

**Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара**  
**Кафедра ракетно-космічних та інноваційних технологій**

**КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ З ДИСЦИПЛІНИ**  
**“ІНСТРУМЕНТИ ТА МЕТОДИ**  
**СПЕЦІАЛЬНОЇ РОЗМІРНОЇ ОБРОБКИ”**

**Доцент Бондаренко О.В.**

**м. Дніпро**  
**2025**

## ВСТУП

Розмірне формоутворення за допомогою хімічних, електрохімічних та фізичних методів обробки використовують у машинобудуванні в тих випадках, коли традиційними методами (наприклад, різанням) або не можна виготовити деталь (вузол) або ж альтернативні їм суттєво ефективніші з точки зору трудомісткості та собівартості. Широке використання різноманітних нетрадиційних методів обробки викликано появою важкооброблюваних матеріалів, ускладненням форми, особливо внутрішніх порожнин виробів, необхідністю обробки великогабаритних тонкостінних елементів конструкцій.

Нині відомі десятки видів формоутворення, заснованих на різноманітних хімічних, фізичних та електрофізичних явищах та їх поєднанні. Використання нових видів розмірної обробки дозволяє простіше і економніше розв'язувати важливі завдання технології машинобудування.

Особливу увагу слід звернути на генеративні технології формоутворення, які дозволяють значно скоротити та здешевшити процес технічної підготовки виробництва. На сьогодні відомо близько тридцяти генеративних технологій формоутворення. Найбільш поширеними є селективне лазерне спікання та тривимірний струменевий друк.

Методи хімічної, електрохімічної, електрофізичної обробки зі зніманням шару матеріалу, а також генеративні технології формоутворення одночасно конкурують з традиційними методами виготовлення деталей машин та взаємно доповнюють один одного.

Крім формоутворення ці ж методи можуть бути використані для обробки поверхні деталі, термічної обробки, зварювання та інше. Наприклад, розроблені багатофункціональні лазерні технологічні комплекси.

На основі конструкції майбутнього виробу, програми та режиму його випуску, завданих економічних показників технолог обирає методи і способи отримання його деталей, призначає оптимальний метод формоутворення та обробки поверхні.

# 1. ХІМІЧНА РОЗМІРНА ОБРОБКА

## 1.1. Сутність процесу, види і способи обробки

Хімічна розмірна обробка (ХО), або хімічне фрезерування - це контрольований за часом процес зняття металу з поверхні оброблюваної заготовки шляхом дії спеціально підібраних розчинів лугів та кислот, який називають травленням. Від операції травлення ХО відрізняється глибиною зняття металу та наданням заготовці певної форми. Зняття металу відбувається за рахунок його розчинення або утворення складної хімічної сполуки при взаємодії з травильним розчином і наступним випаданням цієї сполуки в осад.

Розрізняють такі види ХО:

- загальна обробка – зняття металу по всій поверхні;
- місцева (контурна) обробка - зняття металу з окремих ділянок;
- наскрізна обробка - утворення отворів. ХО виконують:
  - утоплюванням (занурюванням);
  - зрошуванням (струменевий спосіб);
  - налиттям.

Основним з них є спосіб занурення оброблюваної заготовки у ванну з травильним розчином. При струменевому способі сполуки, що утворюються на оброблюваній поверхні і сповільнюють процес травлення, змиваються струменем розчину. Розчин, як правило, подається через обертові сопла і розпилюється на відстані 200-250 мм від оброблюваної поверхні. При використанні способу наливання на оброблювану поверхню встановлюють шаблон - ємність. У закриту порожнину, утворену оброблюваною поверхнею і шаблоном, подається насосом травильний розчин. При цьому забезпечується циркуляція розчину з метою виведення продуктів травлення.

## 1.2. Основні операції

Технологічний процес ХО включає такі основні операції;

- підготовку поверхні;
- нанесення захисного покриття;
- травлення;
- промивання, видалення захисного покриття;
- пасивування поверхні;
- сушіння;
- контроль якості обробки.

Поверхню оброблюваної заготовки можна знежирити органічними розчинниками (бензин, ацетон, уайт-спірит ), або шляхом обробки у водному розчині миючих засобів, а потім промити холодною та гарячою водою.

Захисне покриття наносять з метою запобігання травленню поверхні металу, котра не підлягає обробці. Захистити поверхню можна таким чином:

- лакофарбовими покриттями (ЛФП) ;
- клейовими стрічками і плівками;
- гумовими трафаретами;
- металевими покриттями;
- спеціальними пристосуваннями.

Матеріали, які використовуються для захисту поверхонь при травленні, повинні бути стійкими до використовуваних травильних розчинів. Найбільш розповсюдженими захисними засобами є лакофарбові покриття. Покриття складається з 1- 2 шарів грунту і 2-3 шарів лаку чи емалі. Наносять ЛФП фарборозпилювачем чи щіткою з проміжним сушінням кожного шару. Використовують ЛФП на основі спеціальних плівкоутворюючих смол (перхлорвінілові, поліамідні, поліефірні т інші). Після сушіння проводять перевірку нанесення ЛФП.

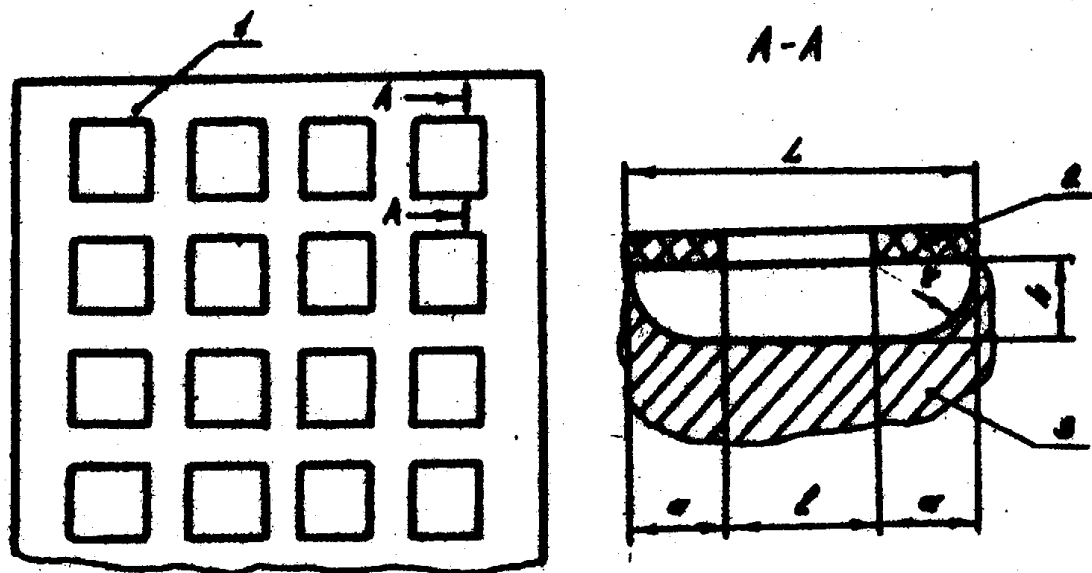


Рис . 1 . Схема нанесення захисного покриття :

1 - трафарет; 2 - захисний шар; 3-деталь

Для захисту алюмінієвих сплавів використовують грунти марок ХС-010, ВЛ-02, ВЛ-08, лаки ХСЛ, ДМЗ, ХВЛ-22, емалі типу ПХВ та ін.

Нанесення ЛФП, наклеювання стрічок, встановлення трафаретів проводять з урахуванням крайового підтравлювання (рис. 1) . Внаслідок підтравлювання торці оброблених ділянок завжди мають скіс "а", як правило заокругленої форми. Величина скосу може бути визначена з умови

$$a \cong h \cong r$$

де  $h$  - глибина травлення;

$r$ - радіус закруглення скосу.

Розмір  $L$  вікна в деталі з урахуванням підтравлення визначають як

$$L = I + 2a$$

де  $I$  - ширина трафарету.

Захист металевими покриттями полягає в нанесенні гальванічним шляхом чи напиленням на необроблювану поверхню шару металу, який не взаємодіє з травильним розчином. Метод не знайшов широкого використання внаслідок відносно великої трудомісткості.

При серійному виробництві для захисту необроблених поверхонь можуть використовувати спеціальні пристрої, основні елементи яких виготовляють з хімічно стійких металів і пластмас (рис. 2).

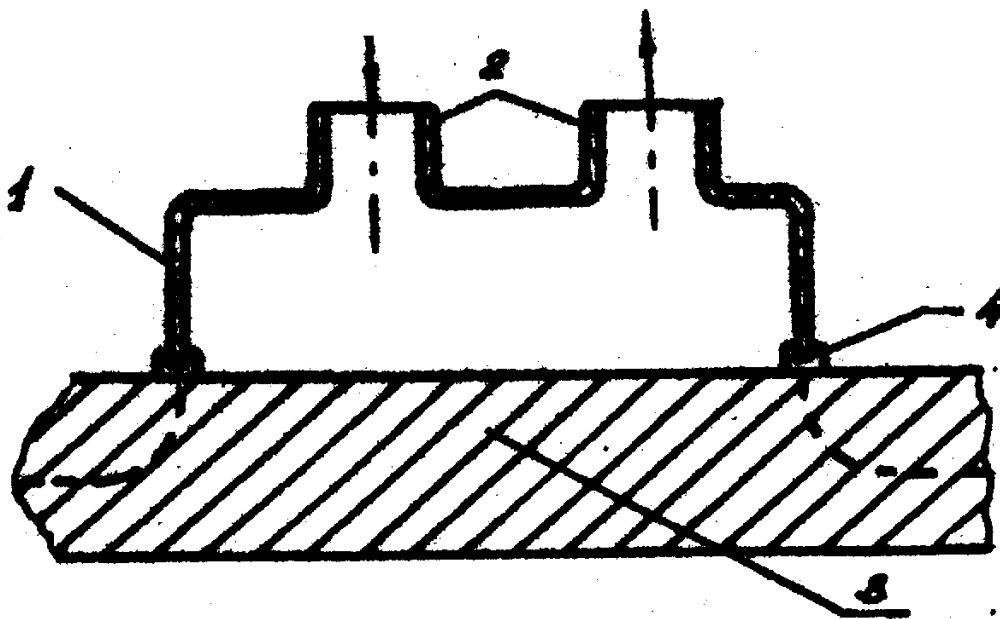


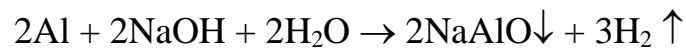
Рис. 2. Схема захисту за допомогою спеціального пристрою гідршаблону):

- 1 - шаблон; 2 - штуцери прокачування травильного розчину;
- 3 - поверхня заготовки, яку потрібно захистити; 4 – ущільнювач

Травлення проводять у ваннах з розчинами, які відповідають оброблюваному матеріалу. Травильні ванни устатковуються механізмами для пересування заготовок у процесі травлення, установками для регулювання температури розчину та вентиляцією для відсмоктування виділень газу та бризок травильної рідини. В автоматизованих ваннах переміщення деталей під час травлення здійснюється автоматично і керується за допомогою програмних пристроїв. З метою рівномірного травлення деталі розташовують горизонтально, оброблюваною поверхнею вверх (для видалення бульбашок водню).

### 1.3. Особливості обробки конструкційних сплавів

Для обробки алюмінієвих сплавів використовують водний розчин (10-17%) їдкого натрію NaOH (120...140 г/л) при температурі 50...90°C (80±10°C). Швидкість травлення приблизно 3 мм/год. Рівняння реакції, що при цьому відбувається:



алюмінат натрію

Після насичення розчину молекули алюмінату натрію розпадаються на NaOH і оксид алюмінію  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , який випадає в осад. Для освітлення використовують 30% розчин азотної кислоти.

Нержавіючі сталі обробляють у суміші водних розчинів азотної (35%), соляної (20%) та плавикової (15%) кислот. Температура обробки 20-70 °С. Швидкість травлення 0,4-0,8 мм/год.

Титанові сплави обробляють у суміші розчинів плавикової (14%) та сірчаної (6,0%) кислот. Температура обробки 18-27°C. Швидкість травлення 0,5-0,8 мм/год. Для зняття поверхневого наводнення заготовки обробляють у розчині суміші азотної та плавикової кислот.

Для обробки магнієвих сплавів використовують 10% розчин сірчаної кислоти при температурі 15-35°C.

Швидкість травлення залежить від таких факторів:

- температури травильного розчину;
- концентрації розчину;
- стану металу;
- хімічного складу металу.

Після травлення деталі промивають холодною та гарячою водою і видаляють захисне покриття. Деталі з алюмінієвих сплавів піддають пасивації - оксидуванню. При цьому, за рахунок створення захисної плівки, знижується корозійна активність поверхневих шарів. Потім деталі сушать при температурі 70-80°C.

Контроль якості ХО включає:

- візуальний огляд поверхонь;
- перевірку точності і рівномірності зняття металу;
- визначення ваги знятого металу,

#### **1.4. Точність та галузі застосування ХО**

ХО взагалі не змінює якості поверхні, а переносить стан вихідної поверхні на глибину травлення. Проте у разі відносно високої якості обробки поверхні (Ra 0,8 і вище) шорсткість поверхні може підвищитись. Практично чистота поверхні, отримана травленням, знаходиться в межах Ra 1,0-Ra 2,5.

ХО не впливає на фізико-механічні властивості металів, не знижує їх корозійної стійкості.

Точність обробки невисока - близько 10% від товщини знятого шару металу.

ХО застосовують для:

- зняття припуску по товщині на тонкостінних деталях типу оболонок;
- утворення рівномірних конструкцій, наприклад, при зварюванні; .
- отримання оболонок вафельної структури;
- отримання елементів конструкції з оребренням;
- збільшення ступеня монолітності конструкції, наприклад, у разі заміни приклепаних підсилень у місцях вирізів під люки монолітними потовщеннями, місцевого потовщення на ділянках зосереджених сил та інше) .

## 2. ЕЛЕКТРОХІМІЧНА РОЗМІРНА ОБРОБКА

### 2.1. Сутність процесу, його особливості

Розмірна електрохімічна обробка (ЕХО) набула широкою розповсюдження в машинобудуванні завдяки низці позитивних особливостей:

- високопродуктивної обробки металів з різними фізико-механічними характеристиками;
- складного формоутворення з використанням нескладного інструменту;
- забезпечення високої точності обробки;
- відсутності суттєвого зношення катода - інструмента;
- отримання поверхневого шару високої якості.

В основу ЕХО покладено процес анодного розчину металу заготовки, яка обробляється в електроліті при малій напрузі і великій силі струму. Механізм анодного розчинення визначається адсорбційно-хімічною взаємодією атомів поверхні металу з компонентами розчину електроліту. Згідно із законом Фарадея, кількість розчиненого металу на аноді пропорційна електрохімічному еквівалентові даного металу, силі струму і часу його проходження, тобто кількості електроенергії:

$$m = \alpha It$$

де  $m$  – вага розчиненого металу, г;

$\alpha$  - електрохімічний еквівалент даного металу, г/А/год;

$I$  - сила струму, А;

$t$  - час проходження струму, год,

Електрохімічний еквівалент - кількість розчиненого на аноді металу, отриманого при проходженні через електроліт одиниці електрики за одиницю часу. Електрохімічний еквівалент прямо пропорційний атомній вазі  $I$  обернено пропорційний валентності металу, тобто визначається природою металу.

Наприклад:

$$C_{\Gamma^{+2}} - \alpha = 0,973 \text{ г/А/год.};$$

$$C_{\Gamma^{+6}} - \alpha = 0,333 \text{ г/А/год.}$$

Для сплаву електрохімічний еквівалент можна визначити за формулою

$$\alpha_{\Sigma} = 100 / \sum(C_i/\alpha_i)$$

де  $C_i$ - вміст  $i$ -го компонента у сплаві, %;

$\alpha_i$ - електрохімічний еквівалент  $i$ -го компонента сплаву.

Процес здійснюють шляхом подачі електроліту у вузький щільовий простір між електродами. Для нього характерна значна Інтенсивність зняття металу внаслідок високої густини струму (рис.і). Електроліт подається в міжелектродний проміжок (МЕП) під тиском і циркулює, охолоджуючи електроди і видаляючи електроліт.

