНОЇ ОБРОБКИ МАТЕРІАЛІВ

*План.*

*1 Фізико-хімічні основи процесу електрохімічної обробки матеріалів.*

*2 Електрохімічне полірування.*

*3 Розмірна електрохімічна обробка.*

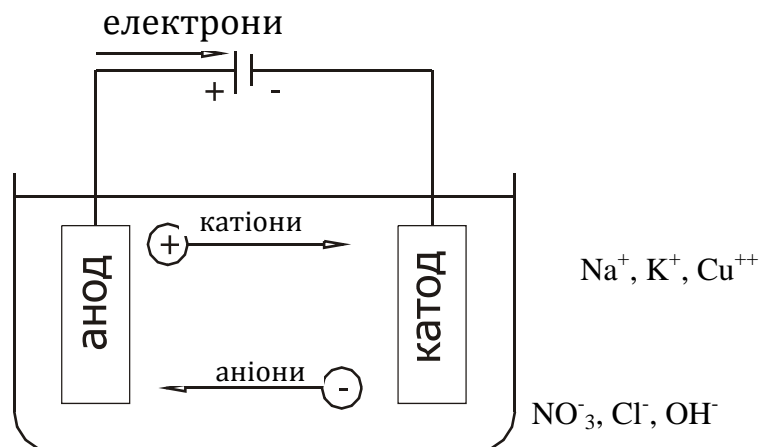
*СРС: електрохімічне точіння. Електрохімічне шліфування.*

*Література:* [3, с. 96–112, с. 127–131, с.168–173; 5, с. 42–46, с. 53–64].

### *5.1 Фізико-хімічні основи процесу електрохімічної обробки матеріалів.*

Процес *електрохімічної обробки* (ЕХО) матеріалів заснований на явищі *анодного розчинення* металу при електролізі. Електроліз – хімічний процес, що протікає у електроліті при проходженні через нього постійного електричного струму.

Схема руху електричних зарядів при електролізі наведена на рисунку 5.1. Іони електроліту рухаються до електродів: позитивно заряджені іони (катіони) – до катода, негативно заряджені іони (аніони) – до анода.

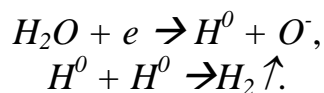


*Рисунок 5.1 – Схема руху електричних зарядів при електролізі*

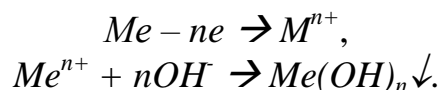
При проходженні постійного електричного струму через електроліт на поверхні заготовки, ввімкненої у електричний ланцюг у якості анода, відбуваються хімічні реакції з перетворенням поверхневого шару металу

на сполуки, що легко видаляються з поверхні заготовки потоком електроліту.

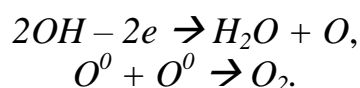
Послідовність анодного розчинення металу представимо у наступний спосіб. На катоді відбувається прискорений розклад молекул води з виділенням молекулярного водню:



На аноді відбувається перехід металу у нерозчинний гідроксид:

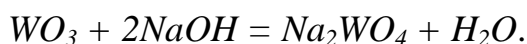


Одночасно утворюється молекулярний кисень:



У результаті реакції на катоді виділяється газ (водень), на аноді – осад (гідроксид металу) та газ (кисень). Катод, що є інструментом, практично не зношується; це – одна з позитивних особливостей процесу ЕХО.

Оксиди вольфраму і титану, що утворюються при ЕХО твердих та жароміцних сплавів у лужних розчинах, що містять іони натрію або калію, частково переходять у розчинний у воді вольфрамокислий натрій (калій):



Окис титану  $TiO_2$  гідратується з утворенням  $Ti(OH)_4$  у колоїдному стані, що легко вимивається.

Електролітами слугують розчини солей  $NaCl$ ,  $NaNO_3$  та  $Na_2SO_4$  з додаванням слабого розчину соляної кислоти. Найчастіше використовують водний розчин  $NaCl$  – він є дешевим та забезпечує тривалу працездатність завдяки безперервному відновленню у розчині хлористого натрію.

## **5.2 Електрохімічне полірування.**

При електрохімічному поліруванні (ЕХП) заготовка вміщується до ванни з електролітом, підключається до анода, а катодом служить

металева пластина (мідна або свинцева). Загальна схема ЕХП наведена на рисунку 5.2.

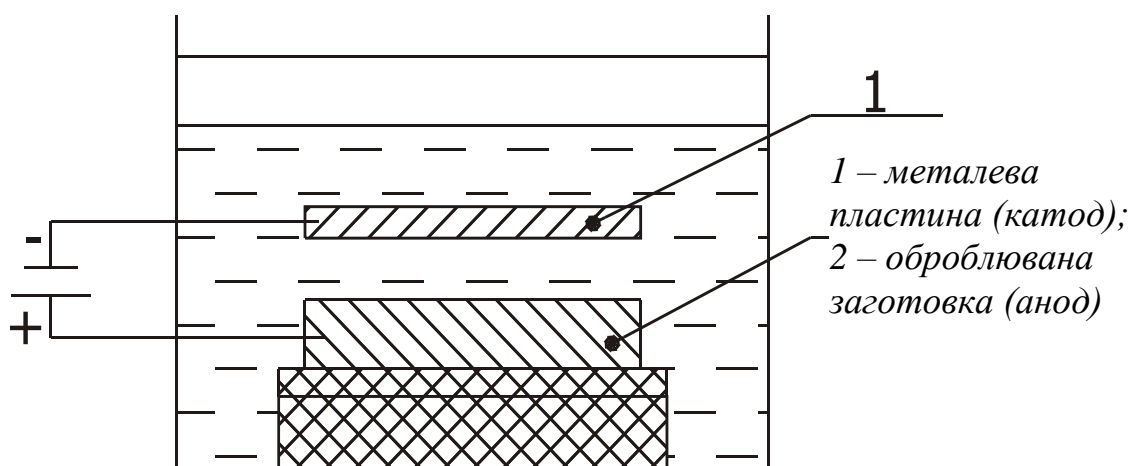


Рисунок 5.2 – Загальна схема електрохімічного полірування

Після подачі напруги на електроди починається інтенсивне розчинення виступів мікронерівностей заготовки внаслідок підвищеної щільності електричного струму на їхніх вершинах. Поверхні западин мікронерівностей розчиняються значно повільніше, оскільки вони заповнюються екрануючими їх продуктами розчинення, і відтак – мають знижену електропровідність. У результаті такого нерівномірного розчинення відбувається згладжування виступів мікронерівностей, зменшення товщини дефектного шару. Для підвищення інтенсивності розчинення використовують електроліт, підігрітий до 40...80 °С.

#### **Переваги електрохімічного полірування (ЕХП).**

1 Продуктивність ЕХП не залежить від механічних властивостей оброблюваного матеріалу та конфігурації виробів, що дозволяє використовувати електрохімічне полірування для чистової обробки виробів з в'язких, твердих та крихких металів та сплавів.

2 Отримання важкодоступних внутрішніх та складнопрофільних поверхонь, порожнин, прорізів, зняття ґрату та задирок на кромках за допомогою ЕХП є набагато простішим, ніж за допомогою обробки різанням.

3 ЕХП можна використовувати для видалення дефектів поверхні (рисок, мікротріщин), невидимих після механічної обробки.

4 ЕХП використовують при видаленні зміцнених при механічній обробці та дефектних шарів, а також газонасичених шарів металу та газових включень.

5 Використання ЕХП при металографічних дослідженнях мікро- та макрошліфів, виготовлення шліфів для електронного мікроскопа дозволяє вивчити структуру та властивості металу без спотвореного шару.

6 ЕХП застосовують для доведення до готового розміру у випадку неможливості обробки різанням (наприклад, при доведенні дроту, стрічки, виробів товщиною у десятки мікрометрів та менших).

7 У результаті ЕХП досягається шорсткість обробленої поверхні  $R_a = 0,08...0,63$  мкм, підвищується корозійна стійкість поверхні та втомна міцність матеріалу.

### ***Недоліки електрохімічного полірування (ЕХП).***

1 За допомогою ЕХП неможливо отримати таку високу якість поверхні, як при алмазно-абразивних та інших доводочних операціях.

2 При ЕХП використовуються кислоти та агресивні середовища, що зумовлює необхідність витрат на спеціальну вентиляцію, знешкодження шкідливих викидів у атмосферу та водойми і на корозійностійке обладнання.

За допомогою ЕХП отримують отвори у листових матеріалах, здійснюють маркування виробів. Поверхні, що не підлягають обробці, покривають шаром діелектрика (рисунок 5.3). Інструмент не переміщається у напрямку до оброблюваної поверхні – міжелектродний зазор під час зйому металу зростає, а сам зйом металу – зменшується.

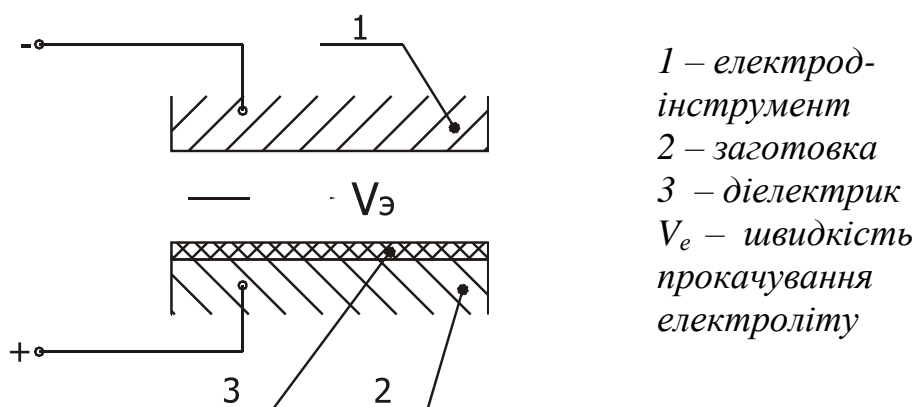


Рисунок 5.3 – Схема подачі електроліту до зони обробки при електрохімічному поліруванні

### ***5.3 Розмірна електрохімічна обробка.***

***Розмірна електрохімічна обробка*** (розмірна ЕХО) призначена для зміни форми, розмірів та шорсткості поверхонь заготовки за рахунок розчинення металу при проходженні струму через електроліт, що прокачується під тиском у зазорі між катодом-інструментом та заготовкою. У зв'язку з розчиненням металу заготовки та необхідністю підтримки оптимальної ширини міжелектродного зазору катод-інструмент отримує рух подачі, спрямований до оброблюваної поверхні. Поверхні

заготовки, які не потребують обробки, ізолюють так само, як і поверхні інструменту, з якими взаємодія заготовки є неприпустимою.

Показником продуктивності розмірної ЕХО є лінійна швидкість розчинення металу (швидкість зйому)  $V_d$ , що є пропорційною до анодної щільності струму. Швидкість зйому регулюють зміною електричних параметрів ЕХО, температури та швидкості прокачування електроліту. При обробці поверхонь площею до  $100000 \text{ мм}^2$  швидкість зйому становить  $1 \text{ мм/хв}$ , для великих поверхонь площею понад  $100000 \text{ мм}^2$  швидкість зйому становить  $0,02 \dots 0,2 \text{ мм/хв}$ .

**Електричні параметри розмірної ЕХО:** напруга  $U = 6 \dots 60 \text{ В}$ , щільність струму  $i = 5 \dots 250 \text{ А/см}^2$ . При цьому досягається шорсткість обробленої поверхні  $R_a = 0,32 \dots 2,5 \text{ мкм}$ , що знижується зі збільшенням щільності струму.

До основних схем розмірної ЕХО відносять електрохімічне прошивання порожнин та отворів (у тому числі струминним методом), електрохімічне точіння, електрохімічне розрізання тощо.

Загальна схема електрохімічного прошивання порожнин та отворів наведена на рисунку 5.4. Електрод-інструмент при прошиванні має один робочий рух – поступальне переміщення зі швидкістю  $V_i$ , спрямоване до деталі. Система регулювання зазору підтримує постійність міжелектродного зазору, через який зі швидкістю  $V_e$  прокачують електроліт. У заготовці або електроді-інструменті іноді виконують технологічні отвори для підведення та відведення електроліту і продуктів обробки.

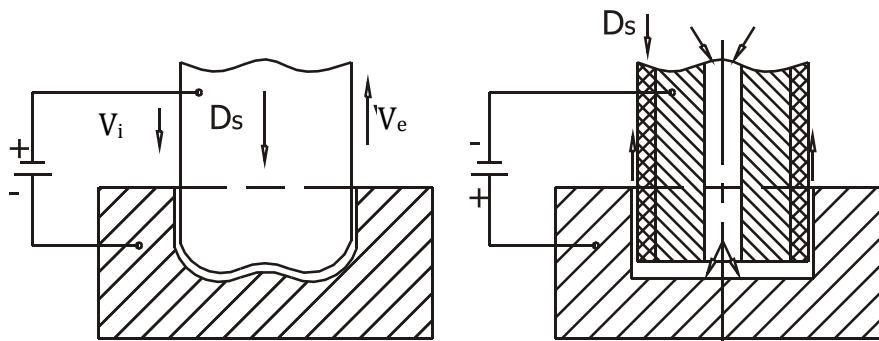


Рисунок 5.4 – Загальна схема електрохімічного прошивання порожнин та отворів

За схемою електрохімічного прошивання виготовляють робочі порожнини штампів, прес-форм, отвори, пази, вирізають профільні заготовки, а також обробляють пера лопаток турбін (рисунок 5.5).

До схеми прошивання відносять отримання отворів струминним методом (рисунок 5.6). Електрод-інструмент складається з корпусу 3 з ізоляційного матеріалу та струмопідводу 1, омивається потоком електроліту. Струмопідвід знаходиться всередині корпусу 3. Електроліт створює струмопровідний канал між струмопідводом 1 та заготовкою 2.



У місці контакту рідини з оброблюваною поверхнею матеріал заготовки розчиняється, утворюючи заглиблення. Зі збільшенням глибини отвору корпус 3 зближують із заготовкою 2. Так отримують отвори діаметром 1,5...2 мм і вирізають контури деталей складної форми. Недолік методу – достатня продуктивність тільки при високих напругах.

При розрізанні заготовок (рисунок 5.7) інструментом слугує обертовий диск 1, який отримує рух подачі  $D_s$ . Зазор  $S$  зберігають постійним.

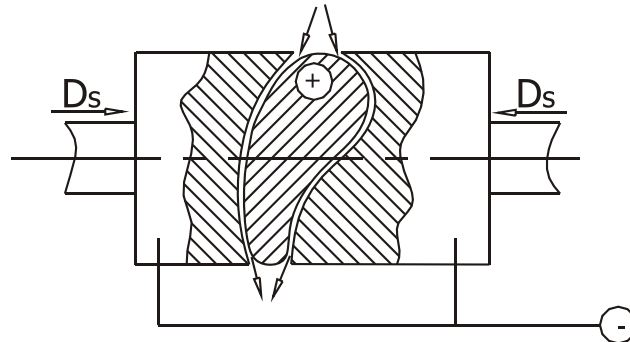
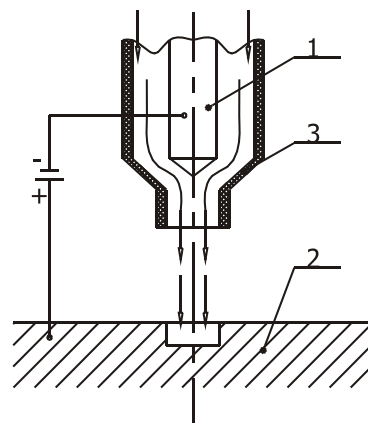
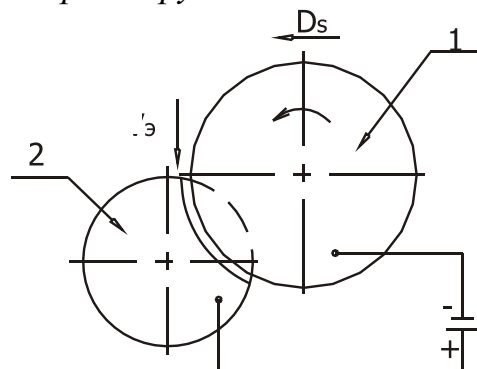


Рисунок 5.5 – Схема обробки пер лопаток турбін за допомогою електрохімічного прошивання



1 – струмопідвід; 2 – заготовка; 3 – корпус

Рисунок 5.6 – Схема електрохімічного прошивання отворів струминним методом



1 – обертовий диск; 2 – заготовка

Рисунок 5.7 – Схема електрохімічного розрізання заготовки

## ЛЕКЦІЯ 6. УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСОМ ЕЛЕКТРОХІМІЧНОЇ ОБРОБКИ МАТЕРІАЛІВ

*План.*

*1 Управління продуктивністю електрохімічної обробки матеріалів.*

*2 Управління точністю електрохімічної обробки матеріалів.*

*3 Управління якістю обробленої поверхні при електрохімічній обробці матеріалів.*

*4 Загальні відомості про електроліти та електроди-інструменти при електрохімічній обробці матеріалів.*

*5 Загальні переваги та недоліки електрохімічної обробки матеріалів.*

*СРС: обладнання для електрохімічної обробки матеріалів. Системи регулювання міжелектродного зазору. Системи подачі та очищення електроліту.*

*Література: [3, с. 117–168; 5, с. 49–53, с. 65–69].*

### *6.1 Управління продуктивністю електрохімічної обробки матеріалів.*

У технологічних схемах електрохімічного прошивання, розрізання, точіння, шліфування продуктивність електрохімічної обробки (ЕХО) матеріалів оцінюють швидкістю подачі інструменту  $V_i$ , (при електрохімічному поліруванні – середньою швидкістю розчинення металу  $V_{сер}$ ):

$$V_i = \frac{\eta \cdot \varepsilon \cdot \chi \cdot U}{\rho \cdot S}, \text{ м/с}$$

де  $\eta$  – вихід за струмом;

$\varepsilon$  – електрохімічний еквівалент матеріалу, кг/(А·с);

$\chi$  – питома електрична провідність, См/м;

$U$  – електрична напруга, В;

$\rho$  – щільність матеріалу, кг/м<sup>3</sup>;

$S$  – міжелектродний зазор, мм.

**Вихід за струмом  $\eta$**  являє собою відношення дійсної та теоретично очікуваної кількості розчиненого матеріалу і характеризує частку корисного використання електричного струму (частина струму витрачається на вторинні реакції). Вихід за струмом залежить від щільності струму, матеріалу заготовки, швидкості прокачування,

температури та залуженості електроліту та ін. Вихід за струмом визначається експериментально і коливається від 0,6 до 1,35 (якщо процес ЕХО здійснюється у середовищі нітрату натрію, то для більшості сталей  $\eta = 0,6...0,7$ , для алюмінієвих сплавів  $\eta = 1,1...1,35$ , що пояснюється розчиненням алюмінієвого сплаву у лужних продуктах реакції).

**Електрохімічний еквівалент**  $\varepsilon$  визначає кількість металу, що розчинився з анода за одиницю часу при проходженні через електроліт електричного струму  $I$  силою 1 А:

$$\varepsilon = \frac{A \cdot m}{F},$$

де  $A$  – атомна маса;

$m$  – валентність;

$F = 96500$  – число Фарадея.

Кількісні значення  $\varepsilon$  для різних матеріалів наводяться у довідковій літературі. Наприклад, для сталі 45  $\varepsilon = 0,22$ ; для жароміцних сплавів  $\varepsilon = 0,29$ ; для алюмінієвих сплавів  $\varepsilon = 0,092$ . Електрохімічний еквівалент оброблюваного матеріалу  $\varepsilon$  не залежить від його основних фізико-механічних характеристик (твердості, в'язкості, теплостійкості).

**Питома електрична провідність**  $\chi$  залежить від типу і складу електроліту, концентрації та температури. Зі збільшенням концентрації значення  $\chi$  зростає, досягаючи максимуму, а потім знижується. Останнє пояснюється зниженням рухливості іонів за рахунок їхнього взаємного тяжіння при збільшенні концентрації. Для хлориду натрію найбільша питома електрична провідність досягається при концентрації 250 г/л, для хлориду калію – при 210 г/л. Для збільшення швидкості розчинення використовують електроліти з підвищеною електричною провідністю, а для підвищення точності обробки – електроліти зі зниженою провідністю.

Для інтенсифікації анодного розчинення необхідно підвищити **напругу на електродах**. Однак при напрузі понад 15...18 В починають зростати втрати у приелектродних шарах – підведена потужність зростає швидше, ніж корисна. Крім того, зі збільшенням напруги знижується точність обробки за рахунок розчинення металу на ділянках заготовки, віддалених від зони обробки. При напрузі понад 30 В можуть виникати пробої міжелектродного зазору. Для більшості схем ЕХО  $U = 9...18$  В, для розрізання заготовок –  $U = 25...30$  В, для шліфування –  $U = 6...8$  В. При струминному методі обробки  $U = 100...800$  В.

Швидкість анодного розчинення підвищується зі зменшенням **міжелектродного зазору**  $S$ . Однак зі зменшенням зазору ускладнюється процес регулювання анодного розчинення, зростає опір прокачуванню електроліту, може статися пробій, що викликає пошкодження оброблюваної поверхні. Через газонаповнення при малих зазорах

знижується швидкість анодного розчинення. Розмір  $S$  має відповідати оптимальним швидкості зйому металу і точності формоутворення.

Для ЕХО отворів, невеликих порожнин, лопаток газотурбінних двигунів, при розрізанні заготовок величина зазору дорівнює  $S = 0,1...0,3$  мм; для ЕХО великих порожнин, лопаток енергетичних машин, електрохімічного точіння  $S = 0,3...0,5$  мм, при струминному методі обробки  $S = 1...15$  мм, у випадку нерухомих електродів на початку процесу  $S = 0,1...0,3$  мм.

Продуктивність обробки при нерухомих електродах (середня швидкість розчинення) в залежності від припуску та початкового міжелектродного зазору становить  $V_{\text{сер}} = 0,001...0,01$  мм/с.

При електрохімічному прошиванні, точінні та шліфуванні на врізання швидкість подачі інструмента становить  $V_1 = 0,005...0,1$  мм/с.

## **6.2 Управління точністю електрохімічної обробки матеріалів.**

**Точність розмірів** та форми деталі при електрохімічній обробці (ЕХО) залежить від похибки електрода-інструменту, величини і нерівномірності припуску на обробку, стабільності процесу анодного розчинення по оброблюваній поверхні, точності обладнання.

### **Шляхи підвищення точності ЕХО матеріалів:**

- 1) посилення вимог до точності розмірів та форми електрода-інструменту;
- 2) підтримання оптимального міжелектродного зазору;
- 3) вібрації електродів, під впливом яких швидше переміщується рідина від оброблюваної поверхні, прискорюється видалення продуктів обробки та підведення чистого електроліту до зони анодного розчинення.
- 4) локалізація анодного розчинення за рахунок діелектричних покриттів деталі або електрода-інструменту, що обмежують проходження струму через ділянки заготовки, прилеглі до оброблюваної.

**Похибки** (показники точності) оброблених поверхонь після ЕХО складають:

- при обробці нерухомими електродами зі зйомом за глибиною до 0,2 мм – похибка не більше 0,02 мм;
- при виготовленні пера лопаток турбін – похибка 0,1...0,6 мм;
- при прошиванні дрібних отворів (діаметром до 2 мм) – точність за 9...10-им квалітетом;
- при обробці порожнин та розрізанні деталей – точність за 12...14-им квалітетом;
- при електрохімічному точінні – точність за 8...10-им квалітетом;
- при електрохімічному шліфуванні металевими кругами – точність за 6...7-им квалітетом.

### 6.3 Управління якістю обробленої поверхні при електрохімічній обробці матеріалів.

**Мікрорельєф обробленої поверхні** при електрохімічній обробці (ЕХО) залежить від електричних параметрів режиму ЕХО, складу, температури і швидкості прокачування електроліту, структури матеріалу заготовки, вихідної шорсткості поверхні. Для зниження шорсткості обробленої поверхні підвищують щільність електричного струму, використовують імпульсний струм, стабілізують параметри електроліту та його гідродинамічний режим, використовують охолоджені електроліти.

Для більшості матеріалів зі збільшенням щільності електричного струму  $j$  шорсткість обробленої поверхні знижується.

При  $j \geq 0,15 \dots 0,2 \frac{A}{мм^2}$  шорсткість обробленої поверхні залишається практично постійною. При високій щільності струму прискорене розчинення може спостерігатися не по межах, а по самому зерну, на якому утворюються місцеві заглиблення, що визначають шорсткість обробленої поверхні.

Чим нижчою є температура електроліту, тим меншою буде висота нерівностей (при тій же щільності електричного струму), але нижчою буде і швидкість розчинення металу. У більшості випадків використовують електроліти з температурою 17...37 °С.

При ЕХО в електролітах на основі хлориду натрію шорсткість обробленої поверхні конструкційних сталей становить  $R_a = 0,1 \dots 0,32$  мкм, корозійно-стійких сталей та сплавів –  $R_a = 0,32 \dots 1,25$  мкм, титанових сплавів –  $R_a = 1,25 \dots 2,5$  мкм, алюмінієвих сплавів –  $R_a = 0,63 \dots 2,5$  мкм.

У порівнянні з механічною обробкою ЕХО забезпечує меншу шорсткість обробленої поверхні, відсутність слідів обробки, плавний профіль вершин виступів, ізотропність мікрорельєфу.

При стабільних параметрах процесу ЕХО шорсткість обробленої поверхні практично не змінюється і залежить від структури оброблюваного матеріалу (наприклад, від величини зерна). Зерна металу, як правило, розчиняються повільніше, ніж міжкристалічні проміжки, тому між зернами виникають заглиблення, які і визначають шорсткість (міжкристалітне розтравлення). Шорсткість обробленої поверхні крупнозернистих сплавів зазвичай вища, ніж дрібнозернистих.

