

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ**

**С.О. Абрамов, В.С. Гришин**

**ТЕХНОЛОГІЯ МАШИНОБУДУВАННЯ  
(СПЕЦІАЛЬНІ ТА ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ МЕТОДИ  
ОБРОБКИ ПОВЕРХНІ)**

Затверджено Вченою радою НМетАУ  
як навчальний посібник для студентів  
спеціальності 131 – прикладна механіка  
(магістерський рівень)  
протокол № 5 від 28.04.21р.

**І частина**

**Дніпро НМетАУ 2021**

УДК 621.7+621.9.

Абрамов С.О., Гришин В.С. Технологія машинобудування (спеціальні та електрофізичні методи обробки поверхні). Частина I: Навч. посібник. – Дніпро: НМетАУ, 2021. – 93с.

У навчальному посібнику викладаються основи сучасних електротехнологій, які застосовуються для обробки матеріалів, виробів і пристроїв в машинобудуванні. Приводиться опис таких видів електротехнологічної обробки, як електроерозійні, плазмові, лазерні, пучкові, електрохімічні, ультразвукові, електроімпульсні, високочастотні, магнітноімпульсні технології. Для кожного типу технологій передбачене вивчення фізичних основ, пристрою й принципу роботи, необхідного обладнання для виконання операцій обробки матеріалів і модифікування їхніх властивостей.

Посібник підготовлений на кафедрі технології машинобудування НМетАУ ім. В.Н. Морозенко і призначений для студентів спеціальності 131 – прикладна механіка (магістерський рівень)

**Укладачі: С.О. Абрамов, канд. техн. наук., асистент  
В.С. Гришин, канд. техн. наук., доцент**

**Відповідальний за випуск С.О. Абрамов, канд. техн. наук., асистент**

**Рецензенти:**

**П.П. Єрмаков д-р. техн. наук, проф., проф. кафедри матеріалознавства ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»;**  
**Н.Є. Калініна д-р. техн. наук, проф., проф. кафедри технології виробництва Дніпровського національного університету ім. Олеся Гончара**

# 1 ВСТУП. ІСТОРИЧНА ДОВІДКА. КЛАСИФІКАЦІЯ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ МЕТОДІВ ОБРОБКИ МАТЕРІАЛІВ

## Вступ

У сучасному машинобудуванні виникають технологічні проблеми, пов'язані з обробкою нових матеріалів та сплавів (наприклад, жаро- та кислототривкі, спеціальні нікелеві сталі, тугоплавкі сплави, композити, неметалічні матеріали: алмази, рубіни, германій, кремній, порошкові тугоплавкі (матеріали і т. д.), форму та стан поверхневого шару яких важко отримати з допомогою відомих механічних методів.

До таких проблем відноситься обробка вельми міцних або вельми в'язких матеріалів, крихких та неметалевих матеріалів (кераміка), тонкостінних нежорстких деталей, а також пазів та отворів, що мають розміри у декілька МКМ; отримання поверхонь деталей з малою шорсткістю, з дуже малою товщиною дефектного поверхневого шару і т. д.

За таких умов, коли можливості обробки різанням обмежені поганою оброблюваністю матеріалу виробу, складністю форми оброблюваної поверхні або коли обробка взагалі неможлива, доцільно застосовувати електрофізичні та електрохімічні методи обробки [1].

В них є наступні переваги:

- 1) механічні навантаження або відсутні, або настільки незначні, що практично не впливають на сумарну похибку точності обробки;
- 2) дозволяють змінити форму оброблюваної поверхні заготовки (деталі);
- 3) дозволяють впливати і навіть змінювати стан поверхневого шару деталі;
- 4) не утворюється наклеп обробленої поверхні;
- 5) не утворюється дефектний шар;
- 6) видаляються припікання поверхні, отримані при шліфуванні;

7) підвищуються: зносотривкість, корозійна тривкість, міцність та інші експлуатаційні характеристики поверхонь деталей.

Кінематика формоутворення поверхонь деталей електрофізичними та електрохімічними методами обробки, як правило, проста, що забезпечує точне регулювання процесів та їхню автоматизацію.

На обробку деталей такими методами (за винятком ультразвукового) не впливають твердість та в'язкість матеріалу деталі.

## **1.1 Історична довідка**

В науці та техніці про руйнування контактів під дією електричних розрядів було відомо здавна. Зокрема, іскрові та дугові розряди виникають при розриві або відключенні електричних ланцюгів. Електричній ерозії піддаються контакти реле, вимикачів, рубильників (розмикачів) та інших подібних пристроїв. Електрична ерозія – це дуже шкідливе явище, яке скорочує термін служби та знижує надійність електричних пристроїв. Багато досліджень були присвячено усуненню або принаймні зменшенню такого руйнування контактів.

Над цією проблемою в 40-х роках ХХ сторіччя працювали вчені Б.Р. Лазаренко та Н.І. Лазаренко. За винахід ЕЕО їх було винагороджено Державною премією. Пізніше Б.Р. Лазаренко було обрано академіком АН, де він і пропрацював до кінця життя (1910....1979 рр.). Значний внесок в розвиток методів ЕЕО внесли співробітники кафедри технології машинобудування ім. В.Н. Морозенко, В.С. Назарец, Б.И. Тимошенко, В.С. Гришин, які розробили технологію текстурування (нанесення мікрорельєфу ЕЕО) валків листопрокатних станів. Розроблена технологія та обладнання для її виконання були впроваджені на заводі «Запоріжсталь» в 1973 р., де продовжують роботи по теперішній час.

Розробка основ електрохімічного методу та його технологічного застосування належить талановитому вченому В.Н. Гусеву (1904...1956 рр.). У 1929 р. він отримав патент на ЕХО. Перші досліди по розмірній

електрохімічній обробці металів були проведені у 40-х роках минулого століття. У 1954 р. він отримав патент на заточування свердел з вершинами з карбідів. В наступні роки, як сам Гусев, так і інші вчені розробили різні варіанти електрохімічної термінології та створили основи теорії електрохімічного методу.

Початковий період розвитку методу характеризується тим, що поряд з (під час його) використанням у виробництві (для отримання профілю пературбінних та компресорних лопаток, кувальних штампів, прес-форм, кільцевих деталей, прошивання отворів та щілин, заточування інструмента, видалення задирок та ін.) накопичувалися експериментальні та статистичні дані; робилися спроби теоретичних узагальнень, які б дозволили заздалегідь, без випробувань, передбачити кінцеві результати обробки.

Науково-дослідні роботи по розвитку електрохімічного утворення деталей складної форми і передусім шинні прес-форми, які були виконані на кафедрі технології машинобудування В.Н. Морозенко, В.С. Гришиним, О.Є. Проволоцьким.

Успіхи, що були досягнуті в області електрохімічного утворення деталей складної форми, і передусім лопаток та компресорів, а також порожнини кувальних штампів, в достатньо повній мірі викладені в книзі В.А. Головачова «Електрохімічна розмірна обробка деталей складної форми».

На теперішній час значних успіхів було досягнуто в області моделювання електричних полів та вирішенні задач формоутворення поверхні при ЕХО, здійснено спроби аналітичного розрахунку простих форм інструментів, що забезпечують достатньо високу точність виготовлення отворів та порожнин. Створено математичні моделі, що враховують гідродинаміку потоку електроліту для певної форми поверхні, яка отримується при ЕХО, та методики визначення похибок, припусків та якості обробки.

Швидкий розвиток технологічно розвинутих галузей промисловості (авіаційної, ядерної та ін.) супроводжувався підвищенням частки використання важкооброблюваних сплавів. Характер металообробки починає змінюватися.

Традиційні способи різання більше не відповідають сучасним вимогам. Хоча швидкість різання таких матеріалів, як низьковуглецева сталь, в результаті успіхів технології верстатобудування та різальних інструментів подвоюється приблизно кожні 10 років, гранична міцність на розрив матеріалів, які можна обробляти, наприклад, зі швидкістю 30 м/хв, подвоюється десь лише кожні 50 років. Крім того, гранична міцність використовуваних матеріалів на розрив подвоюється приблизно кожні 20 років. Отже, вже спостерігається занепад технології металообробки у деяких галузях промисловості.

Було здійснено спроби подолати труднощі обробки важкооброблюваних металів шляхом гарячої обробки або шляхом застосування абразивних методів чи таких, як УЗ обробка. Проте успіх був частковим. Отже, потрібні методи, при яких швидкість обробки не залежала б від твердості деталі і її складного формоутворення.

На кафедрі технології машинобудування В.Н. Морозенко з 1967 р. почались проводитися дослідження по фінішним методам обробки поверхонь деталей вільними абразивами: струменево-абразивна обробка складно профільних поверхонь пресформ (обладнання та технології впроваджені на заводах «Дніпрополімермаш» та на шинних заводах міст – Барнаула, Кірова, Воронежа, Ярославля та ін., обробка внутрішніх поверхонь деталей гідроагрегатів (впроваджено на «Дніпропетровському агрегатному заводі», на Київському виробничому об'єднанні «Більшовик» впроваджені поточні лінії для гідро абразивної очистки проката.