## 2.2. Основні параметри ЕХО

Основними параметрами ЕХО є:

- густина струму, напруга;
- склад та температура електроліту;
- величина МЕП;
- продуктивність процесу;
- тиск та швидкість прокачування електроліту.

Густина струму в сучасних промислових установках досягає сотень Ампер на  $1 \text{ см}^2$  при напрузі 12...25 В..

Склад електроліту підбирається відповідно до металу заготовки з метою найбільш ефективної обробки. Температура електроліту приймається в межах  $20-80^{\circ}\text{C}$ , чим вища температура, тим продуктивніший процес, але виникає небезпека закипання рідини. Останнє призводить до нерівномірного зняття металу та зниження продуктивності процесу.

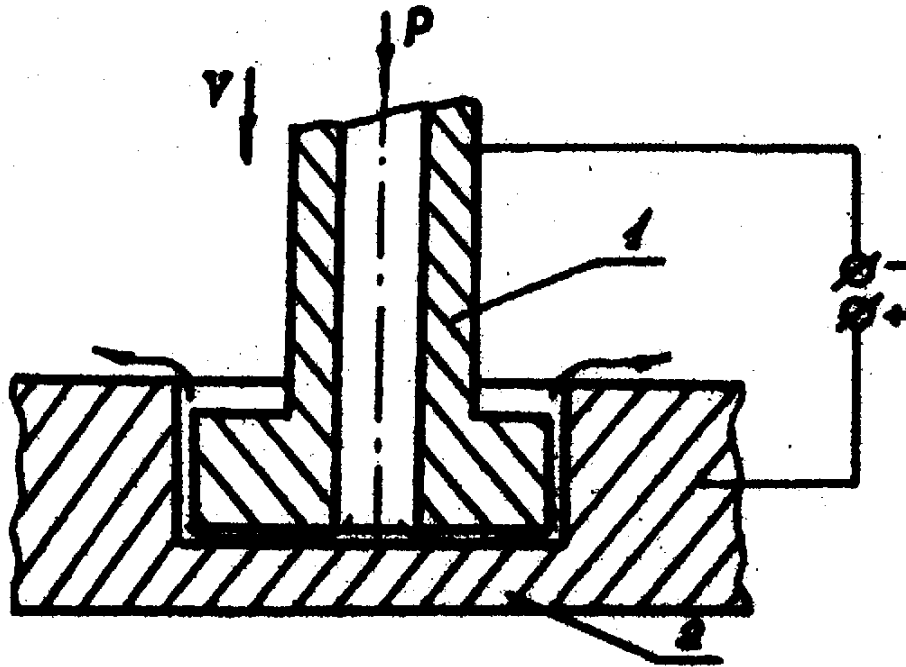


Рис. 3. Схема процесу ЕХО

1 - електрод-інструмент; 2 - оброблювана заготовка

При збільшеному МЕП знижується продуктивність, тому що збільшується електричний опір проміжку, падає вихід по струму. Зі зменшенням проміжку при інших постійних умовах зменшується електроопір проміжку, зростає густина струму та швидкість зняття металу. Ця швидкість збільшується доти, доки зменшення величини проміжку не призводить до уповільнення швидкості видалення з нього продуктів анодного розчинення, до гальмування обробки внаслідок значного газонаповнення воднем, який виникає на катоді. Крім цього, при відносно малих проміжках між електродами знижується вихід по струму, тому що розряд може в значній мірі проходити крізь продукти електролізу. Тому в залежності від умов обробки пропонують оптимальні МЕП, які встановлюють дослідним шляхом.

Продуктивність ЕХО характеризується кількома показниками, важливішими з яких є:

- питома продуктивність;

- вихід по струму;
- швидкість подачі електрода;
- енергомiсткiсть процесу.

Питома продуктивнiсть (М) оцiнюється вагою матерiалу, який був видалений з одиницi поверхнi (см<sup>2</sup>) за хвилину:

$$M = (m_0 - m) / (st), \text{ (г/(см}^2 \cdot \text{хв))},$$

де  $m_0, m$  - вага заготовки до i пiсля обробки, г;  $s$  – оброблювана площа , см<sup>2</sup> ;  $t$  - тривалiсть процесу, хв,

Вихiд по струму ( $\eta$ ) – це вiдношення густини струму, використаного на основнi реакцiї, до всiєї густини струму в електролитi :

$$\eta = j / j_0 \cdot 100\%$$

де  $j$  - густина струму, використаного на основнi реакцiї;  $j_0$  - вся густина струму в електролитi.

Вихiд по струму залежить вiд матерiалу електрода, складу електролiту, величини поляризацiї електродiв та iнших факторiв. Наприклад, при обробцi у хлоридному електролитi молiбденової заготовки  $\eta = 10\%$ , а при обробцi заготовки з iнструментальної сталi  $\eta = 99\%$ .

Швидкiсть (V) подачi електрода-iнструмента визначають iз спiввiдношення

$$V = 10M/\gamma, \text{ [мм/хв]}$$

де  $M$  - питома продуктивнiсть процесу, г/(см<sup>2</sup>·хв);  $\gamma$  – густина оброблюваного металу, г/см<sup>3</sup>.

Швидкiсть  $V$ , як правило, становить 1,5...5 мм/хв. Енергомiсткiсть процесу (E) знаходять за формулою

$$E = U \cdot j / (60 \cdot M), \text{ (квт} \cdot \text{год/кг)}$$

$U$  – технологiчна напруга, В

### 2.3. Особливості обробки конструкційних сплавів

На обробку алюмінієвих сплавів суттєво впливає їх склад та структура. Сплави, які складаються зі структурних фаз, після ЕХО мають менш якісну поверхню в порівнянні з гомогенними сплавами. Продуктивність обробки здебільш залежить від електрохімічної активності легуючих компонентів сплавів. Наприклад, велика концентрація міді у сплаві знижує швидкість його розчинення.

Сплав АМгб рекомендують обробляти при такому режимі:

- електроліт, який містить 30% розчин азотнокислого натрію та 3% хлористого натрію; температура 40...45°C;
- густина струму 150...160 А/см<sup>2</sup>;
- міжелектродний проміжок – 0,15...0,20 мм;
- продуктивність (швидкість подачі електрода-інструмента) 3,8-4,8 мм/хв.

При цьому забезпечується шорсткість поверхні Ra 0,08-0,032 мм.

Продуктивність ЕХО сталей в основному залежить від густини струму, складу електроліту та хімічного складу легуючих додатків. Як електроліти застосовують розчини хлористого натрію, азотнокислого натрію, бромистого калію та ін.

Рекомендований режим обробки:

- густина струму 20-80 А/см<sup>2</sup>;
- температура електроліту 20...60°C;
- МЕР 0,1-0,3 мм.

Оптимальними для титанових сплавів вважають хлоридний та хлоридно-бромний електроліти ( 10% NaCl + 10% KBr). Густина струму 20-100 А/см<sup>2</sup>.

## 2.4. Устаткування ЕХО

Сучасна електрохімічна установка - це комплекс, який складається з верстата, джерела живлення, системи контролю та регулювання параметрів процесу обробки, а також системи постачання, охолодження та очистки електроліту, вентиляційної системи. Тип і конструкція електрохімічного верстата визначаються видом розв'язуваних технологічних завдань, розмірами оброблюваних заготовок та необхідною точністю обробки. Електрохімічний верстат включає станину з приводом подачі катода - інструмента, робочий стіл, камеру з системами підведення та відведення електроліту і вентиляції.

Матеріалом катода-інструмента можуть бути мідь, латунь, бронза, граніт, а також нержавіючі сталі та титанові сплави. Форма катода-інструмента звичайно відповідає формі оброблюваної порожнини з еквідистантною кореляцією. Розміри, вид і розташування електролітопідвідних щілин та отворів вибирають експериментальне.

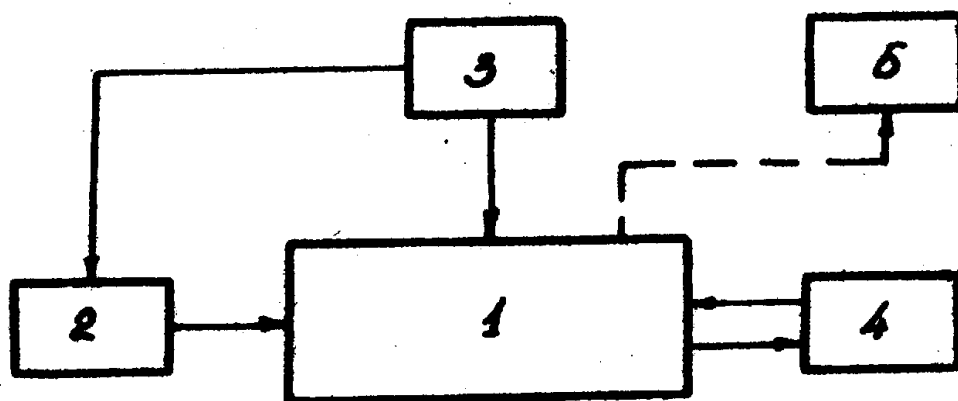


Рис. 4 Схема комплексу устаткування ЕХО:

- 1 - верстат; 2 - джерело живлення; 3 - система керування режимом обробки;  
4 - система постачання електролітом; 5 - вентиляційна система

Як джерело живлення використовують установки типу двигун - генератор або випрямлячі, які забезпечують силу струму до 10000 А.

Система подачі та очищення електроліту складається з агрегату подачі електроліту, резервуара, системи очищення електроліту, системи регулювання і стабілізації хімічного складу електроліту та системи вентиляції. Швидкість подачі електроліту - 70 м/с при тиску 0,5-1,5 МПа.

## **2.5. Точність і застосування ЕХО**

Точність обробки при прошиванні отворів 0,05-0,15 мм і 0,2-0,5 мм – при виготовленні порожнин складної конфігурації. Шорсткість обробленої поверхні Ra 25-16 мкм.

ЕХО використовують головний чином для обробки нежорстких заготовок типу оболонок (наприклад, оболонок вафельної структури). Широко використовують ЕХО для отримання глибоких фасонних отворів та пазів, при виготовленні штампів і прес-форм.

## **2.6. Диференційна електрохімічна обробка (ДЕХО)**

При виготовленні великогабаритних заготовок з міцних сталей і сплавів розкатуванням, ротаційним куванням, зварюванням з листового прокату, штампуванням вибухом не вдається отримати рівномірні конструкції без усунення нерівномірності їх товщини. На точність отримання заготовки впливають два фактори:

- початкова різновтовщність напівфабрикату;
- похибка технологічного процесу формоутворення.

У зв'язку з цим виникає необхідність впровадження додаткової керованої фінішної обробки з локальним зняттям шару метала.

Ідея керованої фінішної обробки найбільш ефективно реалізується при диференціальній електрохімічній обробці (ДЕХО). Сутність технологічного процесу ДЕХО полягає в диференціальному знятті спеціальним

секціонованим катодом необхідного об'єму металу в місцях, які задані програмою обробки. Схему процесу ДЕХО подано на рисунку 5.

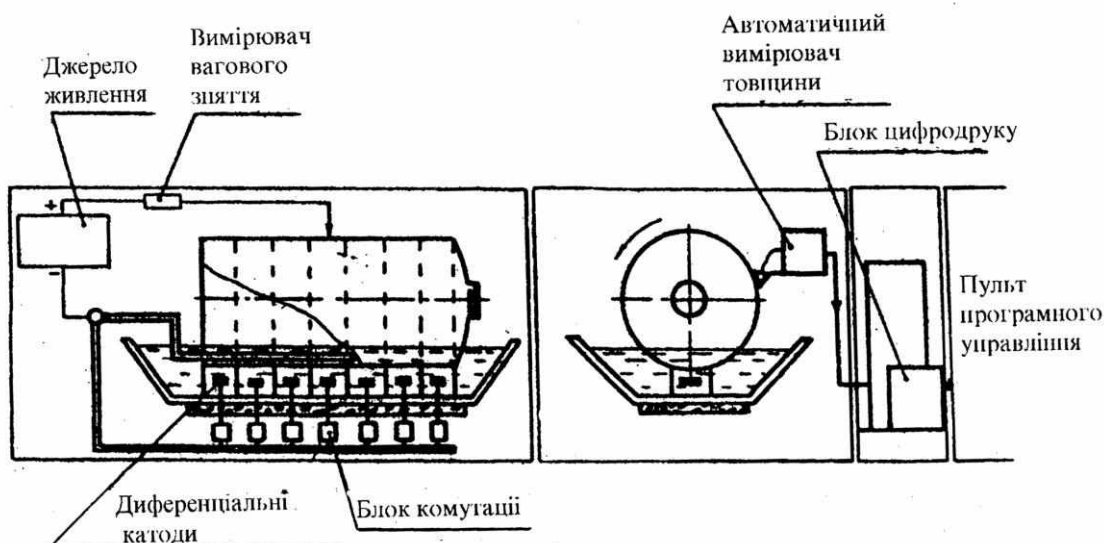


Рис. 5 Схема процесу ДЕХО

Метод розроблено в Дніпропетровському Науково-дослідному інституті технології машинобудування (нині Відкрите акціонерне товариство “Український науково-дослідний інститут технології машинобудування”) під керівництвом О.Л.Серебренікова та О.С.Надхі.

Склад технологічного устаткування для ДЕХО такий:

верстат електрохімічної обробки, який складається з електролітичної ванни з секціонованими катодами, приводу обертання виробу та джерела робочої напруги;

тиристорні блоки катодів (ТБК);

ультразвуковий товщиновимірювач, що обмірює виріб з точністю до 25 мкм;

комплекс електронної апаратури для керування технологічним процесом ДЕХО за результатами обмірювання виробу (ЕОМ з пристроєм для вводу-виводу інформації (ПВВІ), блок узгоджуючих пристроїв та пристрій відображення інформації);

- координатні пристосування, які дозволяють умовно розбивати поверхню виробу на елементарні ділянки.

Послідовність виконання технологічного процесу.

1. Вимірювання об'єкта обробки (вхідний контроль оболонки виробу, який підлягає обробці) .

На цьому етапі використовується ультразвуковий вимірювач товщини та ЕОМ як засіб обробки масивів інформації.

В процесі обмірювання виробу по елементарних ділянках (досягається дискретним обертанням виробу та пересуванням ультразвукового вимірювача вздовж виробу) у пам'яті ЕОМ накопичується інформація про товщину оболонки на кожній з цих ділянок. Фіксується значення її мінімальної ( $h_{\min}$ ) і максимальної ( $h_{\max}$ ) товщини.

2. Обробка результатів вимірювання та видання початкових даних для здійснення процесу ДЕХО (програми обробки даного виробу).

Оскільки процес ДЕХО, як правило, супроводжується і рівномірною ЕХО з додатковим катодом (з метою виключення явища пітингового травлення електрохімічна корозія в місцях, де має послабитися вплив ЕХО, наприклад, на ділянках де закінчена обробка та підвищення продуктивності), розрахунковий час обробки кожної ділянки ДЕХО корегується з урахуванням величини зняття металу.

3. Обробка виробу за програмою.

Програма ДЕХО здійснюється у такій послідовності:

- оброблюваний виріб установлюють і затискують на спеціальному верстаті таким чином, щоб частина його поверхні знаходилась у ванні з електролітом; і

- у ванні з електролітом уздовж еквідистантної поверхні виробу поряд із суцільним катодом розташовують секціонований катод. Кількість елементів такого катода і їх розміри визначаються виходячи з різнотовщинності, розмірів виробу та необхідної точності обробки;

- виріб приводять в обертання і починають обробку подачею робочої напруги крізь тиристорні блоки комутації (ТБК) на деталь і катода. Таким чином, кожна елементарна ділянка оброблюваної поверхні за один оберт виробу потрапляє в зону впливу своєї секції катода.

Виріб обробляють за програмою доти, доки на кожній ділянці значення товщини не досягне розрахункової величини.

Контроль, товщини оброблюваної оболонки на дільницях може проводитися двома способами.

Перший спосіб полягає у розділенні часу операцій обмірювання і керування технологічним процесом. Такий технологічний процес являє собою обробку за "жорсткою" програмою з періодичними вимірами товщини оброблюваної оболонки в контрольних точках. Цей спосіб відносно простий, тому що програма на обробку, яку розробила ЕОМ, може корегуватися за результатами обмірювання будь-яким пристроєм пам'яті, наприклад полем тумблерів загальною кількістю, яка дорівнює кількості ділянок.