Після ЕХО, на відміну від механічної обробки, відсутній наклеп поверхневого шару матеріалу (твердість не змінюється).

**Залишкові напруження у поверхневому шарі** обробленого матеріалу після ЕХО підвищуються внаслідок міжкристалітного розтравлення, оскільки малий радіус заокруглення міжкристалічних заглиблень сприяє концентрації напружень. Для зменшення напружень

у поверхневому шарі підвищують щільність електричного струму, стабілізують параметри та гідродинамічний режим електролізу.

При ЕХО титанових сплавів з малими швидкостями прокачування електролізу має місце наводнювання поверхні заготовки, що підвищує крихкість та знижує втому міцність матеріалу. Цього явища можна уникнути за рахунок підвищення швидкості прокачування електролізу.

У нікелевих, титанових та інших сплавів, схильних до міжкристалічного розтріскування, межа міцності на розтяг та межа витривалості після ЕХО знижуються порівняно з механічно обробленими матеріалами на 10...15 %, тому для високонавантажених деталей після ЕХО необхідно видалення припуску на глибину розтріскування (для нікелевих сплавів – не менше ніж на 0,15 мм, для титанових – не менше ніж на 0,3 мм).

Основним методом підвищення механічних властивостей матеріалів після ЕХО є полірування.

#### ***6.4 Загальні відомості про електроліти та електродо-інструменти для електрохімічної обробки матеріалів.***

***Електроліти*** для електрохімічної обробки (ЕХО) матеріалів підбирають в залежності від оброблюваного матеріалу.

##### ***Вимоги до електролітів в процесі ЕХО:***

1) висока електропровідність при помірній концентрації розчинених у воді компонентів; забезпечення максимального зйому оброблюваного металу за рахунок електрохімічних процесів; відсутність у складі електролізу солей, що утворюють при розчиненні катіони;

2) забезпечення мінімальної пасивації поверхні і, як наслідок, - максимальний вихід за струмом;

3) добре розчинення продуктів реакцій;

4) низька в'язкість, що покращує проникнення електролізу до зони обробки, підсилює тепло- та масообмін;

5) безпека для людини та навколишнього середовища,

6) низька вартість.

У якості основи електролізу використовують воду з розчиненими солями калію або натрію (нітратами, нітритами, карбонатами, сульфатами, фосфатами; у окремих випадках – основами цих солей). До складу електролізу можуть входити антикорозійні добавки та поверхнево-активні речовини (ПАР).

Матеріали електродів-інструментів для ЕХО повинні характеризуватися корозійною стійкістю, високою електропровідністю, хорошим опором місцевим руйнуванням при коротких замиканнях, високою адгезією до діелектричних покриттів, достатньою механічною міцністю та оброблюваністю, низькою вартістю.

Найбільш повно цим вимогам задовольняють мідь, мідні сплави, корозійно-стійкі сталі, меншою мірою – титанові сплави. Мідь та мідні сплави мають високу електропровідність, задовільну адгезію до покриттів, достатню механічну міцність. Головний недолік мідних електродів-інструментів – висока чутливість до коротких замикань, при яких виплавляються великі ділянки робочої поверхні, що ускладнює їхнє відновлення. Для литих електродів-інструментів використовують латунь або бронзу. Електроди-інструменти підвищеної міцності виготовляють з корозійно-стійких сталей (наприклад, зі сталі 12Х18Н9Т).

### ***6.5 Загальні переваги та недоліки електрохімічної обробки матеріалів.***

***Електрохімічна обробка (ЕХО)*** матеріалів характеризується такими загальними перевагами:

- 1) відсутність механічного контакту інструмента з оброблюваною деталлю та вібрацій, у зв'язку з чим можлива обробка нежорстких деталей та деталей з крихких матеріалів;
- 2) висока продуктивність процесу у порівнянні з іншими електрофізичними методами обробки;
- 3) відсутність впливу твердості, крихкості, вязкості оброблюваних матеріалів на продуктивність обробки;
- 4) фактична відсутність слідів інструменту на обробленій поверхні, зносу інструменту та нагрівання деталі;
- 5) відсутність зміцнення матеріалу в результаті ЕХО, що виключає подальший відпал або нормалізацію;
- 6) безшумність обробки;
- 7) безпека напруги використовуваного електричного струму;
- 8) можливість обробки важкодоступних та складнопрофільних поверхонь, порожнин, прорізів;
- 9) відсутність вимог до високої кваліфікації робітників.

#### ***Недоліки електрохімічної обробки (ЕХО):***

- 1) неможливість обробки неелектропровідних матеріалів;
- 2) відносно невисока точність обробки;
- 3) повторення мікропрофілю поверхні заготовки у разі, якщо ЕХО виконується після механічної обробки;
- 4) корозія оброблених деталей у електроліті з водних розчинів солей;
- 5) труднощі з утилізацією шламу;
- 6) додаткові витрати на спеціальну вентиляцію, знешкодження шкідливих відходів, корозійностійке обладнання.

## ЛЕКЦІЯ 7. ЕЛЕКТРОХІМІЧНЕ АЛМАЗНЕ ЗАГОСТРЕННЯ ІНСТРУМЕНТУ

*План.*

*1 Загальна характеристика електрохімічного алмазного загострення інструменту.*

*2 Алмазні загострювальні круги та електроліти для електрохімічного алмазного загострення інструменту.*

*3 Загальні переваги та недоліки електрохімічного алмазного загострення інструменту.*

*СРС:* обладнання для електрохімічного алмазного загострення інструменту.

*Література:* [5, с. 153–157, 6, с. 24–28; 7, с. 26–61].

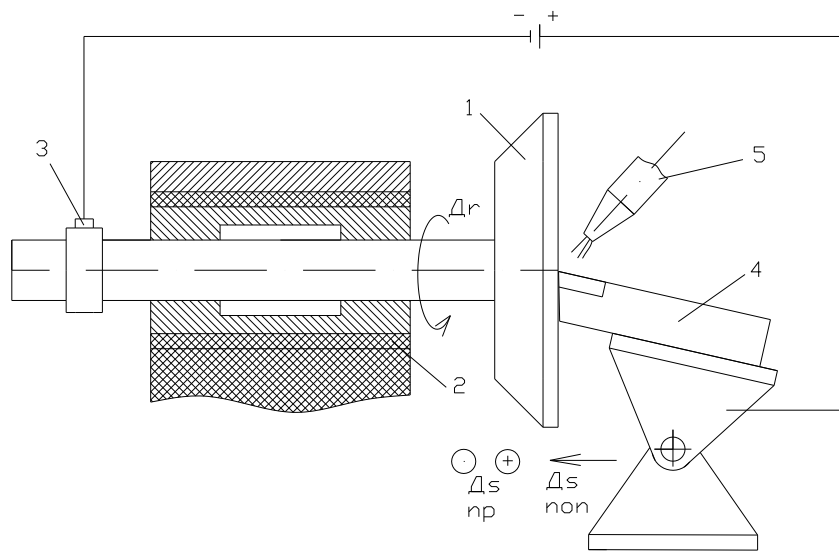
### *7.1 Загальна характеристика електрохімічного алмазного загострення інструменту*

*Електрохімічним алмазним загостренням (ЕХАЗ) інструменту* називають комбінований спосіб обробки, при якому зйом матеріалу з загострюваного інструменту здійснюється за рахунок комбінації процесів мікрорізання алмазними зернами загострювального круга, електрохімічного анодного розчинення та електричної ерозії. Абразивний, електрохімічний та електроерозійний процеси зйому матеріалу проходять одночасно, складові процеси є взаємопов'язаними та суттєво впливають один на одного.

У технологічній схемі ЕХАЗ інструментом слугує алмазний загострювальний круг на електропровідній зв'язці. Робочий зазор між зв'язкою круга та оброблюваною поверхнею підтримується за допомогою алмазних зерен, які виступають на певну висоту над зв'язкою. У якості електролітів використовуються водні слабкокцентровані розчини солей натрію, калію та деяких інших металів з добавками речовин, що перешкоджають розвитку корозії та кристалізації.

Загальна схема електрохімічного алмазного загострення (ЕХАЗ) інструменту наведена на рисунку 7.1. Алмазний загострювальний круг *1* встановлюють на шпинделі, ізольованому від інших елементів верстата діелектричною втулкою *2*. Через ковзаючий контакт *3* алмазний круг підключають до негативного полюса джерела постійного струму (катода), а загострюваний інструмент *4* – до позитивного полюса (анода). У зону обробки за допомогою патрубку *5* подається електроліт, який заповнює зазор між зв'язкою та оброблюваною поверхнею, утвореною виступаючими зі зв'язки алмазними зернами. Круг отримує обертальний головний рух різання  $D_r$ , осцилююче зворотно-поступальне переміщення





1 – алмазний загострювальний круг; 2 – діелектрична втулка;  
3 – ковзаючий контакт; 4 – загострюваний інструмент; 5 – патрубков

Рисунок 7.1 – Загальна схема електрохімічного алмазного загострення (ЕХАЗ) інструменту

паралельно до оброблюваної поверхні (рух поздовжньої подачі  $D_{s_{\parallel}}$ ) та переміщення у напрямку, нормальному до оброблюваної поверхні (рух поперечної подачі  $D_{s_{\perp}}$ ).

**Поперечна подача** може здійснюватися за схемами глибинного та врізного шліфування. При глибинному шліфуванні весь припуск знімається за один хід. При врізному шліфуванні припуск знімається за кілька ходів, а круг або оброблювана деталь отримують непереривний рух у напрямку, перпендикулярному до оброблюваної поверхні.

**Основні процеси**, що відбуваються при ЕХАЗ інструменту:

- **анодне розчинення** з утворенням оксидних плівок з продуктів розчинення;
- **мікрорізання** та зйом оксидних плівок;
- **електроерозійні процеси**.

Алмазні зерна втискаються у оброблюваний матеріал на величину, яка визначається притисканням круга до деталі. Глибина втискання зерен зазвичай перевищує товщину оксидних плівок, тому поряд з видаленням продуктів анодного розчинення зерна круга здійснюють зрізання шару металу, лише частково підданого анодному розчиненню. Витрати енергії на зрізання оброблюваного матеріалу при ЕХАЗ твердосплавного інструменту є помітно меншими, ніж при традиційному загостренні, що зумовлено зменшенням енергомісткості зрізання та зміною структури загострюваного твердого сплаву в результаті послаблення зв'язку між зернами карбідів, зумовленого більш швидким розчиненням

кобальтової зв'язки. Відтак, падає температура у зоні різання та зменшується знос інструменту.

**Електроерозійні процеси** з іскровим розрядом, виникають у результаті пробою міжелектродного зазору в місцях найбільшого зближення та контакту мікронерівностей зв'язки алмазного круга та поверхні оброблюваної деталі. Електроерозійні процеси покращують різальні властивості круга. Під впливом іскрових розрядів вигорає стружка, що залишилася на поверхні круга, алмазні зерна оголюються та виступають зі зв'язки на більш помітну висоту. Однак надмірне збільшення інтенсивності ерозійних процесів призводить до збільшення зносу круга та погіршення якості обробленої поверхні. Інтенсивність ерозії залежить від напруги джерела електричного струму. Для попередження надмірної ерозії робоча напруга не повинна перевищувати 7 В. Мінімальна напруга, необхідна для анодного розчинення, дорівнює 3 В. Напругу зменшують при спільній обробці твердого сплаву та сталі (загострення напайних різців), оскільки тоді збільшується імовірність замикання електродів сталеву стружкою. Напругу збільшують при збільшенні зернистості загострювальних кругів, оскільки збільшується міжелектродний проміжок та зменшується імовірність його пробою.

**Управління процесом ЕХАЗ** інструменту можливе за рахунок зміни щільності електричного струму  $i$ :

$$i = \frac{I}{S},$$

де  $I$  – сила струму;

$S$  – площа обробки.

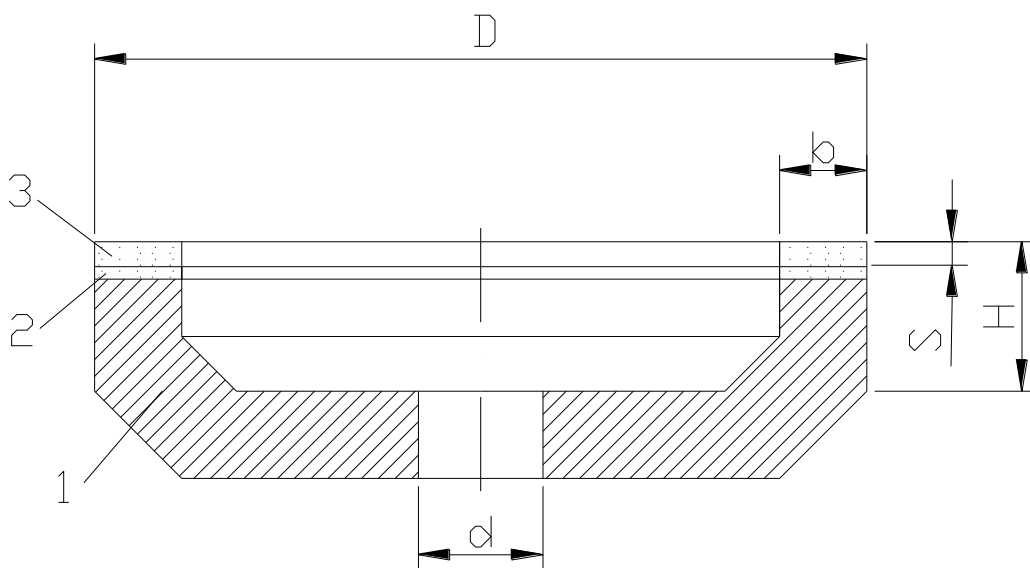
При вірно підібраній напрузі щільність струму  $i$  не повинна перевищувати 50...80 А/см<sup>2</sup>.

Можливо виконати електрохімічне алмазне загострення (ЕХАЗ) інструменту з безперервним правленням алмазних кругів. Воно здійснюється за тих же умов, що і звичайне ЕХАЗ, але деталь підключають до катода. У цьому випадку анодному розчиненню підлягає зв'язка алмазного круга, що сприяє оголенню алмазних зерен та покращенню різальних властивостей круга. Однак поверхня круга при цьому швидко вкривається плівками оксидів, струм електролізу зменшується, що призводить до зменшення правлячого ефекту.

## **7.2 Алмазні загострювальні круги та електроліти для електрохімічного алмазного загострення інструменту.**

**Електрохімічне алмазне загострення** (ЕХАЗ) твёрдосплавних інструментів виконується електропровідними алмазними кругами

у вигляді диска, на периферії або торці яких закріплюється алмазозносний шар. Конструкція алмазного круга для ЕХАЗ твердосплавного інструменту наведена на рисунку 7.2. Корпус 1 круга виготовляють зі сталі або дюралюмінію. Алмазозносний шар 3 отримують змішуванням алмазних зерен та компонентів зв'язки та спеченням їх у спеціальних прес-формах методом порошкової металургії. Між алмазозносним шаром та корпусом може бути розташований перехідний шар 2, що складається з металевих порошків та наповнювачів у вигляді абразивних матеріалів – карбїду кремнію або електрокорунду.



1 – корпус; 2 – перехідний шар; 3 – алмазозносний шар

Рисунок 7.2 – Конструкція алмазного круга для ЕХАЗ твердосплавного інструменту

За формою розрізняють плоскі, чашкові круги та алмазні круги різних модифікацій. Кожна форма має низку типорозмірів. До основних розмірів кругів відносять зовнішній діаметр  $D$ , висоту  $H$ , діаметр  $d$  отвору, товщину  $S$  алмазозносного шару. Вибір форми та розмірів круга залежить від виконуваної операції та обладнання.

**Алмазні круги для ЕХАЗ твердосплавного інструменту** виготовляють із синтетичних алмазів марок АС4, АС6.

**Зернистість** алмазних кругів характеризує розмір зерна, прийнятий для виготовлення круга. У характеристиці круга зернистість вказується дробом. Чисельник дробу вказує розмір чарунки сита (мкм), через яку зерно проходить, знаменник – розмір чарунки сита, на якому зерно залишається при просіюванні. При ЕХАЗ твердосплавного інструменту використовують круги з розміром зерна 100/80, 80/63, 63/50. Збільшення розміру зерна призводить до надмірного збільшення міжелектродного

зазору та зниження ефективності анодного розчинення. Зменшення розміру зерна призводить до зменшення зазору, що збільшує інтенсивність явищ ерозії, підвищує знос алмазних кругів та погіршує якість обробленої поверхні.

**Концентрація** алмазів у алмазозносному шарі характеризує об'ємний вміст алмазів. Концентрації 100 % відповідає такий вміст алмазного порошку, при якому він займає 25 % об'єму алмазозносного шару. Збільшення концентрації збільшує число різальних зерен у шарі, але зменшує міцність їхнього закріплення. При ЕХАЗ твердосплавного інструменту найкращі результати отримані для кругів зі 100 %-ою концентрацією алмазів.

**Зв'язка** – важливий фактор, що визначає різальні властивості та зносостійкість алмазних кругів. Для ЕХАЗ твердосплавного інструменту використовують круги з металевими зв'язками двох типів:

1) **бронзова зв'язка** М1 та її модифікації МК, МІ, МКІ, МС6. Основу цих зв'язок складають порошки міді, олова та наповнювачі (карбід кремнію, електрокорунд). Бронзові зв'язки характеризуються високою міцністю утримання алмазного зерна, але при контакті з оброблюваною поверхнею зв'язка, маючи підвищену пластичність, затулює алмазні зерна, «засолує» круг, різальні властивості круга при цьому погіршуються. Введення наповнювача у бронзову зв'язку робить її більш крихкою, зменшуючи «засолування»;

2) **зв'язки на основі алюмінію, цинку, магнію** МВ1, ТМ2, М013, М5, що утримують зерно менш міцно, ніж бронзові зв'язки, але різальні властивості круга при цьому значно кращі. Зв'язки цього типу дозволяють обробляти тверді сплави разом зі сталевим тримачем напайних різців.

Поряд з кругами на металевих зв'язках для ЕХАЗ використовують круги на органічних зв'язках з металевим наповнювачем типу Т02, Б156 та ін. Ці зв'язки швидше зношуються, ніж металеві, але мають кращі різальні властивості та дають кращу якість обробленої поверхні.

Для ЕХАЗ інструменту зі швидкорізальної сталі використовують загострювальні круги з ельбору на металевій зв'язці. Ельбор має дещо меншу твердість, ніж алмаз, зате хімічно стійкий до заліза. Для ЕХАЗ використовують ельборові круги з зерном високої міцності Л. В залежності від вимог до шорсткості обробленої поверхні використовують ельборові круги зернистістю 80/63, 100/80, 125/100, 160/125, 200/160.

Приклад умовного позначення алмазного круга представлений на рисунку 7.3.

Вибір електроліту для ЕХАЗ інструменту визначається властивостями оброблюваного матеріалу. До електролітів висувають наступні вимоги:



Рисунок 7.3 - Приклад умовного позначення алмазозного круга

- 1) забезпечення інтенсивного анодного розчинення оброблюваного матеріалу;
- 2) відсутність шкідливого впливу на здоров'я робітника
- 3) відсутність корозійного впливу на деталі верстата та оброблювані деталі.
- 4) дешевизна та універсальність.

При ЕХАЗ твердих сплавів зазначеним вимогам задовольняють водні розчини нейтральних солей – нітриту та нітрату натрію або калію. Нітриту натрію та калію є, крім того, інгібіторами корозії. Разом з нітритом натрію у складі електролітів у якості антикорозійної присадки вводять кальциновану соду.

Найбільш поширеними електролітами є наступні:

- 1) нітрат натрію  $NaNO_3$  – 5 %, нітрит натрію  $NaNO_2$  – 0,3 %, сода  $Na_2CO_3$  – 0,5 %, гліцерин – 1 %, решта – вода;
- 2) нітрит натрію  $NaNO_2$  – 0,8%, – сода  $Na_2CO_3$  – 1,2 %, решта – вода;
- 3) нітрат калію  $KNO_3$  – 5%, хлорид натрію  $NaCl$  – 5%, нітрит натрію  $NaNO_2$  – 1%, решта – вода.

Електроліти 1 та 2 використовують при обробці твердих сплавів, електроліт 3 – при обробці твердого сплаву спільно зі сталевим тримачем. Швидкість анодного розчинення при використанні електроліту 2 дещо менша, ніж при роботі з електролітами 1 та 3, але електроліт 2 має кращі антикорозійні властивості.

Швидкість подачі електроліту до зони обробки становить від 2 до 10 л/хв в залежності від перетину оброблюваного інструменту. Об'єм ємності для електроліту становить 50...80 літрів; ємність оснащується перегородкою для покращення відстоювання шлама. Система

підведення електроліту включає центрифугу, яка прискорює очищення електроліту від шламу. Електроліт замінюють після 150...200 годин роботи.

### ***7.3. Загальні переваги та недоліки електрохімічного алмазного загострення інструменту.***

Технологія електрохімічного алмазного загострення (ЕХАЗ) інструменту має наступні переваги у порівнянні з алмазним шліфуванням:

1) висока швидкість зйому оброблюваного матеріалу, що досягає 600...800 мм<sup>3</sup>/хв; підвищення продуктивності у порівнянні з алмазним шліфуванням становить від 2 до 6 разів (і навіть 10...50 разів в залежності від оброблюваного матеріалу);

2) можливість одночасної та почергової обробки різнорідних матеріалів без зміни круга (наприклад, одночасної обробки твердосплавної пластини та сталевого тримача);

3) висока якість обробленої поверхні, відсутність мікротріщин, викришувань, фазових змін поверхневого шару, формування поверхневого шару без внутрішніх залишкових напружень або зі сприятливими напруженнями;

4) алмазний круг тривалий час зберігає різальні властивості.

***Недоліки електрохімічного алмазного загострення (ЕХАЗ) інструменту:***

1) ускладнені конструкція та обслуговування верстата;

2) додаткові витрати на модернізацію обладнання;

3) шкідливий вплив електролітів на обладнання;

4) після ЕХАЗ шорсткість обробленої поверхні, радіус округлення різальних кромки, неплотинність зазвичай вищі, ніж після алмазного шліфування; поверхневий шар товщиною 10...20 мкм має розтравлену структуру, і його знімають виходжуванням з вимкненим електричним струмом за 3...4 ходи.

## ЛЕКЦІЯ 8. ПЛАЗМОВА ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ

*План.*

*1 Загальна характеристика плазмової обробки матеріалів.*

*2 Типи плазмотронів.*

*3 Різновиди плазмової обробки матеріалів.*

*СРС: обладнання для плазмової обробки матеріалів. Системи подачі робочого газу. Системи охолодження.*

*Література: [2, с. 150–170; 5, с. 142–152].*

### *8.1 Загальна характеристика плазмової обробки матеріалів.*

*Плазмовою обробкою* називають технологічний метод обробки, при якому для видалення матеріалу використовується струмінь іонізованого газу (плазми).

*Плазмою* називають такий стан речовини, у якому разом з нейтральними та збудженими молекулами і атомами присутні заряджені частинки – іони та електрони. Стан плазми властивий для будь-якої речовини, нагрітої до високої температури.

При переході речовини з твердого стану у рідкий та з рідкого у газоподібний збільшується кінетична енергія молекул і атомів речовини, послаблюються і руйнуються енергетичні зв'язки не тільки між ними, а й між елементарними частинками, що входять до складу атомів (ядрами та електронами). Газ іонізується – стає сумішшю нейтральних атомів, вільних електронів, позитивно заряджених іонів. Стан речовини у формі іонізованого газу (плазми) називають **четвертим агрегатним станом речовини** (три інші агрегатні стани – твердий, рідкий та газоподібний).

Перехід речовини з газоподібного стану у стан плазми відбувається поступово. При температурі 3000...5000 °С у газі з'являється незначна кількість заряджених частинок. При температурі 5000...10000 °С кількість заряджених частинок досягає кількох відсотків від загального числа частинок, а при температурі 30000...50000 °С – майже 100 %, тобто газ повністю іонізується. Найпростіший спосіб переведення газу у стан плазми – збудження у ньому електричних розрядів. Стан плазми виникає і при тліючому, і при дуговому, і при іскровому розряді. Температура плазми залежить від виду розряду.

При тліючому розряді температура є настільки низькою, що не нагріває скільки небудь суттєво електрони і судини, у яких збуджуються розряди. Такий вид розряду виникає, наприклад, у струмових лампах.

При дуговому розряді у газі температура плазми досягає 5000...50000 °С, при іскровому вона є на порядок вищою. Для плазмової обробки іонізований газ (плазму) збуджують, нагріваючи будь-якої робочий газ в умовах дугового розряду.

**Властивості плазми:**

1) **висока електропровідність**, що дозволяє керувати плазмою за допомогою магнітних полів;

2) **висока швидкість частинок, що утворюють плазму** (наприклад, при тиску газу 0,2...0,3 МПа та силі електричного струму дуги 400...500 А швидкості іонізованих частинок у струмені доходять до 15000 м/с);

3) **висока температура плазми**. У технологічних цілях використовують, як правило, низькотемпературну плазму, що являє собою частково іонізований газ з температурою  $10^3 \dots 10^5$  °С

Плазма знаходить технологічне використання, перш за все у процесах, що вимагають **високотемпературного концентрованого нагрівання значних зон матеріалу заготовки**. У результаті впливу плазмового струменю на оброблюваний матеріал останній розігрівається у зоні обробки, потім розплавляється та частково випаровується. Розплавлений матеріал під дією кінетичної енергії плазмового струменю видаляється із зони обробки.

## 8.2 Типи плазмотронів

**Плазмотрон (плазмовий генератор, плазмова голівка)** – газорозрядний пристрій для отримання низькотемпературної плазми. Найбільш широкого поширення набули **дугові** та **високочастотні плазмотрони**.