У вирішенні даної проблеми викристалізувалися два основних напрямки: термічний та хімічний методи обробки.

Термічні методи обробки основані на тому, щоб розплавити та випарувати матеріал шляхом концентрування енергії на маленькій ділянці деталі. Енергія може подаватися у формі:

- теплоти – газополум'яна або плазмова обробка;
- світла – лазери;
- електронне бомбардування – електронний промінь та електрична ерозія.

Серед термічних методів існує лише один, який вже дозволяє з економічною вигодою видаляти доволі велику кількість металу з деталі зі значним рівнем точності – це процес електричної ерозії, який розробляється з 1940 р.

Проте швидкість, з якою можна видаляти метал електроіскровим методом за умови високого класу чистоти поверхні, обмежена. Більше того, висока продуктивність процесу призводить до пошкодження поверхні, що спостерігається часто і через що цей спосіб стає непридатним у багатьох випадках. З цього випливає, що жоден з термічних методів не вирішує повністю проблеми обробки високоміцних металів в широкому масштабі.

Хімічні методи, окрім способів травлення, включають електрохімічну обробку. Цей метод можна використовувати для обробки особливо твердих та в'язких електропровідних матеріалів (незалежно від твердості або міцності деталі, оскільки швидкість знімання металу не змінюється). При цьому досягається:

- висока швидкість знімання металу (більше 1000 мм/хв);
- високий клас точності (квалітет);
- відсутнє спрацювання інструмента;
- відсутні залишкові напруги;
- відсутні пошкодження матеріалу деталі;
- відсутні задирки на крайках різання.

До числа сучасних технологічних процесів, що отримали за останні 30-40 років практичне застосування, належить ультразвукова розмірна обробка важкооброблюваних матеріалів (кварц, кераміка, порцеляна, ферити, кремній, германій, кольорове виробне та напівкоштовне каміння). Сутність ультразвукової розмірної (абразивної) обробки твердих ламких матеріалів полягає у спрямованому руйнуванні оброблюваного матеріалу під дією ударів абразивних зерен, що знаходяться між поверхнями матеріалу та інструмента, що коливається з ультразвуковою частотою в поздовжньому (осьовому) напрямку. Частота – 18-25 тис. ударів в секунду. Кількість зерен, що беруть

участь в різанні – 30-100 тис. на один квадратний сантиметр площі. Це - різновид механічної обробки матеріалів. Ультразвукові процеси основані на використанні механічних коливань, що поширюються в газах, рідинах та твердих тілах.

Бурхливий розвиток квантової електроніки, який значною мірою обумовлений видатними досягненнями наукових шкіл академіків М.Г. Басова та О.М. Прохорова, що були нагороджені разом з американським вченим Ч. Таунсом Нобелівською премією, призвів до створення принципово нових джерел енергії – лазерів. Лазерне випромінювання характеризується колосальною концентрацією енергії, яка сфокусована на вкрай малій площі, яка теоретично співмірна з квадратом довжини хвилі випромінювання.

Лазер – це генератор електромагнітних хвиль в діапазоні ультрафіолетового, видимого та інфрачервоного випромінювань. Починаючи з кінця 60-х років минулого століття лазери (невеликої потужності) отримали перше застосування в технології обробки матеріалів (спочатку в приладобудуванні). Великі потенційні можливості закладені в застосуванні процесів, що здійснюються за допомогою імпульсного навантаження – високовольтний електричний розряд в рідині – електрогідравлічна обробка. Вперше на руйнівну силу електричного розряду було вказано у 18 столітті (1767-1769 рр.).

Експериментальний пристрій того часу включав всі основні елементи сучасного устаткування для здійснення імпульсного розряду:

- конденсатор (лейденська банка);
- комутуючий елемент (повітряний кульовий розрядник);
- електроди, занурені в рідину.

Дослідна перевірка промислового обладнання електрогідравлічної обробки розпочалася з середини 50-х років та встановила ряд переваг перед методами, в яких в якості джерела енергії використовуються вибухові речовини в режимі вибухового хімічного перетворення:



- можливість керування процесом нагромадження та виділення енергії;
- відсутність джерел підвищеної небезпеки після вимкнення устаткування;
- простота та низька собівартість оснащення.

Застосування:

1) формоутворення та калібрування деталей та просторових заготовок деталей діаметром 200-1100 мм при висоті до 1100 мм та товщині до 5 мм та ін.; 2) очищення від ожарини неметалічних покриттів виливок з кольорових та чорних металів вагою від 1 кг до 10-15 т.

## **1.2 Класифікація фізико-хімічних способів обробки матеріалів**

У сучасному машинобудуванні при виготовленні відповідних деталей застосовуються фізико-хімічні способи розмірної та зміцнювально-чистої обробки. Ці способи доповнюють, а іноді – замінюють традиційні процеси різання. Вимоги до якості, надійності та довготривалості виробів постійно зростають, що робить актуальним створення та застосування нових методів обробки та зміцнювальної технології для підвищення зносотривкості, корозійної тривкості, жаротривкості та інших експлуатаційних характеристик.

Фізико-хімічні способи мають наступні достоїнства та переваги перед процесами різання:

1) копіювання інструмента складної форми одразу по всій поверхні заготовки при його поступальному русі;

2) обробка матеріалів проводиться при практичній незалежності режимів обробки від твердості та в'язкості матеріалу;

3) виконання унікальних операцій (обробка отворів з криволінійною або спіральною віссю, виготовлення дуже маленьких отворів, вузьких та глибоких канавок);

4) малі значення сил, що діють у процесі обробки, а при деяких методах відсутність механічного контакту інструмента та заготовки;

5) використовується інструмент, який є менш твердим та менш міцним, ніж оброблюваний матеріал;

б) висока продуктивність обробки при порівняно високій точності отримання розмірів;

7) можливість механізації та автоматизації процесу фізико-хімічної обробки, а також багатостатного обслуговування.

Проте фізико-хімічні способи обробки більш енергоємні, аніж процеси різання. Основні фізико-хімічні способи розмірної та зміцнюючо-чистої обробки заготовок наступні: 1) електророзрядні – електроерозійний, електроконтактний та абразивно-ерозійний; 2) електрохімічні – електрохімікогідралічний та електрохімікомеханічний; 3) ультразвукові – розмірна ультразвукова обробка та накладення ультразвукових коливань на різальний інструмент; 4) променеві – лазерний, електронно-променевий та плазмовий.

Таблиця 1.1. – Основні особливості робочих процесів фізико-хімічних методів та процесу різання

Спосіб обробки	Робочий процес	Використовувана енергія	Потужність питома, $N_{уд}$ , Вт/см <sup>2</sup>	Робоче середовище	Рід оброблюваних матеріалів
1	2	3	4	5	6
Електроерозійний	Ерозія в імпульсних розрядах	Теплова	$10^4 \dots 10^8$	Рідина діелектрична	Електропровідні
Електроконтактний	Механічне видалення нагрітого металу	Та сама	$10^4$	Повітря, газ	Той самий
Електрохімічний	Анодне розчинення	Хімічна	$10^3 \dots 10^4$	Електроліт	„„„„
Анодно-механічний	Анодно-механічне видалення	Хімічна + механічна	Та сама	Той самий	„„„„

Продовження табл. 1.1.

1	2	3	4	5	6
Ультразвуковий	Крихке руйнування при ударному вдавлюванні абразивних зерен	Механічна	————— —————	Абразивна	Метали та неметали (тверді та крихкі)
Електронно-променевий	Ерозія під дією потоку електронів	Теплова	$10^6 \dots 10^8$	Вакуум $10^{-4} \dots 10^{-6}$	Електропровідні
Іонно-променевий	Катодне розпилення	Та сама	$10^6 \dots 10^7$	Вакуум $10^{-2} \dots 10^{-4}$	Краще електропровідні
Світлопроменевий	Світлова ерозія	————— —————	$10^6 \dots 10^8$	Газ, рідина	Будь-які
Процеси різання	Великі пружно-пластичні деформації	Механічна	$10^2 \dots 10^3$	Газ, СОЖ	————— —————

5. Магнітноімпульсні – індукційна та електродинамічна.

6. Магнітноабразивний.

7. Комбіновані – анодно-механічний, електроерозійно-хімічний, ультразвуко-електрохімічний та електролазерний.

В цих методах видалення припуску відбувається шляхом електричної або хімічної ерозії. Вони особливо ефективні при виготовленні таких виробів, як штампи, прес-форми, турбінні лопатки, камери згоряння, фасонний твердосплавний інструмент, електронна апаратура та ін.

Чим складнішою є конфігурація оброблюваних деталей, тим вищий техніко-економічний ефект від їхнього застосування: час виготовлення звичайних фасонних поверхонь знижується в 2-3 рази, а складних – в 5-10 разів.

Основні особливості робочих процесів фізико-хімічних методів та процесу різання наведені в таблиці 1.1.