Другий спосіб допускає корегування програми в процесі обробки. Основою для корегування стають результати безперервного обміру ділянок оболонки в процесі фрезерування та обробка числових даних ЕОМ.

Активний контроль за технологічним процесом і замикання зворотного зв'язку від виробу до інструмента через ЕОМ, без оператора, є більш прогресивним.

На завершальному етапі обробки виріб знову обміряють так, як і на початку обробки. За результатами обмірювання ЕОМ обраховує та реєструє такі дані:

$\bar{X}$  – середнє арифметичне значення товщини;

$h_{\min}$  – мінімальне значення товщини із зазначенням координат ділянки;

$\Delta$  – різнотовщинність;

$B = ((\bar{X} - h_{\min})/h_{\text{ном}}) \cdot 100\%$  - значення відносної вагової характеристики ( $h_{\text{ном}}$  – номінальне значення товщини).

При обробці досягається різнотовщинність  $\Delta = 0,01$  мм,

Таким чином, здійснюється здаточний контроль, який дозволяє робити об'єктивні висновки про якість продукції та доскональність технологічного процесу.

На всіх етапах технологічного процесу ДЕХО проходження команд керування і дія установки висвічується на інформаційному табло.

Результати попереднього обміру товщини оброблюваної оболонки виробу, програма на обробку і результати здавального контролю виводяться на принтер і документуються.

### **3. ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ МЕТОДИ РОЗМІРНОЇ ОБРОБКИ**

До електрофізичних методів розмірної обробки належать:

- електроерозійна обробка - обробка струмопровідного матеріалу за допомогою теплової енергії електричних розрядів;

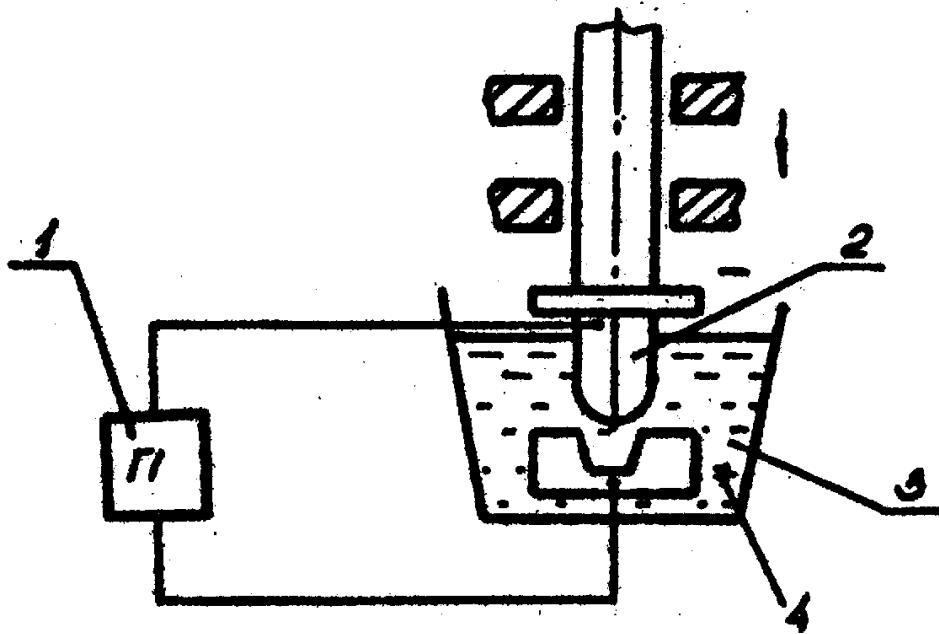
- анодно-механічна обробка, яка заснована на комбінованому процесі електроерозійної та електрохімічної взаємодії на оброблюваний виріб рухомого електрода - інструмента;

- ультразвукова обробка, яка заснована на сколюванні матеріалу імпульсними ударними діями;

- променева обробка (лазерна, електронно-променева, плазмова), коли на матеріал діють висококонцентрованим потоком енергії.

#### **3.1. Електроерозійна обробка (ЕЕО)**

При електроерозійній обробки (рис.6) зняття металу із заготовки відбувається внаслідок послідовної взаємодії електричних розрядів, що збуджуються генератором імпульсів 1, при їх проходженні між електродом-інструментом 2 та електродом-заготовкою 3.



**Рис. 6. Схема електроерозійної обробки:**

- 1 - генератор імпульсів; 2 - електрод-інструмент;  
3 - електрод-заготовка; 4 - діелектрична рідина.

Матеріал у зоні обробки плавиться та видаляється у рідкому і пароподібному стані. Короткочасний ( $10^{-7}$ - $10^{-3}$  с) імпульсний розряд діє на невеликій ділянці поверхні (місце локалізації розряду). Обробка здійснюється у діелектричній рідині 4, яка охолоджує дисперговані частинки металу, сприяє видаленню їх із зони обробки, перешкоджає розширенню каналу розряду та підвищує цим густину енергії, що виділяється на поверхні заготовки. Внаслідок пробоя і утворення каналу розряду в місцях локалізації руйнується поверхня як електрода-заготовки та так і електрода-інструмента. Тому оброблювана заготовка повинна підключатися таким чином, щоб інтенсивність її руйнування була вище інтенсивності руйнування електрода-інструмента. Це здійснюється за рахунок вибору відповідної полярності електродів, форми і тривалості імпульсів розрядного струму, матеріалу електрода -інструмента, робочої діелектричної рідини та інше.

Електроерозійною обробкою можливо здійснити практично всі види формоутворення, що використовуються при механічній обробці. Але найчастіше вона застосовується для прошивання та розрізування.

Прошивання – це обробка поверхонь з об'ємним копіюванням форми електрода при прямолінійному поступальному русі електрода-інструмента (або заготовки). Використовується при обробці отворів, порожнин, заглиблень, пазів та інше.

Розрізання - поділ заготовки на частини, який здійснюється аналогічно до процесу прошивання. При цьому застосовується непрофільований електрод (дріт), який здійснює рух відносно заготовки по заданій траєкторії.

Продуктивність ЕЕО залежить від теплофізичних властивостей оброблюваного матеріалу, електричних параметрів процесу, розмірів оброблюваної поверхні, матеріалу електрода-інструмента, робочого середовища і визначається кількістю знятого матеріалу за одиницю часу. Продуктивність сучасного устаткування досягає 1000 мм<sup>3</sup> /с.

Продуктивність устаткування

$$Q = (KA_i) / (q\tau)$$

де Q - об'єм знятого металу, мм<sup>3</sup>;

K - коефіцієнт, що залежить від виду та стану робочого середовища, його прокачування; матеріалу і розмірів електрода-інструмента; характеристики, імпульсів струму (визначається експериментально);

A<sub>i</sub> - енергія імпульсу, Дж;

q - шпаруватість, тобто відношення періоду імпульсу до його тривалості;

τ - тривалість імпульсу, с.

Оброблюваність матеріалів при ЕЕО оцінюється відношенням об'єму знятого з оброблюваної заготовки металу до об'єму металу, знятого із заготовки зі сталі 45 при однакових умовах обробки.

Коефіцієнт оброблюваності вольфраму - 0,7; молібдену -0,8; алюмінію - 1,5; магнію - 2,5; заліза,- 1,0; жароміцних сплавів - 1,3..1,8.

Точність ЕЕО при використанні профільного, електрода-інструмента відповідає 6-11 квалітетам, непрофільованого – 5-6 квалітетам.

За допомогою ЕЕО можна виконати фігурні прорізи, щілини, а також з'єднуючі канали в деталях агрегатів автоматики. Наскрізні канали виконують електроерозійною вирізкою непрофільованим електродом-дротом, а глухі - прошиванням.

Електроерозійною обробкою можна виконати канали з некруглим перетином у важкодоступних місцях.

За тривалістю і характером імпульсів струму, що обумовлюють електричну ерозію, умовно розрізняють декілька різновидів електроерозійної обробки, які подано на рис.7. У практиці іноді буває важко провести між ними чітку межу, однак кожний з цих різновидів має певну специфіку.



Рис.7. Види електроерозійної обробки

Для електроіскрової обробки (ЕІО) характерні коротка тривалість імпульсів ( $10^{-5} - 10^{-7}$  с), відносно невелика їх енергія, звичайна пряма полярність підключення електродів (заготовка + електрод), відсутність механічного коливання електродів.

Електроімпульсна обробка (ЕІМ) - різновид ЕЕО, для якої типові ознаки: підвищена тривалість імпульсів ( $10^{-4} - 10^{-1}$ с), підвищена енергія імпульсів і зворотна полярність підключення електродів, а також відсутність їх механічного контакту.

Електроконтактна обробка (ЕКО) - також є різновидом ЕЕО, але вона суттєво відрізняється за характером явищ, які відбуваються між електродами, що упродовж визначених проміжків часу знаходяться в зіткненні один з одним. Тепло, що розплавляє та випаровує метал, виникає лише частково за рахунок проходження електричного розряду. Значна частина тепла вводиться при проходженні струму крізь опір контакту. Частина тепла виникає внаслідок тертя.

Електроди інструменти для електроерозійної обробки поділяють на профільовані та непрофільовані. Непрофільовані електроди – це дріт, яким найчастіше виконують прорізання. Дріт виконують найчастіше з вольфраму. Профільовані електроди виготовляють з графіту, матеріалів типу ВНДС (спечений матеріал з порошоків вольфраму та нікелю). Перевага матеріалів типу ВНДС – чудова оброблюваність різанням, висока якість поверхні, недолік – висока ціна та дефіцитність вольфраму.

### **Формоутворення деталей машин за допомогою профільованих електродів-інструментів.**

Для ЕЕО створено і широко використовується унікальне вітчизняне устаткування: електроерозійні копіювально-прошивні верстати моделей 4720, 4720У, 4Г721М, 4Е723, 4Д722АФЗ, вирізні верстати моделей 4531П, 4532ФЗ, 4732ФЗ, 4735ФЗ та ін. На сьогодні у промисловості широко використовують електроерозійні верстати різних іноземних виробників.

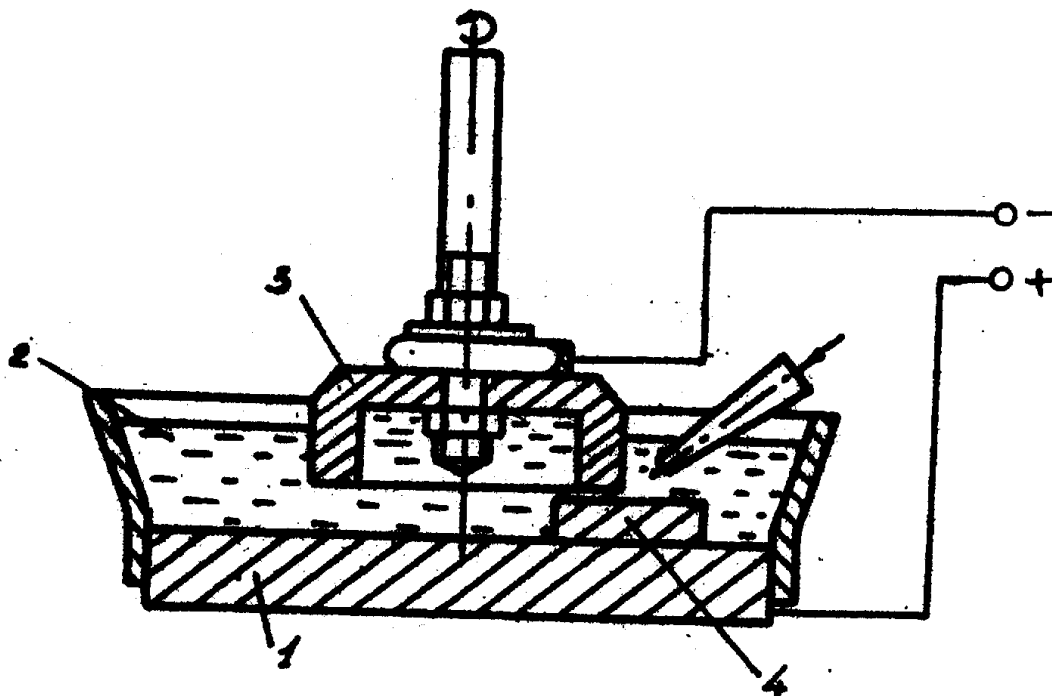
### 3.2. Анодно-механічна обробка

При анодно - механічній обробці використовується комбінований процес електрохімічної та електроерозійної дії на оброблюваний виріб електрода-інструмента, що рухається (обертається) .

Тут, як і при електрохімічній обробці, електрод-інструмент підключають до негативного полюса джерела струму, а електрод-деталь – до позитивного .

Зайвий матеріал видаляється як за рахунок анодного розчинення, так і за рахунок електроерозійного руйнування.

Деталь-анод 4 (рис. 8.) закріплюють на робочому столі 1 у середовищі електроліту 2, а металевий інструмент-катод 3 приводять в обертання .



**Рис. 8. Схема анодно-механічної обробки:**  
1 - робочий стіл 2 - електроліт; 3 - інструмент-катод; 4 - деталь-анод.

Внаслідок анодного розчинення на поверхні деталі утворюється пасивована стрічка (плівка), яка видаляється шляхом механічного руху (обертання) електрода-інструмента. Таке руйнування оброблюваного

матеріалу спостерігається при малій густині струму. Швидкість видалення матеріалу становить 0,03-0,05 мм/хв.

При великій густині струму обробка відбувається внаслідок електроерозійного руйнування. Внаслідок електротермічної дії струму плавляться вершини мікронерівностей оброблюваної поверхні в місцях контакту з електродом-інструментом. Продукти руйнування виносяться із зони обробки рухомим електродом-інструментом і електролітом.

Живлення здійснюється від джерела постійного струму в десятки кіловат .

Як електроліт для анодно-механічної обробки найчастіше використовують водний розчин силікату натрію ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) р питомою вагою 1280-1380 кг/м<sup>3</sup>. У залежності від характеру виконуваної роботи іноді використовують й інші електроліти: 3...5 % рідкого скла, 1% гліцерину, решта - вода; 4% водний розчин бури, дрібнодисперсний розчин рідкого скла (20%), веретенне або трансформаторне масло (6%) з доданням стеаринової кислоти (5% маси масла) і триетаноламіну (0,5% маси води).

Ці електроліти за властивостями не поступаються загальноприйнятому розчину рідкого скла у воді, але на відміну від нього не налипають на поверхні деталей верстатів та оброблюваних деталей,

Виходячи із суті методу, анодно-механічну обробку можна виконувати в таких двох режимах:

1. Високопродуктивному режимі при робочій напрузі до 30 В. У ньому переважає електроерозійне руйнування матеріалу. Висота нерівностей на оброблюваній поверхні досягає 500-600 мкм. Використовується для чорнової обробки.

2. М'якому режимі. Він менш продуктивний, і його отримують при робочій напрузі до 15 В. Метал знімається тільки за рахунок анодного розчинення. Якість обробленої поверхні висока – висота нерівностей менше 1 мкм і використовується для чистової обробки.

Обидва режими, як правило, можна виконати одним інструментом без заміни, тобто з однієї його установки.

При анодно-механічній обробці досягається:

- висока продуктивність (на чорнових режимах) і висока якість обробленої поверхні (на чистових режимах);
- можливість обробки будь-яких важкооброблюваних металів та сплавів;
- можливість легкого видалення та утилізації продуктів обробки, варіювання режимами обробки в широких діапазонах.

До недоліків методу можна віднести експлуатаційні незручності використання рідкого скла як електроліту, порівняно значну складність в експлуатації і відносно високу вартість устаткування.

Анодно-механічна обробка сьогодні використовується в інструментальному виробництві для виготовлення абразивних інструментів.

### **3.3. Ультразвукова обробка**

При ультразвуковій обробці матеріал видаляється інструментом, який коливається з ультразвуковою частотою. Обробка може відбуватися за частот як ультразвукового, так і звукового діапазонів. Однак оптимальні режими забезпечуються при 16-25 кГц (нижня межа ультразвукового діапазону). Тому метод дістав назву ультразвукового. Цим методом успішно обробляють деталі з твердих та крихких важкооброблюваних матеріалів. Метод розвивається у двох напрямках:

1. Розмірна ультразвукова обробка матеріалів у середовищі абразивної суспензії.