У **дугових плазмотронах** нагрівання газу до необхідної температури здійснюється дуговим електричним розрядом. Розрізняють два типи дугових плазмотронів:

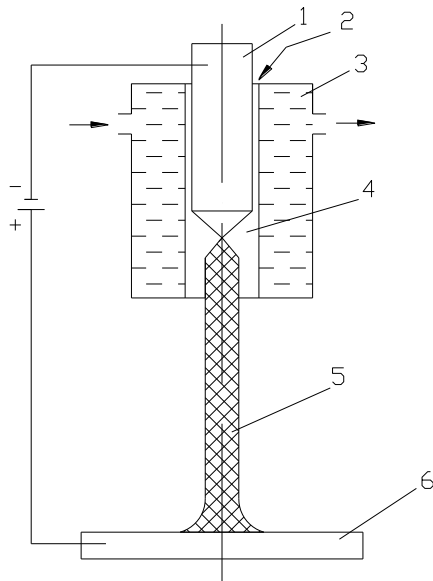
1) **плазмотрони прямої дії** (для створення зовнішньої плазмової дуги);

2) **плазмотрони непрямої дії** (для створення плазмового струменю).

У плазмотронах прямої дії дуговий розряд горить між катодом плазмотрона та оброблюваної заготовкою, що служить анодом (рисунок 8.1).

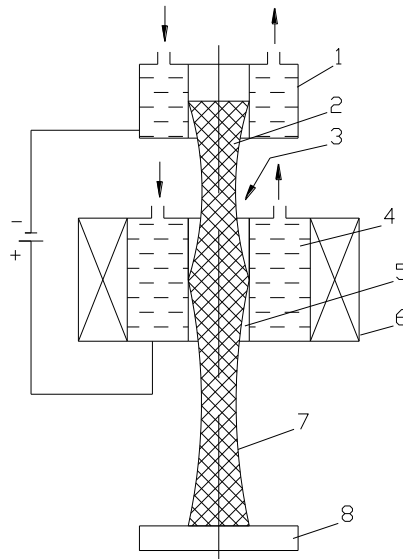
У плазмотронах непрямої дії дуговий розряд горить між тугоплавким катодом та водоохолоджуванім мідним анодом, виконаним у вигляді вузького кільця-сопла (рисунок 8.2). За допомогою **соленоїда у розрядній камері** плазмотрона створюється сильне магнітне поле, перпендикулярне до площини сопла, що змушує струмовий канал дуги безперервно





*1 – катод; 2 – плазмоутворюючий газ;  
 3 – водоохолоджуваний корпус плазмотрона; 4 – розрядна камера;  
 5 – плазмова дуга; 6 – анод (оброблювана заготовка)*

*Рисунок 8.1 – Загальна схема плазмотрона прямої дії*



*1 – водоохолоджуваний катод; 2 – плазмова дуга;  
 3 – плазмоутворюючий газ; 4 – водоохолоджуваний анод;  
 5 – розрядна камера; 6 – соленоїд; 7 – плазмовий струмінь;  
 8 – оброблювана заготовка*

*Рисунок 8.2 – Загальна схема плазмотрона непрямої дії*

обертатися, огинаючи анодне кільце, яке у іншому випадку розплавилася б. Робочий газ, що подається під тиском до розрядної камери, видуває дугу крізь сопло у вигляді плазмового струменю, який спрямовується на оброблювану заготовку.

У *дугових плазмотронах* робочий газ подається до *розрядної камери* за спіральними каналами, у результаті чого утворюється газовий вихор, що обдуває стовп дуги, і генерується плазмовий струмінь: шар більш холодного газу під дією відцентрових сил розташовується біля стінок камери, оберігаючи їх від контакту з дугою. Крім того, газовий потік стискає дугу та струмінь, збільшуючи щільність теплового потоку і його гідродинамічний напір. Проходячи крізь розрядну камеру, робочий газ нагрівається та іонізується. Температура плазми на зрізі сопла, в залежності від типу і режиму роботи плазмотрона, становить 3000...25000 °С.

У разі, якщо не потрібно сильного стиснення потоку плазми (наприклад, для плавлення металу), стабілізуючий газовий потік не закручують, спрямовуючи паралельно до стовпу дуги, і не обтискають соплом (катод розташовують на самому зрізі сопла).

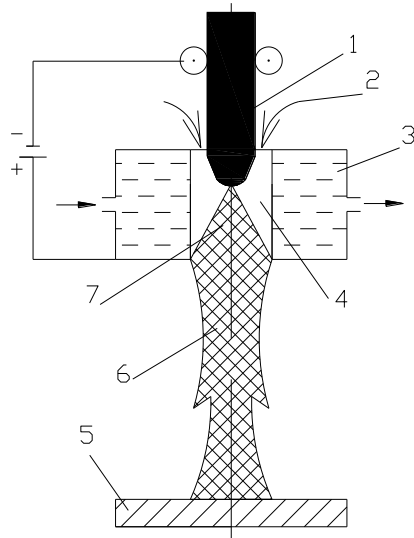
Плазма дугових плазмотронів неминуче містить частинки речовини електродів унаслідок *ерозії* електродів. Якщо процес ерозії електродів з технологічних міркувань є корисним, його інтенсифікують (такі плазмотрони називають *плазмотронами з витратними електродами*).

У інших випадках, навпаки, ерозію мінімізують, виготовляючи *електроди з тугоплавких матеріалів* (вольфраму, молібдену, спеціальних сплавів) та (або) охолоджуючи їх водою, що, до того ж, збільшує термін служби електродів.

*Плазмотрони з полум'яним струменем* зазвичай використовують при термічній обробці металів, при нанесенні покриттів, отриманні порошків з частинками сферичної форми, у плазмохімічній обробці тощо; *плазмотрони з зовнішньою дугою* слугують для обробки електропровідних матеріалів; *плазмотрони з витратними електродами* (рисунок 8.3) використовують при роботі у агресивних плазмоутворюючих середовищах (повітрі, воді та ін.) та при необхідності генерації металевої, вуглецевої та іншої плазми з матеріалу електродів (наприклад, при карботермічному відновленні руд).

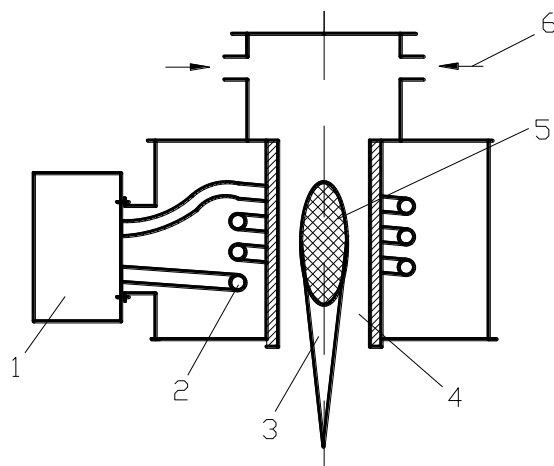
Потужність дугових плазмотронів становить  $10^2 \dots 10^7$  Вт; температура струменю на зрізі сопла – 3000...25000 К; швидкість витікання струменю –  $1 \dots 10^4$  м/с; промисловий ККД – 50...90 %; ресурс роботи (визначається ерозією електродів) досягає декількох сотень годин; у якості плазмоутворюючих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

*Високочастотний плазмотрон (ВЧ-плазмотрон)* (рисунок 8.4) включає: *електромагнітну котушку-індуктор* або *електроди, підключені до джерела високочастотної енергії, розрядну камеру, вузол*



1 – електрод (катод); 2 – плазмоутворюючий газ;  
 3 – електрод (анод); 4 – розрядна камера; 5 – оброблювана  
 заготовка; 6 – полум'яний струмінь; 7 – розряд

Рисунок 8.3 – Загальна схема дугового плазмотрона  
 з витратними електродами



1 – джерело електроживлення; 2 – індуктор; 3 – полум'яний  
 струмінь; 4 – розрядна камера; 5 – розряд; 6 – плазмоутворюючий газ

Рисунок 8.4 – Загальна схема високочастотного плазмотрона

**введення плазмоутворюючої речовини. Розрізняють індукційні, ємнісні, факельні плазмотрони, плазмотрони на коронному розряді, плазмотрони з високочастотною короною, а також надвисокочастотні плазмотрони (НВЧ-плазмотрони).**

Найбільшого поширення у техніці отримали **індукційні ВЧ-плазмотрони**, у яких плазмоутворюючий газ нагрівається вихровими

струмами. Оскільки індукційний високочастотний розряд є безелектродним, ці плазмотрони використовують для нагрівання активних газів ( $O_2$ ,  $Cl_2$ , повітря та ін.), парів агресивних речовин (хлоридів, фторидів та ін.), а також інертних газів, якщо до чистоти плазмового струменю висуваються високі вимоги. За допомогою індукційних ВЧ-плазмотронів отримують тонкодисперсні та особливо чисті порошкові матеріали на основі нітридів, боридів, карбідів та інших хімічних сполук. У плазмохімічних процесах об'єм розрядної камери таких плазмотронів може бути поєднаний з реакційною зоною (**плазмовий реактор**). Потужність індукційного ВЧ-плазмотрона досягає 1 МВт, температура у центрі розрядної камери та на початковій ділянці плазмового струменю –  $10^4$  К, швидкість витікання плазми – 0...103 м/с, частота – від декількох десятків тисяч герц до десятків МГц, промисловий ККД – 50...80 %, ресурс роботи – до 3000 годин. У **надвисокочастотних плазмотронах (НВЧ-плазмотронах)** робочі частоти складають тисячі та десятки тисяч МГц; у якості живлячих генераторів цих плазмотронів використовуються **магнетрони**.

У ВЧ-плазмотронах, як і у дугових, часто використовують газову «закрутку», що ізолює розряд від стінок камери. Це дозволяє виготовляти камери ВЧ-плазмотрона з матеріалів з низькою термостійкістю (наприклад, зі звичайного або органічного скла).

Для запуску плазмотрона, тобто збудження у ньому розряду використовують: **замикання електродів, підпал допоміжного дугового розряду, високовольтний пробій міжелектродного проміжку, інжекцію до розрядної камери плазми** та інші способи.

### **8.3 Різновиди плазмової обробки матеріалів**

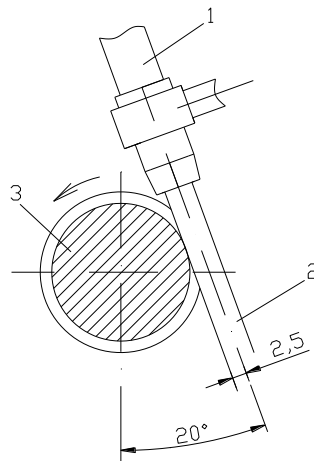
**Плазмова обробка** – обробка матеріалів низькотемпературною плазмою, що генерується дуговим або високочастотним плазмотроном. При плазмовій обробці змінюються форма та розміри заготовки, структура оброблюваного матеріалу або стан його поверхні. Плазмова обробка включає: **роздільне та поверхневе різання, нанесення покриттів, наплавлення, зварювання, руйнування гірських порід**.

Плазмова обробка набула широкого поширення внаслідок високої за промисловими стандартами температури плазми, великого діапазону регулювання потужності та можливості зосередження потоку плазми на певній ділянці оброблюваного виробу; при цьому ефекти плазмової обробки досягаються за допомогою як теплової, так і механічної дії плазми (під механічною дією плазми розуміють бомбардування виробу частинками плазми, що рухаються з дуже високою швидкістю – так званий швидкісний напір плазмового потоку). Питома потужність, що передається

до поверхні матеріалу плазмовою дугою, досягає  $10^5 \dots 10^6$  Вт/см<sup>2</sup>, у разі плазмового струменю вона становить  $10^3 \dots 10^4$  Вт/см<sup>2</sup>.

У той же час тепловий потік, якщо це необхідно, може бути розосереджений, забезпечуючи «м'яке» рівномірне нагрівання поверхні, яке використовується при наплавленні та нанесенні покриттів.

**Плазмове точіння** являє собою зйом поверхневих шарів матеріалу з циліндричних заготовок на токарному верстаті. Матеріал видаляється за схемою звичайної токарної обробки, але із застосуванням плазмового пальника замість різця. Загальна схема плазмового точіння наведена на рисунку 8.5.



1 – плазмотрон; 2 – плазмовий струмінь; 3 – оброблювана заготовка

Рисунок 8.5 – Загальна схема плазмового точіння

Ефективність процесу плазмового точіння залежить від положення плазмового пальника відносно оброблюваної деталі. Оптимальна відстань осі плазмового струменя від оброблюваної поверхні становить 2,5 мм; середнє віддалення сопла від оброблюваної поверхні – 10 мм; кут нахилу плазмового струменю – 20°. При таких умовах оплавлений метал повністю видаляється із зони обробки і досягається найвища якість обробки. Значне збільшення питомого зйому матеріалу у порівнянні з традиційною токарною обробкою отримано при плазмовому точінні жаростійких сталей та сплавів. Для обробки вуглецевих сталей, алюмінію, латуні використовувати цей спосіб недоцільно.

На продуктивність плазмового точіння найбільший вплив справляє подача, окружна швидкість обертання заготовки, струм дуги, висота встановлення пальника. Залежність зйому металу  $Q$  (кг/хв) від параметрів режиму різання визначається співвідношенням:

$$Q = \gamma \cdot v \cdot s \cdot t \cdot 10^{-6},$$

де  $\gamma$  – щільність оброблюваного матеріалу, кг/м<sup>3</sup>;

$v$  – швидкість різання, м/хв;

$s$  – подача, мм/об;

$t$  – глибина різання, мм;

Зі збільшенням струму дуги в діапазоні 400...700 А продуктивність плазмового точіння зростає.

Найбільший питомий зйом металу досягається при подачі  $s = 2,0...2,7$  мм/об та окружній швидкості обертання заготовки  $v = 15...20$  м/хв.

**Плазмова розрізання матеріалів** здійснюється стисненою плазмовою дугою, яка горить між анодом (розрізуваний матеріал) та катодом плазмового пальника або плазмовим струменем (дуга горить у соплі плазмового пальника між її електродами). Стабілізація та стиснення струмового каналу дуги, що підвищує її температуру, здійснюється соплом пальника та обдуванням дуги потоком плазмоутворюючого газу ( $Ar$ ,  $N_2$ ,  $H_2$ ,  $NH_4$  та їхні суміші). Для інтенсифікації розрізання матеріалів використовується хімічно активна плазма. Наприклад, розрізання повітряною плазмою  $O_2$ , окислюючи метал, створює додатковий енергетичний внесок у процес розрізання.

Плазмовий струмінь можна використовувати для різання різних матеріалів – тугоплавких металів (вольфрам, молібден, тантал та ін.), тугоплавких сполук (карбідів, силіцидів, оксидів та ін.), кольорових металів (мідь, алюміній), високолегованих сталей та сплавів, неметалевих та електронепровідних матеріалів (вогнетривка кераміка, скло, слюда, каміння та ін.). Плазмове розрізання листового матеріалу може бути ручним, механізованим та повністю автоматизованим. У останніх випадках обробка здійснюється за кресленням із використанням стежачої системи, або за допомогою програмного автоматизованого пристрою.

Ширина різу залежить від параметрів пальника, матеріалу і товщини листа. Наприклад, при розрізанні листа сталі товщиною 25 мм плазмовим пальником з продувкою повітря ширина різу становить близько 5 мм, поверхня різу – гладка, кромки – гострі.

Дані про режими плазмового розрізання різних матеріалів наведені у таблиці 8.1.

Плазмовий струмінь можна використовувати і при «**мікрообробці**» матеріалів. Для цього застосовують пальники невеликої потужності (50...500 Вт). Ними розрізають фольгу з різних матеріалів з шириною різу до 100 мкм, можуть отримувати отвори малих діаметрів до 55 мкм. «Мікрообробку» здійснюють плазмовими закритими пальниками.

Таблиця 8.1 – Режими плазмового розрізання різних матеріалів

| Матеріал                             | Товщина, мм | Швидкість різання, м/г | Струм, А | Напруга, В | Потужність, кВт | Витрата газу, л/хв | Робочий газ |
|--------------------------------------|-------------|------------------------|----------|------------|-----------------|--------------------|-------------|
| Мідь                                 | 10          | 60                     | 400      | 90         | 36              | 50                 | Аргон       |
|                                      | 40          | 10                     | 400      | 130        | 56              | 300                | +           |
|                                      | 80          | 5                      | 400      | 160        | 64              | 600                | Водень      |
| Корозійно-стійка (неіржавіюча) сталь | 10          | 80                     | 350      | 31         | 37              | 37                 | Аргон       |
|                                      | 50          | 15                     | 350      | 49         | 49              | 200                | +           |
|                                      | 120         | 40                     | 350      | 63         | 63              | 750                | Водень      |

При плазмовій «мікрообробці» з прецизійним соплом дуговий розряд збуджується в дуже малому об'ємі при високому тиску газу. Малий об'єм та висока щільність плазми досягаються внаслідок зменшення відстані між катодом та соплом до 1 мм і використання вольфрамових стрижневих катодів діаметром 1 мм. Невелика довжина електрода та охолодження електродотримача водою дозволяють високе струмове навантаження. Сопло має діаметр 50...100 мкм. Такі розміри і форма сопла, а крім того, високий тиск у катодному просторі дозволяють отримати плазму майже циліндричної форми, що витікає з сопла з надзвуковою швидкістю.

**Переваги розмірної плазмової обробки матеріалів:**

- 1) можливість обробляти практично будь-які відомі у природі матеріали;
- 2) висока продуктивність;
- 3) порівняно невелика зона термічного та хімічного впливу;
- 4) можливість механізації та автоматизації процесу.

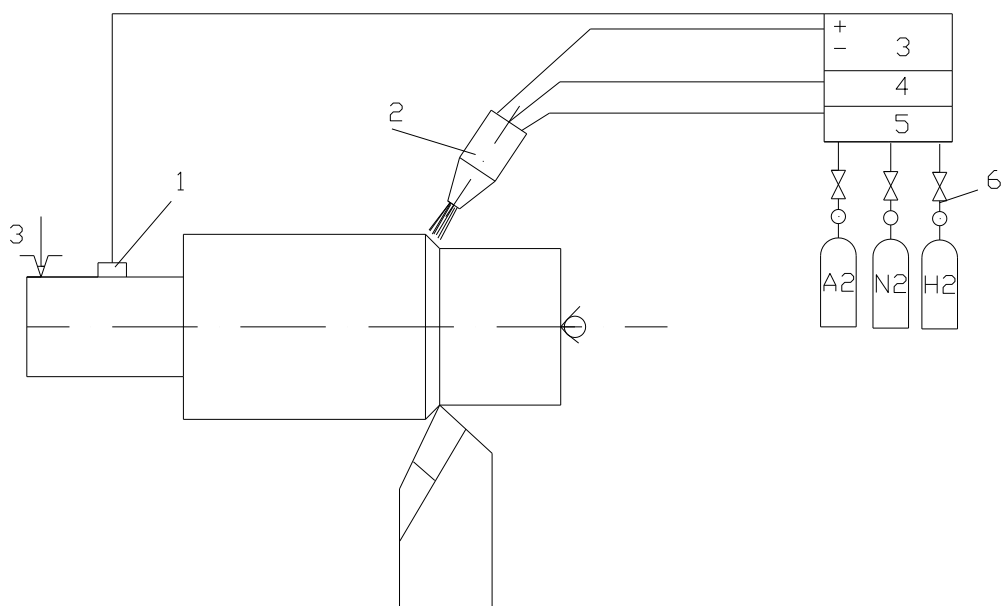
**Недоліки розмірної плазмової обробки матеріалів:**

- 1) відносна складність обладнання;
- 2) необхідність використовувати при обробці спеціальні гази, що збільшує вартість процесу обробки.

На сучасному етапі науково-технічного прогресу міцність, в'язкість та інші характеристики конструкційних матеріалів зростають настільки швидко, що наявні інструментальні матеріали у цілій низці випадків не дозволяють виконувати високопродуктивну обробку різанням. До того ж різання часто доводиться вести у екстремальних умовах – по кірці, по високоміцному наплавленню, при великому перетині зрізу тощо, що посилює технологічні складнощі. У зв'язку з цими особливостями сучасного виробництва в металообробці розвиваються технологічні методи, які передбачають підвищення ефективності процесу різання шляхом тимчасового зниження міцності оброблюваного матеріалу та зміни механізмів контактних процесів на робочих поверхнях інструменту.

До таких методів належить **обробка різанням з плазмовим нагріванням (плазмово-механічна обробка або ПМО матеріалів)**, що являє собою комбінований процес, при якому механічна енергія та енергія високотемпературної плазми разом використовуються для підвищення ефективності процесу різання при виготовленні деталей машин із сучасних важкооброблюваних матеріалів. При ПМО поверхневі

шари заготовки нагріваються плазмовим струменем до високих температур, близьких до температури плавлення металу, а потім видаляються різцем в пластичному стані (рисунок 8.6).



*1 – ковзаючий контакт; 2 – плазмовий пальник; 3 – джерело живлення;  
4 – система охолодження пальника; 5 – система подачі робочого газу;  
6 – система вентилів, манометрів і витратомірів*

*Рисунок 8.6 – Загальна схема плазмово-механічної обробки (ПМО) матеріалів*

Установка для ПМО монтується на базі універсального токарного верстата. На ній використовуються плазмові пальники 2 потужністю до 50 кВт з діаметром сопла 3 мм. Такі пальники дають можливість отримати щільність потужності до 7 ГВт/м<sup>2</sup>. Суміш аргону, азоту та водню (75 % Ar, 20 % N, 5 % H<sub>2</sub>) подається до пальника крізь систему подачі робочого газу 5 та систему вентилів, манометрів і витратомірів 6. Дуга запалюється від високочастотного пристрою запалювання. Спочатку запалюється допоміжна дуга між катодом та ввімкненим для цього у ланцюг у якості анода соплом пальника (використовується відкритий пальник). При підведенні пальника до оброблюваної поверхні загоряється головна дуга подачею більш високого потенціалу. Струм від джерела живлення 3 підводиться до оброблюваної заготовки за допомогою ковзаючого контакту 1, розташованого на патроні верстата або заготовки.

Обробка різанням в умовах попереднього нагрівання плазмовим струменем здійснюється твёрдосплавними або мінералокерамічними різцями.



Плазмовий струмінь для попереднього підігрівання використовують при обробці корозійно-стійких, кислотостійких та жароміцних сталей, кобальтових та нікелевих сплавів.

З підвищенням температури нагрівання сили різання значно знижуються. При температурі нагрівання  $T = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$  значення сил різання на всіх подачах знижуються в середньому на 24 % у порівнянні з обробкою при нормальній температурі, а при температурі нагрівання  $T = 800\text{ }^{\circ}\text{C}$  – в середньому на 45 %. При підвищених температурах оброблюваної поверхні швидкість різання на силу різання не впливає. З підвищенням температури нагрівання до  $T = 630\text{ }^{\circ}\text{C}$  об'єм матеріалу, що знімається за одиницю часу, може збільшитися до 45 %.

Нагрівання заготовки плазмовою дугою тягне за собою:

- 1) зниження міцності оброблюваного металу;
- 2) виникнення системи структурних перетворень і термічних змін у поверхневих шарах заготовки;
- 3) розплавлення частини металу, що підлягає зрізуванню;
- 4) зміну параметрів тертя на поверхнях контакту нагрітих металів заготовки та різального інструменту.

**Плазмове зварювання** використовує властивості плазмової дуги глибоко проникати у метал. Сприятлива форма утвореної ванни дозволяє зварювати досить товстий метал (10...15 мм) без спеціальної обробки крайок. Зварювання плазмовою дугою відрізняється високою продуктивністю і, внаслідок значної стабільності горіння дуги, – високою якістю. Малопотужна плазмова дуга зі струмом 0,1...40 А використовується для зварювання тонких листів (0,05 мм) при виготовленні мембран, теплообмінників з танталу, титану, молібдену, вольфраму, алюмінію.

**Плазмове плавлення** здійснюється у плазмодугових та плазмових високочастотних печах. Відомі два типи плазмодугових печей: подові (або тигельні) печі періодичної дії та печі з кристалізатором напівнеперервної дії.

## ЛЕКЦІЯ 9. УЛЬТРАЗВУКОВА ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ

### *План.*

- 1 Загальна характеристика ультразвукової обробки матеріалів.*
- 2 Різновиди ультразвукової обробки матеріалів.*
- 3 Управління продуктивністю ультразвукової обробки матеріалів.*
- 4 Управління точністю розмірної ультразвукової обробки матеріалів.*
- 5 Управління якістю обробленої поверхні при ультразвуковій обробці матеріалів.*
- 6 Загальні переваги та недоліки ультразвукової обробки матеріалів.*

*СРС: обладнання для ультразвукової обробки матеріалів. Акустичні голівки. Магніострикційні перетворювачі. Механізми подачі коливних систем.*

*Література: [3, с. 177...241; 5, с. 79...92].*

### *9.1 Загальна характеристика ультразвукової обробки матеріалів.*

*Ультразвукова обробка (УЗО) матеріалів* являє собою різновид механічної обробки, заснований на використанні енергії ультразвукових коливань інструменту, що впливають на оброблювану поверхню безпосередньо або через частинки вільного абразиву, твердість яких перевищує твердість оброблюваного матеріалу.

Ультразвукову обробку матеріалів здійснюють на ультразвукових верстатах потужністю від 100 Вт до 4 кВт. Основним вузлом таких верстатів є акустична голівка з джерелом ультразвукових коливань у вигляді магніострикційного перетворювача, що являє собою феромагнітний сердечник, здатний змінювати свої розміри у змінному магнітному полі за рахунок відомого у фізиці ефекту магніострикції. Таку здатність мають сердечники, виготовлені з нікелю, залізокобальтових, залізоалюмінієвих та інших сплавів.