### 1.3 Контрольні запитання

1. Які технологічні проблеми виникають в сучасному машинобудуванні?
2. Які є переваги в електрофізичних та електрохімічних методах обробки?
3. Хто є основоположником електроерозійного способу обробки?
4. Хто розробив основи електрохімічного методу обробки?
5. Які є основні напрямки в обробці важкооброблюваних матеріалів?
6. Як класифікуються фізико-хімічні способи обробки матеріалів?
7. Які є переваги фізико-хімічних методів обробки перед процесами різання?

## 2 ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНА ОБРОБКА МЕТАЛІВ

Розробниками даного методу є вчені М.І. Лазаренко та Б.Р. Лазаренко. Помістивши електроди в рідкий діелектрик та розмикаючи електричний ланцюг, вчені помітили, що рідина ставала каламутною вже після перших розрядів між контактами. Вони встановили: це відбувається тому, що в рідині внаслідок електричної ерозії з'являються найдрібніші металеві кульки [1, 2, 3].

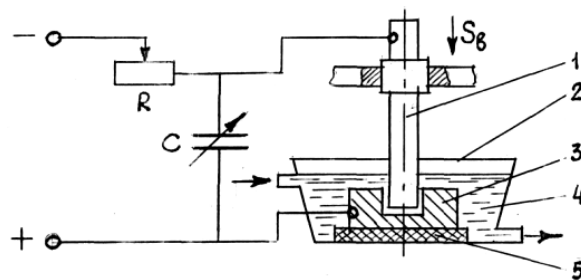


Рисунок 2.1 – Схема електроіскрового верстату: 1 – електрод-інструмент; 2 – ванна; 3 – заготовка; 4 – діелектрична рідина; 5 – пластина ізолююча

Вчені вирішили посилити ефект руйнування та пробували застосувати електричні розряди для рівномірного видалення металу (1943 р.). З цією метою вони помістили електроди (інструмент 1 та заготовку 3) в рідкий діелектрик 4,

який охолоджує розплавлені частинки металу та не дозволяє їм осідати на протилежному електроді (рис. 2.1).

У якості генератора імпульсів використовувалася батарея конденсаторів ( $C$ ), що заряджаються від джерела постійного струму; час зарядки конденсаторів регулювали реостатом ( $R$ ). Так з'явилося перше в світі електроерозійне устаткування. Електрод-інструмент 1 переміщували до заготовки 3. По мірі того, як вони зближувалися, зростала напруженість поля у просторі між заготовкою та інструментом. Цей простір називають міжелектродним проміжком (МЕР) або просто проміжком.

При досягненні певної напруженості поля на ділянці з мінімальною відстанню між поверхнями електродів (мінімальним електродним проміжком) виникав електричний розряд (протікав імпульс) струму, під дією якого відбувалося руйнування ділянки заготовки. Продукти обробки потрапляли до діелектричної рідини 4, де вони охолоджувалися, не дістаючись до електрода-інструмента 1, а потім осідали на дні ванни. Через деякий час електрод-інструмент 1 прошив заготовку 3, причому контур отвору точно відповідав профілеві інструмента. Таким чином було винайдено електроерозійну розмірну обробку матеріалів (ЕЕО). Спочатку для здійснення ЕЕО застосовувалися виключно іскрові розряди, що створюються конденсатором у так званому  $RC$ -генераторі. З цієї причини новий процес на той час називали електроіскровою обробкою.

На початку 50-х років ХХ століття були розроблені спеціальні генератори імпульсів, завдяки яким обробку можна було проводити не тільки на коротких іскрових розрядах, але й на триваліших іскродугових та дугових розрядах. Щоб розрізнити нові умови здійснення процесу, його стали називати електроімпульсною обробкою.

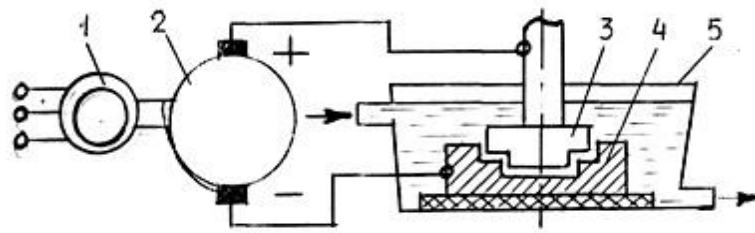


Рисунок 2.2 – Схема електроімпульсного устаткування: 1 – електродвигун; 2 – імпульсний генератор; 3 – електрод-інструмент; 4 – заготовка; 5 – ванна для діелектричної рідини

Цей метод ґрунтується на тому, що полярний ефект при імпульсах малої та середньої тривалості призводить до підвищеної ерозії аноду, що використовується при електроіскровій обробці. При імпульсах великої тривалості (дуговий розряд) значно швидше руйнується катод. Тому при електроімпульсній обробці застосовують зворотню полярність увімкнення електродів та обробляють при дії уніполярних імпульсів, що створюються електричними машинами або електронним генератором. Тривалість імпульсів – 500-10000 мкс. Електрод-інструмент зношується значно менше, ніж при електроіскровій обробці. Продуктивність при цьому вища, оскільки потужність імпульсів більша. Метод найдоцільніше застосовувати при попередній обробці штампів, турбінних лопаток, фасонних отворів в деталях з твердих, нержавіючих та жаротривких сплавів. При електроімпульсній обробці знімання металу в одиницю часу в 8-10 раз більше, ніж при електроіскровій.

Для підвищення точності та зменшення шорсткості оброблюваних поверхонь заготовок при ЕЕО було запропоновано метод високочастотної електроіскрової обробки, суть якого полягає у використанні електричних імпульсів малої енергії при частоті 100-150 кГц.

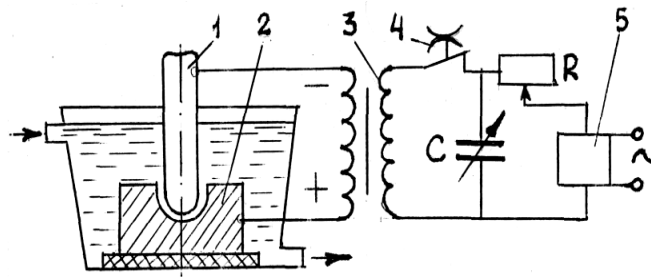


Рисунок 2.3 – Схема високочастотної електроіскрової обробки: 1 – електрод-інструмент; 2 – заготовка; 3 – трансформатор; 4 – переривник; 5 – випростувач

В даній схемі немає дугового розряду, оскільки електрод-інструмент 1 і заготовка 2 включені до вторинного ланцюга трансформатора. Продуктивність методу вища в 30-50 разів порівняно до електроіскрового методу при значному збільшенні точності і зменшенні шорсткості. Зношування інструмента незначне. Метод виключає структурні зміни та мікротріщини у поверхневому шарі матеріалу оброблюваної заготовки.

На теперішній час застосовують декілька технологічних схем електроерозійної обробки.

1. **Прошивання** – видалення металу з порожнин, заглиблень, отворів, пазів, з зовнішніх поверхонь (рис. 2.1). Завдяки прошиванню можна отримати поверхні як з прямою, так і з криволінійною віссю. Існує два варіанти прошивання:

- пряме копіювання, коли електрод-інструмент знаходиться над заготовкою (рис. 2.1);

- зворотне копіювання, коли електрод-інструмент знаходиться під заготовкою. Рух подачі тут може здійснювати заготовка.

Цей варіант полегшує видалення продуктів обробки і за рахунок скорочення кількості бічних розрядів через частинки розплавленого металу у міжелектродному проміжку підвищує точність обробки деталей.

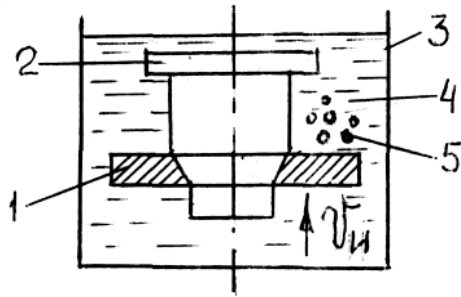


Рисунок 2.4 – Схема зворотного копіювання: 1 – електрод-інструмент; 2 – заготовка; 3 – ванна; 4 – діелектрик; 5 – продукти обробки

## 2. Електроерозійне шліфування.

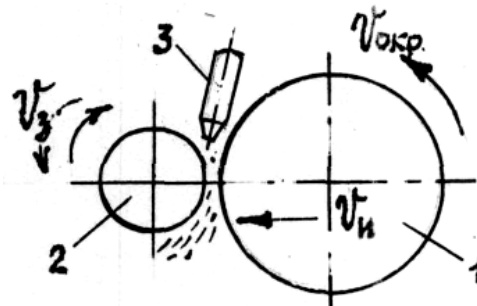


Рисунок 2.5 – Схема електроерозійного шліфування: 1 – електрод-інструмент; 2 – заготовка; 3 – насад

Металевий електрод-інструмент 1 у формі диска здійснює обертальний та поступальний рух до заготовки 2 зі швидкістю  $v_{\text{н}}$ . Заготовка може обертатися назустріч або водночас. Рідина подається поливанням з насаду 3. Інструмент – чавунний або мідний диск. Обробку проводять на постійному або змінному струмі. Використовувана напруга – 10-40 В. Метод не забезпечує високу точність і низьку шорсткість, проте він є високопродуктивним внаслідок використання великих електричних потужностей.