2. Накладання ультразвукових коливань на різальний інструмент при звичайній обробці різанням.

### 3.3.1. Ультразвукова розмірна обробка у середовищі абразивної суспензії

Під розмірною ультразвуковою обробкою розуміють кероване руйнування оброблюваного матеріалу внаслідок імпульсної ударної дії інструмента на матеріал в абразивному середовищі.

Робочому інструменту 2 (рис. 9) надаються механічні коливання ультразвукової частоти (16-30 кГц) і невеликої амплітуди (0,01-0,06 мм).

У робочу зону, тобто в проміжок між торцем інструмента і заготовкою 4, подається абразивна суспензія 3 - суміш зерен абразиву у воді. Зерна абразиву під дією ударів віброуючого інструмента поступово виконують обробку (відколюють частки матеріалу). Розмір відколюваних часток невеликий, однак кількість ударів і зерен абразиву велика (20-100 тис/см<sup>3</sup>), що призводить до відносно інтенсивного зняття матеріалу. Внаслідок цього заготовка копіює форму робочого інструмента.

Велике значення у руйнуванні матеріалу має кавітація – утворення та захопування порожнин у рідині під дією ультразвукових коливань.

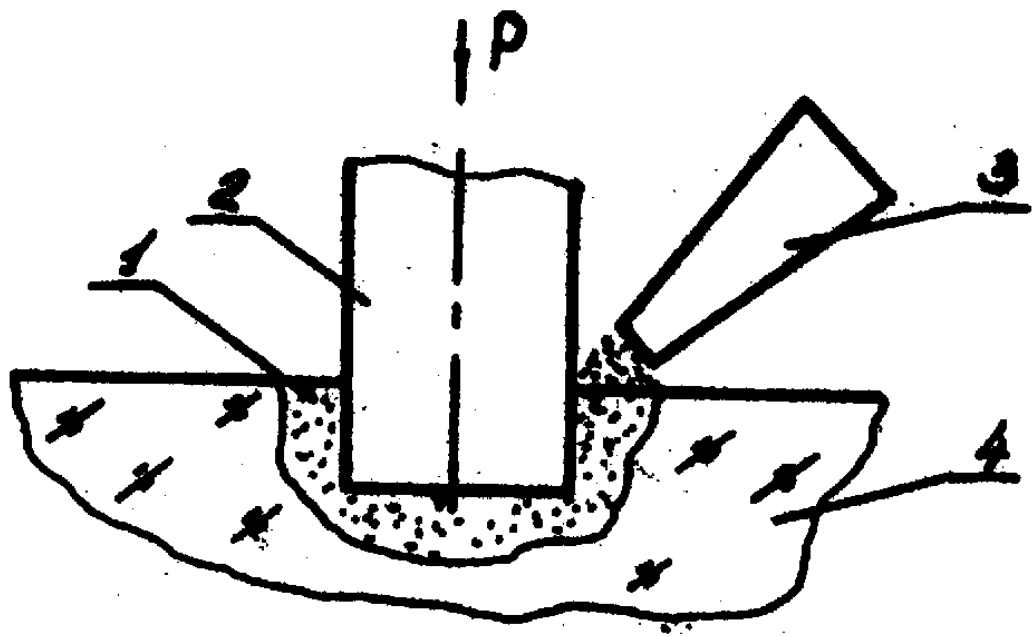


Рис. 9. Схема розмірної ультразвукової обробки

При захопленні порожнини тиск у ній різко зростає, що призводить до випромінювання імпульсів стиснення.

Абразивна суспензія, проникаючи в пори і утворені тріщини, розколює їх і під впливом кавітаційних явищ виносить продукти руйнування із зони обробки. Виникає кавітаційна ерозія.

В ультразвуковій розмірній обробці розрізняють два рухи: головний (рух різання) – повздовжні коливання інструмента з ультразвуковою частотою, які надають енергію абразивним зернам, і допоміжний – рух подачі.

Швидкість головного руху

$$V = 4fA/1000, [м/с],$$

де  $f$  - частота коливань, Гц;  $A$  - амплітуда коливань, мм.

Допоміжний рух при ультразвуковій обробці може бути у вигляді повздовжньої, поперечної або кругової подачі, або поєднання двох із них та інше.

Використання допоміжних рухів дозволяє значно розширити можливості методу, використовувати його для прошивки порожнин, нарізання різьблень, розрізних операцій, прошивки криволінійних порожнин і таке інше.

Для ультразвукової розмірної обробки використовуються спеціальні верстати.

В ультразвуковому верстаті (рис.10.) електричні коливання високої частоти подаються від генератора на обмотку охолоджуваного водою магнітострикційного перетворювача 5. З перетворювачем жорстко з'єднані концентратор 4 та робочий інструмент 3. Коливальна система закріплена в акустичній головці 6, яка розташована в станині 9 верстата. Спеціальний пристрій забезпечує потрібне зусилля подачі інструмента на оброблювану деталь 8 (наприклад, важільна система з противагою 7). Абразивна суспензія в зону обробки подається насосом 2 з блоку 1.

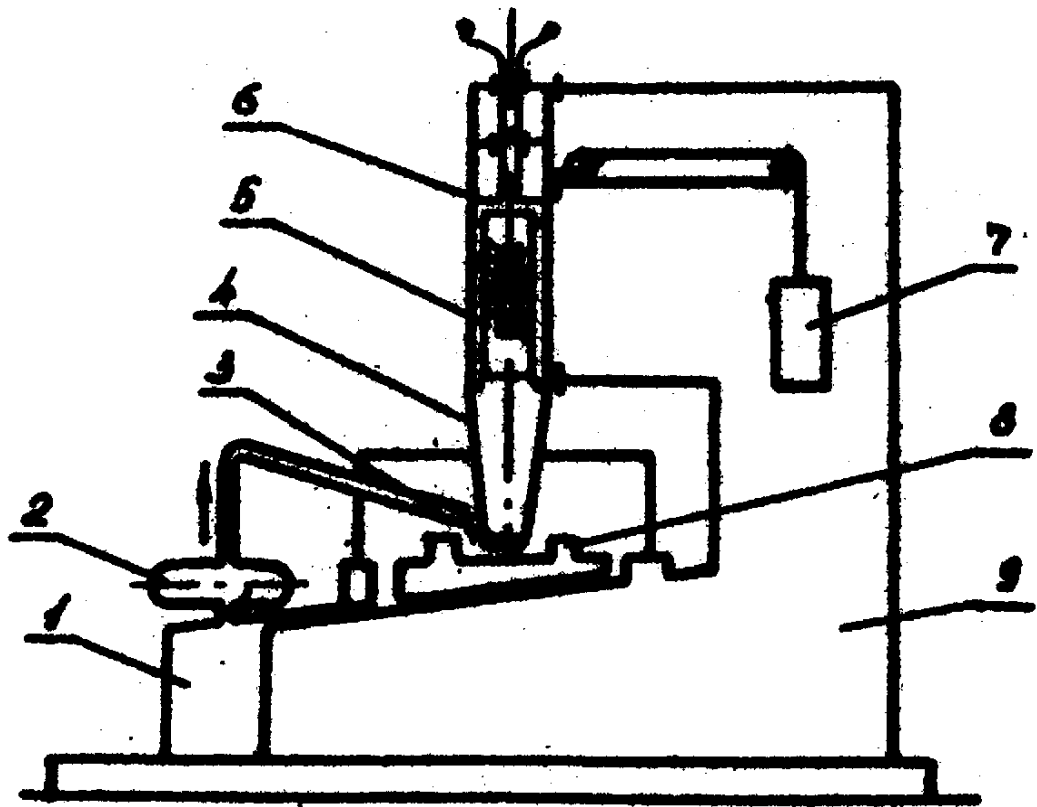


Рис. 10. Принципова схема ультразвукового верстата

Сучасні спеціальні ультразвукові верстати можна поділити на верстати малої (30-300 Вт), середньої (до 1,5 кВт) та великої (1,6-4 кВт) потужності.

Продуктивність об'ємного зняття матеріалу  $V$  мм<sup>3</sup>/хв визначається подачею  $S$  мм/хв і площею  $F$  мм<sup>2</sup> поперечного перетину:

$$V = F \cdot S$$

Продуктивність обробки залежить від звукових параметрів - частоти та амплітуди коливань інструмента.

Залежність середнього зняття матеріалу від амплітуди коливань можна визначити за формулою

$$V = cA^x$$

де  $c$  - постійний коефіцієнт;

$x$  - показник, що залежить від умов обробки та властивостей оброблюваного матеріалу.

На продуктивність обробки впливає відношення амплітуди коливань  $A$  до середнього розміру  $d_3$  абразивного зерна .

Як правило, максимальна продуктивність має місце при  $2A/d_3 = 0,6-0,8$

Ультразвукова розмірна обробка має такі переваги:

- 1) можливість використати для виготовлення деталей із струмопровідних матеріалів;
- 2) висока точність обробки (0,01-0,02 мм) при високій якості обробленої поверхні ( $Ra$  0,32 - 0,16);
- 3) відсутність як нагрівання деталі у зоні обробки, так і дефектного шару на обробленій поверхні;
- 4) відносно висока продуктивність при обробці твердих та крихких матеріалів.

До недоліків ультразвукової обробки слід віднести:

- 1) складність проектування та виготовлення ультразвукового інструмента, яка пов'язана з необхідністю акустичного розрахунку;
- 2) непридатність цього методу для в'язких важкооброблюваних матеріалів.

### **3.3.2. Накладання ультразвукових коливань на інструмент**

Накладання ультразвукових коливань на інструмент у процесі різання викликає допоміжні циклічні переміщення контактних поверхонь інструмента, що може значно зменшити опір сходу стружки (полегшити стружкоутворення), знизити сили тертя, а також змінити характер тертя інструмента і заготовки. Це зменшує сили тертя і полегшує процес обробки.

При точінні ультразвукові коливання можуть бути накладені на різальний інструмент у трьох напрямках (рис. 11): I - паралельно осі обертання деталі, що викликає коливання інструмента у напрямку подачі; II - нормально до осі обертання (радіальні коливання); III - у вертикальному напрямку для створення тангенціальних коливань.

Найбільш ефективним є накладання тангенціальних (III) ультразвукових коливань, до того ж чим матеріал пластичніший, тим більшим буде ефект. При обробці червоної міді тангенціальні коливання ( $A \approx 2,5$  мкм) при подачі 0,08-0,25 мм/об дозволяють знизити тангенціальну складову сили різання в 10 разів, радіальну - у 50.

При накладанні тангенціальних коливань значно зменшується висота мікронерівностей.

Радіальні ультразвукові коливання малої амплітуди ( $A=3-4$  мкм) підвищують стійкість швидкорізальних різців у 4 рази.

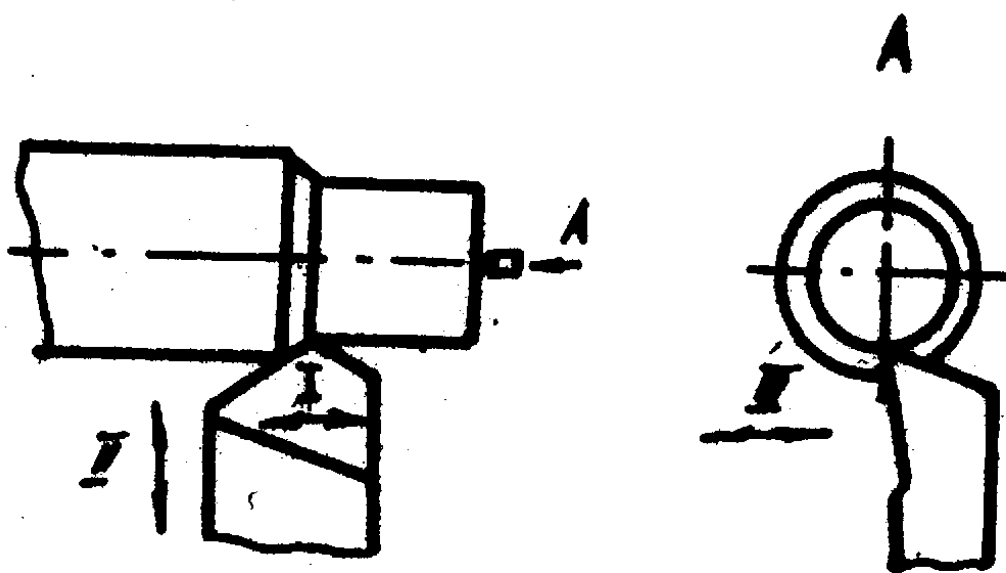


Рис.11. Напрямки накладання ультразвукових коливань на різальний інструмент

При шліфуванні ультразвукові коливання можуть надаватися заготовці або шліфувальному кругу.

Установка із взаємодією коливань на робочу поверхню круга має ультразвуковий генератор у вигляді окремого блоку і акустичну головку, яку можна встановити на будь-якому шліфувальному верстаті.

Розташовують головку вертикально. Заготовку 2 (рис. 12) закріплюють на столі 1 у проміжок між робочими поверхнями круга 3 і концентратора 4 підводять емульсію 5 або іншу мастильно-охолоду рідину.

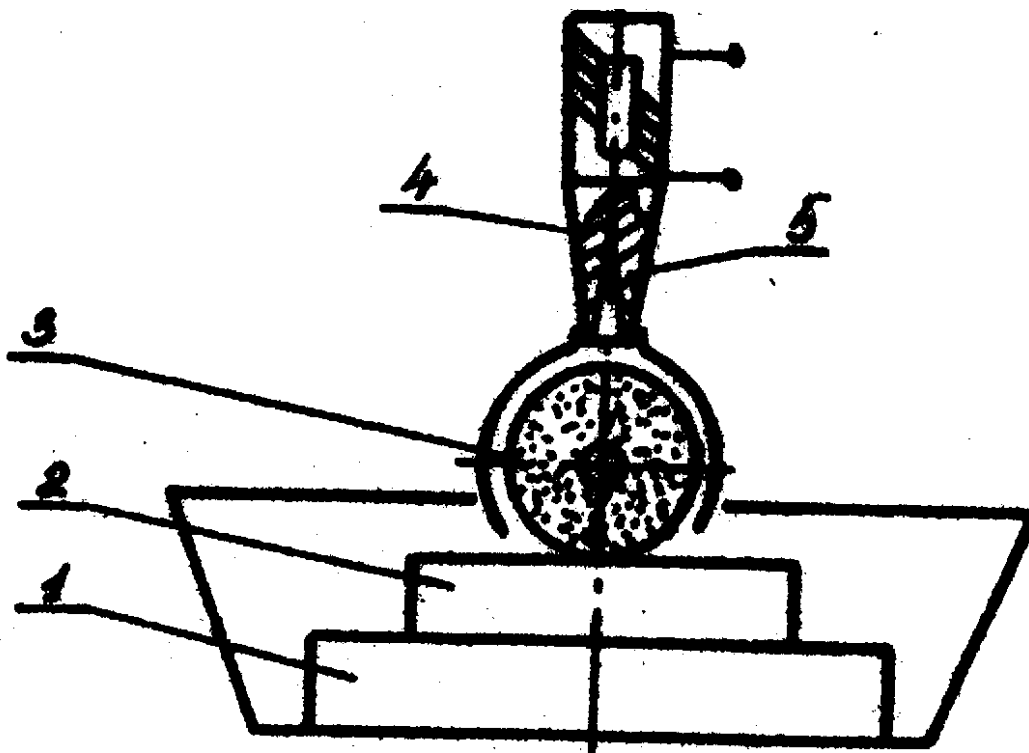


Рис. 12 Схема накладання ультразвукових коливань на шліфувальний круг

Під дією інтенсивних коливань у рідині виникає кавітація, внаслідок чого пори і зерна круга очищаються і змащуються. Накладання ультразвукових коливань збільшує стійкість круга втричі. Відсутність засалювання дозволяє використовувати більш твердіші та дрібнозернисті круги. Цей метод найбільш доцільно використовувати при чистовому шліфуванні в'язких важкооброблюваних матеріалів, при обробці алмазними кругами і для отримання поверхонь високої якості.