### *9.2 Різновиди ультразвукової обробки матеріалів.*

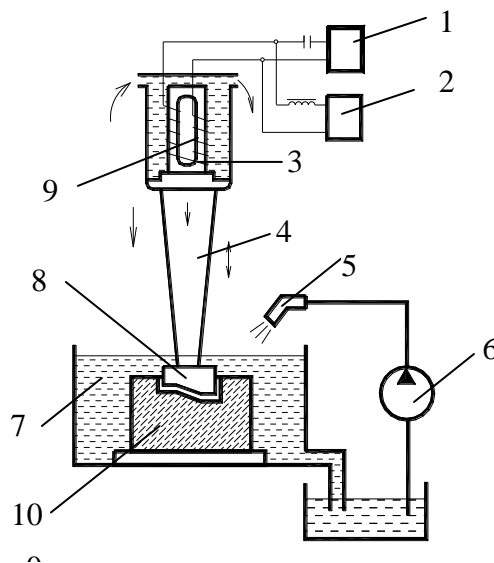
У якості різновидів ультразвукової обробки матеріалів можна назвати:

- 1) розмірну ультразвукову обробку вільним абразивом;*

- 2) *різання при наданні вимушених ультразвукових коливань металевому або абразивному інструменту;*
- 3) *ультразвукове зміцнення заготовки;*
- 4) *обробку дрібних деталей вільним абразивом для зняття заусениць.*

При *розмірній ультразвуковій обробці вільним абразивом* абразивні частинки, отримавши імпульс руху від торця інструменту, що коливається з частотою 16...30 кГц, вриваються у оброблювану поверхню, сколюючи з неї мікрочастинки.

Загальна схема розмірної ультразвукової обробки вільним абразивом наведена на рисунку 9.1.



- 1 – генератор УЗК; 2 – джерело постійного струму; 3 – обмотки;  
 4 – хвилевід-концентратор; 5 – патрубок; 6 – насос; 7 – ванна;  
 8 – інструмент; 9 – сердечник; 10 – оброблювана заготовка

*Рисунок 9.1 – Загальна схема розмірної ультразвукової обробки вільним абразивом*

Створене за допомогою генератора 1, джерела постійного струму 2 та обмотки 3 змінне магнітне поле забезпечує коливання торця сердечника 9 з частотою  $f = 16 \dots 30$  кГц і амплітудою  $A = 5 \dots 10$  мкм. Для збільшення амплітуди до 40...60 мкм до торця прикріплюють резонансний хвилевід-концентратор 4, на кінці якого закріплюють інструмент 8. Для подачі до робочої зони абразивної суспензії верстат оснащують ванною 7 та патрубком 5, по якому насос 6 прокачує суспензію.

Найбільш інтенсивний зйом матеріалу відбувається у напрямку коливань інструменту, на його бічних поверхнях зйом проходить менш інтенсивно. Ультразвукова обробка здійснюється у рідинному середовищі (воді), яке містить у своєму об'ємі абразивні частинки, що покращує умови

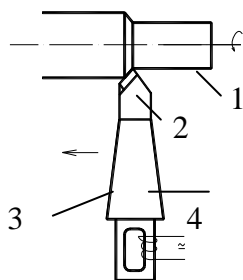
їхнього обміну та інтенсифікує видалення продуктів обробки внаслідок ультразвукової кавітації рідини у робочій зоні.

Ультразвуковій обробці піддають тверді та крихкі матеріали (скло, кераміку, ситали, кремній, тверді сплави тощо). Надаючи інструменту та заготовці різні види подач (поздовжню, поперечну) та змінюючи профіль перетину інструменту, можна обробляти глухі та наскрізні отвори, заглиблення, пази при прямому та зворотному копіюванні, розрізати заготовки великих розмірів тощо.

Інструменти для ультразвукової обробки виготовляють з міцних, але в'язких матеріалів твердістю  $HRC_e$  35...40. У якості абразиву для ультразвукової обробки зазвичай використовують карбід бору, який має високу твердість, добре змочується водою і завдяки порівняно невеликій щільності задовільно переноситься рідиною. Використовують також такі абразивні матеріали, як карбід кремнію та електрокорунд.

Інтенсифікувати процес різання при точінні та інших видах обробки можливо за рахунок надання вимушених ультразвукових коливань металевому або абразивному інструменту.

Загальна схема **точіння при наданні вимушених ультразвукових коливань інструменту** представлена на рисунку 9.2.



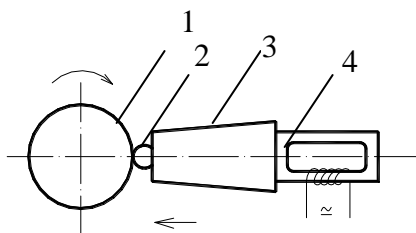
1 – заготовка; 2 – різальний інструмент (різець); 3 – концентратор;  
4 – ультразвуковий перетворювач

Рисунок 9.2 – Загальна схема точіння при наданні вимушених ультразвукових коливань інструменту (різцю)

На різальний інструмент (різець) 2 подаються ультразвукові коливання від концентратора 3, з'єданого з ультразвуковим перетворювачем 4. Різальному інструменту надаються поздовжня та поперечна подача, заготовці 1 – рух обертання. Надання інструменту ультразвукових коливань при точінні дозволяє підвищити продуктивність обробки, якість поверхневого шару, знизити сили різання та крутний момент.

При **ультразвуковому зміцненні заготовки** (рисунок 9.3) інструмент виконаний у вигляді кульки 2 та пов'язаний з концентратором напружень 3, що надходять від ультразвукового перетворювача 4. Інструмент

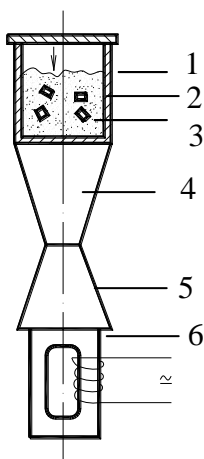
притискається з невеликим зусиллям  $P_{ст}$  до заготовки 1, що обертається. При обробці ультразвукові коливання значно знижують опір пластичній деформації поверхневого шару заготовки.



1 – заготовка; 2 – кулька; 3 – концентратор;  
4 – ультразвуковий перетворювач

Рисунок 9.3 – Загальна схема ультразвукового зміцнення заготовки

**Обробка дрібних деталей вільним абразивом** (рисунок 9.4) використовується в основному для зняття заусениць. Деталі 3 вміщуються до ванни 1, у яку заливається рідина з абразивом 2. Ультразвукові коливання в рідині збуджуються інструментом 4, торець якого слугує дном ванни. Інструмент з'єднаний з ультразвуковим перетворювачем 6 через концентратор 5. Деталі 3 знаходяться у рідині у зваженому стані. Для прискорення процесу до рідини прикладають статичний тиск  $P_{ст}$ . Видалення заусениць відбувається в результаті кавітаційного руйнування та обробки абразивними зернами.



1 – ванна; 2 – абразив; 3 – деталі; 4 – інструмент;  
5 – концентратор; 6 – ультразвуковий перетворювач

Рисунок 9.4 – Загальна схема обробки дрібних деталей вільним абразивом

### 9.3 Управління продуктивністю ультразвукової обробки матеріалів.

**Продуктивність** ультразвукової розмірної обробки залежить від амплітуди коливань інструменту, фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу, складу та властивостей абразивної суспензії, способу її підведення, статичного навантаження (сили подачі).

Продуктивність  $Q$  (мм/хв) розраховують за емпіричною формулою:

$$Q = \varphi \cdot (A^2 \cdot P_{\Pi})^a \cdot f^b,$$

де  $\varphi$  – коефіцієнт, що залежить від властивостей оброблюваного матеріалу та абразивної суспензії;

$a = 0,5 \dots 1$  та  $b = 0,5 \dots 1$  – показники ступеня, що залежать від умов обробки;

$A$  – амплітуда коливань, мкм;

$P_{\Pi}$  – сила подачі, Н;

$f$  – частота коливань, Гц.

При збільшенні амплітуди коливань  $A$  збільшується швидкість головного руху  $i$ , отже, – продуктивність процесу. Максимально припустима амплітуда коливань обмежується втомною міцністю матеріалу інструменту та концентратора.

Залежність продуктивності обробки від властивостей оброблюваного матеріалу задається коефіцієнтом  $\varphi$ . Розмірну ультразвукову обробку доцільно використовувати тільки для крихких матеріалів. Продуктивність обробки скла, що виражається швидкістю зйому матеріалу, становить  $Q_v = 3000 \dots 5000$  мм<sup>3</sup>/хв та у 20...50 разів перевищує продуктивність обробки твердого сплаву ВК8. З підвищенням твердості абразиву та розміру абразивних зерен, зростає зйом матеріалу  $i$ , отже, продуктивність обробки, що відображається коефіцієнтом  $\varphi$ . При підвищенні концентрації абразивної суспензії до певного значення спостерігається зростання продуктивності ультразвукової обробки внаслідок збільшення кількості абразивних зерен під інструментом. Оптимальні умови обробки забезпечуються при масовому співвідношенні карбиду бору до води 1:2. При великій концентрації суспензії стає дуже густою, погіршуються умови циркуляції абразиву  $i$ , відповідно, продуктивність обробки знижується.

**Сила подачі  $P_{\Pi}$**  між інструментом та заготовкою також впливає на продуктивність обробки. При роботі без статичного навантаження продуктивність ультразвукової обробки різко знижується. Оптимальна сила подачі підбирається експериментально і становить при розмірній обробці  $P_{\Pi} = 20 \dots 200$  Н.

Продуктивність обробки залежить від глибини та площі оброблюваного отвору, що відображається у значеннях показників ступеню  $a$  та  $b$ . У міру заглиблення інструменту збільшуються сили тертя між інструментом та заготовкою і погіршуються умови надходження до зони «головного різання» свіжої суспензії та видалення продуктів зносу, що зумовлює зниження продуктивності обробки.

Підвищення продуктивності ультразвукової розмірної обробки можливе за рахунок покращення умов циркуляції абразивної суспензії, використання інструменту зі зворотною конусністю, збільшення швидкості головного руху зі збільшенням амплітуди  $A$  та частоти  $f$  коливань.

Оптимальна амплітуда коливань пов'язана з розміром  $d$  абразивного зерна основної фракції. Максимальна продуктивність ультразвукової обробки досягається за умови  $\frac{A}{d} = 0,6 \dots 0,8$ .

#### ***9.4 Управління точністю розмірної ультразвукової обробки матеріалів.***

***Точність розмірної ультразвукової обробки*** наскрізних отворів визначається в основному трьома факторами: точністю виготовлення інструменту, точністю копіювання його форми, розміром шкідливих поперечних коливань. При виготовленні глухих отворів на точність впливає також знос інструменту. Знос інструменту відбувається внаслідок ударів абразивних зерен, кавітаційної ерозії та стирання. В основному зношується торець інструменту, значно менше – бічні поверхні. Похибки зношеного інструменту копіюються на стінках та дні обробленого отвору. Для зменшення зносу інструменту перш за все необхідно підбирати інструментальний матеріал з достатньою зносостійкістю. Наприклад, для УЗО скла інструмент виготовляють з твердого сплаву, для УЗО твердого сплаву – із загартованої інструментальної сталі.

Поперечні коливання інструменту спричиняють розбивку оброблених отворів, тобто поперечні розміри отвору виходять більшими за необхідні. Поперечні коливання інструменту виникають у випадках, якщо вісь інструменту не перпендикулярна до оброблюваної поверхні, якщо не витримана прямолінійність осей та співвісність усіх трьох частин коливної системи: ультразвукового перетворювача, концентратора та інструменту. У несприятливих випадках похибка форми може досягати 30...60 мкм. При суворому дотриманні прямолінійності осей і співвісності перетворювача, концентратора та інструменту, а також точній вивірці інструменту та заготовки похибка форми не перевищує 10 мкм.

Розбивка отворів зростає зі збільшенням розмірів абразивних зерен та глибини обробки. Так, наприклад, при обробці абразивами з розміром зерна № 6...10 похибка розмірів знаходиться у межах +0,08 мм,

а при використанні абразивів з розмірами зерна № 3...5 зменшується до +0,03 мм.

Точність розмірної ультразвукової обробки багато в чому залежить від матеріалу заготовки. Матеріали з крупнозернистою структурою (корунд, карбід кремнію, ферити) неможливо обробити з високою точністю, оскільки вони сколюються великими частинками.

### ***9.5 Управління якістю обробленої поверхні при ультразвуковій обробці матеріалів.***

***Шорсткість обробленої поверхні*** при розмірній ультразвуковій обробці залежить від розмірів зерен абразиву, фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу, амплітуди коливань, шорсткості поверхні інструменту, типу рідини, що несе абразив.

Найбільший вплив на шорсткість обробленої поверхні справляє зернистість абразиву – шорсткість є пропорційною до розміру абразивних зерен, тобто до зернистості.

***Властивості оброблюваного матеріалу*** також в значній мірі визначають шорсткість обробленої поверхні: при обробці матеріалів з крупнозернистою структурою сколюються великі частинки і отримати високу якість обробленої поверхні неможливо.

Розмір кроку нерівностей визначається шириною виколувань при УЗО. Зміна зернистості абразиву може призвести до багаторазової зміни кроку нерівностей.

Зі зростанням амплітуди коливань інструменту зростає шорсткість обробленої поверхні. Пояснюється це тим, що при збільшенні амплітуди коливань інструменту збільшуються сили, що діють на зерно, зростає середня глибина втиснення абразивних зерен. Наприклад, при УЗО скла збільшення амплітуди коливань  $A$  з 18 до 30 мкм зумовило зростання параметру шорсткості обробленої поверхні  $R_a$  з 20 до 32 мкм.

Якщо у якості рідини, що несе абразив, замість води використовувати машинне масло, то шорсткість обробленої поверхні зменшується, але при цьому у кілька разів знижується і продуктивність обробки.

Шорсткість обробленої поверхні залежить і від шорсткості робочих поверхонь інструменту – нерівності інструменту копіюються на поверхнях заготовки.

При ультразвуковій обробці дрібними шліфпорошками при амплітудах коливань  $A = 15...20$  мкм досягається шорсткість обробленої поверхні  $R_a = 1,2...0,4$  мкм, а при доводці –  $R_a = 0,2$  мкм.



## **9.6 Загальні переваги та недоліки ультразвукової обробки матеріалів.**

Технологія ультразвукової обробки (УЗО) матеріалів характеризується такими **загальними перевагами**:

- 1) можливість використовувати для виготовлення деталей як електропровідні, так і неелектропровідні матеріали;
- 2) висока точність обробки (до 0,01...0,02 мм) при високій якості обробленої поверхні ( $R_a = 0,32...0,16$  мкм);
- 3) відсутність нагрівання деталі у зоні обробки та дефектного шару на обробленій поверхні;
- 4) відносно висока продуктивність при обробці твердих та крихких матеріалів;
- 5) відносно низька енергомісткість процесу.

### **Недоліки ультразвукової обробки (УЗО) матеріалів:**

- 1) складність проектування та виготовлення інструменту, пов'язана з необхідністю проведення акустичного розрахунку;
- 2) непридатність методу для обробки в'язких важкооброблюваних матеріалів.

## ЛЕКЦІЯ 10. ЛАЗЕРНА ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ

### *План.*

- 1 Загальна характеристика лазерної обробки матеріалів.*
- 2 Управління процесом лазерної обробки матеріалів.*
- 3 Різновиди лазерної обробки матеріалів.*
- 4 Загальні переваги лазерної обробки матеріалів.*

*СРС:* обладнання для лазерної обробки матеріалів. Твердотільні лазери. Функціональні системи та вузли установок для лазерної обробки.

*Література:* [4, с. 36–68; 5, с. 100–133].

### *10.1 Загальна характеристика лазерної обробки матеріалів.*

Якщо атому, що знаходиться на основному (нижньому) енергетичному рівні, передати певну порцію енергії, він може перейти на один зі збуджених рівнів. Збуджений атом може, в свою чергу, самовільно (спонтанно) перейти на один з нижчих енергетичних рівнів, випромінюючи при цьому певну порцію енергії у вигляді фотона. Такі спонтанні процеси випромінювання відбуваються у нагрітих тілах. Нагрівання переводить частину атомів у збуджений стан, і потім при переході на нижчі енергетичні рівні ці атоми випромінюють світло. Спонтанне випромінювання є некогерентним, тобто утворюються світлові хвилі різної довжини.

Особливу цінність являє собою отримання когерентного (монохроматичного) світла, тобто світлової хвилі певної довжини. Когерентне випромінювання може бути отримане під дією зовнішнього електромагнітного поля, коли частота падаючого світла збігається з однією з частот енергетичного спектру атому. Існування вимушеного (індукційного) випромінювання створює можливість керувати випромінюванням атомів за допомогою електромагнітних коливань і таким чином посилювати або генерувати когерентне світлове випромінювання.

Метод *світлопроменевої (лазерної) обробки* базується на використанні теплової дії світлового променя високої енергії, що випромінюється *оптичним квантовим генератором (лазером)*, на поверхню заготовки. Лазер – абревіатура слів англійського виразу «*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*» – посилення світла вимушеним випромінюванням.

*Лазер* – джерело когерентного електромагнітного випромінювання оптичного діапазону, дія якого базується на використанні індукованого випромінювання світла системою збуджених атомів, вміщених до оптичного резонатора. При багаторазовому проходженні посиленого

випромінювання між дзеркалами оптичного резонатора формується потужний спрямований пучок лазерного випромінювання. Зазвичай лазерне випромінювання виводиться з резонатора через одне з дзеркал, яке роблять частково прозорим.

Випромінювання лазера характеризується оптичною нерасходімістю у просторі та високою концентрацією енергії, щільність якої значно збільшується при фокусуванні світлового променя на майданчику діаметром близько 10 мкм. Температура у зоні фокусування досягає 5000...9000 °С, що при достатній тривалості випромінювання призводить до розплавлення та випаровування будь-якого матеріалу.

Основу конструкції будь-якого лазера становить **активний елемент**, у якому безпосередньо здійснюється генерація лазерного випромінювання. За типом активного елемента розрізняють наступні **типи лазерів: газові, рідинні та твердотільні**. До останнього типу можна віднести **напівпровідникові лазери**.

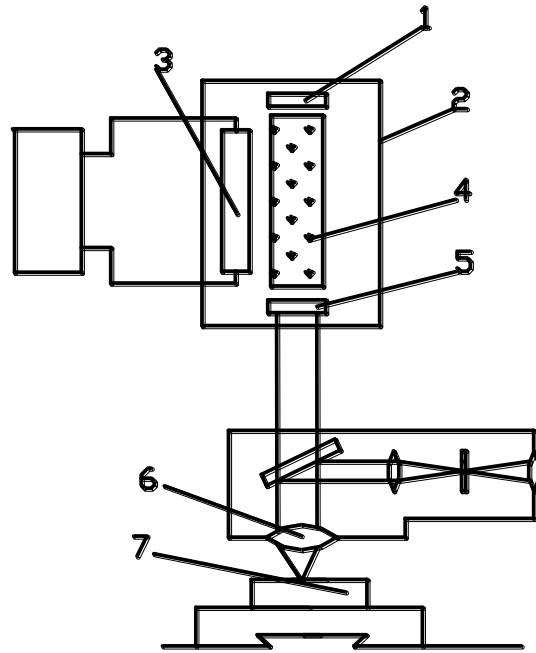
Найбільш надійними для розмірної обробки є **твердотільні рубінові лазери**, що працюють у імпульсному режимі. Активним елементом такого лазера є **рубіновий стрижень** ( $Al_2O_3$ , легований 0,05 % Cr).

Схема твердотільного технологічного лазера наведена на рисунку 10.1. Торці **рубінового стрижня 4**, встановленого у **лазерну голівку 2**, закриваються **дзеркалами-резонаторами 1 та 5**, одне з яких (обернене до оброблюваної заготовки) виконують напівпрозорим. При опроміненні рубінового стрижня **4 неоновю лампою 3** атоми хрому приходять у збуджений стан. При поверненні до нормального стану атоми хрому випускають фотони, які, взаємодіючи з іншими збудженими атомами хрому, викликають лавиноподібний потік фотонів. Наявність дзеркал-резонаторів забезпечує посилення коливань фотонів вздовж осі рубінового стрижня **4**, накопичення енергії та подальше її випускання у вигляді імпульсу яскраво-червоного світла через **напівпрозоре дзеркало-резонатор 5**. **Системою лінз 6** промінь світла фокусується на **поверхні оброблюваної заготовки 7**. ККД твердотільних лазерів невеликий: лише 0,1...1%.

На відміну від електронних гармат робота лазера не супроводжується рентгенівським випромінюванням, а його конструкція є простішою внаслідок відсутності вакуумної системи.

## **10.2 Управління процесом лазерної обробки матеріалів.**

У якості параметрів управління процесом лазерної обробки матеріалів можна вказати:



1, 5 – дзеркала-резонатори, 2 – лазерна голівка, 3 – неонова лампа,  
4 – рубіновий стрижень, 6 – лінза (система лінз);  
7 – оброблювана заготовка

Рисунок 10.1 – Схема твердотільного технологічного лазера

1) **потужність випромінювання для лазера безперервної дії або енергія випромінювання та час імпульсу для пристроїв, що працюють у імпульсному режимі;**

2) **довжину хвилі випромінювання;**

3) **щільність світлового потоку;**

4) **положення променю у просторі.**

Ефективність дії лазерного випромінювання залежить також від теплофізичних властивостей матеріалу заготовки та відбивної здатності оброблюваної поверхні.

Управління потужністю випромінювання або енергією променю здійснюється за рахунок зміни струму розряду лампи-спалаху у твердотільних лазерах та зміни струму у розрядній камері для газових лазерів.

**Довжина хвилі випромінювання** зазвичай є строго фіксованою і залежить від типу робочої речовини, схеми та конструкції лазера. Частота випромінювання плавно змінюється за допомогою пропускання когерентного випромінювання через спеціальні кристалічні системи на основі ніобата літію, титаната барію та ін.

Різде збільшення щільності світлового потоку у плямі нагрівання забезпечується **фокусуванням випромінювання лазера**. Діаметр пучка, що виходить з резонатора лазера, зазвичай дорівнює 5...8 мм і для його фокусування найчастіше використовується система лінз.

Контроль стану лазерного променя у просторі досягається застосуванням систем сканування. У механічних системах розгортки (від виразу «розгорнути промінь») використовують призми та дзеркала, що отримують обертальний та коливний рух за допомогою вібраторів та п'єзоелементів. Як правило, механічні системи є інерційними та не забезпечують великої швидкості розгортки, тому на практиці більш широко використовують електрооптичний метод, що дозволяє отримувати високі швидкості відхилення та високу роздільну здатність. Сутність електрооптичного методу полягає в тому, що прикладене до електрооптичного елемента (кристалу) електричне поле викликає зміну показника заломлення у напрямку, перпендикулярному до напрямку поширення пучка світла, а це викривляє його траєкторію.

### ***10.3 Різновиди лазерної обробки матеріалів.***

До основних різновидів лазерної обробки матеріалів належать:

- 1) ***лазерна поверхнева термічна обробка;***
- 2) ***лазерне скрайбування;***
- 3) ***локальне лазерне переплавлення;***
- 4) ***лазерне зварювання*** (в тому числі лазерне зварювання неметалічних матеріалів);
- 5) ***лазерне розрізання;***
- 6) ***лазерне прошивання.***

***Лазерна поверхнева термічна обробка*** може бути використана для окремих зон поверхні деталі з подальшим їхнім охолодженням за допомогою практично будь-яких охолоджуючих середовищ (вода, повітря, масло). Нагрівання лазерним випромінюванням вигідно використовувати для термообробки шийок валів та осей, гільз, вкладишів, зубів шестерень тощо. У порівнянні з гартуванням струмами високої частоти (СВЧ) при лазерному гартуванні немає потреби виготовляти для кожного виробу спеціальний індуктор, можна отримувати більш вузькі зони загартованого матеріалу. Твердість поверхневих шарів після гартування лазером зростає у 3...5 разів, що різко підвищує зносостійкість деталей навіть з низьколегованих матеріалів. У порівнянні з індукційним гартуванням продуктивність обробки підвищується на 70...90 %. Нагрівання лазерним випромінюванням використовується також для відпалу фольги у різних середовищах при великій швидкості її руху.

***Лазерне скрайбування*** – технологічний метод, в якому, за аналогією з алмазним скрайбуванням, на поверхні крихкого оброблюваного матеріалу лазерним променем наноситься риска, яка ініціює подальше руйнування матеріалу за лінією її нанесення. Нанесення риски забезпечується нагріванням без плавлення вузької зони оброблюваного матеріалу за допомогою лазера, що зумовлює утворення у цій зоні

термічних напружень і, внаслідок цього, – мікротріщин. Лазерне скрайбування використовується для розрізання скла, кераміки, пластин з напівпровідникових матеріалів. Процес лазерного скрайбування характеризується малою шириною зони різку, високою продуктивністю та досить високою точністю (похибка не перевищує 30 мкм).

Набуло поширення **лазерне локальне переплавлення**. Нагрівання лазерним випромінюванням до плавлення з подальшим швидким охолодженням та кристалізацією невеликих об'ємів металу призводить до утворення структур, які в звичайних умовах отримати неможливо. Для масивних деталей необхідна швидкість охолодження може бути отримана просто за рахунок відведення теплоти у оброблюваний матеріал.

У деяких випадках доцільним є не суцільне поверхнєве переплавлення, а **створення зони проплавлення у вигляді окремих ліній, сіток, спіралей**. Тоді вдається поєднати міцність та пластичність основного матеріалу з підвищеною твердістю та зносостійкістю переплавлених зон. Подібна технологія набула поширення при виготовленні напрямних, опор, поверхонь тертя.

**Лазерне зварювання** як технологічний процес, пов'язаний з локальним плавленням, набуває все ширшого використання, конкуруючи як з традиційними способами зварювання, так і з електронно-променевим зварюванням. При лазерному зварюванні отримують шви з мінімальним розігрівом навколишньої зони зварювання матеріалу. Потужні газові лазери безперервного випромінювання дозволяють проплавити метал за один прохід на значну глибину (до 20 мм). Лазерне зварювання дає вузький шов «кинжального» типу з малими деформаціями зварюваних деталей, що дозволяє використовувати цей спосіб для з'єднання остаточно оброблених вузлів та деталей. Мікрозварювання імпульсним випромінюванням твердотільних лазерів використовується при монтажі мікросхем на плати. Діаметр з'єднаних лазерним зварюванням провідників круглого перетину становить 0,05...1,0 мм, товщина плоских виводів – 0,03...0,5 мм. Деякі електронні прилади (електронно-променеві трубки, електронно-оптичні перетворювачі та ін.) доцільно збирати, вакуумувати, а потім після налаштування фіксувати взаємне розташування їхніх вузлів за допомогою зварювання. Для цієї мети використовується випромінювання лазера з довжиною хвилі  $\lambda < 1,06$  мкм, для якої герметичний скляний корпус приладу прозорий.