Даний метод також використовується для обробки плоских поверхонь (рис. 2.6).



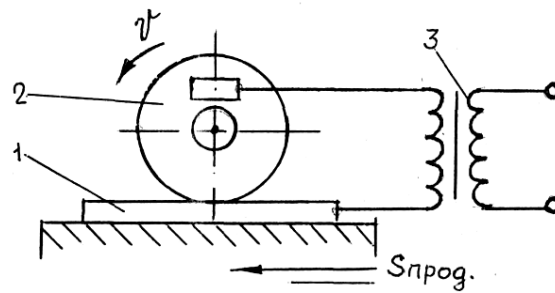


Рисунок 2.6 – Схема електроконтактної обробки пласкої поверхні:

1 – заготовка; 2 – інструмент; 3 – трансформатор

### 3. Розрізання профільним або непрофільованим інструментом.

Воно включає розділення заготовки на частини – відрізання (інструмент – диск або пластина), отримання непрямолінійного контуру – вирізання, яке виконується лише непрофільованим електродом-інструментом – дріт діаметром 0,02 ... 0,3 мм або стрижень, які можуть переміщуватися в різних напрямках зі швидкістю  $v_u$  у будь-якій частині заготівки. Матеріал дроту – латунь, мідь, вольфрам, молібден. На рисунку 2.7 подано схему верстату для виконання вирізальних робіт.

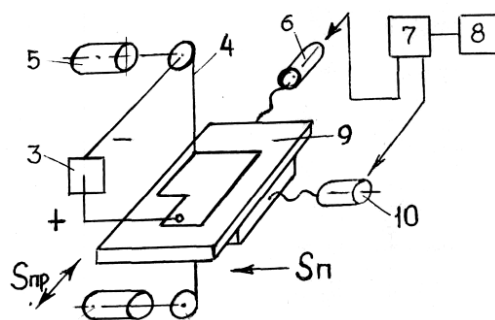


Рисунок 2.7 – Схема копіювально-вирізального верстату з ЧПК: 1 – котушка з дротом; 2 – електропвід натягування дроту; 3 – генератор імпульсів; 4 – інструмент-дріт; 5 – електропвід подавання дроту; 6 – електропвід гвинта поздовжнього подавання столу; 7 – пристрій системи ЧПК; 8 – зчитуючий пристрій та програмоносій; 9 – стіл; 10 – електропвід гвинта поперечного подавання столу

Для усунення впливу зносу електрода-інструмента на точність прорізуваних пазів дріт або стрижень переміщують (зазвичай перемотуванням) вздовж вісі з певною швидкістю. Розрізання (вирізання) виконують у ванні з діелектричною рідиною.

4. **Електроіскрове зміцнення**, яке включає легування та нарощування поверхні, зазвичай здійснюють у повітрі. Частинки розплавленого металу інструмента на повітрі не встигають охолонути і осідають на поверхні заготовки, утворюючи на ній шар сплаву, насиченого легуючими елементами електрода-інструмента. Крім того, нанесений на заготовку шар загартований до високої твердості та має за рахунок цього підвищену зносотривкість.

## 2.1 Загальний опис процесу

Видалення металу з заготовки відбувається в середовищі діелектрика за рахунок мікророзрядів, що розплавляють частину металу. Розглянемо основні стадії протікання електроерозійного процесу зняття припуску.

По мірі зближення електрода-інструмента з заготовкою напруженість електричного поля ( $E$ ) зростає обернено пропорційно відстані між електродами:

$$E = U / S, \quad \text{В/м} \quad (2.1)$$

де  $U$  – різниця потенціалів електрода-інструмента та заготовки, В;

$S$  – проміжок між електродами, м.

Найбільша напруженість виникає на ділянці, де міжелектродний проміжок мінімальний. Проміжок залежить від висоти  $h_e$  місцевого або макровиступу на заготовці.

Якщо електроди зблизити до відстані кількох десятків мкм, то напруженість поля в районі виступу буде найбільшою, станеться пробиття міжелектродного проміжку в цій точці, виникає електричний розряд, через проміжок протікає струм, тобто має місце спрямований рух електронів. В електричному полі, що виникає в міжелектродному проміжку, в напрямку, що є зворотним рухові електронів, відбувається переміщення більш важких частинок

- іонів. Електрони, що мають меншу масу, швидко дістаються до позитивно зарядженої поверхні заготовки і нагрівають метал, спричиняючи розплавлення та його випаровування в місці проходження струму. В результаті утворюється заглиблення у формі сферичної лунки радіусом  $R$  (рис. 2.8.).

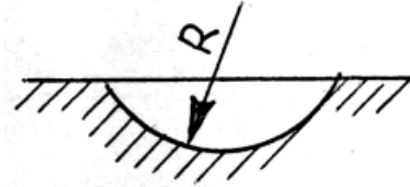


Рисунок 2.8 – Форма лунки

Частинки металу, що вилетіли з лунки, охолоджуються рідиною, яка знаходиться в проміжку, та застигає у вигляді кульок. У якості рідини використовують різні діелектрики: керосин плюс мінеральне масло у співвідношенні 1:1; 1:2, дистильовану воду. Поверхня набуває форми з явно вираженими заглибленнями у вигляді лунок. Такі лунки формують мікрорельєф, що характеризує шорсткість поверхні. Поверхневий шар дна лунок піддається дії термічного циклу нагрівання та швидкого охолодження рідиною. Властивості цього шару відмінні від властивостей металу в глибині заготовки.

У електроіскровому режимі більшість іонів, що мають значну масу, не встигають дістатися до негативно зарядженого електрода та спричинити видалення матеріалу з його поверхні. Знімання металу відбувається переважно з аноду, який обирають в якості заготовки. Кількість та активність іонів, що дістаються до поверхні інструмента, визначають інтенсивність його зносу. Вочевидь, чим меншим буде знос інструмента, тим точнішою може буде отримана деталь. Для цього необхідно сформувати імпульс з меншою тривалістю, щоб іони не встигали дістатися до катоду.

Полярність, при якій заготовка є анодом, називається прямою. Якщо збільшити тривалість імпульсів струму, то тоді зростає інтенсивність знімання металу з катоду (інструмента) потоком іонів. Можна підібрати такий час

протікання струму, при якому частка знімання металу електронами складе лише незначну частину від загального об'єму матеріалу, видаленого з електродів. Тому тут необхідно обрати заготовку катодом.

Полярність, при якій заготовка анодом є інструмент, називається зворотною. Зворотна полярність є при електроімпульсному режимі.

Полярність залежить не лише від тривалості імпульсу, але й від матеріалів, що використовуються у якості електродів. Для зниження зносу інструмента (від дії потоку електронів) його виготовляють з матеріалів, що слабо руйнуються під дією іскрових розрядів: графітових, мідно-графітових композицій.

Кількісною оцінкою зносу є відносний проміжок. Це і є відношення маси (об'єму) знімання металу з інструмента до маси (об'єму) знятого металу з заготовки.

## 2.2 Стадії протікання

Першою стадією ерозійного процесу є пробиття міжелектродного проміжку в результаті утворення зони з високою напруженістю поля. Для діелектричних рідин напруженість ( $E$ ) поля в момент розряду досягає десятків мегавольт на метр. Під дією розряду відбувається іонізація проміжку, через який між електродами починає протікати електричний струм, тобто утворюється канал провідності – вузька циліндрична область, заповнена нагрітою речовиною (плазмою), яка містить іони та електрони. Через канал провідності протікає струм, і при цьому швидкість наростання його сили може досягати сотень кілоампер в секунду. На межах каналу відбувається плавлення металу та утворюється лунка сферичної форми.

Другою стадією є утворення газової бульбашки з парів рідини та металу біля каналу провідності. Внаслідок високого тиску (до  $2 \cdot 10^7$  Па) канал провідності прагне розширитися, стискаючи газову фазу, що оточує його. Межа каналу провідності рухається з високою швидкістю в радіальному напрямку.

Швидкість розширення може бути 150-200 м/с. На зовнішній межі утворюється так званий фронт ущільнення, в якому тиск стрибкоподібно змінюється від вихідного в рідині до високого його значення на межі)  $P_{\phi}$ .

Третьою стадією буде припинення струму, відривання ударної хвилі від газової бульбашки та тривання його розширення за інерцією. Ударна хвиля гаситься оточуючою рідиною.

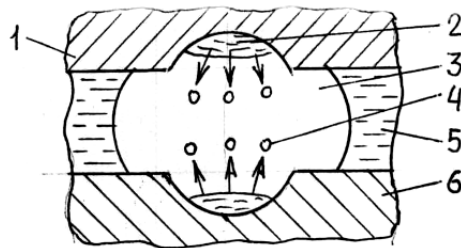


Рисунок 2.9 – Схема електричного розряду між електродами: 1 – катод; 2 – мікропорція металу, виплавлена на поверхні катоду; 3 – газова бульбашка; 4 – розплавлені частинки металу; 5 – робоча рідина – діелектрик; 6 – анод

На початку стадії у проміжку (0,01-0,05 мм) знаходяться: рідкий метал 2 в заглибленнях електродів 1 та 6, газова бульбашка 3, всередині якої є пари 4 металів та інструмента, рідкий діелектрик 5. Коли газова бульбашка досягає найбільшого розміру, тиск всередині неї різко падає. Розплавлений метал, що міститься в лунках, скипає та викидається в міжелектродний проміжок.