Зараз у промисловості при виготовленні деталей з нержавіючих сталей (жароміцних, титанових та інших важкооброблюваних сплавів) все ширше використовують ультразвукове нарізування внутрішніх різьб. При нарізанні різьби одночасно з обертливим рухом навколо осі та поступальним уздовж осі мітчику надають ультразвукових коливань з частотою 18-20 та амплітудою

до 20 мкм. Внаслідок цього поліпшуються умови роботи, усуваються заклинювання та поломка мітчика на зворотному ході, що дає можливість нарізати різьбу одним мітчиком і підвищує його стійкість у 8-10 разів. Як охолоджуючу рідину використовують машинне мастило, емульсію, змащувально-охолоджуючі рідини на основі нафтових та синтетичних мастил.

### **3.4. Методи променевої розмірної обробки.**

#### **3.4.1 Лазерна обробка**

Лазер, або оптичний квантовий генератор (ОКГ), створює потужний когерентний імпульс монохроматичного випромінювання внаслідок оптичного коливання атомів домішок у деяких кристалах або газах.

ОКГ можуть працювати в імпульсному та безперервному режимах.

За типом робочої речовини розрізняють твердотільні, газові, рідинні та напівпровідникові ОКГ.

Для розмірної обробки широко застосовуються твердотільні та газові ОКГ. Схема твердотільного ОКГ наведена на рис. 13.

Активна речовина (стержень) 2, яка є джерелом індукційного випромінювання, розташована між двома дзеркалами 1 і 3. Дзеркало 1 відбиває всі падаючі на нього промені, а дзеркало 3 - напівпрозоре.

Джерелом коливання (накачування) світлового потоку є газорозрядна лампа-спалах 4, яку для підсилення випромінювання робочої речовини вміщують разом з ним усередину відбиваючого кожуха 5. Живлення лампи-спалаха здійснюється від спеціальної високовольтної батареї конденсаторів 6.

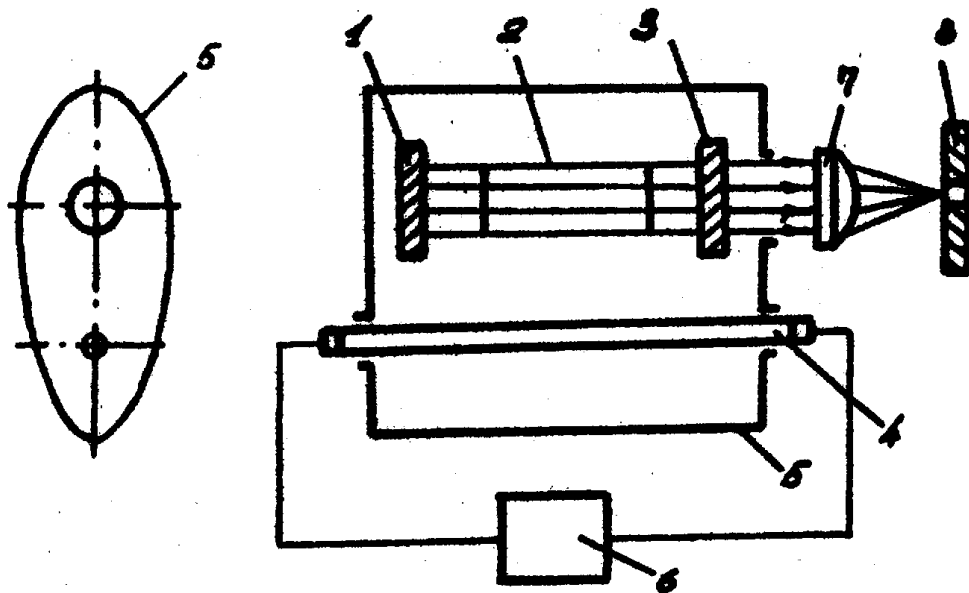


Рис. 13. Схема твердотільного ОКГ:

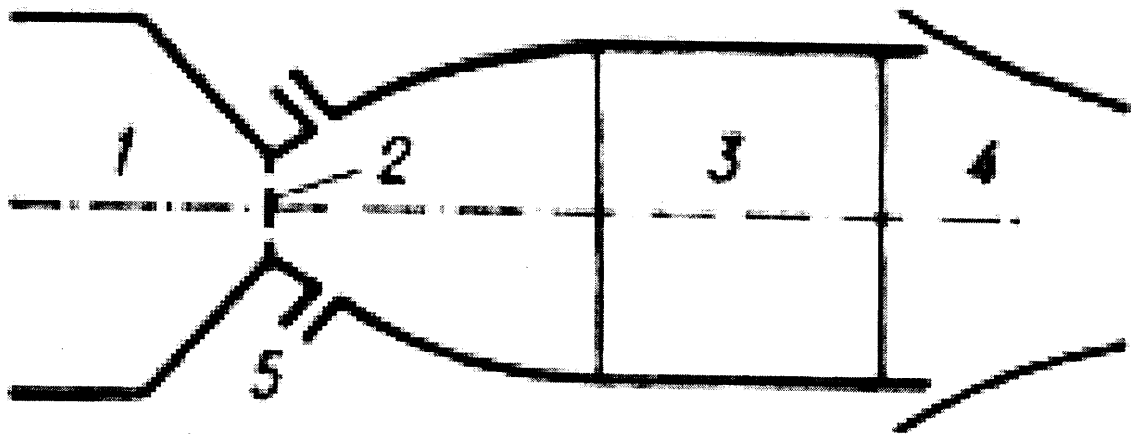
1,3 - дзеркала; 2 - активна речовина; 4 - газоразрядна лампа-спалах; 5 - відбиваючий кожух; 6 - високовольтна батарея конденсаторів; 7 - оптична система; 8 - оброблюваний матеріал

Як активна речовина використовується синтетичний рубін (або ітрієво-алюмінієвий гранат, неодимове скло). Торці рубінового або іншого стрижня полірують до оптично рівних поверхонь і встановлюють суворо паралельно. Один торець, вкритий щільним шаром срібла, непроникний для світла, а другий, також вкритий сріблом, – напівпроникний. Енергія випромінювання подається перпендикулярно його осі. Імпульсна лампа посиляє на рубіновий стрижень потік фотонів з довжиною хвилі від 410 до 500 нм. Фотони проникають у рубіновий стрижень і, діючи на атоми хрому, збуджують їх, тобто переводять електрони на більш високий енергетичний рівень, на якому ті не можуть утриматися і відразу ж переходять на проміжний рівень без випромінювання.

Коли на проміжному енергетичному рівні набереться більше половини усіх збуджених електронів, відбувається лавинний перехід їх з цього рівня на початковий. У тілі кристала рубіну індукується світловий потік, який проходить уздовж стрижня і, багаторазово відбившись від торців, досягає

великої інтенсивності. Вихідні промені фокусуються оптичною системою 7 і з високою густиною та концентрацією енергії спрямовуються на оброблюваний матеріал 8.

Як активна речовина у газових лазерах можуть використовуватися аргон, неон, криптон, ксенон, хлористий водень, суміші неону, вуглекислого газу, азоту, гелію, повітря.



**Рис. 14. Схема газового лазера:**

1 - форкамера; 2 – критичний переріз сопла; 3 - оптичний резонатор; 4 - дифузор; 5 - газовий тракт для підведення CO<sub>2</sub> для "лазера с домішуванням".

“Лазер з домішуванням” – це лазер, в якому використовується суміш повітря та CO<sub>2</sub>.

Лазер є тепловим джерелом з густиною випромінення енергії до  $10^6$ - $10^9$  Вт/см<sup>2</sup>. Питома потужність променя лазера з енергією 1 Дж, тривалістю імпульсу  $10^{-3}$  с та діаметром 0,12 мм дорівнює  $9 \cdot 10^6$  Вт/см<sup>2</sup>. Зменшуючи діаметр променя, можна довести питому потужність до  $10^9$  Вт/см<sup>2</sup>. При густині енергії  $10^3 - 10^4$  Вт/см<sup>2</sup> відбувається нагрівання матеріалу (лазерне зміцнення – термічна обробка без оплавлення),  $10^6 - 10^7$  Вт/см<sup>2</sup> – плавлення металу, більше  $10^7$  Вт/см<sup>2</sup> – випаровування.

Основні переваги застосування лазера:

- передача енергії у вигляді світлового променя на відстань;
- відсутність механічного та електричного контактів, між джерелом енергії та деталлю (промінь є інструментом).
- висока концентрація енергії та температури у плямі нагріву, малі розміри зони обробки.

Лазери використовуються для отримання отворів у форсунках; жиклерів; для виготовлення фільтрів (у тому числі тонкої очистки); розкрою листів із титанових сплавів, різноманітних сталей, композиційних матеріалів. Розкрій листів з алюмінієвих сплавів дещо утруднений, тому що алюміній має великий коефіцієнт відбиття (0,92, тобто 92% енергії, яка потрапляє на поверхню, відбивається).

Прошивка отворів - це одна з перших операцій у використанні лазера. Діапазон діаметрів отворів, які отримуються променем, становить від 10 до 500 мкм, їхня глибина (при відношенні глибини до діаметра 20...50) – від 5 мм до 10 мм.

Лазерна прошивка отворів легко автоматизується. Може використовуватися для отримання отворів з малими кутами нахилу, має велику швидкість при обробці будь-яких матеріалів та поверхонь у важкодоступних місцях. Експериментально встановлено, що дно отвору при лазерній обробці формується за рахунок випаровування, а бокові стінки – плавлення матеріалу оброблюваної деталі та витиснення рідини при надлишковому натиску парів у порожнині отвору.

На вітчизняних підприємствах для прошивки отворів використовують лазерні установки "Квант 9 М", 4222. Як правило, такі установки обладнані пристроями числового програмного управління (ЧПУ). На сьогодні більшість застосовуваних у промисловості установок даних типів модернізовані, тобто устатковані більш ефективними пристроями ЧПУ. Крім них, застосовуються сучасні установки вітчизняного та закордонного виробництва.

Лазери на вуглекислому газі використовуються для різання та розкрою листових матеріалів. Одночасно з лазерним променем подається струмінь

робочого газу (при обробці матеріалів використовується кисень). Екзотермічна реакція, що відбувається при цьому, дозволяє інтенсифікувати різання.

Для лазерного способу різання характерні висока продуктивність (швидкість 5-10 м/хв), мала ширина (0,3-0,8 мм) різку, невелика глибина зони термічного впливу (300-500 мкм), що дозволяє звести до мінімуму відходи обробки.

Висока якість поверхні різання забезпечується при певному співвідношенні між швидкістю газолазерного розрізання металу та потужності випромінювання, підведеного у зону обробки.

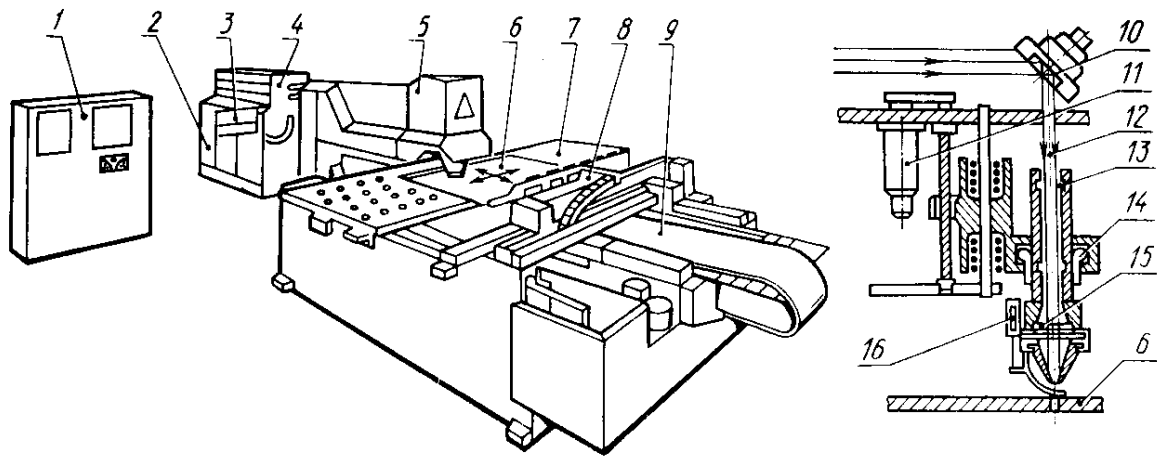
Точність різання з підвищенням швидкості обробки дещо зростає. Отже для підвищення точності газолазерного різання металевих матеріалів обробку необхідно проводити на максимальних швидкостях, при яких ще можливе різання деталей заданої товщини.

Вітчизняна промисловість використовує газові лазери потужністю 40Вт (ЛГ - 22), 100 Вт ("Квінтет"), 800 Вт ("Кардамон"), а також лазери імпортного виробництва.

### **3.4.2 Лазерні технологічні комплекси**

У промисловості широко використовуються різноманітні лазерні технологічні комплекси. Деякі з них мають вигляд окремих одиниць обладнання, деякі складають дільниці, автоматичні лінії, гнучкі виробничі системи або цехи. У більшості випадків лазерні технологічні комплекси інтегруються до інших комплексів, наприклад, обробки металів тиском, зварювання, термічної обробки, поверхневого зміцнення, іноді механічної обробки.

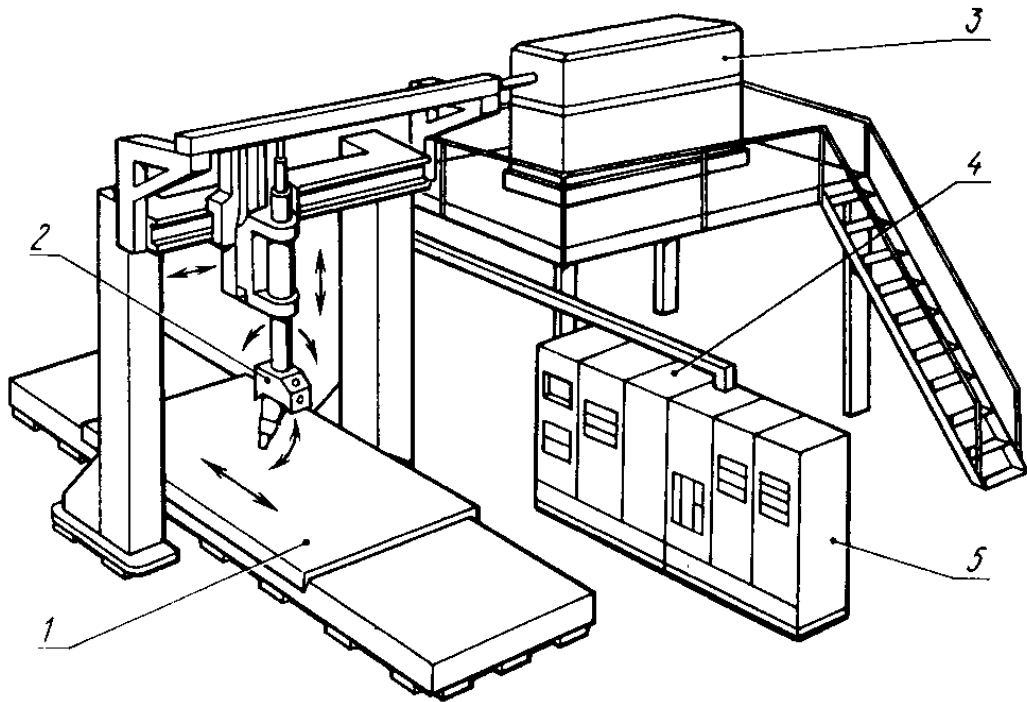
У вітчизняній промисловості ще з 80-х років минулого сторіччя застосовують комплекси М-36М та М-25С. Комплекс М-36М призначено в основному для розкрою листових матеріалів. використаний в ньому лазер може застосовуватися і в інших технологічних комплексах.