**Лазерне зварювання неметалічних матеріалів** (скла, кераміки) здійснюється з великою довжиною хвилі (наприклад,  $\lambda = 10,6$  мкм у лазера  $CO_2$ ). У порівнянні з газополум'яним нагріванням, що зазвичай використовується для зварювання та паяння скла, випромінювання лазера збільшує швидкість нагрівання місця зварювання або паяння та зменшує зону нагрівання. За такою технологією виготовляють скляні корпуси термометрів, де капіляр уварюють у оболонку та виконують заварювання денця.

**Лазерне розрізання матеріалів** базується на локальному плавленні матеріалу та його подальшому видаленні під дією сили тяжіння, конвективного потоку або газового струменю.

Ефективність лазерного розрізання може бути підвищена за рахунок введення до зони обробки газу, наприклад кисню – таке розрізання називають **газолазерним**. Загальна схема газолазерного розрізання наведена на рисунку 10.2.

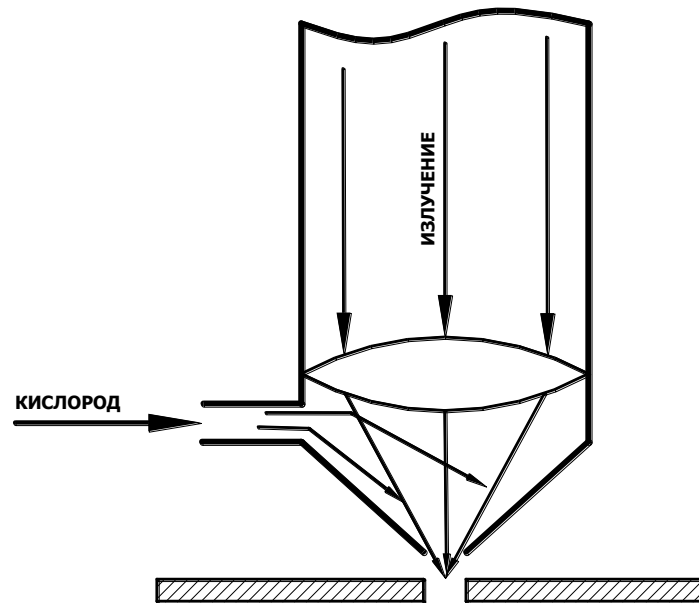


Рисунок 10.2 – Загальна схема газолазерного розрізання

Екзотермічна реакція між розрізуваним матеріалом та киснем при газолазерному розрізанні значно збільшує виділення енергії у місці взаємодії випромінювання з матеріалом. Струм газу під тиском сприяє видаленню розплавлених оксидів із зони різання. Швидкість газолазерного розрізання у деяких випадках є значно вищою, ніж при інших способах розрізання, що і визначає ефективність процесу.

**Лазерне прошивання** у порівнянні з механічною обробкою отворів має низку переваг:

- 1) можливість обробки практично будь-яких матеріалів незалежно від їхньої твердості та інших механічних властивостей;
- 2) можливість отримання отворів малих діаметрів ( $< 0,1$  мм) з великим відношенням глибини отвору до діаметру;
- 3) відсутність механічного силового контакту між інструментом та оброблюваним матеріалом;
- 4) можливість отримання отворів з віссю, нахиленою під кутом до оброблюваної поверхні.

Лазерне прошивання отворів використовується при виготовленні фільтрів, вальниць з кристалічних матеріалів, мікро-трафаретів для стрічкових схем, форсунок та ін. Прошивання лазером мікроотворів

діаметром 0,05...0,6 мм у заготовках з кераміки, металу, фериту, рубінів широко використовується у якості як попередньої, так і фінішної операції при виготовленні фільтер, часових каменів.

#### ***10.4 Загальні переваги лазерної обробки матеріалів.***

Лазерна обробка матеріалів характеризується такими *загальними перевагами*:

1) можливість передачі енергії у вигляді світлового променя на відстань (в тому числі і через прозору розділову перегородку або за спеціальним світловодом).

2) відсутність механічного та електричного контакту між джерелом енергії та заготовкою у місці обробки.

3) висока концентрація енергії у плямі нагрівання при «гострому» фокусуванні.

4) можливість плавного регулювання щільності світлового потоку у плямі нагрівання за рахунок зміни фокусування променя.

5) високі температури у зоні дії випромінювання.

6) можливість отримання як імпульсів енергії дуже малої тривалості (до  $10^{-6}$  с), так і неперервного випромінювання.

7) малі розміри зони обробки (до кількох мкм).

8) можливість переміщення променя з високою точністю та швидкістю за допомогою систем розгортки при нерухомому об'єкті обробки.

9) можливість обробки в будь-якому оптично прозорому середовищі.



## ЛЕКЦІЯ 11. ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВА ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ

*План.*

*1 Загальна характеристика електронно-променевої обробки матеріалів.*

*2 Різновиди електронно-променевої обробки матеріалів.*

*3 Загальні переваги та недоліки електронно-променевої обробки матеріалів.*

*СРС: обладнання для електронно-променевої обробки матеріалів.*

*Література:* [4, с. 6–31; 5, с. 133–142].

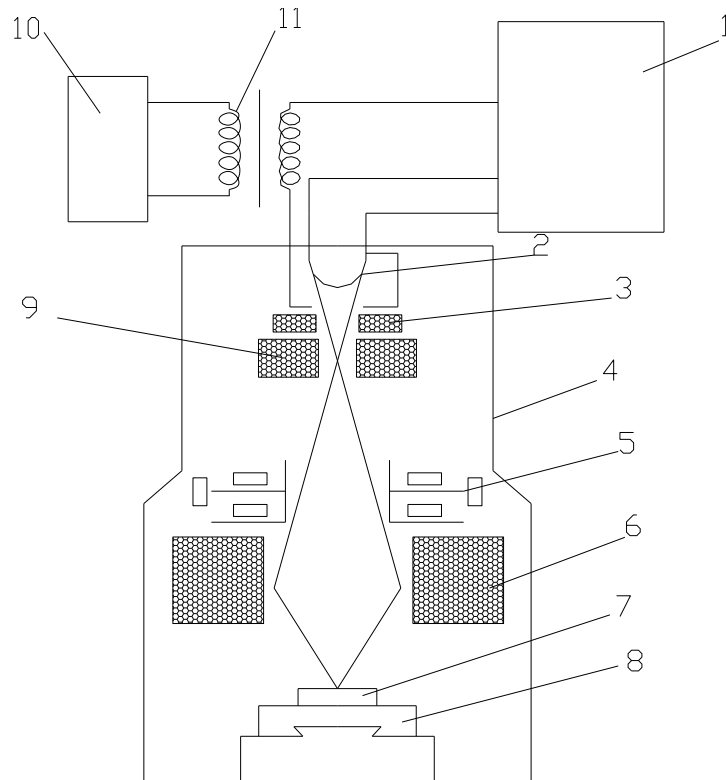
### *11.1 Загальна характеристика електронно-променевої обробки матеріалів.*

*Електронно-променева обробка (ЕЛО)* матеріалів базується на тепловій дії потоку електронів на оброблюваний матеріал, який у місці обробки плавиться та випаровується. Інтенсивне нагрівання оброблюваного матеріалу зумовлене тим, що кінетична енергія рухомих електронів при зіткненні з поверхнею заготовки майже повністю переходить у теплову. Внаслідок того, що теплова енергія сконцентрована на ділянці діаметром не більше ніж 10 мкм, на цій ділянці відбувається розігрівання оброблюваного матеріалу до 6000 °С.

У якості обладнання для проведення ЕЛО використовують *спеціальні електровакуумні пристрої*, що називаються *електронними гарматами*. Вони генерують, прискорюють та фокусують потік електронів (*електронний промінь*).

Загальна схема установки для електронно-променевої обробки наведена на рисунку 11.1. Електронна гармата складається з *вакуумної камери 4* (з розрідженням  $10^{-3} \dots 10^{-4}$  Па), у якій встановлено *джерело живлення високої напруги 1*, *вольфрамовий катод 2*, що забезпечує емісію вільних електронів, які розганяються електричним полем, створеним між *катодом 2* та *анодом-діафрагмою 3*. Далі електронний промінь проходить крізь *систему магнітних лінз 9* та *6*, *пристрій електричного юстування 5* та фокусується на поверхні *оброблюваної заготовки 7*, встановленої на *координатному столі 8*. Імпульсний режим роботи електронної гармати забезпечується системою, що складається з *імпульсного генератора 10* та *трансформатора 11*.

Вільний, не пов'язаний з атомом електрон можна отримати, якщо надати атому надлишкову енергію, внаслідок поглинання якої електрон переходить на більш віддалені від ядра орбіти та може при цьому втратити



1 – джерело високої напруги; 2 – катод; 3 – анод-діафрагма;  
 4 – вакуумна камера; 5 – пристрій електричного юстування;  
 6, 9 – магнітні лінзи; 7 – оброблювана заготовка; 8 – координатний стіл;  
 10 – імпульсний генератор; 11 – трансформатор

Рисунок 11.1 – Загальна схема установки для електронно-променевої обробки матеріалів

зв'язок з ядром. Це відбувається, наприклад, при нагріванні металів, які при цьому починають випускати електрони. Випускання електронів з поверхні твердих тіл при їхньому нагріванні називають **термоелектронною емісією**.

Крім **термоемісійних катодів** набули поширення **плазмові катоди**, що використовують електрони з **плазми газового розряду**. Ці катоди не містять елементів розжарювання, є більш простими за конструкцією, мають значно більший термін служби навіть у найважчих умовах експлуатації.

Для надання електронам енергії та формування з них потоку частинок, використовують різні методи. Найпростіший та найпоширеніший з них – прискорення електронів електричними та магнітними полями.

**Швидкість руху електронів** може бути визначена за формулою:

$$v = 593,2\sqrt{U},$$

де  $U$  – прискорююча напруга (різниця потенціалів), В.

При прискорюючій напрузі  $U = 1$  В швидкість електрона становить 593,2 км/с. У електронних гарматах напруга  $U$  може досягати  $2 \cdot 10^5$  В, що дозволяє розганяти електрони до швидкостей, які дорівнюють 250000 км/с.

Значення *прискорюючої напруги* при ЕЛО значною мірою залежить від призначення процесу:

1) *низьковольтні системи* ( $U = 15 \dots 30$  кВ) є найпростішими за конструкцією та експлуатацією і використовуються в основному для операцій, пов'язаних з плавленням та зварюванням різних матеріалів;

2) *системи з проміжною прискорюючою напругою* ( $U = 50 \dots 80$  кВ) використовуються у випадках, коли необхідно збільшити глибину проплавлення оброблюваного матеріалу, наприклад, при зварюванні;

3) *високовольтні системи* ( $U = 100 \dots 200$  кВ) є найскладнішими у виготовленні та експлуатації та використовуються у випадках прецизійної розмірної обробки та мікрозварювання.

У промисловості найбільшого поширення набула низьковольтна апаратура.

*Потужність* електронно-променевої установок в залежності від призначення коливається у діапазоні 0,5...100 кВт. Малопотужні установки використовують для мікрозварювання та розмірної обробки, потужні – у печах для переплавлення металів у вакуумі.

Електронним променем можна керувати за допомогою електростатичних або магнітних полів. На практиці більше поширені *магнітні системи фокусування і керування переміщенням променя*.

Створюючи по осі електронного променя за допомогою спеціальної магнітної системи (магнітної лінзи) магнітне поле певної форми, можна забезпечити збіжність траєкторії електронів у одній точці (фокусування). Змінюючи положення цієї точки за вертикаллю до оброблюваної поверхні, можна змінювати концентрацію енергії на оброблюваному виробі.

Електронний промінь можна отримати тільки у вакуумі, оскільки при зіткненнях з молекулами атмосферних газів електрони віддають їм свою енергію і промінь «розсіюється». На практиці тиск у вакуумній камері намагаються довести до  $10^{-3} \dots 10^{-5}$  Па, оскільки при гіршому вакуумі у електронній гарматі різко збільшується число іонізованих електронами молекул залишкових газів і це може привести до пробоя проміжку між анодом та катодом.

Усі зміни у оброблюваному матеріалі при ЕЛО відбуваються за рахунок його взаємодії з електронами променя. В результаті зустрічі потоку електронів з оброблюваним матеріалом кінетична енергія рухомих електронів перетворюється на інші види енергії.

Досягаючи оброблюваної поверхні, електрони потоку приникають у оброблюваний матеріал і гальмуються там, проходячи деякий шлях.

Глибина проникнення електрона у оброблюваний матеріал зазвичай не перевищує кількох десятків мікрометрів. Проходячи крізь оброблюваний матеріал, електрони взаємодіють з кристалічною ґраткою або окремими атомами матеріалу. При цьому збільшується амплітуда коливань частинок оброблюваного матеріалу, змінюються параметри його кристалічної ґратки, підвищується температура. У деяких випадках енергія, передана електронами томів, призводить до розриву зв'язків між окремими атомами оброблюваного матеріалу.

**Гальмування електрона у оброблюваному матеріалі** супроводжується низкою різних явищ:

- 1) власне нагріванням поверхні оброблюваного матеріалу, що використовується у технологічних цілях;
- 2) гальмівним рентгенівським випромінюванням, що виникає при електронному бомбардуванні матеріалів;
- 3) вторинною електронною емісією, відбиттям електронів та термоелектронною емісією з оброблюваної поверхні.

**Нагрівання оброблюваного матеріалу електронним променем** здійснюється за рахунок виділення енергії у поверхневих шарах матеріалу та подальшої передачі теплоти у його внутрішні шари. Завдяки високій інтенсивності введення енергії до оброблюваного матеріалу при ЕЛО на оброблюваній поверхні розвиваються настільки високі температури, що вони можуть перевищувати точку кипіння найбільш тугоплавких матеріалів. Наприклад, при ЕЛО вольфраму (температура кипіння 5673 К) розвивається температура 15873 К.

Зйом матеріалу з оброблюваної поверхні за рахунок його випаровування та вибухового скипання лежить у основі розмірної ЕЛО.

Електронний потік, що падає на оброблювану поверхню, зумовлює **вторинну електронну емісію з оброблюваної поверхні та термоелектронну емісію з розігрітої до високих температур зони обробки**. Зазвичай втрачена при цьому потужність не перевищує 1 % потужності електронного променя.

Не всі електрони, які потрапляють на оброблювану поверхню, поглинаються – деяка частина з них відбивається, причому тим сильніше, чим більше атомний номер елемента. **Відбиття електронів** збільшується при відхиленні осі променя від нормалі до поверхні заготовки, тому обробку завжди доцільно вести променем, перпендикулярним до оброблюваної поверхні. Частка відбитих електронів може сягати 40 %.

## **11.2 Різновиди електронно-променевої обробки матеріалів.**

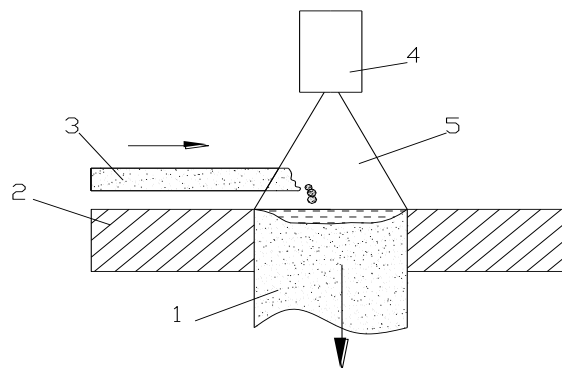
Основні **технологічні операції електронно-променевої обробки матеріалів** можна умовно розбити на три групи:

- 1) **плавлення** (технологічні операції локального переплавлення, плавлення у вакуумі, зварювання);
- 2) **випаровування** (випаровування у вакуумі, розмірна ЕЛО);
- 3) **термічна обробка** без зміни агрегатного стану речовини.

Набувають поширення і технологічні процеси ЕЛО нетермічного типу, де електронний промінь використовується для інтенсифікації різних хімічних реакцій, полімеризації, стерилізації продуктів харчування тощо.

**Локальне переплавлення** (поверхневе оплавлення) оброблюваних поверхонь за допомогою електронного променя дозволяє отримати надзвичайно високі швидкості кристалізації металу у зоні плавлення. Утворені при цьому структури металу значно відрізняються від структур, отриманих у звичайних умовах: розширюються межі розчинності для твердих розчинів, подрібнюється мікроструктура, значно підвищуються пластичність і твердість металу. Швидке охолодження розплавленого металу призводить до подальшого додаткового гартування і на протязі  $\tau = 10^{-3} \dots 1$  с з температурного циклу «нагрів-охолодження гартованих сталей» утворюється структура дрібнозернистого мартенситу з дуже високою твердістю. Включення локальних зон з високоміцною модифікованою структурою у більш пластичний основний метал підвищує зносостійкість поверхні.

**Електронно-променева плавлення у вакуумі** використовується у тих випадках, коли необхідно виплавляти особливо чисті метали, в тому числі хімічно активні. Загальна схема електронно-променевого плавлення наведена на рисунку 11.2.



1 – злиток; 2 – тигель; 3 – переплавлений метал;  
4 – електронна гармата; 5 – електронний промінь.

Рисунок 11.2 – Схема електронно-променевого плавлення

**Переплавлений метал 3** у вигляді бруска подається у зону дії **електронного променя 5**, випущеного **електронною гарматою 4**. **Злиток 1** витягується з **тигля 2** із заданою швидкістю і через вакуумний шлюз видаляється з вакуумної камери.

Плавлення електронним променем має значні переваги у порівнянні з іншими способами плавлення у вакуумі (індукційним, дуговим), оскільки дозволяє отримувати більш високий перегрів рідкого металу у ванні і найбільш повно проводити дегазацію металу, відгінку летючих домішок, здійснювати інші фізико-хімічні процеси, які в умовах інших методів плавлення не встигають відбуватися повністю або не відбуваються взагалі. При електронно-променевому плавленні переплавлений метал може бути використаний практично у будь-якому вигляді (шихта, пруток, брухт, спечені бруски).

Починаючи з 60-х років ХХ століття, практично усі тугоплавкі та хімічно активні метали виплавляються у електронно-променевих печах. Створені установки для електронно-променевого плавлення потужністю до 1200 кВт, що дозволяють виплавляти злитки масою до 12 т при річному обсязі випуску до 3000 т. Отримані злитки використовуються при виробництві валів та лопаток турбін, камер згоряння, високошвидкісних кулькових вальниць.

**Електронно-променеве зварювання** є однією з найбільш поширених технологічних операцій ЕЛО. При зварюванні відбувається локальне плавлення з подальшою кристалізацією, ширина зони розплавленого металу є незначною, що справляє свій істотний вплив на властивості зварного з'єднання. Від об'єму розплавленого при зварюванні металу залежать деформації та напруги, що виникають у конструкціях після зварювання.

При електронно-променевому зварюванні отримують шви з глибоким проплавленням. За чисто зовнішніми ознаками проплавлення такий різновид зварного шва часто називають кинджальним. Кинджальний шов дає змогу за один прохід зварювати без обробки крайок заготовки товщиною до 100 мм, у той час як при дуговому зварюванні для цієї мети необхідна обробка крайок і кілька десятків проходів. Загальний вигляд кинджального шва при електронно-променевому зварюванні наведений на рисунку 11.3.

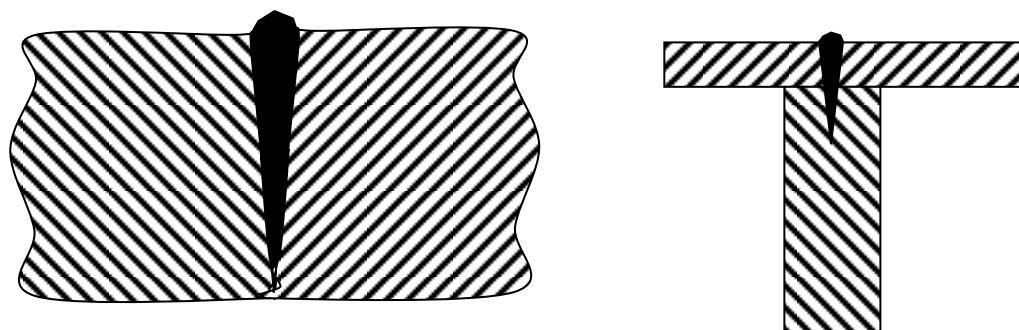


Рисунок 11.3 – Загальний вигляд кинджального шва при електронно-променевому зварюванні

Глибоке проплавлення дозволяє отримати зварні з'єднання принципово нової форми, які не можна отримати іншими способами.

Вакуум як захисне середовище при зварюванні цілої низки хімічно активних і тугоплавких металів та сплавів дозволяє отримувати значно вищі показники властивостей зварного шва, ніж при зварюванні у захисних газах. Тому зварні конструкції з таких матеріалів, як вольфрам, молібден, титан, цирконій, тантал та ін., виготовляються в основному за допомогою електронно-променевого зварювання.

Електронно-променеве зварювання доцільно використовувати при виготовленні товстостінних конструкцій, оскільки за один прохід можна отримати проплавлення глибиною до 200...300 мм. Перевага методу полягає у зниженні залишкових деформацій завдяки малій кількості розплавленого металу, а також у скороченні часу зварювання. Електронно-променеве зварювання використовують при виготовленні вузлів важкого енергетичного обладнання (атомних реакторів, атомних насосів тощо).

Використовуючи технологію електронно-променевого зварювання, можна отримати шви малих розмірів у конструкціях різних радіоелектронних схем та пристроїв, де зварювання часто доводиться вести з застосуванням мікроскопа.

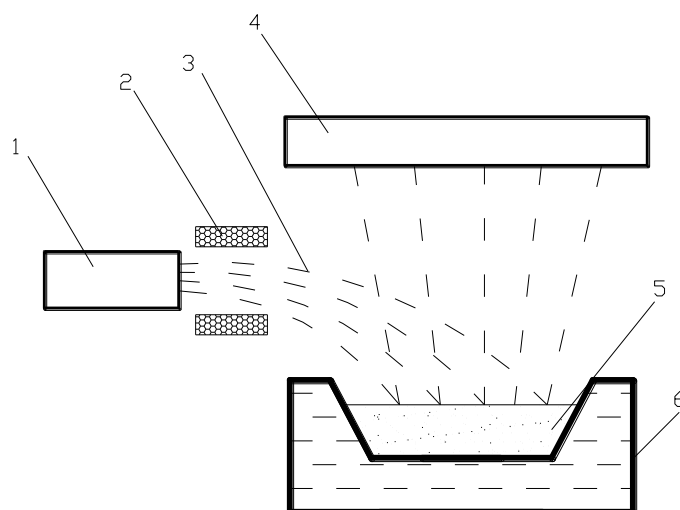
Електронно-променеве мікрозварювання використовується для з'єднання елементів мікросхем. Таким способом зварюють виводи та контактні елементи товщиною менше ніж 0,3 мм та провідники діаметром 10...300 мкм.

Великі перспективи для розвитку методу відкриває зварювання за допомогою електронного променя в умовах космосу на висоті понад 200 км над поверхнею Землі. На таких висотах тиск становить близько  $10^{-4}$  Па і там можливо здійснювати електронно-променеві технологічні процеси у природних умовах.

**Електронно-променеве випаровування матеріалів** у вакуумі широко використовують для отримання тонких плівок. Загальна схема електронно-променевого випаровування матеріалів у вакуумі наведена на рисунку 11.4.

Траєкторія **електронного променя 3**, отриманого за допомогою **електронної гармати 1**, викривляється **відхилюючою системою 2** у напрямку, випаровуваного матеріалу **5**. Внаслідок впливу променя на поверхню випаровуваного матеріалу останній випаровується і частинки пари, підіймаючись вгору, осідають на поверхню **підкладинки 4**, утворюючи щільну плівку. Використання відхилюючого магнітного поля дозволяє розташовувати магнітну гармату практично у будь-якому зручному місці.

Електронно-променеве випаровування використовують у мікроелектроніці, при нанесенні різних металевих покриттів на сталеву стрічку, при виготовленні фольги зі сплавів складного складу.



1 – електронна гармата; 2 – відхиляюча система;  
 3 – електронний промінь; 4 – підкладинка; 5 – випаровувана речовина;  
 6 – водоохолоджуваний тигель

Рисунок 11.4 – Схема електронно-променевого випаровування матеріалів

Електронним променем можна випаровувати і різні неметалеві матеріали – діоксид кремнію, оксид алюмінію, різні види скла. Такі покриття використовуються у оптичній промисловості та різних галузях електроніки.

В залежності від призначення процесу електронно-променевого випаровування матеріалів використовують електронні гармати потужністю від 250 Вт до 200 кВт, а продуктивність процесу становить від 1 г/год до 100 кг/год.

**Розмірна обробка електронним променем базується** на тому, що при досить великій питомій поверхневій потужності дії променю швидкість випаровування оброблюваного матеріалу і тиск пари зростають настільки, що весь рідкий метал з потоком пари викидається із зони обробки. У результаті розмірної обробки електронним променем у заготовці отримують глухі або наскрізні отвори заданих розмірів та контури з заданими допусками на розміри.

Параметри електронно-променевої розмірної обробки пов'язані з фізичними характеристиками матеріалу (температурою плавлення, теплоємністю, питомою теплотою випаровування, пружністю пари) і не залежать від його механічних властивостей (міцності, твердості, пластичності), які зазвичай впливають на оброблюваність матеріалів при обробці різанням. У зв'язку з цим електронний промінь знайшов використання в першу чергу при розмірній обробці твердих матеріалів (алмазів, кварцу, кераміки, кристалів кремнію та германію).