Не будь-який імпульс, що виробляється генератором, спричиняє ерозію, оскільки проміжок великий, напруження мале, винесення твердих частинок з проміжку ускладнений і процес може припинитися. (Тому у великогабаритних заготовках застосовується примусове прокачування діелектрика).

### **2.3 Система очищення та подавання робочої рідини в електроерозійному верстаті**

Для підвищення продуктивності, точності обробки та покращення

поверхні деталей доцільно здійснювати помпування робочої рідини через міжелектродний проміжок. Для цього призначена гідравлічна система верстату (рис. 2.10).

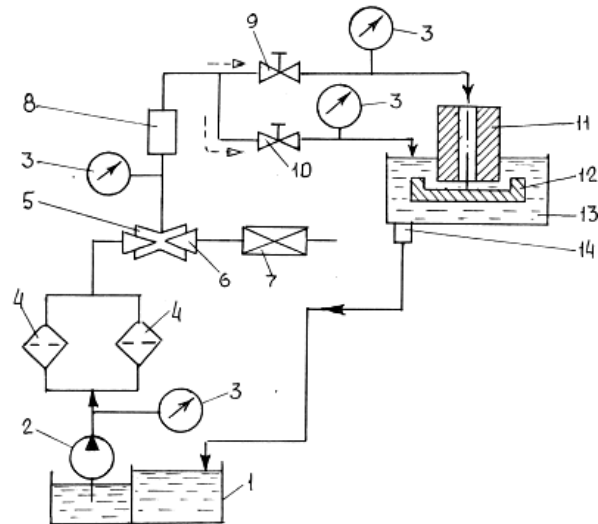


Рисунок 2.10 – Схема гідравлічної системи верстату: 1 – бак; 2 – помпа; 3 – манометри; 4 – фільтр; 5 – пристрій для регулювання витрачання робочої рідини; 6 – заслонка; 7 – перетворювач; 8 – ротаметр; 9, 10 – крани; 11 – порожнистий електрод-інструмент; 12 – заготовка; 13 – робоча ванна; 14 – зливний отвір

Робоче середовище з баку 1 подається помпою через фільтри 4 та пристрій 5 регулювання витрачання в робочу зону. При цьому можливі два варіанти подавання робочого середовища: або при відкритому крані 9 через порожнистий електрод-інструмент 11 в проміжок з заготовкою 12, або через кран 10 безпосередньо в робочу ванну 13. Бак 1 складається з декількох секцій для устоювання робочого середовища. Секції розділені переділами, через які рідина потрапляє методом переливання з однієї секції до іншої. Робоча ванна 13 є частиною силової схеми верстату, оскільки точність обробки деталей залежить від її жорсткості. У дрібних верстатах ванна закріплюється безпосередньо на столі, а робоча рідина періодично зливається в бак. У великих

верстатах ванна може підніматися та опускатися. Вона завжди заповнена рідиною.

Існують схеми з введенням додаткової ємності (за принципом сполучених посудин), яка опускається та спорожняє робочу ванну. Помпа 2 найчастіше відцентрового типу. Напір – 5-10 м, продуктивність – 2-180 л/хв. Якщо необхідний високий тиск, то тоді використовуються трибові помпи ( $P = 0,5 \dots 250$  МПа).

Фільтри 4 грубого та тонкого очищення стоять послідовно для затримання шламу:

- паперові по декілька штук в пакеті;
- наливні – з допоміжними фільтруючими речовинами – дрібнопористі частинки з великою активною поверхнею;
- сітчасті;
- магнітні, центрифуги, сепаратори, гідроциклони.

Пристрій призначений для врегулювання витрачання 5 робочого середовища. Він виготовлений у вигляді ежектора. При відведеній заслінці 6 рідина відсмоктується з міжелектродного проміжку, а при закритій заслінці 6 вона пропомпуюється через проміжок. Таким чином, регулюючи положення заслонки 6 перетворювачем 7, можна змінювати витрачання робочого середовища через міжелектродний проміжок.

На теперішній час випускаються агрегати обладнання та очищення робочого середовища, скомпоновані в одному корпусі. Вони можуть працювати в автоматичному режимі за заданою програмою або від адаптивної системи.

## **2.4 Контрольні запитання**

1. Що таке електроерозійна обробка?
2. Хто був основоположником методу?
3. Які технологічні схеми ЕЕО застосовуються в промисловості?

4. У чому полягає принципова різниця електроімпульсного устаткування від електроіскрового верстату?
5. Які фізичні явища відбуваються на електродах при ЕЕО?
6. Які стадії протікання процесу при ЕЕО?
7. Від чого залежить продуктивність процесу ЕЕО та якості поверхні?
8. Який струм використовується при ЕЕО і яка є його величина?
9. Які діапазони напруги використовуються при ЕЕО?
10. Який вплив на продуктивність процесу ЕЕО має ділянка оброблюваної поверхні і глибина введення електрода-інструмента в заготовку?
11. Які середовища використовуються при ЕЕО?

### **3 РОЗМІРНА ЕЛЕКТРОХІМІЧНА ОБРОБКА**

Честь відкриття нових способів обробки належить російським та радянським вченим. Відомий хімік Є.І. Шпитальний у 1911 р. розробив процес електролітичного полірування. У 1928 р. В.Н. Гусев застосував цей процес для розмірної обробки стовпів великих металорізальних верстатів. Електроліт не прокачувався. Катод-плиту на деякий час прибирали і видаляли ручним способом шар продуктів розчинення. Процес був трудомістким та повільним. В.Н. Гусев та Л.А. Рожков запропонували зменшити проміжок між електродами до десятих часток мм, а електроліт примусово прокачувати через міжелектродний проміжок. Так народився новий вид обробки – розмірної електрохімічної обробки (ЕХО), процес у якій відбувається за рахунок анодного розчинення металу.

Отримані в роки війни результати по вивченню основних фізико-хімічних закономірностей процесів залишаються актуальними і сьогодні. У 1948 р. було створено електрохімічне устаткування для виготовлення отворів у броньовій сталі. Тоді ж були проведені перші дослідження з обробки турбінних лопаток. Значних успіхів в розвитку теорії та у вдосконаленні технології було досягнуто завдяки працям Ю.Н. Петрова, І.І. Мороза, Л.Б. Дмитрієва та ін. [1, 2, 4].



Існує декілька основних схем електрохімічної обробки:

### 1. Обробка з нерухомими електродами.

За цією схемою отримують місцеві полегшення в деталях, отвори в листових матеріалах, наносять інформацію (порядкові номери, шифри виробів та ін.), видаляють задирки.

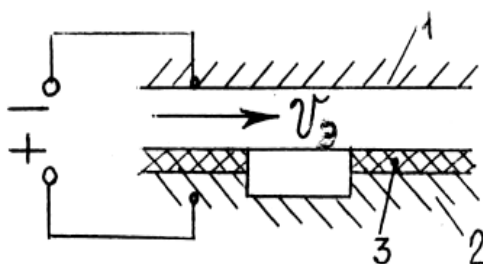


Рисунок 3.1 – Схема обробки з нерухомими електродами: 1 – електрод-інструмент; 2 – заготовка; 3 – діелектрик

Необхідна форма заглиблення або отвору отримується за рахунок нанесення на заготовку 2 шару діелектрика 3. Електрод-інструмент 1 не переміщується до оброблюваної поверхні – міжелектродний проміжок по мірі знімання металу з заготовкою 2 зростає, а швидкість  $V_э$  прокачування електроліту знижується. Процес буде неусталеним з нестационарним за часом режимів обробки.

### 2. Прошивання заглиблень, порожнин та отворів.



Рисунок 3.2. – Схема прошивання: 1 – електрод-інструмент; 2 – заготовка

При такій схемі електрод-інструмент 1 має один робочий рух – поступальний рух зі швидкістю  $V_u$  до деталі 2. Міжелектродний проміжок ( $S$ ) – постійний, тобто режим є стаціонарним. Електроліт прокачується зі швидкістю  $V_3$ .

За цією схемою виготовляють робочі порожнини кувальних штампів, прес-форм, прошивають отвори, пази, пір'я лопаток турбін, вирізають заготовки різного профілю.

До такої схеми відносять і отримання отворів струменевим методом.

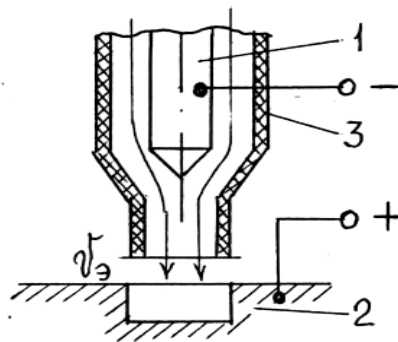


Рисунок 3.3 – Схема прошивання струменевим методом: 1 – електрод-інструмент (струмопровід); 2 – заготовка; 3 – діелектричний корпус

Електрод-інструмент складається зі струмопроводу 1, що омивається потоком електроліту. Струмопровід знаходиться всередині корпусу 3 з діелектрика. Електроліт створює струмопровідний канал між струмопроводом 1 та заготовкою 2.