**Рис. 15 – Автоматизований технологічний комплекс М-36М для лазерного різання листових металів**

1- блок контролю й управління, 2 – силовий блок лазера; 3- пульт управління; 4 – лазер на CO<sub>2</sub> (безперервної дії); 5 – оптико-механічна система; 6 – заготовка; 7 – опорний стіл; 8 – робот; 9- транспортна система; 10- дзеркало; 11 – механічний привод системи стеження; 12 – промінь лазера; 13- лінза (фокусна відстань 254 мм); 14 – лінза (фокусна відстань 12 мм), 15 – лінза (фокусна відстань 63 мм); 16 – датчик системи стеження

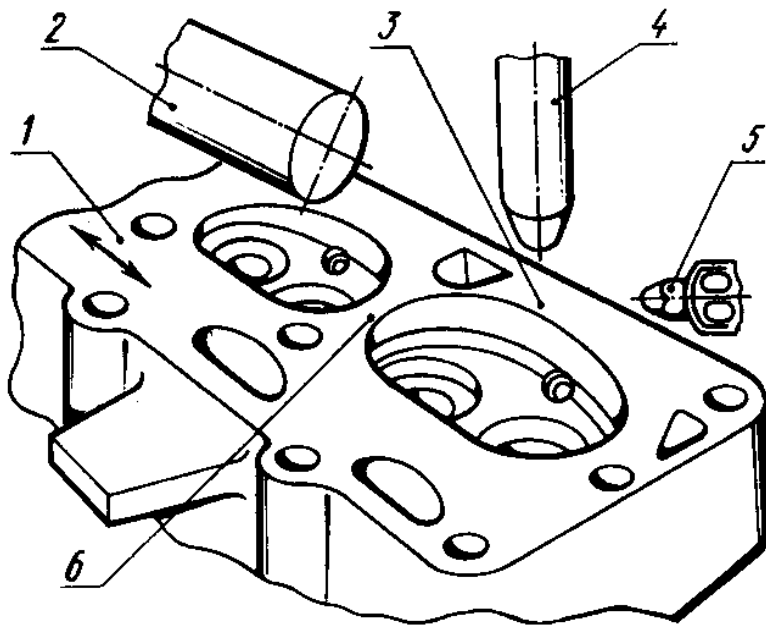
Комплекс М-25С дозволяє поряд із розкромом листових матеріалів здійснювати операції термічної обробки, наплавлення, зварювання, вирізання отворів в конструкціях, які можна розмістити в його робочому просторі. Характерною особливістю цього комплексу є можливість обробки тривимірних конструкцій, що забезпечується наявними п'ятьма ступенями свободи його виконавчих органів.



**Рис. 16. Лазерний технологічний комплекс М-25С:**  
 1 – позиційний стіл; 2 – оптико-механічний блок; 3 – лазер на CO<sub>2</sub>;  
 4 – блок контролю і керування; 5 – силовий блок

Для обробки головок циліндрів автомобільних двигунів застосовували верстат АЛТК-Т. Така обробка на 20–30% підвищує твердість і в багато разів – зносостійкість оброблюваного матеріалу. Перевага лазерної термічної обробки полягає в здійсненні вибіркового впливу на різні ділянки оброблюваної деталі. Зокрема, можна обробляти контури отворів у головці блока циліндрів, не торкаючись основного металу. Така обробка має риси не тільки термічної, але й розмірної. При лазерній термічній обробці, на відміну від традиційної, розміри заготовки майже не змінюються, що дозволяє значно зменшити відстань між циліндрами автомобільного двигуна в блоці. Крім цього, застосування лазерної термічної обробки дозволяє відмовитися від дорогих гартувальних середовищ. В якості гартувального середовища в процесі нагрівання й охолодження зі швидкістю  $10^6$  К/с, що властиве лазерній обробці, може виступати повітря, а особливо відповідальних випадках, аргон. Лазерна термічна обробка може здійснюватися з

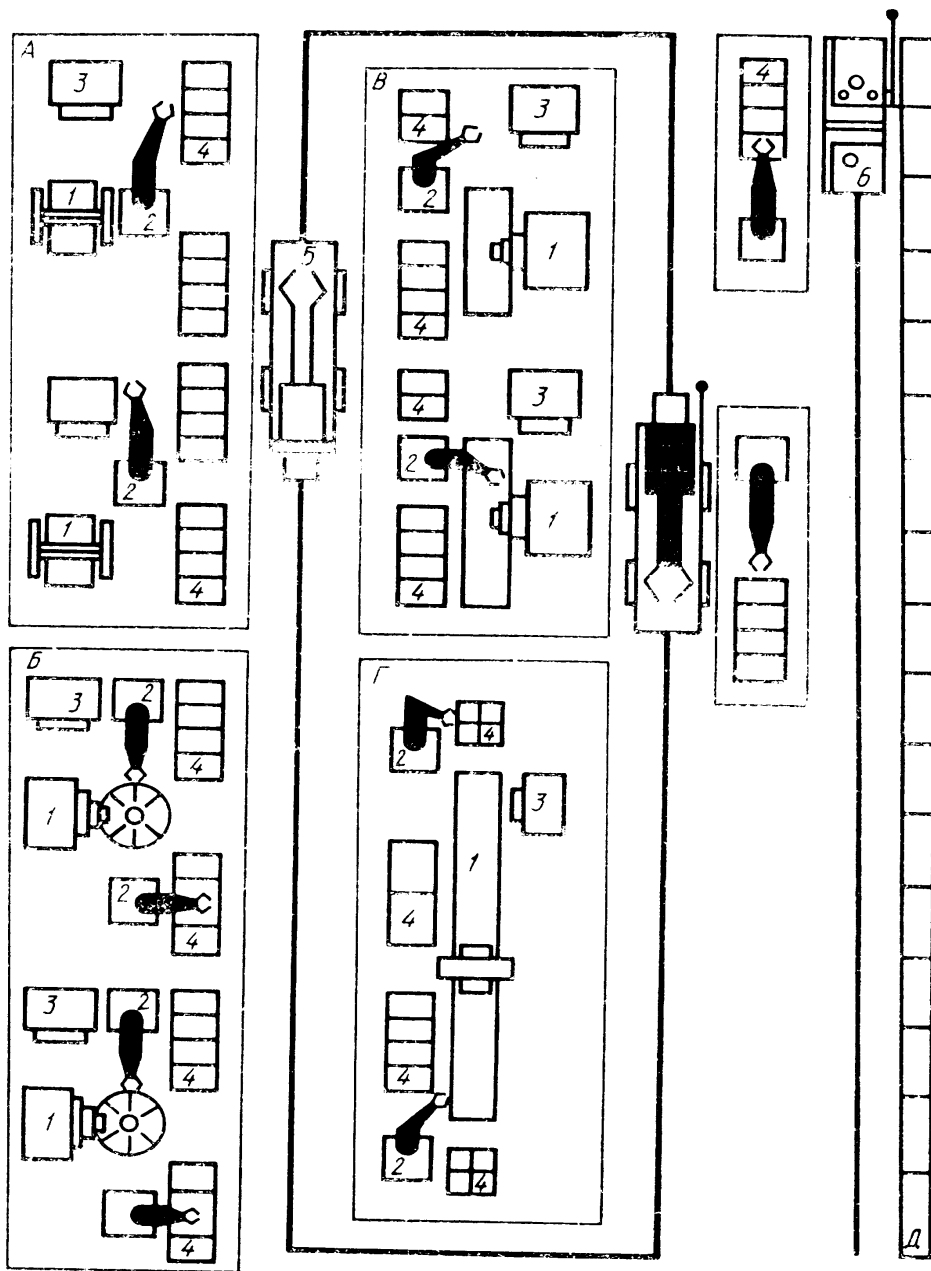
оплавленням основного матеріалу та без оплавлення. Крім цього може застосовуватися лазерне легування поверхні деталі. Для цього на поверхню наносять шар матеріалу, який містить легуючі компоненти, потім поверхню опромінюють лазером. Найчастіше лазерне легування відбувається з оплавленням поверхневого шару матеріалу.



**Рис. 17. Схема лазерної термічної обробки**

1 – деталь, 2 – витяжний патрубок, 3 – оброблювана поверхня, 4 – лазерна головка, 5 – сопло подачі аргону, 6 – контур обробленої поверхні.

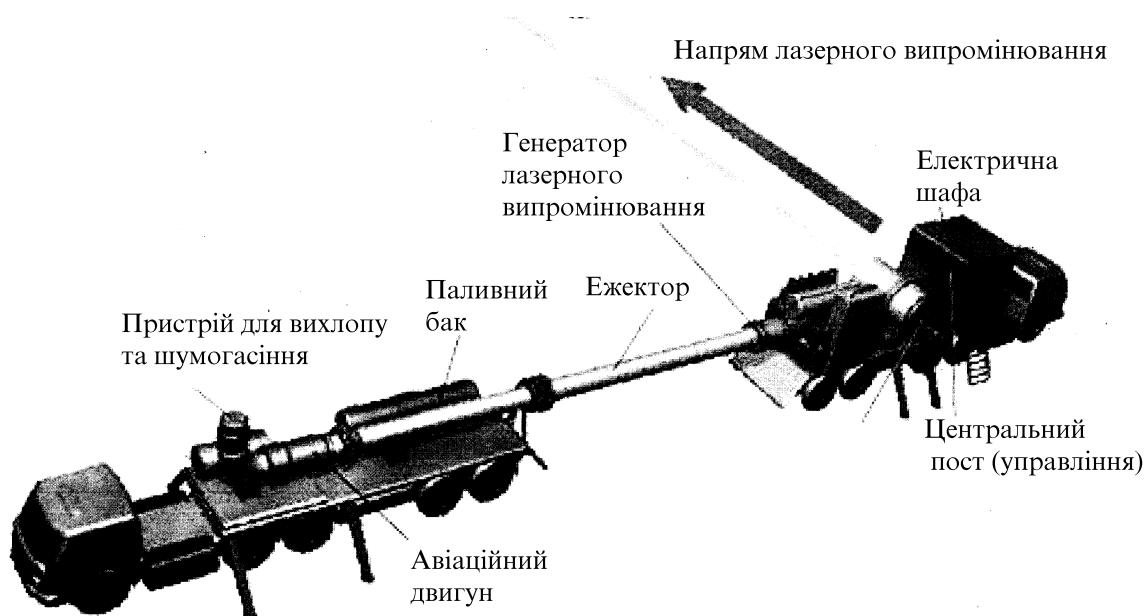
Фірмою “Toshiba” (Японія) був розроблений концептуальний проект гнучкого автоматизованого виробництва із застосуванням лазерної обробки (фактично, лазерного технологічного комплексу), який складається з дільниць напилення покриттів, лазерного зварювання та лазерної термічної обробки. У суцільному вигляді такий технологічний комплекс не застосовувався, але його елементи використовувалися для створення гнучких автоматизованих виробництв для виготовлення машинобудівної продукції різного призначення.



**Рис. 18. Гнучке автоматизоване виробництво із застосуванням лазерної обробки**  
 1 – лазер; 2 – робот; 3 – пристрій ЧПУ; 4 – розвантажувально-завантажувальний пост; 5 – транспортний робот; 6 – робот-штабелер.

Для виконання ремонтних робіт на електростанціях (наплавлення посадочних місць під підшипники на роторах турбін), аварійно-рятувальних та ремонтно-відновлюваних робіт при гасінні пожеж на нафтових та газових родовищах в Федеральному державному унітарному підприємстві

“Державний науковий центр “Троїцький інститут інноваційних та термоядерних досліджень” (російська федерація) були розроблені мобільні лазерні технологічні комплекси МЛТК-50. Потужність лазера – 50 кВт. Цей комплекс здатний розрізати середньолеговані сталі товщиною до 120 мм з дистанції до 30 м навіть крізь полум’я. Версія цього комплексу з меншою потужністю МЛТК-5 (потужність лазера 5 кВт) використовується для робіт на менших об’єктах та навіть для боротьби з шкідниками сільськогосподарських рослин. Сучасні лазерні технологічні комплекси монтується на двох напівпричепках до вантажних автомобілів. Перспективні розробки планується монтувати вже на одному транспортному засобі. В цих комплексах використовуються турбореактивні двигуни Р29, які вже не можуть бути застосовані у літальних апаратах. Перевагою комплексів МЛТК-50 є використання в якості робочого тіла повітря з додаванням 5%  $\text{CO}_2$ .



**Рис. 19** Принципова схема мобільного лазерного технологічного комплексу МЛТК-50



**Рис. 20. Мобільний лазерний технологічний комплекс у готовому до роботи положенні**



**Рис. 22. Мобільний лазерний технологічний комплекс на випробуваннях (розрізання металокопструкцій крізь полум'я – це необхідно для ліквідації пожеж на нафтових та газових свердловинах)**

Сьогодні застосовують лазерні технологічні комплекси різних виробників. Актуальна також модернізація наявних комплексів, у першу чергу системи керування, блоків живлення лазерів, власне лазерних випромінювачів на більш нові фізично та сучасні за конструкцією.

Для захисту від лазерного випромінювання можуть бути використані різноманітні матеріали: металеві листи, листи з азбесту, кам'яні та цегляні стіни. В умовах використання потужних лазерів для створення відносно легких та мобільних захисних екранів (споруд) доцільно використовувати спінені вуглецеві матеріали. Лазерне випромінювання здійснює різноманітний вплив на матеріал. Вуглецева піна за рахунок великої термостійкості (більш ніж  $3000^{\circ}\text{C}$ ) та пружності під дією лазерного випромінювання дуже повільно пропалюється та мало деформується під ударною дією випромінювання. При потраплянні лазерного променя на високопористий вуглецевий матеріал відбувається інтенсивне розсіювання енергії променя і значно зменшується його проникаюча здатність. Таким чином, на сьогодні існують не тільки високоефективні лазерні технологічні комплекси різного призначення, а й ефективні засоби для захисту людей та навколишнього середовища від шкідливої дії лазерного випромінювання. Конверсійні програми надають широкі можливості для створення та значного поширення лазерних технологій у промисловості.

### **3.4.3 Електронно-променева обробка(ЕПО)**

ЕПО заснована на тому, що випромінювані катодом електрони (у високому вакуумі) прискорюються потужним електричним полем, фокусуються у вузький пучок і спрямовуються на оброблювану деталь. Наштовхуючись на деталь, електрони гальмуються, їхня кінетична енергія перетворюється у теплову. Матеріал у цьому місці нагрівається, плавиться та випаровується. Схема електронно-променевої установки, яку використовують для розмірної обробки, зображена на рис. 14.

Пучок електронів від катода 1 (виготовленого з вольфраму, танталу або гексабориду лантану) розганяється електричним полем напругою 100...150 кВ між катодом та анодом 2. За допомогою магнітної лінзи 3 пучок електронів фіксується на деталі. Переміщення променя по оброблюваній поверхні

здійснюється системою 4. Оброблювану деталь 6 встановлюють у робочу камеру 5, яка має ілюмінатор для спостереження за процесом обробки.

В робочому просторі камери та електронної гармати необхідний вакуум (щоб молекули газів не перешкоджали вільному пробігу електронів), який створюється системою насосів 7 (залишковий тиск  $10^{-3} - 10^{-4}$  Па). Оброблювана деталь переміщається у вакуумній камері за допомогою спеціальних механізмів.

Електронний промінь теоретично може бути сфокусований на ділянці діаметром, меншим 1 мкм, при цьому густина енергії у пучку  $10^7 - 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>. Оброблюваність матеріалу при ЕПО залежить від його теплофізичних властивостей.