Сфокусований електронний промінь може мати діаметр менше 1 мкм, тому зйом металу проводиться у дуже малих кількостях



і на малих площах, що не може бути забезпечене традиційними способами обробки. Мінімальна ширина різку при електронно-променевої розмірній обробці може досягати 5...10 мкм, можливе отримання отворів такого діаметру. Малі розміри перетину електронного променя визначили його використання у якості технологічного інструменту у мікроелектроніці, , наприклад, при виготовленні мікросхем з високою щільністю монтажу.

Особливим різновидом розмірної електронно-променевої обробки є перфорація (отримання дрібних наскрізних отворів). Перфорацією отримують металеві та керамічні елементи фільтрів, шпарини у матеріалі для охолодження камер згоряння та лопаток турбін. Продуктивність перфорації може досягати  $10^5$  отворів на секунду.

Точність розмірів та якість обробленої поверхні при розмірній обробці залежить від оброблюваного матеріалу, виду обробки, параметрів процесу та характеристик електронної гармати. Похибка розмірів при цьому не перевищує  $\pm 5$  мкм, а шорсткість поверхні –  $R_z = 5$  мкм.

Обробка електронним променем набула поширення при виготовленні фільтрів з твердих сплавів та кераміки для виробництва штучних волокон. Зазвичай фільтри випускають діаметром до 30...50 мм при товщині 1...3 мм, вони можуть містити до 500 отворів. Отвори у фільтрі виконують не тільки круглої, але і більш складної форми поперечного перетину променя. Кожен окремий отвір виготовляють переміщенням електронного променя, а перехід від одного отвору до іншого здійснюється за допомогою руху столу установки.

У мікроелектроніці поширеним є електронно-променеве розрізання заготовок з напівпровідникових матеріалів та феритів на окремі малорозмірні елементи і прошивання отворів у них.

**Електронно-променева термообробка** виникла як процес, що дозволяє здійснювати локальне нагрівання оброблюваних ділянок поверхні з метою отримання структурних перетворень матеріалу (в основному, з метою гартування).

Застосування гартівних середовищ, що забезпечують швидке охолодження (вода, масло), у вакуумі ускладнене. Однак у випадках, коли зона гартування є досить малою, інтенсивність тепловідведення у основний метал є цілком достатньою для утворення загартованих структур у зоні електронно-променевого нагрівання. Гартування, зокрема, застосовується для зміцнення лез інструменту зі швидкорізальної сталі – ресурс їхньої роботи підвищується вдвічі порівняно з інструментом, загартованим звичайним способом. Для рівномірного нагрівання матеріалу у цьому випадку зазвичай використовують сканування променя по оброблюваній поверхні за допомогою відхиляючої магнітної системи.

### **11.3 Загальні переваги та недоліки електронно-променевої обробки матеріалів.**

Технологія електронно-променевої обробки матеріалів характеризується такими *загальними перевагами*:

1) можливість за рахунок фокусування електронного променя плавно змінювати у широких межах питому енергію у зоні нагрівання.

2) велика потужність (від десятків ватів до мегаватів) у місці взаємодії електронного променя з оброблюваною заготовкою.

3) відносна простота керування просторовим положенням електронного променя за допомогою магнітної системи та можливість модулювання променя за потужністю.

4) наявність вакууму як робочого середовища і, як наслідок, чистота процесу.

5) можливість отримання малорозмірної (прецизійної) зони дії електронного променя на оброблюваний матеріал.

#### ***Недоліки електронно-променевої обробки матеріалів:***

1) необхідність забезпечувати високий вакуум, що для ряду виробів надзвичайно складно.

2) складність виготовлення та експлуатації електронно-променевого обладнання.

3) наявність рентгенівського випромінювання, що вимагає використання спеціальних засобів захисту.

## ЛЕКЦІЯ 12. ОСАДЖЕННЯ ЗНОСОСТІЙКИХ ПОКРИТТІВ НА РІЗАЛЬНІ ІНСТРУМЕНТИ

*План.*

*1 Загальна характеристика зносостійких покриттів для різальних інструментів.*

*2 Вимоги до зносостійких покриттів для різальних інструментів.*

*3 Класифікація технологічних методів нанесення зносостійких покриттів.*

*4 Методи хімічного осадження зносостійких покриттів (методи ХОП).*

*5 Метод осадження покриттів конденсацією з плазмової фази з іонним бомбардуванням (метод КІБ).*

*СРС: Управління процесом осадження покриття з парогазової фази. Обладнання для осадження покриттів з парогазової фази. Управління процесом вакуумно-плазмового осадження покриття. Обладнання для вакуумно-плазмового осадження покриттів. Конструктивні особливості установки «Булат-6». Підготовка різального інструменту під нанесення зносостійкого покриття.*

*Література:* [1, с. 266–277, с. 298–302; 6, с. 38–44; 8; 9].

### *12.1 Загальна характеристика зносостійких покриттів для різальних інструментів.*

*Різальні властивості інструментальних матеріалів* визначаються цілим комплексом чинників. Зокрема, вони залежать від хімічного складу, структури та кристалохімічної будови кристалічної ґратки інструментального матеріалу, які визначають його твердість, теплостійкість, теплопровідність, міцність, ударну в'язкість, інші фізико-механічні та експлуатаційні властивості, від яких, в свою чергу, залежать характеристики фізичних процесів у зоні різання, напружено-деформований стан і працездатність інструменту.

Створення інструментального матеріалу, що характеризується ідеальним поєднанням властивостей у об'ємі однорідного тіла, є практично неможливим. Більшість інструментальних матеріалів має тільки певний набір високих характеристик, що робить область їхнього раціонального використання дуже обмеженою. Наприклад, надтверді інструментальні матеріали, різальна мінералокераміка мають, з одного боку, високі твердість, зносостійкість, відносно високу теплостійкість, проте з іншого боку характеризуються низькою ударною в'язкістю, підвищеною

крихкістю, низькою міцністю на згин. Найбільш ефективна область їхнього використання – чистова обробка деталей при високих швидкостях різання та обмеженою площею перетину зрізу. Швидкорізальні сталі характеризуються відносно невисокою теплостійкістю, середньою твердістю, високими міцністю на згин та ударною в'язкістю, а також високою межею витривалості. Тому інструменти зі швидкорізальних сталей мають більші переваги при малих та середніх швидкостях різання у поєднанні з середніми та великими значеннями площі перетину зрізу.

Нанесення на інструментальний матеріал зносостійкого покриття дозволяє створити на робочих поверхнях різального інструменту необхідний комплекс властивостей зі збереженням вихідних властивостей у обсязі інструментального матеріалу. Це дозволяє наблизитися до вирішення задачі створення *«ідеального» інструментального матеріалу*, що характеризується високою зносостійкістю поверхневого шару у поєднанні з достатньою об'ємною міцністю та ударною в'язкістю. Інструментальний матеріал зі зносостійким покриттям буде задовольняти найвищим вимогам, що висуваються до якості та надійності інструменту, продуктивності механічної обробки.

Під словом *«зносостійке покриття»* розуміють таке утворення на поверхні інструментального матеріалу, яке, істотно відрізняючись за своїми кристалохімічними, фізико-механічними та теплофізичними властивостями від відповідних властивостей інструментального матеріалу основи, значно покращує властивості останнього.

Таким чином, інструментальний матеріал зі зносостійким покриттям можна розглядати як принципово новий тип композиційного матеріалу з оптимальним поєднанням заданих «поверхневих» та «об'ємних» властивостей.

Використання різальних інструментів зі зносостійкими покриттями дозволяє забезпечити:

- 1) значне підвищення стійкості та надійності різального інструменту;
- 2) підвищення продуктивності механічної обробки деталей;
- 3) скорочення питомих витрат дорогих інструментальних матеріалів та гостродефіцитних елементів (вольфраму, молібдену, танталу, кобальту) для їхнього виготовлення;
- 4) розширення ефективної сфери використання твердих сплавів та скорочення номенклатури використовуваних сплавів стандартних марок;
- 5) підвищення якості обробленої поверхні та точності оброблюваних деталей;
- 6) поліпшення оброблюваності складнолегованих сталей та сплавів;
- 7) підвищення різальної здатності інструментів, виготовлених з низьколегованих матеріалів.

***Підвищення різальних властивостей інструменту при нанесенні зносостійкого покриття*** забезпечується за рахунок:

- 1) високої твердості покриття порівняно з твердістю інструментального матеріалу основи;
- 2) високої зносостійкості покриття, що перевищує зносостійкість інструментального матеріалу основи;
- 3) зниження адгезійної взаємодії інструментального та оброблюваного матеріалів, що призводить до зниження інтенсивності адгезійного зношування інструменту;
- 4) виконання покриттям бар'єрної функції, що перешкоджає дифузійній взаємодії оброблюваного та інструментального матеріалів.

Причини і механізм підвищення різальних властивостей інструменту відповідно зі швидкорізальних сплавів та твердих сплавів при нанесенні на них зносостійких покриттів мають свою специфіку.

Покриття суттєво впливає на всі характеристики процесу різання інструментом зі швидкорізальної сталі. Зокрема, при роботі швидкорізальним інструментом з покриттям знижуються сили різання, зменшується коефіцієнт укорочення стружки та довжина контакту стружки з передньою поверхнею інструменту, збільшується кут зсуву, знижується потужність теплових джерел при різанні, знижується середня температура на задній поверхні інструменту та підвищується середня температура на передній поверхні. Підвищення різальних властивостей інструментів зі швидкорізальних сталей з покриттям пояснюється переважно не так зносостійкістю самого покриття, як зміною температурно-силового режиму роботи інструменту.

При різанні твердосплавним інструментом основний ефект зносостійкого покриття полягає у зниженні адгезійної взаємодії інструменту з оброблюваним матеріалом, що призводить до зниження інтенсивності адгезійного зношування інструменту, а також рівня силового навантаження на інструмент, внаслідок чого знижується імовірність його крихкого руйнування. Крім того, покриття є ефективним бар'єром проти дифузійної взаємодії оброблюваного та інструментального матеріалів. Висока міцність твердосплавної основи та достатня зносостійкість самого покриття забезпечують його цілісність протягом тривалого часу роботи інструменту, завдяки чому покриття ефективно захищає інструментальний матеріал основи від дифузійного зношування.

## ***12.2 Вимоги до зносостійких покриттів для різальних інструментів.***

Весь комплекс ***вимог до зносостійких покриттів для різальних інструментів*** може бути розділений на чотири групи.

До *першої групи вимог* відносять *вимоги до службового призначення покриття*:

1) висока твердість, що перевищує твердість інструментального матеріалу основи, а також збереження високої твердості при підвищених температурах, які супроводжують процес різання;

2) інертність до адгезійної взаємодії з оброблюваним матеріалом у всьому розглянутому діапазоні температур;

3) стійкість до високотемпературної корозії та окислення;

4) стабільність механічних властивостей при температурах, не нижчих за температуру теплостійкості інструментального матеріалу; інертність до розчинення у оброблюваному матеріалі при високих температурах;

5) опір руйнуванню при значних коливаннях температур і напружень.

До *другої групи вимог* відносять *вимоги до поєднання характеристик покриття та інструментального матеріалу основи*:

1) схожість кристалохімічної будови матеріалів покриття та основи, при якому можливо забезпечити міцний адгезійний зв'язок між ними;

2) оптимальне співвідношення основних фізико-механічних і теплофізичних характеристик (модулю пружності, коефіцієнтів Пуасона, термічного розширення, теплопровідності) матеріалів покриття та основи;

3) відсутність твердофазних дифузійних реакцій між матеріалами покриття та основи у всьому діапазоні температур і контактних навантажень;

4) мала схильність до утворення крихких подвійних сполук між матеріалами покриття та основи.

До *третьої групи вимог* віднесені *вимоги до технологічних особливостей процесів отримання покриттів*:

1) формування покриття при температурах, що виключають рекристалізаційні процеси у матеріалі основи;

2) формування покриттів в умовах, що виключають зниження міцності при стисканні, розтягу, згині матеріалу основи;

3) можливість отримання заданих хімічного складу, властивостей та структури покриття при обраному методі нанесення покриття.

До *четвертої групи вимог* відносять *загальні вимоги до зносостійких покриттів для різальних інструментів*:

1) висока щільність та цільність покриття, що виключає доступ активних реагентів до поверхні інструментального матеріалу основи;

2) гранично малі коливання товщини покриття на робочих поверхнях інструменту та на різальній кромці (рівнотовщинність покриття);

3) стабільність властивостей покриття на робочих поверхнях інструменту;

4) можливість отримання покриттів гранично простим та економічним способом;

5) стабільність властивостей покриттів у часі.

Найбільшою мірою перерахованим вимогам відповідають **зносостійкі покриття на основі карбідів, нітридів, карбонітридів тугоплавких перехідних металів IV–VI груп Періодичної системи хімічних елементів Д. І. Менделєєва**. Унікальність властивостей цих сполук пов'язана з наступними особливостями їхньої кристалохімічної будови:

1) характерною особливістю перехідних металів є наявність у них дефекту електронів на внутрішніх електронних орбітах, що робить їх дуже вразливими до присвоєння електрона від будь-якого джерела;

2) більшість сполук перехідних металів мають широкі області гомогенності, що дозволяє в залежності від вмісту кисню, азоту та вуглецю досить сильно змінювати їхні фізико-механічні властивості (ця обставина є дуже важливою з точки зору можливості варіювання властивостями покриттів в залежності від умов їхнього використання);

3) перехідні метали та їхні сполуки мають дуже високу температуру плавлення, що забезпечує отримання найбільш стійких у термодинамічному сенсі покриттів, здатних успішно протистояти дифузійним реакціям, корозії та окисленню при підвищених температурах.

Використання однієї з тугоплавких сполук у якості зносостійкого покриття не завжди може задовольнити основні вимоги, що висуваються до покриттів для різальних інструментів. Тому все більшого поширення набувають **багат шарово-композиційні зносостійкі покриття**. Останні у найбільшій мірі здатні забезпечити відповідність складному комплексу вимог, що висуваються до покриттів для різальних інструментів, і, крім того, здатні добре чинити опір крихкому руйнуванню в умовах розвитку тріщин або сильних пластичних деформацій леза.

На рисунку 12.1 представлена схема багат шарово-композиційного зносостійкого покриття для різального інструменту.

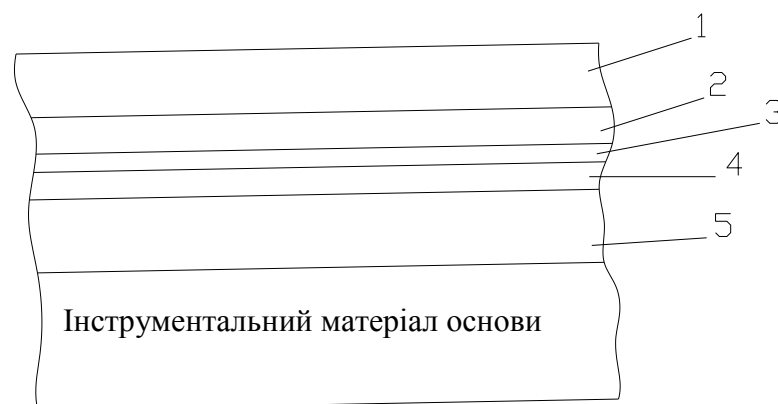


Рисунок 12.1 – Схема багат шарово-композиційного зносостійкого покриття для різального інструменту

**Шар 5**, що безпосередньо прилягає до інструментального матеріалу основи, повинен забезпечити міцний зв'язок покриття з поверхнею основи. Очевидно, що в цьому випадку кристалохімічна будова матеріалу шару 5 та інструментального матеріалу основи повинна бути максимально схожою.

**Шар 1**, що безпосередньо контактує з оброблюваним матеріалом, перш за все повинен мати низьку схильність до фізико-хімічної взаємодії з оброблюваним матеріалом, слугувати своєрідним бар'єром проти дифузійних реакцій між інструментальним та оброблюваним матеріалами. Крім того шар 1 повинен досить добре чинити опір явищам високотемпературної корозії та окислення, крихкого руйнування в умовах багаторазового навантаження.

Призначення шарів 2 та 4 – забезпечувати зв'язок між шарами 5, 3 та 1, що несуть основне функціональне навантаження, тому їхні властивості повинні забезпечувати плавний перехід або від властивостей шару 5 до властивостей шару 3 (у випадку шару 4), або від властивостей шару 1 до властивостей шару 3 (у випадку шару 2). Нарешті шар 3 може ефективно здійснювати чисто бар'єрні функції (наприклад, збільшувати термодинамічну стійкість покриття в цілому, збільшувати або зменшувати його теплопровідність тощо).

### **12.3 Класифікація технологічних методів нанесення зносостійких покриттів.**

З урахуванням специфіки **процесів формування зносостійких покриттів** існуючі технологічні методи їхнього нанесення можна розділити на три основні групи.

До **першої групи** належать методи, при яких формування покриттів здійснюється переважно за рахунок **дифузійних реакцій** між насичуючими елементами та структурами інструментального матеріалу основи.

До **другої групи** належать методи, при яких формування покриття здійснюється за рахунок **хімічних реакцій** між елементами парогазових сумішей та **інтердифузійних реакцій** між компонентами парогазової суміші та структурами інструментального матеріалу основи.

До **третьої групи** належать методи формування покриттів за рахунок **хімічних та плазмохімічних реакцій** потоку частинок у об'ємі простору, що безпосередньо прилягає до поверхонь інструментального матеріалу основи.

Кожна з груп **технологічних методів нанесення покриттів на різальні інструменти** має свої переваги та недоліки.

До **методів першої групи** відносять **хіміко-термічні методи нанесення покриттів (ХТМ)**, що базуються на твердоподібному, рідинному та газовому насиченні поверхонь інструменту. Дифундуючі



елементи можуть насичувати поверхні інструментів безпосередньо без проміжних реакцій або з попередньою хімічною реакцією на межі між інструментальним матеріалом основи та покриттям, або ж у об'ємі вихідних реагентів. Хіміко-термічні методи включають такі методи, як насичення поверхні інструментальних сталей азотом та вуглецем у газових та рідинних середовищах, іонне азотування та цементацію у плазмі тліючого розряду, борування, інтероксидування та ін.

Внаслідок насичення інструментального матеріалу дифундуючими елементами утворюються **дифузійні шари**, кристалохімічна будова та властивості яких сильно відрізняються від будови та властивостей вихідного інструментального матеріалу основи. Дифундуючі елементи покращують властивості поверхневого шару інструментального матеріалу основи. Швидкість утворення, кінетика зростання покриття, його структура та властивості значною мірою визначаються температурою процесу, часом насичення, параметрами дифузії насичуючих компонентів у інструментальному матеріалі основи та суттєво залежать від хімічного складу, структури та властивостей останнього.

Хіміко-термічні методи дозволяють отримати покриття товщиною 10...40 мкм, що дає можливість збільшити стійкість різних типів інструментів зі швидкорізальних та вуглецевих сталей у 1,5...2 рази.

Серед ХТМ найбільші переваги має іонне азотування інструментів зі швидкорізальних сталей. За його допомогою можливо отримати покриття з мінімальними деформаціями інструменту при високій швидкості насичення азотом (у плазмі тліючого розряду) і регулюванні структури та властивостей нітридних шарів. Ефективність швидкорізальних інструментів з іонним азотуванням поверхневих шарів значно знижується при товщині азотованого шару більше ніж 25...30 мкм і твердості шару близько HV 1100...1200 через крихке руйнування леза інструменту.

ХТМ дозволяють лише обмежено підвищувати поверхневі властивості швидкорізальних сталей за рахунок варіювання технологічними параметрами процесу, тому ефективність цих методів є відносно невисокою.

До методів першої групи можна віднести також **метод термодифузійного насичення твердосплавних пластин (метод ДТ)**.

До **методів другої групи** відносять **методи хімічного осадження покриттів з парогазової фази (методи ХОП)**, які отримали у світовій практиці найменування методів **CVD (Chemical vapour deposition)**.

Методи ХОП набули широкого поширення для нанесення покриттів на основі карбідів, нітридів, карбонітридів титану, а також оксиду алюмінію на змінні багатогранні твердосплавні різальні пластини. На основі методу ХОП були розроблені технології, що використовуються відомими світовими виробниками твердосплавних інструментів (*Sandvik Coromant, Teledyne, Plansee, Widia Krupp* та ін). У колишньому СРСР

(ВНІТС) був розроблений метод нанесення карбідотитанових покриттів на твердосплавні змінні багатогранні пластини, що отримав найменування **методу ГТ**.

Різновидом методів ХОП є також **метод вакуумного титанування (метод КВТК)**, розроблений Московським інститутом інженерів транспорту спільно з Московським комбінатом твердих сплавів (МКТС).

Відмінною особливістю покриттів, отриманих методом ХОП, є формування **перехідної зони** між покриттям і основою твердого сплаву; цю перехідну зону часто називають **h-фазою**. Формування перехідної зони пов'язане з інтердифузійними реакціями між насичуючим тугоплавким металом з парогазової суміші та компонентами твердого сплаву.

Методи другої групи зазвичай реалізуються при температурах близько 1000...1100 °С, що виключає їхнє використання для нанесення покриттів на інструменти зі швидкорізальної сталі. Нанесення покриттів методами ХОП дозволяє підвищити стійкість твердосплавних різальних пластин до 3...10 разів у широкій області використання пластин.

До **третьої групи методів** відносять **методи фізичного осадження покриття (методи ФОП)**, які отримали у світовій практиці найменування **методів PVD (Physical vapour deposition)**. Процеси ФОП зазвичай передбачають вакуумне випаровування тугоплавкого металу, його часткову або повну іонізацію (при частковій іонізації утворюється пароплазмова фаза), подачу реакційного газу, хімічні та плазмохімічні реакції, конденсацію покриття на робочих поверхнях різального інструменту.

Серед методів ФОП найбільшого поширення набув **метод конденсації покриття з плазмової фази з іонним бомбардуванням** поверхонь інструменту (**метод КІБ**), розроблений Харківським фізико-технічним інститутом (ХФТІ), а також **метод реактивного електронно-променевого плазмового осадження покриттів з пароплазмової фази у вакуумі (метод РЕП)**.

Можливість широкого варіювання температурою у зонах нанесення покриттів дозволяє використовувати вакуумно-плазмові методи у якості універсальних методів нанесення покриттів на інструменти з твердих сплавів та швидкорізальних сталей. Вакуумно-плазмові методи є найбільш універсальними і з точки зору можливості отримання широкої гами одношарових, багатшарових та композиційних покриттів на базі нітридних, карбідних, карбонітридних, оксидних, боридних сполук тугоплавких металів.

Використання вакуумно-плазмових методів нанесення покриттів значно розширює технологічні можливості інструментів з покриттями. Ці методи дозволяють більш ефективно, ніж методи першої і другої груп, керувати процесами отримання покриттів із заданими властивостями, а також попереджати утворення геометричних, кристалохімічних

та фізико-механічних дефектів на поверхневих шарах інструментального матеріалу.

Найбільш характерною особливістю покриттів, отриманих вакуумно-плазмовим методом, є відсутність перехідної зони між покриттям та інструментальним матеріалом основи. Це обумовлено досить слабкою взаємодією між конденсатом та субструктурою інструментального матеріалу основи в умовах відносно низьких температур останнього. Ця обставина є дуже важливою, оскільки створює можливість отримання комплексу високих поверхневих властивостей на лезах інструменту практично без погіршення його об'ємних властивостей – міцності та ударної в'язкості.

До методів третьої групи відносяться також *плазмові* та *детонаційні методи напилення покриттів*, які лише обмежено використовуються у виробництві різальних інструментів. Особливо незадовільно працюють інструменти з напиленням плазмовими та детонаційними покриттями, якщо вони мають криволінійні поверхні або складну форму леза. Це пов'язано з сильно вираженим спрямованим ефектом потоку частинок, що формують покриття.

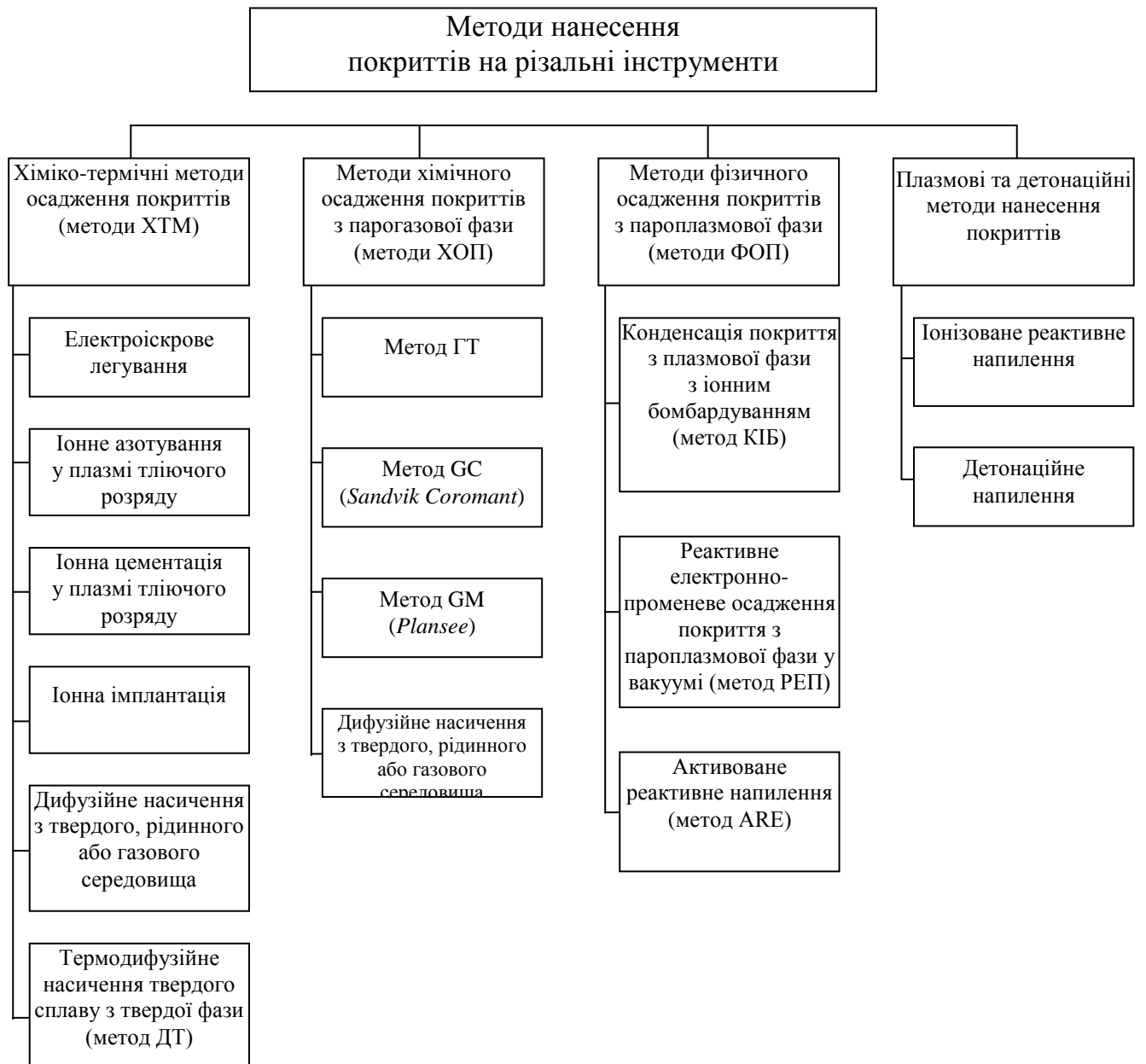
Недоліками *напиленних плазмових покриттів* є висока шпаруватість, слабка адгезія з інструментальним матеріалом основи, необхідність ретельної підготовки поверхні інструменту, складність управління властивостями покриття. Крім того, плазмові методи нанесення покриттів є недостатньо продуктивними, і при їхньому використанні створюються сильні шуми.