В місці контакту рідини з оброблюваною поверхнею матеріал заготовки розчиняється і утворюється заглиблення. Процес іде достатньо швидко лише при високих напругах (до декількох сотень вольт). Так отримують отвори діаметром 1,5 - 2,0 мм та вирізають контури деталей складної форми.

### 3. Точіння зовнішніх та внутрішніх поверхонь.

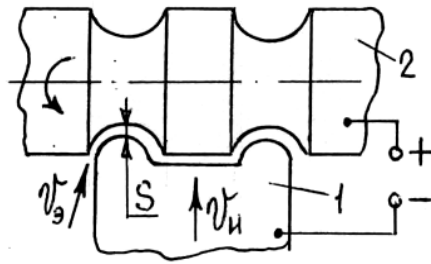


Рисунок 3.4 – Схема точіння зовнішніх поверхнь: 1 – електрод-інструмент; 2 – заготовка

За такою схемою електрод-інструмент 1 виконує роль різця без контакту. В проміжок  $S$  прокачується електроліт зі швидкістю  $V_э$ . При точінні внутрішньої поверхні електрод-інструмент 1 переміщується вздовж заготовки 2 зі швидкістю  $V_u$ .

Міжелектродний проміжок  $S$  може підтримуватися діелектричними прокладками 3.

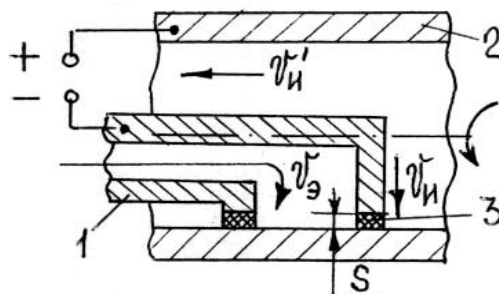


Рисунок 3.5 – Схема точіння внутрішніх поверхнь: 1 – електрод-інструмент; 2 – заготовка; 3 – прокладки діелектричні

#### 4. Протягування зовнішніх та внутрішніх поверхнь в заготовках.

Заготовки повинні мати попередньо оброблені поверхні, по яких можна базувати електрод-інструмент. Його встановлюють відносно заготовки з допомогою діелектричних прокладок. Електрод-інструмент поздовжньо переміщується, а іноді може і обертатися.

За такою схемою виконують чистову обробку циліндричних отворів, нарізування нарізі, шліців, гвинтових канавок.

### 5. Розрізання заготовок.

При розрізанні заготовок використовується профільований інструмент (обертювий диск) або непрофільований – дріт.

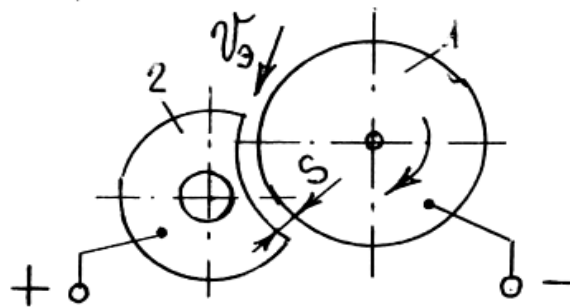


Рисунок 3.6 – Схема розрізання профільованим інструментом: 1 – електрод-інструмент (диск); 2 – заготовка

За цією схемою проміжок між інструментом-електродом та заготовкою має бути постійним.

Для виконання в заготовках різних фігурних пазів, щілин, особливо в нежорстких матеріалах, застосовується непрофільований інструмент-електрод у вигляді дроту з латуні, міді або вольфраму.

Для усунення впливу зносу дроту на точність обробки дріт безперервно перемотується з котушки на котушку, що дозволяє все новим її елементам брати участь в роботі.

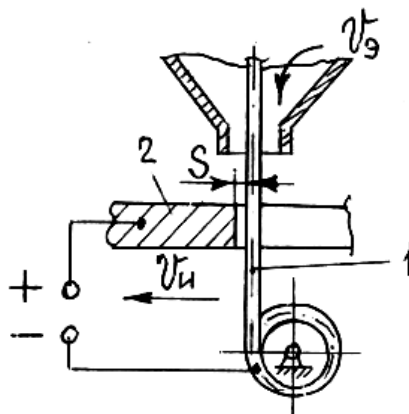


Рисунок 3.7 – Схема розрізання непрофільованим інструментом: 1 – інструмент-електрод (дріт); 2 – заготовка

### 6. Шліфування.

При цьому використовується обертовий металевий інструмент циліндричної форми, який поступально рухається вздовж заготовки 2 зі швидкістю  $V_u$ .

Це – остаточна операція при виготовленні пакетів пластин з магнітно-м'яких матеріалів, коли при обробці неприпустимі механічні зусилля, а також при виготовленні деталей з в'язких та міцних сплавів.

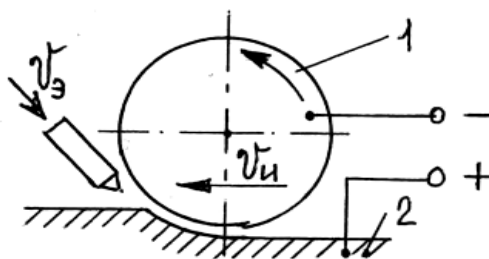


Рисунок 3.8 – Схема шліфування: 1 – електрод-інструмент; 2 – заготовка

### 3.1 Теоретичні основи електрохімічного процесу формоутворення (ЕХО)

#### 3.1.1 Закони електролізу М. Фарадея

Майкл Фарадей (1791-1867 рр.) – англійський фізик, основоположник вчення про електромагнітне поле. У 1831 р. він виявив закони електромагнітної індукції, а у 1833-1834 рр. встановив закони електролізу.

Під час ЕХО при підключенні оброблюваної деталі до позитивного полюса джерела живлення утворюються позитивно заряджені іони металу, які відводяться від поверхні аноду під дією електричного поля.

Електрична комірка складається в основному з двох неконтактуючих електродів, занурених в електроліт, між якими є різниця потенціалів.

Якщо умови електролізу обрані правильно, проходження струму через комірку призводить до розчинення матеріалу аноду зі швидкістю, яка визначається згідно першого закону Фарадея:

- кількість речовини, осадженої або розчиненої при електролізі пропорційно кількості пропущеної електрики

$$m = \varepsilon \cdot Q, \text{ г} \quad (3.1)$$

де  $m$  – маса матеріалу, розчиненого з аноду, г;

$\varepsilon$  – коефіцієнт пропорційності (електрохімічний еквівалент);

$Q$  – кількість електрики, пропущеної через електроліт через Кл (А·с).

При використанні постійного струму кількість електрики знаходиться в залежності електрики:

$$Q = I \cdot \tau$$

де  $I$  – сила струму, А;

$\tau$  – час його проходження, с.

Тоді залежність (3.1) можна записати у вигляді

$$m = \varepsilon \cdot I \cdot \tau, \text{ г} \quad (3.2)$$

Електрохімічний еквівалент ( $\varepsilon$ ) знаходиться наступним чином:

$$\varepsilon = \frac{A \cdot n}{F}, \quad \text{г/А} \cdot \text{с}$$

де  $A$  – атомна маса елемента;

$n$  – валентність металу;

$F$  – число Фарадея, що дорівнює 96500 (це кількість електрики, необхідна для розчинення 1 граму еквіваленту металу), Кл/г – еkv. або 26,8 А·ч/г-екv.

Числові значення  $\varepsilon$  для різних елементів наводяться в довідкових матеріалах.

Електрохімічний еквівалент  $\varepsilon_c$  будь-якого сплаву можна знайти через еквіваленти елементів  $\varepsilon_i$ , що входять до нього, і через масовий вміст в % елемента  $k_i$  у сплаві.

$$\varepsilon_c = 100 / \sum \frac{k_i}{\varepsilon_i} \quad (3.3)$$

Кількості різних елементів, осаджених або розчинених однаковою кількістю електрики, пропорційні їхнім хімічним еквівалентам.

Об'єднаний закон Фарадея стверджує, що маса матеріалу в грамах ( $m$ ), осадженого або розчиненого на електроді, пропорційна здійсненню  $I \cdot \tau \cdot \varepsilon$ . Таким чином, узагальнений закон Фарадея можна записати як

$$m = I \cdot \tau \cdot \varepsilon / 26,8, \quad \text{г} \quad (3.4)$$

де  $\tau$  – час протікання струму, ч.

Оскільки кожний компонент сплаву має свій електрохімічний еквівалент, то відповідно він має також і свою швидкість анодного розчинення.

Для практичних цілей необхідно знати швидкість лінійного розчинення, яка дозволяє знайти швидкість подання інструмента при виготовленні деталей.