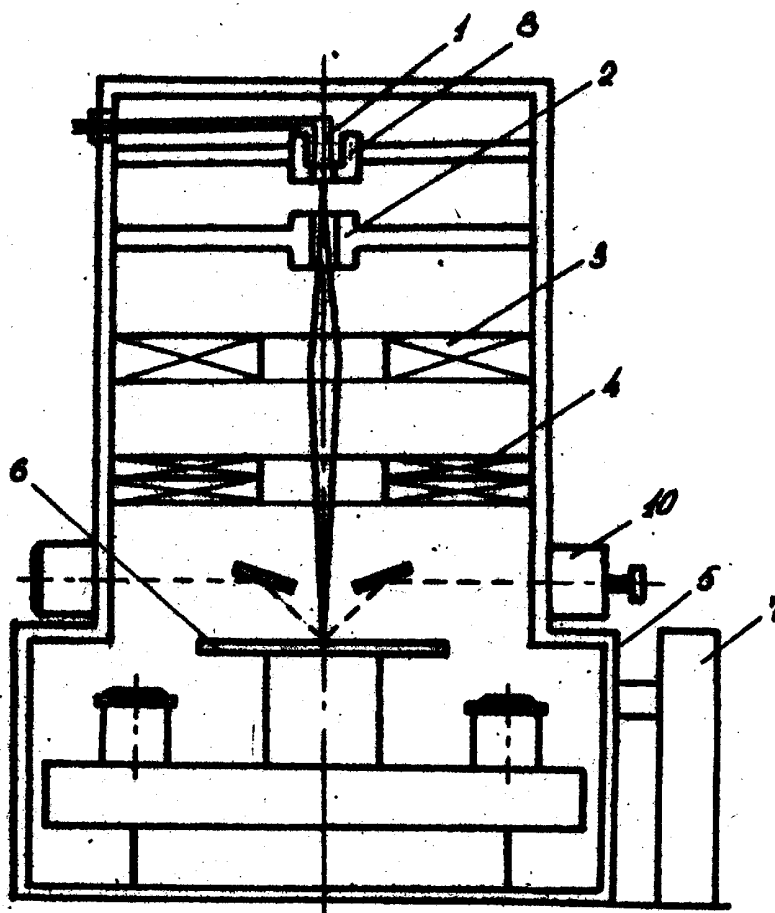


Рис. 23. Схема електронно-променевої установки:

1 - катод; 2 - анод; 3 - магнітна лінза; 4 - відхиляюча лінза; 5 - робоча камера; 6 - деталь; 7 - вакуумний насос; 8 - керований електрод; 9 - електронний промінь; 10 - система слідження

Швидкість зняття матеріалу при ЕПО може досягати 30 мм<sup>3</sup>/хв, однак для забезпечення високої якості обробки вона не повинна перевищувати 1 мм<sup>3</sup>/хв.

ЕПО широко застосовується для отримання отворів малого діаметра. Нижче наведені технічні дані електронно-променевої установки для розмірного свердління (ЕПУРС).

Діаметр отримуваних отворів – 0,05-1,0 мм.

Максимальна товщина матеріалу – 6,0 мм.

Точність обробки, (не гірше) – 20 % від розміру отвору.

Шорсткість поверхні, 0, 8-0,4 мкм.

Продуктивність – 1000 отв/с.

Отвори, отримані шляхом ЕПО, мають вхідний та вихідний конуси висотою 0, 2-0, 6 діаметра отвору.

У порівнянні з лазерною обробкою ЕПО має такі переваги:

- дозволяє обробляти матеріали з високою прозорістю та великою відбивною здатністю;
- обробка здійснюється безперервно при порівняно легкому керуванні переміщенням променя;
- дозволяє мати значно менший діаметр ділянки, на якому фокусується електронний промінь;
- забезпечує більш високу продуктивність (до \* 4000 отв/с).

До недоліків ЕПО слід віднести складність конструкції та високу вартість устаткування.

ЕПО застосовують головним чином при виготовленні деталей з великою кількістю (до сотень тисяч) отворів.

### 3.4.4 Плазмова обробка

Плазмовою обробкою називають такий технологічний процес, при якому для видалення матеріалу використовується струмінь іонізованого газу.

Можна виділити такі випадки застосування плазмового струменя для розмірної обробки: попереднє нагрівання заготовки при обробці різанням, зняття поверхневих шарів матеріалу з циліндричних заготовок на токарному верстаті; різання листового матеріалу; обробка отворів, щілин та пазів малих розмірів.

При обробці важкооброблюваних матеріалів різанням продуктивність можна суттєво підвищити, якщо попередньо нагріти поверхневий шар матеріалу. Можливості індукційного нагріву обмежуються габаритами заготовки, складністю устаткування. Останнім часом для попереднього нагріву успішно використовують плазмові горщики. Вони дають високу енергетичну густину і швидко нагрівають поверхню.

Установка для такої обробки (рис. 15) збирається на базі універсального токарного верстата 7.

На ній використовуються плазмові пальники потужністю до 50 кВт при діаметрі сопла 3 мм. Такі пальники дають можливість отримувати високу енергетичну густину та потужність до 7 ГВт/м<sup>2</sup>. Суміш аргону, азоту та водню (75% Ar, 20% N<sub>2</sub>, 5% H<sub>2</sub>) подається у пальник крізь систему подачі робочого газу 5, систему вентилів, манометрів та витратомірів 6. Дуга запалюється від високочастотного пристрою.

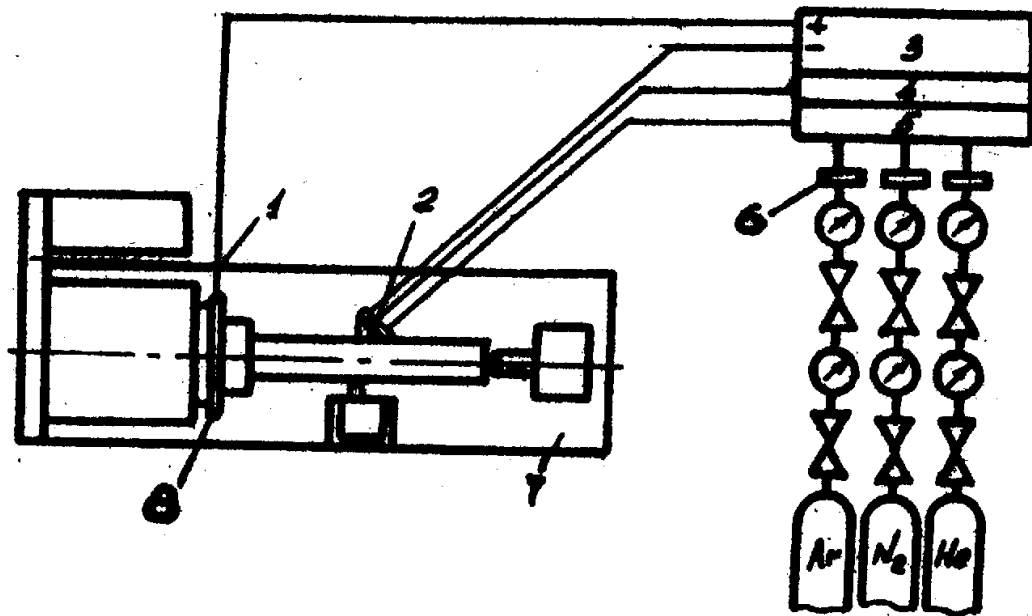


Рис. 24. Схема установки для плазмової обробки циліндричних деталей

Спочатку запалюється допоміжна дуга між катодом, включеним до цього у коло у вигляді анода, і 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 ковзного контакту 1, розташованого на патроні токарного верстата. Установка має систему охолодження 4, пальники та теплоізоляцію для захисту верстата. Обробка різанням в умовах попереднього нагріву плазмовим струменем здійснюється твердосплавними, мінералокерамічними різцями (можуть використовуватися і матеріали на основі кубічного нітриду бора). При підігріванні оброблюваної заготовки до  $T=630^{\circ}\text{C}$  об'єм знятого за одиницю часу матеріалу може збільшуватися на 45% (за рахунок збільшення швидкості, подачі та глибини різання).

Видалення плазмовим струменем поверхневих шарів металу із заготовки, що обертається, останнім часом також уважно вивчається.

Матеріал при цій операції видаляється за схемою звичайної токарної обробки, але із застосуванням плазмового пальника замість різця.

На ефективність процесу впливає характер установки плазмового пальника відносно деталі. При оптимальному розташуванні пальника 3 відносно деталі 1 (рис. 25) оплавлений матеріал повністю видаляється із зони обробки, чим досягається висока якість обробленої поверхні. Оптимальна відстань осі плазмового струменя 4 від оброблюваної поверхні становить близько 2,5 мм. Середнє віддалення сопла 2 від оброблюваної поверхні - 10 мм.

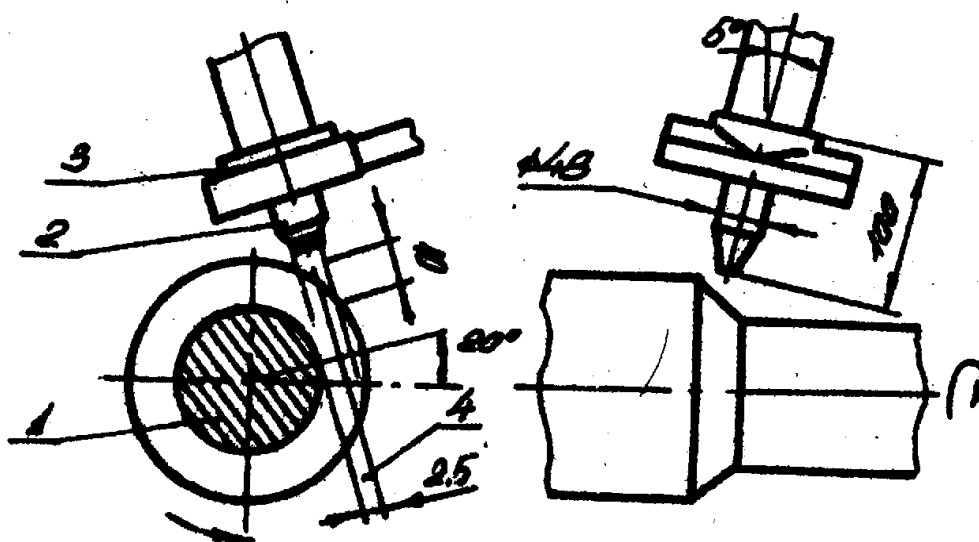


Рис.25 Відносне розташування плазмового пальника до оброблюваної деталі.

Хороші результати у порівнянні з обробкою різанням отримують при “плазмовому точінні” жароміцних сталей. Для обробки вуглецевих сталей, алюмінію, латуні використовувати цей засіб недоцільно.

Найбільше питоме зняття металу  $V = 80-100 \text{ мм}^3/\text{хв}$  досягається при подачі  $S = 2,7 \text{ мм/об}$  та круговій швидкості  $v = 20 \text{ мм/хв}$ .

“Плазмове точіння” доцільне тільки в тих випадках, коли ускладнена або неможлива звичайна токарна обробка. Його доцільно застосовувати, наприклад, для обробки жароміцних матеріалів або чорнової обробки заготовок. Шорсткість обробленої поверхні при “плазмовому точінні”

лежить поза класами чистоти (нижче 1-го класу за старою системою), а зона термічного впливу може досягати 1 мм.

Третій різновид застосування плазмового струменя – плазмове різання – також знаходить широке застосування.

Перевага плазмового різання: не треба видаляти з розрізуваної поверхні окалину, тому що вона в процесі різання плавиться і видаляється плазмовим струменем разом із розплавленим металом.

Плазмове різання листового матеріалу може бути ручним, механізованим, автоматизованим. Автоматичне різання здійснюється за копіром кресленням з використанням слідкуючої системи, а також за допомогою програмного управління (пристрій ЧПУ). Сучасні машини для плазмового різання устатковуються пристроями ЧПУ. раніше випущені машини піддаються модернізації.

Ширина різання залежить від параметрів пальника, матеріалу та товщини листа. Наприклад, при різанні сталі товщиною 25 мм плазмовим пальником з продуванням повітрям ширина різання становить 5 мм, отримана поверхня гладка, кромки гострі.

Плазмовий струмінь можна використовувати для різання будь-яких матеріалів - тугоплавких металів (вольфрам, молібден, тантал та ін.), тугоплавких сполук (карбіди, силіциди, оксиди та інше), кольорових металів (мідь, алюміній), високолегованих сталей, неметалевих і струмопровідних матеріалів (вогнестійка кераміка, скло, слюда та ін.).

Застосування розмірної плазмової обробки дозволяє обробляти практично всі відомі матеріали, забезпечує високу продуктивність, дає можливість мати малу зону термічного та хімічного впливу.

Недоліками методу є відносна складність устаткування, необхідність вживати при обробці спеціальні гази, що значно підвищує вартість процесу.

Устаткування для плазмової обробки складається з таких основних елементів (рис. 26): плазмового пальника 5, джерела живлення 1; системи

подачі робочого газу 2; системи охолодження 4, блоку керування 3. Плазмовий струмінь 6 спрямовується на оброблювану заготовку 7.

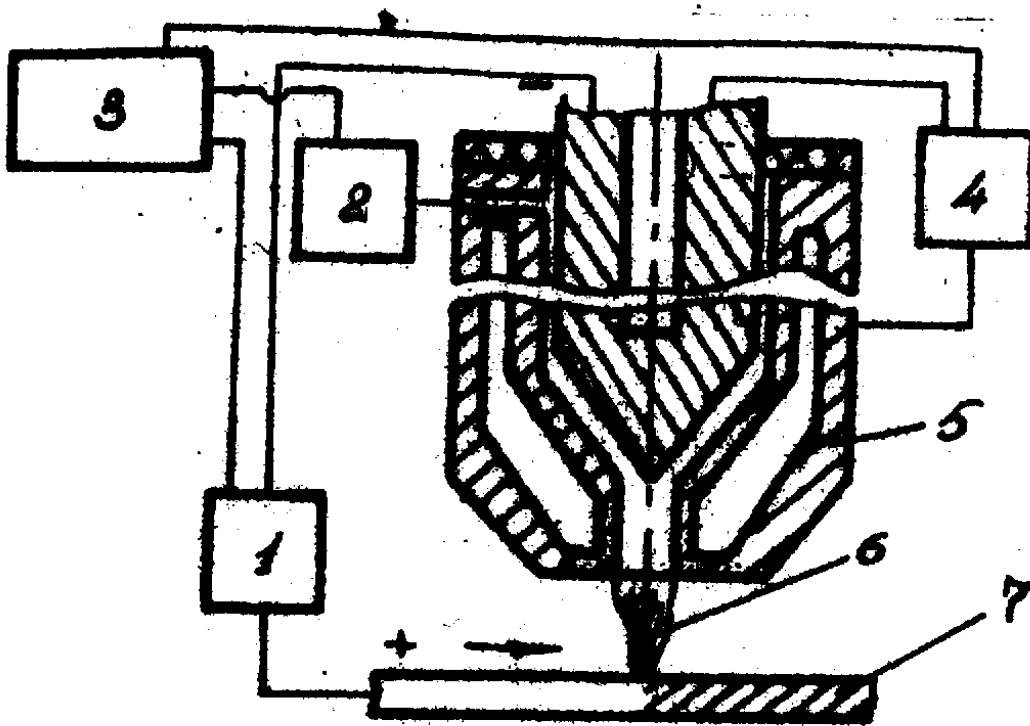


Рис. 26. Структурна схема установки для плазмової обробки матеріалів

Для отримання заданого закону обробки плазмовому пальнику або заготовці надається необхідний рух.

Плазмовий пальник - це пристрій, в якому утворюється струмінь плазми, що використовується для обробки. При формуванні плазмового струменя в пальнику між електродами (катодом та анодом) виникає дуга. Робочий газ, що подається під тиском у камеру пальника, видуває дугу через сопло у вигляді плазмового струменя.

Розрізняють пальники закриті та відкриті. У закритому (без переносу дуги) катод 2 та анод 3 (рис. 27,а) розташовані усередині пальника. Дуга горить у вузькому міжелектродному каналі, а робочий газ, що пройшов через неї, виходить у вигляді плазмового струменя 4 через сопло назовні. У цьому пальнику дуга не виходить за його межі і електричне не з'єднується з оброблюваною поверхнею 1.

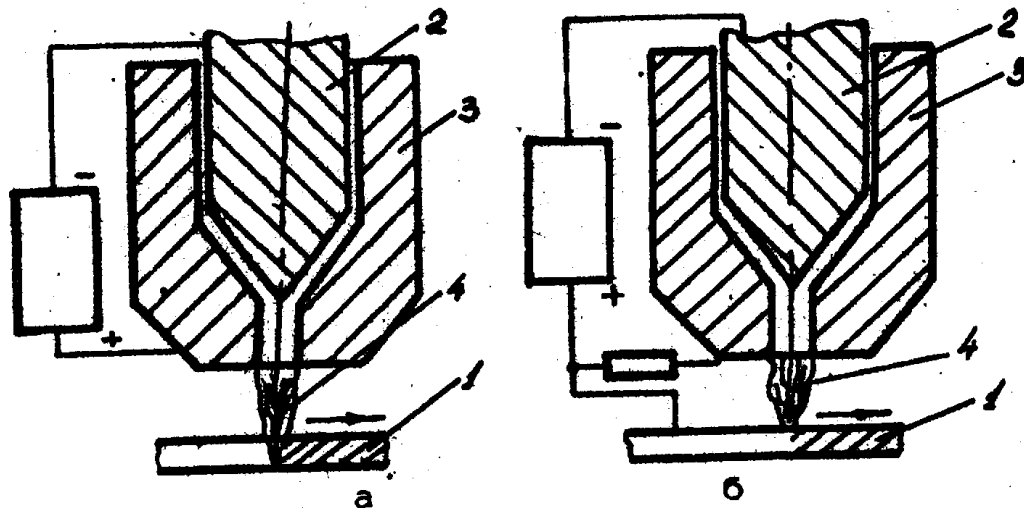


Рис. 27. Плазмові пальники

У відкритому пальнику (рис. 27б) з переносом дуги оброблювана деталь 1 є основним анодом, а сопло пальника – повторним анодом 3 (у разі використання так званої “чергової дуги”). У такому пальнику основна дуга 4 горить між катодом 2, що знаходиться в пальнику, та виробом.