Дещо більш якісні покриття формуються при використанні детонаційного методу, коли покриття утворюється за допомогою енергії вибуху газових сумішей.

*Детонаційні покриття* характеризуються високою щільністю та доброю адгезією з матеріалом основи. Однак цим покриттям притаманні основні недоліки напиленних покриттів, до того ж при детонаційному напиленні створюється шум, що перевищує 140 дБ; ще одним недоліком є дуже висока вартість обладнання.

Найбільшого поширення у вітчизняній промисловості отримали *методи ГТ* та *КІБ*. *Метод ГТ* використовують для нанесення зносостійких покриттів на змінні твердосплавні різальні пластини у масовому виробництві на комбінатах твердих сплавів. *Метод КІБ* широко використовують для нанесення покриттів на різні типи інструментів зі швидкорізальних сталей та твердих сплавів в умовах спеціалізованих ділянок інструментальних заводів та інструментальних цехів машинобудівних підприємств.

Класифікація методів нанесення зносостійких покриттів на різальні інструменти наведена на рисунку 12.2.



*Рисунок 12.2 – Класифікація методів нанесення зносостійких покриттів на різальні інструменти*

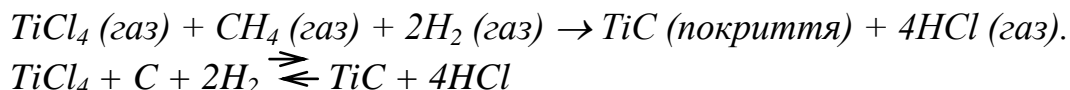
#### **12.4 Методи хімічного осадження зносостійких покриттів (методи ХОП).**

В основі **методів хімічного осадження зносостійких покриттів (методів ХОП)** лежать хімічні реакції у оточуючому інструмент парогазовому середовищі, у результаті яких утворюються сполуки, що конденсуються на поверхнях інструменту рівномірним однорідним шаром. Для отримання сполук тугоплавких металів у якості вихідних продуктів використовують газоподібні галогеніди. В результаті їхньої взаємодії з іншими складовими сумішей (воднем, метаном, окисом вуглецю та ін.) утворюються та конденсуються необхідні сполуки (карбіди,

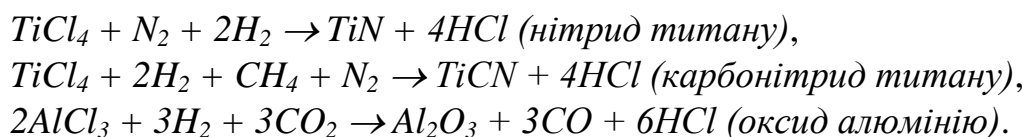
нітриди, карбонітриди, бориди та оксиди тугоплавких металів IV...VI груп Періодичної системи елементів Д. І. Менделєєва).

При нанесенні покриттів на твердосплавні різальні пластини зазвичай використовують процес водневого відновлення пари галогеніду срібла тугоплавкого металу при температурах близько 1000...1100 °С. Процеси ХОП можуть проходити як при нормальному тиску, так і при певному розрідженні.

Утворення покриття з карбіду титану відбувається у відповідності з наступною хімічною реакцією:



Рівняння хімічних реакцій утворення деяких інших поширених сполук для зносостійких покриттів мають вигляд:



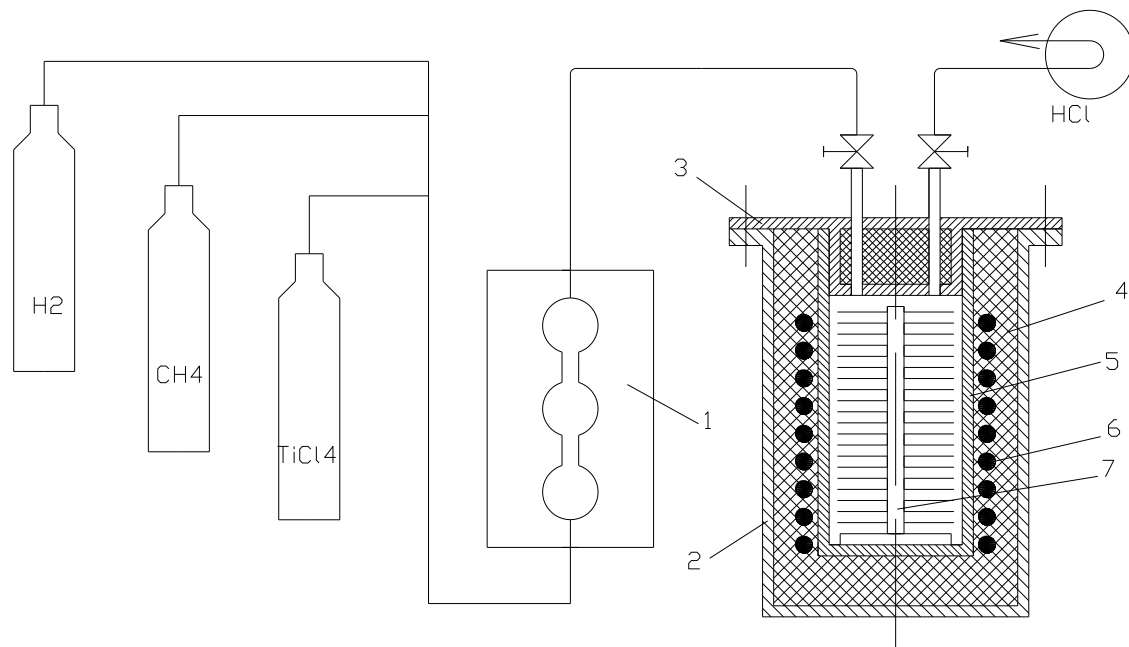
Якість покриття, його властивості та структура залежать від низки параметрів процесу газофазового осадження. Найбільш суттєву роль відіграє температура. Від температури залежать структура покриття та міцність його адгезії (зчеплення) з твердосплавною основою.

Остання характеристика (міцність зчеплення) визначається також можливістю дифузійної взаємодії пари «покриття–твердий сплав». Взаємна дифузія підвищує міцність зчеплення покриття та твердого сплаву і, в свою чергу, залежить від температури та кристалохімічної будови осаджуваного покриття та твердого сплаву. При нестачі вуглецю у поверхневому шарі твердого сплаву можливе утворення фази з подвійного карбіду вольфраму та кобальту  $W_3Co_3C$ , яка знижує міцність зчеплення покриття з твердосплавною основою.

На властивості та параметри покриття (мікротвердість, товщину, фазовий склад, структуру) впливають: температура, концентрація компонентів парогазової суміші, тиск суміші та швидкість її подачі, вихідна чистота компонентів суміші. Особливо шкідливою є присутність активних реагентів типу  $O_2$ ,  $H_2O$ ,  $N_2$ , які призводять до підвищення крихкості покриття, зниження міцності його зчеплення з твердим сплавом, різкої зміни фізико-механічних і теплофізичних властивостей покриття. Тому до чистоти вихідних компонентів газової суміші висувають підвищені вимоги.

Осадження покриттів методом ГТ здійснюється у спеціальних установках, які називаються реакторами (рисунок 12.3). Реактор являє

собою вертикальну шахту, що складається зі сталевого корпусу 2, муфеля 5 та кришки 3. Муфель виготовлений з термостійкого і корозійно-стійкого матеріалу та ізолюваний від корпусу вогнетривким матеріалом 4. Стінки муфеля нагріваються ніхромовим нагрівальним елементом 6. Через кришку 3 здійснюється напуск до муфеля газової суміші з газозмішувача 1 та відведення з муфеля продуктів реакцій. Усередині муфеля на етажерках 7 розміщують твёрдосплавні пластини.



1 – газозмішувачі; 2 – сталевий корпус; 3 – кришка; 4 – вогнетривкий матеріал; 5 – муфель; 6 – нагрівальний елемент; 7 – етажерка

Рисунок 12.3 – Схема установки для нанесення зносостійких покриттів методом ГТ

**Технологічний процес хімічного осадження покриттів на твёрдосплавні різальні пластини** передбачає наступні операції:

- підготовку пластин і завантаження реактора;
- розігрівання реактора до температури  $1050 \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$  (час розігрівання – 10 хв, тиск у муфелі –  $0,1 \dots 0,5 \text{ Па}$ );
- осадження покриття при температурі  $1050 \text{ }^\circ\text{C}$  (час осадження – 15 хв, тиск газу у муфелі –  $0,5 \dots 1,0 \text{ Па}$ , співвідношення  $\text{CH}_4 / \text{TiCl}_4 = 10 \dots 16$ , швидкість газового потоку –  $5,5 \dots 6 \text{ м/с}$ );
- охолодження реактора до температури  $200 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- розвантаження реактора.

У ВНІТС було розроблено спеціальне обладнання для реалізації різновиду методу ХОП – методу ГТ. Найбільшу продуктивність забезпечує установка карусельного типу, у якій термічну обробку здійснюють у безперервному циклі, а завантаження та розвантаження реакторів твёрдосплавними різальними пластинами не вимагає зупинки процесу.

Установка карусельного типу є найбільш ефективною при масовому виробництві змінних багатогранних твердосплавних різальних пластин з покриттям. Для використання методу ГТ в умовах інструментальних цехів машинобудівних підприємств створена компактна установка УНП. Установка дозволяє наносити покриття з карбідів та нітридів титану не тільки на змінні багатогранні твердосплавні різальні пластини, але і на монолітний твердосплавний інструмент (свердла, кінцеві фрези, довбачі та ін.).

Вихідні компоненти перед подачею до реактору змішують у газозмішувачі.

Карбідотитанові покриття, отримані методом ГТ на твердосплавних основах, складаються з полікристалічного карбїду титану з субмікронними зернами без видимих включень. Між покриттям і твердосплавною основою наявна перехідна зона товщиною 0,5...0,6 мкм, яка має хімічну формулу  $Co_3W_3C$ . Локальні об'єми твердосплавних матриці безпосередньо у перехідній зоні є декарбідизованими.

Поверхнева структура покриття  $TiC$  (ГТ) свідчить про наявність дефектів кристалічної будови; протяжність зони контакту зерен  $TiC$  між собою є відносно малою.

Характерним для покриття  $TiC$  (ГТ) є зростання розміру зерен при переході від твердосплавних матриць до поверхні покриття. Перехідний шар ( $\eta$ -фаза) характеризується наддрібним зерном. У об'ємі покриття та на межі покриття і твердосплавної основи виявлені шпарини, причому найбільші з них розташовані на цій межі.

Найбільший вплив на працездатність твердосплавних різальних пластин справляє температура процесу, концентрація  $TiCl_4$ , відношення  $CH_4 / TiCl_4$ . Швидкість газового потоку не справляє помітного впливу на якість покриття; задовільні результати забезпечуються при швидкості 5,5...6 м/с. Підвищення співвідношення  $CH_4 / TiCl_4$  до 16 сприяє помітному зростанню стійкості пластин, оскільки сприятливо змінюється мікроструктура покриття та перехідного шару. Різко негативний вплив на стійкість пластин з покриттям справляє вологість водню, погіршуючи властивості покриття, зумовлюючи появу шпаруватості покриття, включень тощо.

### **12.5 Метод осадження покриттів конденсацією з плазмової фази з іонним бомбардуванням (метод КІБ).**

**Метод осадження покриттів конденсацією з плазмової фази з іонним бомбардуванням** (метод КІБ) базується на тому, що плазмовий потік металу, утворений за допомогою вакуумної дуги з холодним катодом, прискорюється шляхом додавання негативного потенціалу до підкладинки (інструменту) з подальшою конденсацією на ньому плазми

відповідного складу і нейтральних атомів при одночасному проходженні їхньої плазмохімічної реакції з реактивним газом. Подаючи до вакуумної камери газ-реагент під час електродугового випаровування тугоплавкого металу, можна отримувати покриття на основі нітридів, карбідів та інших сполук тугоплавких перехідних металів IV...VI груп Періодичної системи хімічних елементів Д. І. Менделєєва.

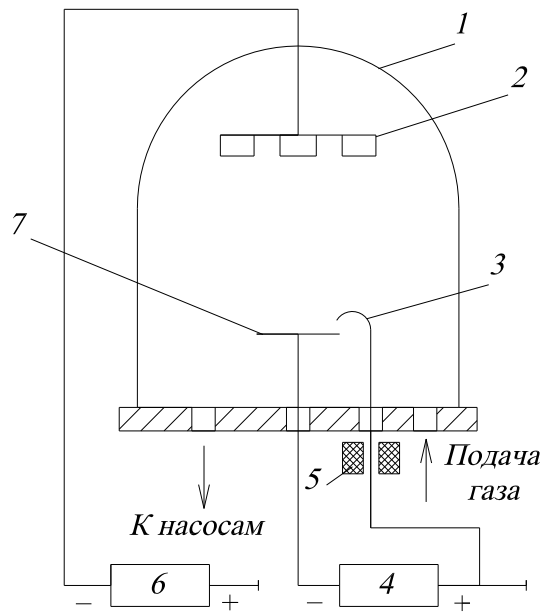
Важливою особливістю методу КІБ є можливість проведення ефективного іонного очищення та розігрівання поверхні підкладки шляхом інтенсивного бомбардування її прискореними іонами розпиленої речовини, що створює умови для високої адгезії покриття до підкладки (інструментального матеріалу основи). При високому потенціалі підкладки (1 кВ та вище) прискореними іонами розпилюється не тільки осаджуваний метал, але частково – і матеріал поверхневого шару підкладки. Так здійснюється іонне травлення підкладки, що забезпечує очищення її поверхні. Одночасно прискорені іони проникають у підкладку, насичуючи тонкий приповерхневий шар. Глибина проникнення іонів у цьому випадку виявляється достатньою для забезпечення надійної адгезії покриття. Розігрівання поверхні, іонне травлення та іонна імплантація забезпечують добру адгезію зносостійкого покриття до підкладки.

Схема нанесення покриттів з плазми електродугового розряду методом КІБ представлена на рисунку 12.4.

Технологічний процес осадження зносостійких покриттів з плазми електродугового розряду методом КІБ включає наступні операції:

- підготовку пластин та завантаження вакуумної камери;
- відкачування вакуумної камери до тиску  $10^{-3} \dots 10^{-5}$  Па (час вакуумування – 20 хв);
- очищення та розігрівання підкладки (струм дуги – 100 А, струм на підкладці – 15 А, напруга на підкладці – 1 кВ, тривалість процесу – 5...10 хв);
- осадження покриття (струм дуги – 100 А, струм на підкладці – 25 А, напруга на підкладці – 0,3 кВ, робочий тиск у камері – 0,5 Па, тривалість операції – 20...25 хв);
- охолодження вакуумної камери до температури 60 °С (тривалість операції – 15 хв);
- розгерметизацію та розвантаження вакуумної камери.





1 – корпус вакуумної камери (анод); 2 – оброблювані вироби (підкладинки); 3 – електромеханічний підпал дуги; 4 – джерело живлення дуги; 5 – електромагніт; 6 – джерело живлення для подачі негативного потенціалу на підкладинку; 7 – розпилюваний матеріал (катод)

Рисунок 12.4 – Схема нанесення покриттів з плазми електродугового розряду методом КІБ

## ЛЕКЦІЯ 13. ГЕНЕРАТИВНІ ПРОЦЕСИ ПРИСКОРЕНОГО ФОРМОУТВОРЕННЯ ВИРОБІВ

*План.*

*1 Сутність генеративних процесів прискореного формоутворення виробів.*

*2 Концептуальне 3D САD-моделювання в генеративних процесах прискореного формоутворення виробів.*

*3 Класифікація технологічних методів генеративної матеріалізації тривимірних моделей виробів.*

*СРС: властивості матеріалів, що використовуються в генеративних процесах прискореного формоутворення виробів*

*Література:* [1, с. 303–329].

### *13.1 Сутність генеративних процесів прискореного формоутворення виробів.*

Сучасні досягнення науки, інформатики, CNC-техніки, лазерної технології та ін. дозволили перейти від традиційних способів виготовлення виробів, пов'язаних зі зйомом матеріалу з заготовки, до генеративних способів формоутворення, пов'язаних з нарощуванням матеріалу, що дозволяє позбутися відразу кількох етапів створення виробів. До *інтегрованих генеративних способів прискореного формоутворення виробів*, належать, зокрема, *процеси «Rapid Prototyping»* (прискорене прототипування) або *RP-процеси*.

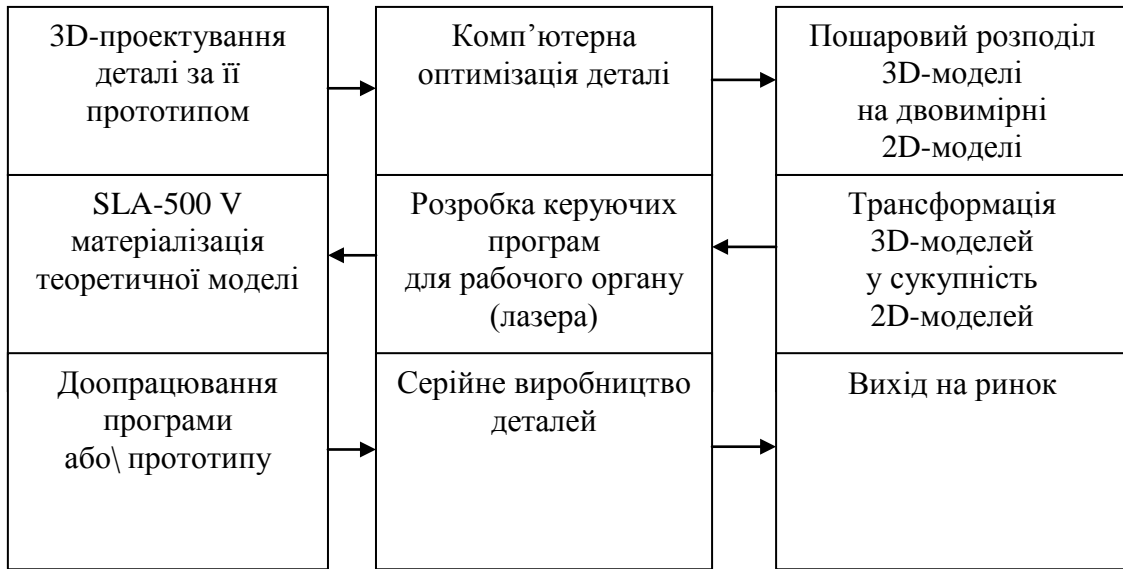
*Ідеологія генеративного прискореного формоутворення виробу* (моделі, прототипу) базується на наступних принципах:

– можливості комп'ютерного проектування виробу та комп'ютерної оптимізації його конструкції, виходячи з вимог дизайну, функціональних та інших властивостей;

– трансформації 3D-моделі виробу у сукупність пошарових моделей;

– можливості відтворення цієї сукупності пошарових моделей, тобто матеріалізації всієї моделі у якості єдиного цілого (твердотільного виробу або його прототипу) (рисунок 13.1).

Таким чином, *структура інтегрованого робочого процесу прискореного генеративного формоутворення виробу* може бути представлена у наступній послідовності:



*Рисунок 13.1 – Структура інтегрованого робочого процесу прискореного генеративного формоутворення виробу*

1 отримання тривимірної 3D-моделі виробу (модель створюється за кресленням та аналітичними залежностями. Якщо виріб відтворюється, то модель отримують на трикоординатній вимірювальній машині шляхом обмірювання оригіналу скануванням поверхні пошарово або поточною);

2 комп'ютерна оптимізація конструкції. (конструкція виробу створюється за програмами, виходячи з функціонального призначення, дизайну, інших вимог, що висуваються до виробу. Важливість цього етапу визначається ще й тим, що для комп'ютерної оптимізації не потрібні твердотільна модель чи виріб, що різко скорочує час на проектування);

3 пошарове представлення 3D-теоретичної моделі за допомогою сукупності відносно простих 2D-моделей;

4 створення програм комп'ютерного керування рухом робочого органу – «інструменту», за допомогою якого пошарово відповідно до сукупності 2D-моделей буде матеріалізуватися теоретична 3D-модель виробу або його прототипу;

5 пошарове отримання одним зі способів цільної твердотільної моделі виробу (або серій виробів);

6 остаточне отримання виробу (моделі) послідовним покращенням властивостей (для цього на першій стадії встановлюються вимоги до форми та властивостей очікуваного прототипу та потрібного виробу; на другій стадії частина відмінностей від вимог усувається за рахунок зміни параметрів процесу матеріалізації теоретичної моделі; на третій, заключній стадії відбувається «облагороджування» виробу, максимально можливе наближення його функціональних властивостей до вимог щодо зносостійкості, міцності, електропровідності, металізація, доводка тощо).

Вищевикладене дозволяє по-іншому вибудувати всю послідовність прототипування та виготовлення виробу, повністю базуючись на ідеології

генеративного пошарового виготовлення. Загальна схема етапів генеративного створення прототипів та виробів наведена на рисунку 13.2.

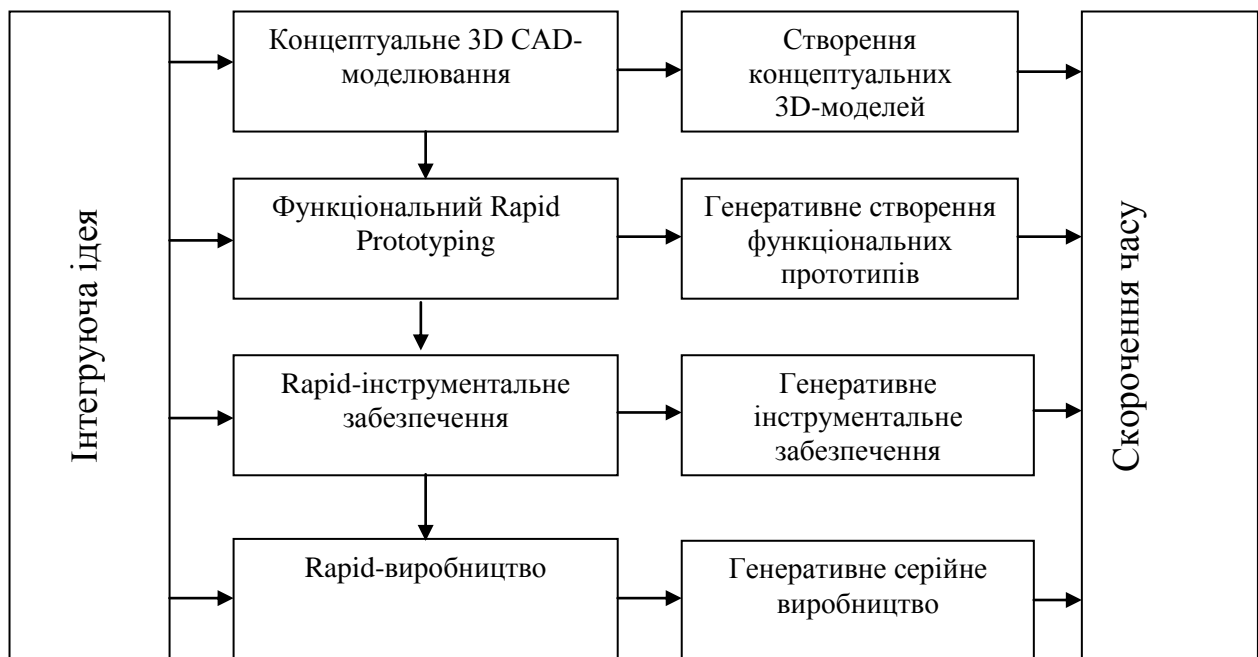


Рисунок 13.2 – Етапи генеративного створення прототипів та виробів

Порівняння з традиційними підходами до прототипування (де часто на виготовлення прототипів витрачається понад 25 % загального часу створення продукту: тільки при створенні функціонального зразка доводиться виготовляти до 5 прототипів) показують, що генеративна технологія є особливо ефективною на етапах прототипування та дозволяє суттєво скоротити кількість цих етапів.