З рівняння (3.1)  $m = \varepsilon \cdot \tau \cdot I$  масу матеріалу, розчиненого з аноду, можна записати через площу оброблюваної ділянки  $S$  та переміщення електрода-інструмента  $\ell$  до деталі:

$$m = S \cdot \ell \cdot \rho, \quad \text{г} \quad (3.5)$$

де  $\rho$  – густина матеріалу, г/см<sup>3</sup>.

Силу струму можна виразити через площу ділянки  $S$  та густину струму  $j$ .

$$I = S \cdot j$$

Тоді рівняння (3.2) матиме вид:

$$S \cdot \ell \cdot \rho = \varepsilon \cdot S \cdot j \cdot \tau, \text{ г.} \quad (3.6)$$

Якщо ліву та праву частини виразу (3.6) розділити на час  $\tau$ , то відношення  $\frac{\ell}{\tau} = V$  називається швидкістю лінійного розчинення матеріалу аноду:

$$\frac{S \cdot \ell \cdot \rho}{\tau} = \frac{\varepsilon \cdot S \cdot \tau \cdot j}{\tau}; \quad V \cdot \rho = \varepsilon \cdot j$$

Таким чином,

$$V = \frac{\varepsilon \cdot j}{\rho}, \quad \text{см/с} \quad (3.7)$$

Густина струму  $j$  згідно закону Ома може бути виражена через напругу  $U$  та питому провідність  $\lambda_r$ , без урахування втрат напруги на електродах та в струмопровідних ланцюгах.

$$j = \frac{U \cdot \lambda_r}{\ell}, \quad \text{А/см}^2 \quad (3.8)$$

де  $\ell$  – хід електрода, см.

З урахуванням формул (3.7) та (3.8) закон анодного розчинення можна записати наступним чином:

$$V^1 = \frac{\varepsilon \cdot U \cdot \lambda_r}{\rho \cdot \ell}, \quad \text{см}^3/\text{с} \quad (3.9)$$

Якщо проміжок не змінюється у процесі анодного розчинення, то режим ЕХО є стаціонарним. У формулі (3.9) враховується дія лише електричного поля. Не враховуються гідродинамічні фактори, а саме – примусове видалення продуктів обробки примусовим прокачуванням електроліту.

Маса металу, розчинюваного з аноду, виходить меншою, ніж за формулою (3.2) закону Фарадея, оскільки кількість електрики витрачається на:

- побічні реакції на електродах; утворення газів; вторинні реакції.

Ці втрати враховуються коефіцієнтом  $\eta$  – виходом по струму, тому



$$V^1 = \frac{\varepsilon \cdot U \cdot \lambda_i}{\rho \cdot \ell}, \quad \text{см}^3/\text{с} \quad (3.10)$$

$\eta$  – залежить від густини струму, матеріалу заготовки, швидкості помпування, температури та рівня залуження електроліту.

Електроліт – хлорид натрію:

- для конструкційних та низьколегованих сталей  $\eta = 0,8 \dots 0,85$  ;
- для жаротривких сплавів  $\eta = 0,85 \dots 0,93$  ;
- для титанових сплавів  $\eta = 0,83 \dots 0,85$  ;

Електроліт – нітрат натрію:

- для більшості сталей  $\eta = 0,6 \dots 0,7$  ;
- для алюмінієвих сплавів  $\eta = 1,1 \dots 1,35$  ;

Для нормального протікання електрохімічних реакцій необхідно забезпечити інтенсивне винесення продуктів обробки з міжелектродного проміжку, тому електроліт повинен мати певну швидкість.

Електроліт може мати ламінарний або турбулентний характер течії. Винесення продуктів при турбулентній течії відбувається швидше! Проте розрахунок ламінарного потоку є значно простішим, тому при технологічних розрахунках течію приймають як ламінарну!

### 3.2. Підбір електроліту

Від складу електроліту залежать його електропровідність та швидкість розчинення металу. Для отримання високих технологічних показників процесу необхідно, щоб:

- а) в електроліті не протікали зовсім або протікали в мінімальній кількості побічні реакції, що знижують вихід по струму;
- б) розчинення заготовки відбувалося тільки в зоні обробки;
- в) на всіх ділянках оброблюваної поверхні протікав розрахунковий струм.

Таких універсальних електролітів не існує, тому при підборі складу електроліту доводиться в першу чергу враховувати ті вимоги, що є визначальними для виконання даної операції.

Для збільшення швидкості розчинення беруть електроліт з більшою питомою провідністю, а для підвищення точності краще використовувати електроліт зі зниженою провідністю.

Електроліти підбирають в залежності від оброблюваного матеріалу.

Вимоги при підборі електроліту:

1) Аніони (« - » – заряджені іони) та катіони («+» – заряджені іони), що містяться у водному розчині електроліту, повинні добре дисоціювати (роз'єднуватися) при будь-яких комбінаціях.

2) Потенціал матеріалу електрода-інструмента був більш позитивним, ніж потенціал осадження катіонів. Це перешкоджає осадженню металевих катіонів на електрод-інструмент.

Дана умова виконується, якщо катіони електроліту володіють великим негативним стандартним потенціалом.\*

(\* це потенціал, вимірний відносно нормального водневого електрода, на поверхні якого за стандартних умов протікає оборотна реакція  $H_2 \leftrightarrow 2H^+ + 2e$ ).

3) Наявність в електроліті активуючих аніонів, що під дією струму руйнують поверхневі оксидні плівки. Це забезпечує переважне протікання на аноді реакції розчинення та високу продуктивність.

4) Необхідно, щоб спорідненість компонентів оброблюваного сплаву з аніонами електроліту та їх спорідненість з киснем були близькі між собою. Це забезпечує вибірність розчинення сплаву, високу якість поверхні та точність обробки.

5) Відповідність концентрації аніонів, що мають близьку спорідненість з тим чи іншим компонентом оброблюваного сплаву, вмістові цього компоненту в сплаві. Це дозволяє досягти рівномірного анодного розчинення всієї поверхні заготовки.

б) Забезпечення в ході реакцій в електроліті переходу продуктів реакції анодного розчинення до нерозчинного стану. Це дає можливість постійно видаляти продукти обробки з розчину (наприклад, відстоюванням, фільтруванням, центрифугуванням) та підтримувати необхідний склад електроліту.

7) Потрібно, щоб електроліт володів невисокою в'язкістю для полегшення помпування та прискорення процесів тепло- та масоперенесення в проміжку.

8) Електроліт повинен володіти невисокою корозійною активністю (стійкістю) до обладнання, бути нешкідливим для здоров'я, пожежо- та вибухобезпечним.

У якості електролітів найчастіше використовують розчини неорганічних солей: хлориди (калію хлорид); нітрати (азотнокислі солі, похідні азотної кислоти –  $\text{HNO}_3$  (калійна селітра  $\text{KNO}_3$ ); сульфати натрію та калію – солі сірчаної кислоти.

До розчину можуть вводитися добавки:

- буферні речовини для зниження залужування електроліту (борна, лимонна, соляна кислоти);

- інгібітори (з латинської – утримую) корозії (нітрит натрію); похідні азотистої кислоти –  $\text{HNO}_2$ ;

- активуючі речовини, що знижують пасивуючу дію оксидної плівки;

- поверхнево-активні речовини для зниження гідравлічних втрат та усунення кавітації (миюча рідина ОП - 7);

- коагулятори – прискорювачі осадження продуктів обробки (1...5 г/л поліакриламід).

Частіше використовуються наступні електроліти: 8...18% розчини хлориду натрію ( $\text{NaCl}$ ) та 15...20% розчини нітрату натрію ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ).

Для кожного електроліту питома провідність може бути найрізноманітнішою залежно від його складу, концентрації, температури.

Для хлориду натрію найбільша питома провідність при концентрації – 250 г/л, а для нітрату натрію – 210 г/л.

Зі збільшенням концентрації електроліту питома провідність зростає, досягає максимуму, а потім знижується, оскільки сильніше проявляється притягання іонів, яке знижує їхню рухливість та можливість переносу зарядів.

З підвищенням температури зростає рухливість іонів та зростає питома провідність

$$\lambda_t = \lambda_o [1 + \alpha(T - 18)], \quad 1/\text{ом}\cdot\text{см} \quad (3.11)$$

де  $\lambda_o$  – питома електропровідність електроліту при 18°C, 1/ом·см;

$\alpha$  – температурний коефіцієнт опору ( $\alpha=0,0225$ );

$T$  – фактична температура електроліту, °C.

У процесі ЕХО розчин необхідно підкислювати до тримання нейтрального стану. Температура в приміщенні повинна бути постійною.

### 3.3 Гідродинамічні процеси в міжелектродному проміжку

В результаті реакції на оброблюваній поверхні заготовки утворюються продукти обробки, в тому числі нерозчинювані гідроксиди. Їхня концентрація в районі протікання анодного розчинення у початковий момент перевищує концентрацію в електроліті. Кількість продуктів залежатиме від швидкості анодного розчинення.

$$V = \frac{\eta \cdot \varepsilon \cdot \lambda_t \cdot U}{\ell \cdot \rho} \quad (3.12)$$

Якщо електроліт протікає зі швидкістю, нижчою за деяке критичне значення (менше 1...2 м/с), то він не встигає винести з проміжку всі продукти обробки і швидкість анодного розчинення через деякий час після початку процесу знижується.