Для підвищення температури плазмового струменя, а також для більш стійкої роботи пальника і підвищення довговічності сопел існують різні засоби стиснення (стабілізації) дуги. У плазмових пальниках дугу стабілізують стінками сопла, газовим шаром та вихором.

Стінками сопла (рис. 28,а) стискають дугу, як правило, у відкритих пальниках. У цьому разі струмінь плазми збігається із стовпом дуги. Наявність повторного анода сприяє рівномірній течії плазмового струменя. При цьому товщина шару газу, який обмежує дугу, і витрати крізь нього холодного газу зменшуються, що додатково підвищує температуру газу.

При стабілізації газовим шаром (рис. 28,б) робочий газ тече аксіальне, утворюючи шар, який обмежує дугу. Крім звуження дуги, підвищується напруга та потужність пальника.

Крім того, межовий газовий шар служить одночасно тепловим та електричним ізолятором, що підвищує ККД пальника.

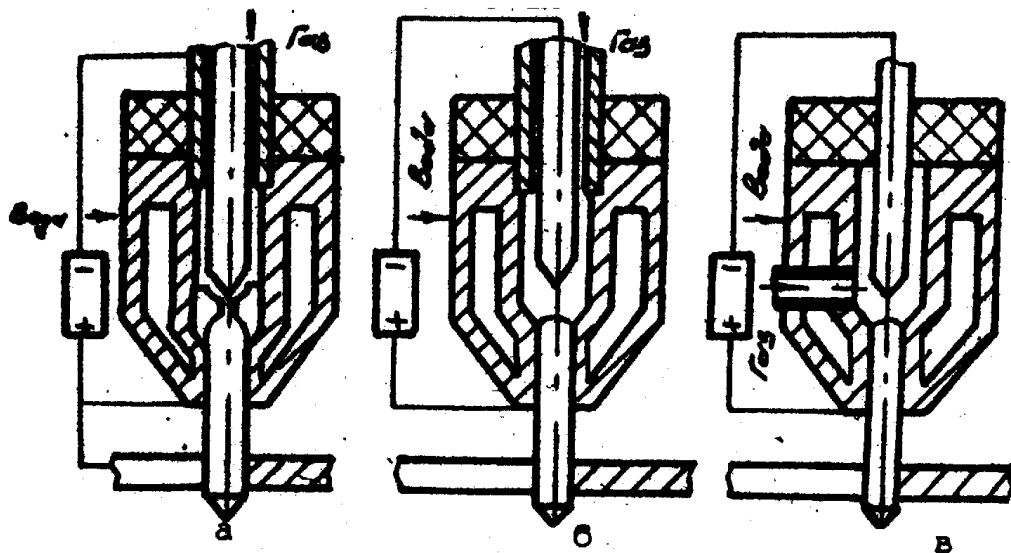


Рис. 28. Засоби стабілізації плазмової дуги

При стабілізації вихором (рис. 28,в) дуга обтискується потоком робочого газу, що подається у катодний простір тангенціально.

Існують різні конструкції плазмових пальників. Вони відрізняються призначенням, потужністю, засобами стабілізації дуги, а також використовуваним робочим газом.

Специфічні умови, в яких перебувають деталі плазмових пальників (висока температура, середовище окислюючих газів та інше), з одного боку, обумовлюють застосування спеціальних корозійностійких матеріалів. З іншого ж боку, щоб зменшити нагрівання пальника, його матеріал повинен мати високу теплопровідність. Проте, вживаючи матеріали з високою теплопровідністю, треба мати на увазі що з охолоджуючою водою виноситься значна частина енергії, яку підводять до пальника (тобто знижується ККД пальника).

Найбільш поширене застосування у пальниках електродів з міді, але такі електроди швидко зношуються. Для підвищення стійкості використовують вольфрам або графіт.

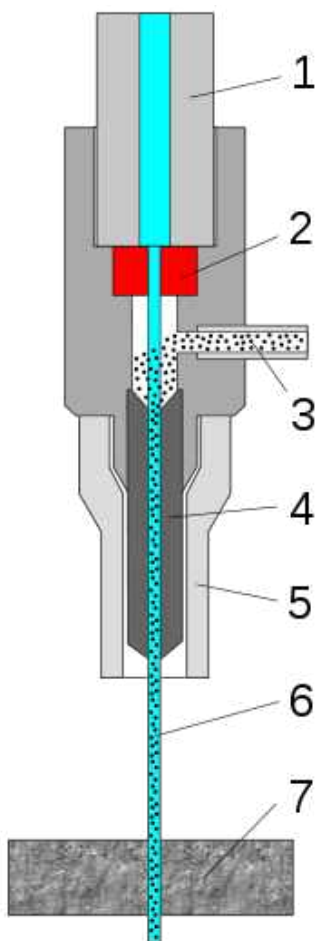
Джерелом живлення для плазмових пальників як правило служать стандартні джерела постійного струму потужністю 70 кВт.

Можна використовувати також спеціальні джерела.

Як робочий газ у плазмових пальниках застосовують одноатомні гази (гелій, аргон), двоатомні (водень, азот) та їх суміші. Найбільш широко використовують суміш азоту з воднем (80% N<sub>2</sub>, 20% H<sub>2</sub>) або аргону з воднем (70% Ar, 30% H<sub>2</sub>).

### 3.5. Гідроабразивна обробка

Гідроабразивна обробка здійснюється за рахунок ерозійної дії потоку високошвидкісного струменя рідини та твердих часток абразиву. Стійкість процесу забезпечується оптимальним вибором таких параметрів як тиск і швидкість витоку струменя рідини, витрати та розміру часток абразиву. Тиск рідини сягає 20-35 МПа, швидкість – до 100 м/с. Розміри частинок абразиву – 0,1-0,2 мм, діаметр сопла – до 0,5 мм.



**Рис. 29. Принципова схема установки для гідроабразивної обробки**

1 – підведення води, 2 – сопло, 3 – подача абразиву, 4 – змішувач, 5 – кожух, 6 – ріжучий струмінь, 7 – оброблюваний матеріал

Методом гідроабразивної обробки можна виготовляти вироби з різних матеріалів: сталі, в тому числі високолеговані жароміцні й нержавіючі, кольорові метали та їх сплави (нікель, мідь, алюміній, магній, титан та інші), неметалеві композиційні матеріали, керамічні матеріали, природні й штучні камені, скло та композиційне скло (триплекс, броньоване скло, армоване скло), ламіновані матеріали, пористі матеріали, бетон та залізобетон, стільникові конструкції, сендвіч-панелей. Тобто при гідроабразивній обробці фактично відсутні обмеження щодо твердості оброблюваних матеріалів – ані висока, ані низька твердість не є перешкодою для обробки. Також не є перешкодою зміна твердості та інших механічних характеристик матеріалу по його товщині – це стосується стільникових конструкцій, сендвіч-панелей. Різати можна і струменем рідини без абразиву. Так обробляють пінополіуретан, шкіру, тканини, пластичні маси, картон як у вигляді листів так і у вигляді тривимірних заготовок. Найчастіше в процесі гідроабразивної обробки використовується звичайна водопровідна вода. В якості абразивів можуть застосовуватися карбід кремнію, тверді сплави, корунд, ельбор та інші матеріали на основі кубічного нітриду бору, природні й штучні алмази. Збільшення твердості абразиву збільшую продуктивність обробки, але здорожує сам процес та прискорює зношення сопла. Сопла виготовляють з твердих сплавів, іноді з нанесенням на їх внутрішню поверхню зносостійких покриттів, сталей з поверхневим зміцненням, наприклад, боруванням. Сучасне обладнання для гідро абразивної обробки дозволяє знімати практично з будь-якого матеріали по кілька кубічних сантиметрів за хвилину.

Переваги гідро абразивної обробки у порівнянні з механічною, лазерною та плазмовою: відсутність нагрівання матеріалу заготовки в зоні обробки (температура не більше 60-90 °С); малі втрати матеріалу; можливість обробки матеріалів з різною товщиною (від 0,1 м до 230 мм і більше); висока ефективність розрізання листових та рулонних матеріалів значної товщини (більше 8 мм); відсутність вигорання легуючих елементів в

зоні різання; відсутність оплавлення та пригоряння матеріалу в зоні різання; вибухо та пожежобезпечність процесу; мала шорсткість різу (Ra 1,6).

Хімічні, електрохімічні та електрофізичні методи обробки конструкційних матеріалів являють собою сьогодення ракетно-космічної промисловості. Деякі з цих методів активно використовуються, наприклад, електроерозійна, лазерна обробка, плазмове напилення теплозахисних, корозійностійких покриттів, гідроабразивна обробка. Інші методи замінені на більш придатні та ефективні за сучасних умов. Перші три розділи побудовані на матеріалах досліджень та досвіді використання електрофізичних та електрохімічних методів обробки конструкційних матеріалів на машинобудівних підприємствах Дніпропетровська та області, особливо Державного підприємства «Південний машинобудівний завод імені О.М. Макарова», Відкритого акціонерного товариства «Український науково-дослідний інститут технології машинобудування», а також багаторічного викладання цих дисциплін на фізико-технічному факультеті Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара.

## КОНТРОЛЬНІ ЗАВДАННЯ

1. Поясніть сутність хімічної обробки
2. Поясніть сутність електрохімічної обробки
3. Поясніть сутність диференційної електрохімічної обробки
4. Анодно-механічна обробка. Галузі застосування
5. Наведіть приклади використання ультразвукової обробки при формоутворенні деталей машин.
6. Поясніть сутність та наведіть види електроерозійної обробки
7. Профільовані та не профільовані інструменти для електроерозійної обробки.
8. Сутність лазерної обробки.
9. Імпульсні лазери. Принципова схема.
10. Газові лазери. Принципова схема.
11. Лазерні технологічні комплекси.
12. Види електронно-променевої обробки
13. Плазмова обробка.
14. Плазмові пальники
15. Принципова схема гідро абразивної обробки

## СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Бирюков В.Н. Электрофизические и электрохимические методы размерной обработки.- М.: Машиностроение, 1981.-128 с.
2. Волков Ю.С., Ливинец А.Л. Введение в теорию размерного формообразования электро-физическими и электро-химическими методами.-К.: Высш. шк., 1978.- 120 с.
3. Грошиков А.И., Малафеев В.А. Заготовительно-штамповочные работы в самолетостроении. - М.: Машиностроение. 1976.- 440 с.
- 6 Коваленко В. С. Технология и оборудование электрофизических и электрохимических методов обработки материалов. К.: Высш. шк., 1983,- 176 с.
- 7 Лазерная резка металлов: Учебн. пособие для ВУЗов/ А.Г.Григорьянц, А.А.Соколов: Под ред. А.Г. Григорьянца.-М.: Высш. шк., 1988.- 127 с.
- 8 Манжелевський С.В. Особливості випромінювання лазерів різних типів./ Космическая техника. Ракетное вооружение: сб. науч.-техн. ст. – 2010. – Вып. 2. – Днепропетровск: ГП «КБ «Южное». – с. 40-48.
- 9 Найдьонов В.А., Ухов Є.І., Шевчук Д.І. Хімічні, електрохімічні та електрофізичні методи розмірної обробки: Навч. посібник.. – Дніпропетровськ: ДДУ, 1996. – 40 с.
- 10 Немилов Е.Ф. Электроэрозионная обработка материалов. -Л.: Машиностроение, 1903.- 160 с.
- 11 Понилов Л.Я. Электрофизическая и электрохимическая обработка материалов: Справ.-2-е изд.- М.: Машиностроение, 1982.,-. 400 с.
- 12 Седыкин Ф.В. Размерная электрохимическая обработка деталей машин.- М.: Машиностроение, 1976.- 302 с.
- 13 Технология и экономика электрохимической обработки, /Под ред. Ф.В. Седыкина.- М.: Машиностроение, 1980.-192 с.
- 14 Фотеев Н.К. Технология электроэрозионной обработки.-М.: Машиностроение, 1980 - 184 с.

15 Стискін Г.М. Технологічні основи програмування обробки деталей на верстатах з числовим програмним керуванням : [Навчальний посібник] / Г.М.Стискін. - Львів: Оріяна-Нова. - 2002. – 172с.

16 Інтегровані технології обробки матеріалів [Текст]: підручник / Е.С. Геворкян, Л.А. Тимофєєва, В.П. Нерубацький, О.М. Мельник. И-73 – Харків: УкрДУЗТ, 2016. – 238 с., іл. 56, табл. 2, бібліогр.: 85 назв.

17 Бондаренко С. Г. Основи технології машинобудування / С. Г. Бондаренко-Львів.: Магнолія.- 2013.-567 с.

18 Технології формоутворення сучасних складнопрофільних деталей [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 131 «Прикладна механіка» спеціалізацій «Технології виготовлення літальних апаратів», «Технології машинобудування» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: Ю.В. Петраков, С.В. Сохань, В.К. Фролов, В.М. Кореньков. – Електронні текстові дані (1 файл: 22,5 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 379 с.

19 Технологічні основи машинобудування (основні способи обробки поверхонь та сучасні Т-системи для їх реалізації): навчальний посібник / О.У. Захаркін.– Суми: Сумський державний університет, 2011. – 137 с.

20 Технологічні основи машинобудування. [Електронний ресурс]: підручник для студ. спеціальностей 131 «Прикладна механіка», 133 «Галузеве машинобудування» / С.С. Добрянський, Ю.М. Малафєєв; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 13,4 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 379 с.

21 Яковенко І. Е., Пермяков О. А., Фесенко А. В. Технологічні основи машинобудування: навчальний посібник для студентів спеціальностей 131 – Прикладна механіка, 133 –Галузеве машинобудування / І. Е. Яковенко, О. А. Пермяков, А.В. Фесенко – Харків: НТУ «ХП», 2022. – 421с.

22 Основи технологій обробки поверхонь деталей машин : підручник / В.А. Кирилович, П.П. Мельничук, В.А. Яновський; за ред. В.А. Кириловича. – Житомир :Видавець О.О. Євенок, 2017. – 266с.

## ЗМІСТ

ВСТУП	2
1. ХІМІЧНА РОЗМІРНА ОБРОБКА	3
1.1 Сутність процесу, види і способи обробки	3
1.2 Основні операції	4
1.3 Особливості обробки конструкційних сплавів	7
1.4 Точність та галузі застосування ХО	8
2. ЕЛЕКТРОХІМІЧНА РОЗМІРНА ОБРОБКА	9
2.1 Сутність процесу, його особливості	9
2.2 Основні параметри ЕХО	10
2.3 Особливості обробки конструкційних сплавів	13
2.4 Устаткування ЕХО	14
2.5 Точність і застосування ЕХО	15
2.6 Диференційна електрохімічна обробка (ДЕХО)	15
3. ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ МЕТОДИ РОЗМІРНОЇ ОБРОБКИ	19
3.1 Електроерозійна обробка (ЕЕО)	19
3.2 Анодно-механічна обробка	24
3.3 Ультразвукова обробка	26
3.3.1. Ультразвукова розмірна обробка у середовищі абразивної суспензії	27
3.3.2 Накладання ультразвукових коливань на інструмент	30
3.4. Методи променевої розмірної обробки.	33
3.4.1 Лазерна обробка	33
3.4.2 Лазерні технологічні комплекси	37
3.4.3 Електронно-променева обробка(ЕПО)	44
3.4.4 Плазмова обробка	47
3.5 Гідроабразивна обробка	54
Контрольні завдання	57
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	58
ЗМІСТ	60