Але головна перевага генеративної технології полягає у тому, що **ідея способу генеративного (пошарового) виготовлення є інтегруючою**, оскільки вона об'єднує **процеси моделювання, інструментального забезпечення та виготовлення**. Це дозволяє представити концептуальну структуру інтегрованих технологій, що базуються на ідеї генеративного виготовлення, наступним чином:

*Комп'ютерне створення концептуальних моделей → генеративне створення функціональних прототипів → генеративне створення інструментального забезпечення → генеративне серійне виробництво → вихід на ринок.*

### **13.2 Концептуальне 3D CAD-моделювання в генеративних процесах прискореного формоутворення виробів.**

**Створення CAD-моделі виробу** (3D-моделювання та трансформація теоретичної 3D-моделі у систему 2D-моделей), а також підготовка до подальшого використання моделі забирає основну частину часу RP-процесу. Воно вимагає підвищеної уваги ще й тому, що може використовуватися у якості діалогового інструменту для оптимізації конструкції виробу, для швидкого усунення недоліків дослідного зразка шляхом зміни банку даних. Найчастіше первісна модель представлена у якості якогось геометричного твердого тіла. За допомогою CAD-систем описується геометрія деталі для її подальшої математичної обробки за допомогою трикутної апроксимації (триангуляції).

Відправною точкою для кожного RP-методу є **тривимірний опис геометрії прототипу** (*Sliceprocess*). Виходячи з виду RP-обладнання, *Sliceprocess* може сам перетворитися на зовнішню систему обробки геометричної інформації або на систему керування процесом у обладнанні. На основі нього виникають різні формати, які використовуються системою керування процесу: двовимірні (формат HPGL) та тривимірні (формат STL).

Для опрацювання вхідної геометричній інформації використовуються різні процеси та функціональні варіанти:

- 3D CAD-об'ємний модулятор з отриманням тривимірних об'ємних даних або формату STL;
- цифрові напрямки для зйомки, фільтрації та очищення тривимірної точкової інформації єдиного фізичного примірника;
- система зворотного зв'язку для подальшої обробки великого числа тривимірних точкових даних та переведення цих даних у тривимірну плоску модель;
- система обробки рисунків для сепарації та селекції точкових даних у медичній техніці.

У якості формату інтерфейсу між різними системами, що розробляють геометрію моделі, використовуються стандартні інтерфейси JGES, VDA-FS, STL.

Створення 3D CAD-моделі пов'язано частіше із використанням оптико-електронної цифрової техніки на принципах триангуляції, що базується на вивченні точки, площі, об'єму із застосуванням фільтрів, скорочень, апроксимації та відповідного методу інтерполяції.

Зрозуміло, що при розробці інтегрованих технологій генеративного виготовлення виробів необхідне створення потужної мережі 3D-даних, оскільки 3D CAD-моделювання є своєрідним каталізатором у загальному ланцюгу етапів інтеграції методів, процесів, способів: *форма завдання виробу* → *3D CAD-моделювання* → *віртуальний інжиніринг* → *пошарова трансформація 3D-моделей у сукупність 2D-моделей* → *критерії вибору*

*та вибір способу RP-моделювання → RP-матеріалізація моделі (виготовлення виробу) → доопрацювання технології тиражування → механічна (CNC) та інші види обробки → модифікація матеріалу поверхневого шару → вихідний контроль (3D-вимірювальна програма).*

Процес створення та реалізації інтегрованих генеративних технологій виготовлення виробів можна зробити більш ефективним, якщо він буде поєднуватися з використанням можливостей телеінженерії.

Під **телеінженерією** розуміють промислове використання інтегрованої техніки мультимедіа-комунікації при синхронній аудіо-, відео та графічно-інтегрованої комунікації, розробкою та експлуатацією якою управляють провідні експерти. Впровадження телеінженерії відбувається за допомогою технологічної, технічної та організаційної інтеграції мультимедійної техніки.

Мультимедійна комунікація означає одночасну передачу синхронних (відео-, аудіо-) та асинхронних (тексти, графіки, таблиці) засобів, що дозволяє проводити спільні аудіо- та відеоконференції, спільну обробку документів на різних комп'ютерах, спільний огляд графічних файлів тощо. Телеінженерія дозволяє об'єднати для вирішення єдиного завдання досвід, знання, вміння фахівців, які перебувають у різних точках земної кулі.

### ***13.3 Технологічні способи генеративної матеріалізації тривимірних моделей виробів.***

***Способи матеріалізації теоретичних 3D-моделей для виготовлення виробів або їхніх прототипів*** є найважливішою складовою інтегрованого робочого процесу прискореного формоутворення, саме вони «відповідають» за скорочення часу створення виробу (прототипу), підвищення його якості, скорочення сумарних виробничих витрат. А в сукупності вони визначають головне – конкурентоздатність продукту на ринку.

Відомі способи матеріалізації теоретичних моделей відрізняються між собою за багатьма ознаками та технологічними можливостями, проте усім їм притаманні наступні **загальні ознаки**:

- 1) усі прототипи або вироби виготовляються на основі 3D CAD-проекування;
- 2) усі прототипи або вироби виготовляються пошарово;
- 3) вироби або їхні прототипи отримують не шляхом зйому припуску з заготовки, а за допомогою нарощування матеріалу, тобто генеративним способом;
- 4) нарощування матеріалу при формоутворенні відбувається найчастіше у перехідній його фазі з рідкого або порошкоподібного до твердого стану;

5) виготовлення виробу (прототипу) не вимагає форм або інструменту, а значить, відпадають проблеми, пов'язані зі зносом інструменту при формоутворенні різанням, штампуванням тощо;

б) відсутні обмеження, пов'язані зі складністю форми виробу (внутрішні порожнини, складні внутрішні або зовнішні поверхні), – чим складнішою є конфігурація виробу, тим більшою є перевага процесу;

7) різке скорочення витрат часу;

8) ефективність усіх RP-способів суттєво підвищується при їхній інтеграції з завершальною технологією виготовлення твердотільних виробів (вакуумне литво, литво під тиском і інші різновиди).

RP-способи можна класифікувати за такими ознаками, як стан вихідного матеріалу (рідкий, твердий, газоподібний), використання лазерної техніки тощо.

Способи можна групувати також за різновидом використовуваних матеріалів: фотополімери, термопласти, віск, папір, кераміка, метали.

Більш загальною є класифікація генеративних методів виготовлення за видом та способом нарощування матеріалу, які визначаються принципами дії різних установок:

– *селективна полімеризація матеріалу під дією світла або ультрофіолетового випромінювання;*

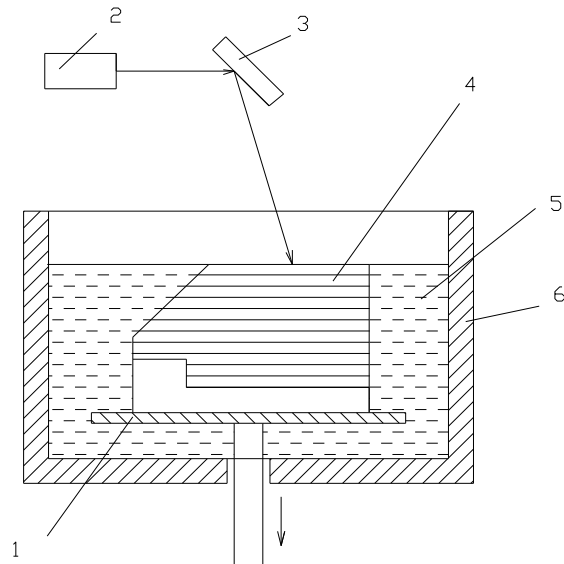
– *індуковане лазером оплавлення порошків;*

– *селективне затвердіння сплавів матеріалу;*

– *склеювання фольги та контурне обрізування.*

Розглянемо принципи та сутність основних із використовуваних способів генеративної матеріалізації тривимірних математичних моделей.

**Спосіб стереолітографії (SL-спосіб).** При SL-способі геометричне відтворення деталі здійснюється пошарово *дисперсійним затвердінням рідкого фотополімеру* за допомогою UV-лазера (*фотополімеризація*). Звичайні товщини шару становлять від 0,05 до 0,2 мм. На основі 3D CAD-даних для окремих площин перетину розробляються керуючі програми для XY-сканування поверхні рідкого фотополімеру. Схема отримання складнопрофільного прототипу SL-способом наведена на рисунку 13.3. Виріб створюється поступово на рухомій платформі 1 носія, яка знаходиться на початку обробки безпосередньо під поверхнею полімеру. Промінь лазера 2, керований комп'ютером, проходить по поверхні рідкого фотополімеру 5, «скануючи» її частину відповідно до конфігурації першого шару виробу. При цьому відбувається дисперсійне отвердіння цього шару фотополімеру. Полімеризація ініціюється лазерним випромінюванням або випромінюванням ртутних та люмінесцентних ламп. Ці випромінювання в рідкому реакційно-здатному середовищі породжують активні центри (радикали, іони, активовані комплекси), які при взаємодії з молекулами мономеру зумовлюють зростання полімерних ланцюгів, що призводить до фазового перетворення опроміненого середовища – отвердіння.



*1 – рухома платформа; 2 – лазер; 3 – дзеркала; 4 – виріб;  
5 – рідкий фотополімер; 6 – ванна*

*Рисунок 13.3 – Схема отримання складнопрофільного прототипу  
SL-способом*

Після цього платформа носія опускається на величину, що дорівнює товщині утвореного твердого шару. Так, послідовно, шар за шаром, відбувається відтворення тривимірної геометрії моделі виробу.

Стереолітографія пов'язана з фотополімерами, а відтак, світлочутливі властивості домінують над усіма іншими властивостями фотополімерного матеріалу (твердістю, еластичністю, температурною стійкістю). Ці властивості не відповідають властивостям серійних матеріалів заготовок, тому потрібно передбачити завершальні методи отримання виробів: лиття, покриття та ін. Тому процес стереолітографії буде двохетапним. На першому етапі у полімерній ванні стереолітографічного пристрою створюється ще відносно м'яка модель, що вимагає встановлення «опор», які готуються в ході передпроцесу та після закінчення виготовлення можуть бути видалені вручну. Виготовлені моделі повинні бути очищені розчинником та остаточно загартовані у печі.

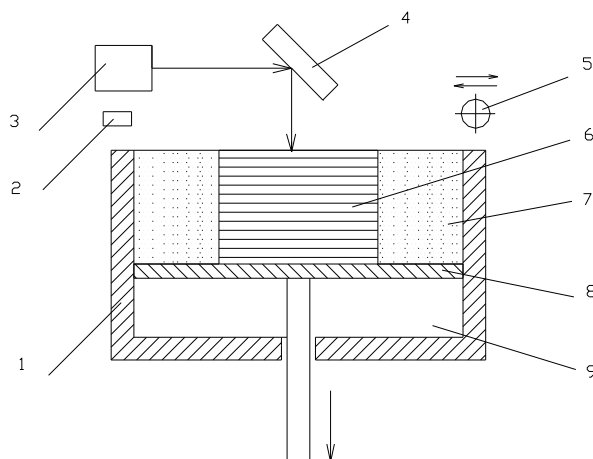
За допомогою SL-методу можна виготовити дуже складні геометричні поверхні з внутрішніми порожнинами, найтоншими стінками та отворами у субмікрообласті.

SL-метод – не тільки найточніший та найвідоміший з RP-методів, але і найбільш поширений у світі. 50 % усіх RP-пристроїв припадає на стереолітографічні. Типовими деталями для SL-способу є корпусні деталі. Складні тонкостінні вироби виготовляються з високою точністю та якістю.



Прототип потрібен для перевірки конструкції, ергономіки та дизайну, виробництва і монтажу, а також для аргументації під час переговорів з підприємствами-постачальниками.

**Спосіб вибіркового спечення (SLS-спосіб).** У якості вихідних матеріалів для цього способу використовуються порошкоподібні поліаміди, полікарбонади, полістирол, сплави нікелю та бронзи, сталі та ін. Подібно до рідкого полімеру при SL-способі порошок заповнює ванну або пошарово наноситься на рухому платформу. Луч CO<sub>2</sub>-лазера сканує поверхню порошку відповідно до конфігурації першого перетину та зумовлює локальне вибіркоче спечення порошкової маси. Керуючі дані для лазера вводяться, як і у попередньому способі, виходячи з 3D CAD-геометрії моделі. Вихідний матеріал пошарово у вигляді порошкової маси за допомогою згладжуючих роликів наноситься на платформу носія. Керований сканером промінь лазера здійснює локально розплавлення порошку. Виготовлення деталі відбувається пошарово. Платформа носія циклічно рухається донизу. Після закінчення виготовлення останнього шару виріб виймається та піддається спеціальній обробці. Загальна схема виборчого лазерного спечення наведена на рисунку 13.4.

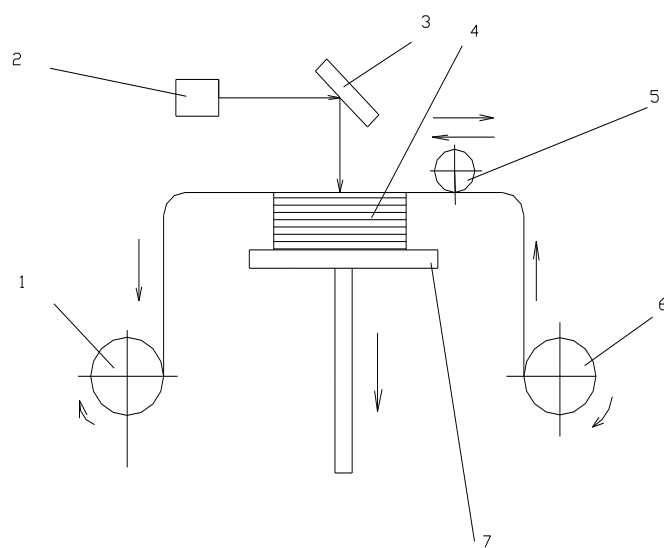


- 1 – робоча камера; 2 – картриджі; 3 – CO<sub>2</sub>-лазер;  
 4 – оптична скануюча система; 5 – згладжуючий ролик;  
 6 – виріб; 7 – полімерний порошок; 8 – платформа.

*Рисунок 13.4 – Загальна схема вибіркового лазерного спечення SLS-методом*

**Спосіб виготовлення шаруватих об'єктів (LOM-спосіб).** При LOM-способі шари виробу вирізаються один за одним з окремих аркушів клейкого паперу або фольги (листової) з металу, кераміки, композитів та з'єднуються вздовж зрізів за допомогою лазера. Загальна

схема виготовлення шаруватих об'єктів LOM-способом наведена на рисунку 13.5.



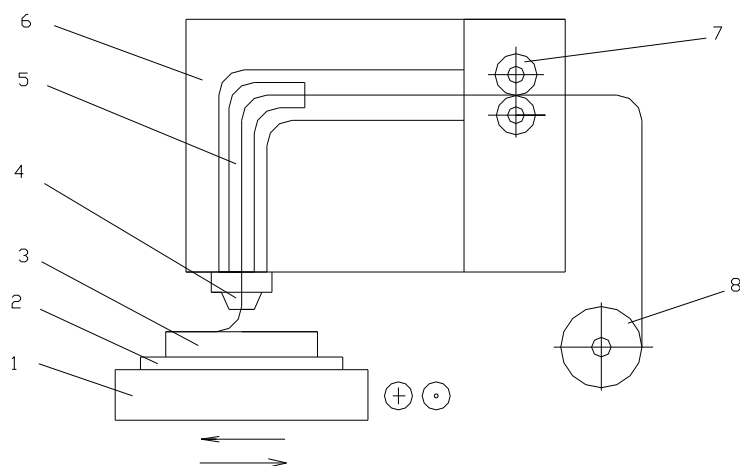
*1 – оброблюваний матеріал; 2 – лазер; 3 – скануюча система;  
4 – обойма; 5 – термовалик; 6 – листовий матеріал; 7 – платформа*

*Рисунок 13.5 – Загальна схема виготовлення шаруватих об'єктів LOM-способом*

Вихідні дані розраховуються для кожного шару в 3D-форматі CAD-даних про конструкції та передаються на лазер. На платформі накладаються один на один та притискаються окремі аркуші фольги. Промінь лазера проникає тільки на певну глибину. Точне фокусування променя лазера та керування від CAD гарантує, що шар буде вирізатися тільки на певну глибину. Частини аркушів фольги, що не належать до області деталі, розрізаються на прямокутники, щоб їх легше було видалити. Модель утворюється пошаровим нарощуванням окремих аркушів (шарів), в результаті чого виникає точна тривимірна модель. Після закінчення формоутворення виробу потрібно видалити фрагменти площі, що не належать до області деталі.

**Спосіб моделювання оплавленням (ФДМ-спосіб).** Намотаний на котушку матеріал, переміщуючись крізь нагрівальну камеру, підводиться до сопла, керованого від координатного механізму відповідно до 3D CAD-геометрії виробу. Розплавлений у камері матеріал витискується на платформу носія, утворюючи перший шар виробу. У загальному випадку товщина шару становить від 0,025 мм до 1,25 мм,

а товщина стінки – від 0,22 мм до 6 мм. Після виготовлення першого шару платформа опускається і починається виготовлення наступного шару. У якості матеріалів для виготовлення виробів використовуються термопласти, метали, віск. Загальна схема ФДМ-способу при використанні у якості матеріалу дроту наведена на рисунку 13.6.



- 1 – супорт; 2 – платформа; 3 – деталь; 4 – координатне сопло;  
 5 – нагрівальна камера; 6 – головка ФДМ;  
 7 – механізм подачі дроту; 8 – бухта з дротом

Рисунок 13.6 – Загальна схема моделювання оплавленням (ФДМ-способу)

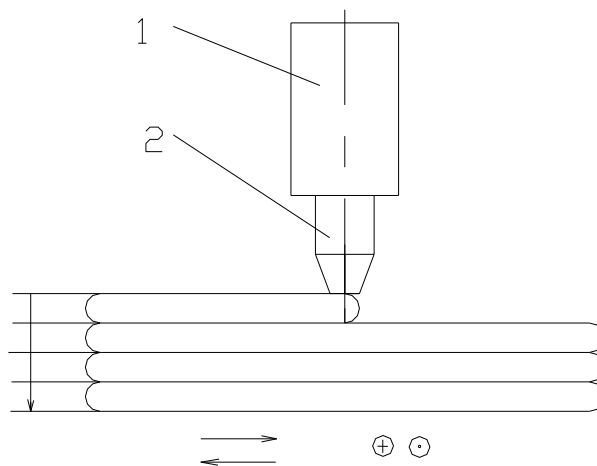
**Спосіб моделювання за принципом трикоординатного (тривимірного) друку (3D-Printing, TDP)** нагадує SLS-спосіб. На рухомій платформі розподіляється шар зерен порошку. Інжектор розтоплюючого сопла, керований від XY-даних, отриманих при комп'ютерному розрахунку пошарової моделі, подає на кожну точку рідку звязку, що скріплює порошок в шарі. Так формується перший шар – нижня перетин моделі. Потім платформа опускається на величину кроку між першим нижнім та другим нижнім перетином. Дозовано наноситься другий шар порошку такої ж товщини. Знову інжектор подає за програмою рідку звязку, формуючи другий нижній шар. Повторенням циклу поступово формується модель від низу до верху. Після завершення процесу зайвий порошок відсмоктується з ванни. Таким чином, система працює як 3D-принтер.

Виготовлені твердотільні моделі після доопрацювання можуть використовуватися безпосередньо для тиражування, перевірки конструкції тощо. Використовувані матеріали – полімери, мінерали, кераміка, целюлоза, гіпс. Спосіб характеризується високою швидкістю.

У даний час 3D-принтер розглядається як найдешевший та найзручніший варіант RP-процесів. Малі габарити, можливість

розміщення у звичайному офісі поряд з САД-системами та інтернетом дозволяють розглядати 3D-принтери як периферійне устаткування компютерів. Швидкість 3D-друку у 5...10 разів вища, ніж швидкість інших RP-процесів. Є відомості про успішне використання цієї технології для пошарового виготовлення медичних таблеток (20 тис. таблеток на годину), а також для виробництва структур кісток, сухожилів, хрящів, імплантів з використанням живих клітин та біоматеріалів.

**Спосіб багатofазного затвердіння (MYS-спосіб).** Конструкційний матеріал нагрівається у камері розтоплення до температури плавлення та пропускається крізь форсунку. Керування температурою здійснюється так, щоб розплавлений матеріал вкривав поверхню необхідним шаром. Спосіб передбачає утворення шару за допомогою форсунки, що розподіляє розтоплений матеріал по поверхні. Цей спосіб схожий з FDM-способом, відмінність полягає у подачі необхідного матеріалу, а також у самому матеріалі. За допомогою MYS-способу виготовляються прототипи з тугоплавких металевих сплавів, сталей, титану, кераміки. Вихідний матеріал може використовуватися і у порошкоподібному стані. У кожному випадку матеріал нагрівається до температури, близької до температури ліквідації, виливається крізь форсунку та застигає протягом декількох секунд. Ще гарячий матеріал розтоплює (розігріває) поверхню попереднього шару і таким чином забезпечується нероз'ємне з'єднання шарів. Загальна схема багатofазного затвердіння MYS-способом наведена на рисунку 13.7.



*1 – розтоплююча камера; 2 – форсунка*

*Рисунок 13.7 – Загальна схема багатofазного затвердіння MYS-способом*

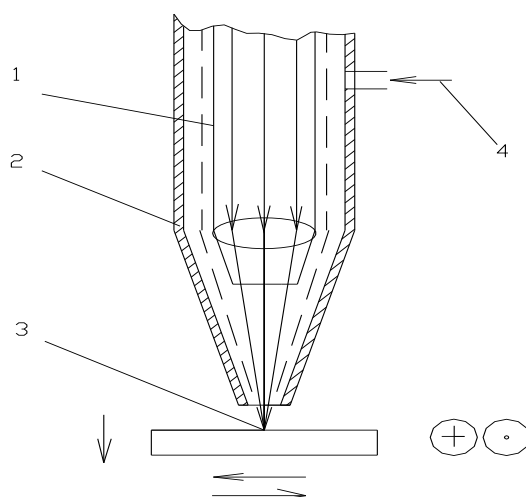
**Спосіб багатоструминного моделювання (МУМ-спосіб).** У цьому способі модель створюється з використанням техніки, схожої

зі струминним друком на звичайному принтері, але у трьох вимірах. Робочий орган – «друкуюча голівка» – включає 352 сопла, що утворюють лінійну решітку: струмінь з кожного сопла тримає в облозі спеціально розроблений термopolімерний матеріал там, де він необхідний по керуючій програмі. Голівка МУМ здійснює зворотно-поступальний рух за віссю x, формуючи шар. Після завершення побудови першого шару платформа опускається за віссю z на величину, що дорівнює його товщині, та починається формування наступного шару.

До цього принципу є близьким Object Quadra Process, який використовує 1536 соплел. Через них за програмою витискуються та розплющуються шари фоточутливої смоли, що твердне під дією ультрафіолетового світла.

**Спосіб формоутворення за допомогою лазерної інженерної мережі (LENS-спосіб).** Спосіб базується на подачі порошку крізь сопло на підкладку та одночасному оплавленні порошку променем лазера. Скріплення з попереднім шаром полегшується тим, що струмінь порошку оплавлюється променем лазера, що підігріває одночасно і попередній шар. Загальна схема LENS-способу наведена на рисунку 13.8.

**Спосіб трикоординатного зварювання (3DW-спосіб).** За допомогою електродугового зварювання пошарово наплавляється метал у вигляді простих форм, з яких потім утворюються більш складні структури. Використовується дві керуючі системи: CNC для зварювального робота та файли STL CAD для пошарової побудови. Установка оснащується системами термоконтролю, інтерактивного охолоджуючого середовища, видалення парів та механічних частинок.



1 – лазер, 2 – сопло для подачі порошку;  
3 – область взаємодії променю та порошку; 4 – порошок

Рисунок 13.8 – Загальна схема LENS-способу

***Спосіб затвердіння полімеру при топографічній інтерференції.***

У основі способу лежить властивість рідких полімерів тверднути при інтерференції певних променів. Коли голографічний образ проектується на смолу, вона твердне по усьому об'єму образу. Спосіб цікавий тим, що відтворення твердого тривимірного об'єкту з 3D CAD відбувається не пошарово, а відразу по всьому об'єму.

## ЛІТЕРАТУРА

- 1 Рабочие процессы высоких технологий в машиностроении : Учеб. пособие / А. И. Грабченко и др. – Харьков : ХГПУ, 1999. – 436 с.
- 2 Рогов, В. А. Основы высоких технологий : Учеб. пособие / В. А. Рогов, Л. А. Ушомирская, А. Д. Чудаков – М. : Вузовская книга, 2001. – 256 с.
- 3 Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов : Учеб. пособие (в 2-х томах). Т. 1 / Б. А. Артамонов и др. – М. : Высш. шк., 1983. – 247 с.
- 4 Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов : Учеб. пособие (в 2-х томах). Т.2./ Б. А. Артамонов и др. – М. : Высш. шк., 1983. – 176 с.
- 5 Коваленко, В. С. Технология и оборудование электрофизических и электрохимических методов обработки материалов / В. С. Коваленко. – К. : Высш. шк., 1983. – 176 с.
- 6 Гах, В. М. Высокие технологии в машиностроении. Лабораторный практикум : Учебное пособие для студентов специальностей 7.090203 и 7.090204 / В. М. Гах. – Краматорск : ДГМА, 2005. – 60 с.
- 7 Попов, С. А. Электроабразивная заточка режущего инструмента / С. А. Попов, В. Л. Белостоцкий. – М. : Высш. шк., 1988. – 175 с.
- 8 Верещака, А. С. Работоспособность инструмента с износостойким покрытием / А. С. Верещака. – М. : Машиностроение, 1993. – 336 с.
- 9 Гах, В. М. Организация участков отделочно-упрочняющей обработки твердосплавных пластин / В. М. Гах, В. В. Скибин // Общемашиностроительные технологические процессы, вып. 3. – М. : ВНИИТЭМР, 1988. – с. 10–12.