Тому у кожний момент часу необхідно забезпечити умову  $V_s \geq V$ .

Перевищення швидкості винесення частинок ( $V_s$ ) над швидкістю їхнього утворення повинно бути незначним, інакше невиправдано збільшиться потужність pomp для прокачування електроліту.

Для кожного режиму обробки повинна бути своя швидкість потоку. Швидкість розчинення металу на різних ділянках є різною, тому розрахунок проводять за максимальною швидкістю. Для неї визначають швидкість електроліту та знаходять необхідні напір та подання помпи.

Середня швидкість електроліту  $V_s$  може змінюватися в широких межах ( $V_s = 5 \dots 40$  м/с).

При таких швидкостях критерій Рейнольдса  $Re$  може бути більш критичного значення ( $Re \geq 2300$ ). Тоді потік рідини буде турбулентним, а розраховані швидкості будуть дещо завищеними.

Якщо довжина ділянки за напрямком потоку електроліту достатньо велика, то необхідно, щоб температура електроліту в проміжку залишалася постійною. Це дозволяє підтримувати розрахункову питому провідність, яка визначає точність обробки та інші технологічні показники процесу.

Вся теплота при анодному розчиненні заготовки переходить до розчину, а нагрівання за рахунок гідравлічних втрат нехтовно мале. Тоді можна прирівняти кількість теплоти, що виділилася за законом Джоуля – Ленца при проходженні струму, до кількості теплоти, що перейшла до електроліту

$$I \cdot U = C \cdot m_t \cdot \Delta T, \text{ Дж} \quad (3.13)$$

де  $C$  – питома теплоємність електроліту, Дж/кг·град;

$m_t$  – масова витрата електроліту через проміжок, кг;

$\Delta T$  – різниця температур електроліту на виході з проміжку та на вході в нього, град.

Силу струму  $I$  в лівій частині рівняння (3.13) запишемо через його густину  $j$  та площу  $S$  оброблюваної поверхні заготовки. В свою чергу  $S = B \cdot \ell_p$ , см<sup>2</sup>.

де  $B$  – ширина міжелектродного проміжку, см;

$\ell_p$  – довжина робочої частини електрода-інструмента, см.

У правій частині рівняння масову витрату виразимо через об'ємний:

$$m_t = V_t \cdot \rho_3, \text{ г/с}$$

де  $\rho_3$  – середня густина електроліту, г/см<sup>3</sup>;

$V_t$  – об'ємна витрата електроліту, см<sup>3</sup>/с.

Величина  $V_t$  представляє добуток швидкості електроліту  $V_3$  на площу перерізу проміжку  $S^I$ .

$$S^I = B \cdot S^{II}, \text{ см}^2$$

де  $S^{II}$  – міжелектродний проміжок, см.

Тоді рівняння (3.13) може бути представлене у виді:

$$U \cdot j \cdot B \cdot \ell_p = C \cdot V_t \cdot \rho_3 \cdot \Delta T = C \cdot V_3 \cdot B \cdot S^{II} \cdot \rho_3 \cdot \Delta T \quad (3.14) \quad (3.14)$$

Напругу  $U$  запишемо через густину струму за рівнянням (3.8)  $U = j \cdot S^{II} / \lambda$

або  $j = U \cdot \lambda / S^{II}$ , тоді  $j^2 \cdot \ell_p = C \cdot V_3 \cdot \rho_3 \cdot \Delta T$

Звідси швидкість електроліту дорівнює:

$$V_3 = \frac{j^2 \cdot \ell_p}{\lambda \cdot C \cdot \rho_3 \cdot \Delta T}, \text{ см/с} \quad (3.15)$$

Якщо інструментові надають обертального руху, як при розрізанні диском, точінні, шліфуванні, то електроліт подають поливанням. Він набуває необхідної швидкості за рахунок контакту частинок рідини з обертальним інструментом

$$V_3 = \kappa_n \cdot \pi \cdot D \cdot n, \text{ см/с.}$$

де  $\kappa_n = 0,18 \dots 0,5$  – коефіцієнт, що характеризує відставання частинок рідини від інструмента;

$D$  – діаметр інструмента, см;

$n$  – частота обертання інструмента, с<sup>-1</sup>.

За швидкістю електроліту визначають характеристику помпи.

### 3.4 Напруга

При проходженні струму через струмові дні шини, електрод-інструмент, проміжок та заготовку відбуваються втрати

$$U_o = U + \Delta U_m + \Delta U + \Delta U_3, \quad \text{В}$$

де  $U$  – напруга, що використовується на анодне розчинення металу заготовки (розрахункова напруга), В;

$\Delta U_m$  – втрати напруги в затискачах та струмовідних шинах, В;

$\Delta U$  – втрати напруги в подвійному електролітичному шарі – це втрати, що являють собою різницю потенціалів аноду та катоду, В;

$\Delta U_3$  – втрати напруги при проходженні струму через заготовку, В.

Втрати  $\Delta U_m$  вдається знизити до часток відсотку і їх, як правило, в розрахунках не враховують.

Втрати  $\Delta U_3$  приймають до уваги для деталей великих розмірів (лопатки енергетичних турбін  $L > 1000$  мм та перерізу профілю не більше  $200 \dots 250$  мм<sup>2</sup>).  $\Delta U_3 = 4 \dots 5$  В і їх слід враховувати в розрахунках.

$$U = U_o - \Delta U$$

де  $U_o$  – напруга на затискачах джерела живлення, В.

Втрати  $\Delta U$  залежать від режиму роботи, складу металу заготовки та складу електроліту, напруги та інших факторів. ( $\Delta U = 2 \dots 5$  В). Нижню межу  $\Delta U$  в розрахунках обмежують значенням, 5 В.

Для того, щоб процес анодного розчинення йшов інтенсивно, необхідно підвищити напругу на електродах порівняно до потенціалу розкладання електроліту ( $\phi_a - \phi_k$ ).

Проте при  $U > 15 \dots 18$  В починають зростати витрати в приелектродних шарах – підвідна потужність зростає швидше, ніж корисна.

При напрузі вище 30 В можуть виникати пробиття міжелектродного проміжку.

Для більшості схем обробки використовують діапазон напруг  $9 \dots 18$  В.

Для титанових сплавів –  $U=25...30$  В, при розрізанні матеріалів теж 25...30 В, а при шліфуванні – 6...8 В.

### 3.5 Електрохімічне формоутворення

#### 3.5.1 Копіювання електрода-інструмента на заготовці

Точність копіювання електрода-інструмента на заготовці залежить від швидкості розчинення ділянок заготовки, що перебувають на різних відстанях від електрода-інструмента.

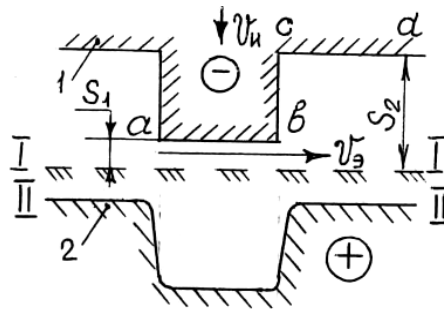


Рисунок 3.9 – Схема отримання заглиблення при ЕХО: 1 – електрод-інструмент; 2 – заготовка

На початку процесу межа заготовки займає положення I - I. На відстані  $S_1$  від неї розташований виступ  $ab$  електрода-інструмента, який переміщується до заготовки з такою швидкістю  $V_n$ , щоб зберігався постійний проміжок  $S_1$ .

Крізь міжелектродний проміжок прокачують електроліт зі швидкістю  $V_з$ .

Якщо наближено прийняти вихід по струму, питому провідність електроліту та напругу однаковими по всій довжині проміжку, то швидкість анодного розчинення матеріалу під ділянками  $ab$  та  $cd$  згідно залежності (3.10) буде:



$$V_{ab} = \frac{\eta \cdot \varepsilon \cdot \lambda_t \cdot U}{\rho \cdot S_1}, \quad V_{cd} = \frac{\eta \cdot \varepsilon \cdot \lambda_t \cdot U}{\rho \cdot S_2}$$

Якщо введемо позначення  $\kappa = \eta \cdot \varepsilon \cdot \lambda_t \cdot U / \rho$ , то тоді швидкість анодного розчинення на ділянках  $ab$  та  $cd$  залежатиме тільки від розмірів міжелектродних проміжків між початковою межею заготовки та відповідною поверхнею електрода-інструмента:

$$V_{ab} = \kappa / S_1, \quad V_{cd} = \kappa / S_2 \quad (3.16)$$

Як видно з рисунку 3.9, у початковий момент обробки проміжок  $S_1 < S_2$ , а отже, швидкість розчинення на ділянці  $ab$  буде більшою, ніж на ділянці  $cd$  в  $S_2 / S_1$  разів

$$V_{ab} / V_{cd} = S_2 / S_1 \quad (3.17)$$

По мірі розчинення металу заготовки та переміщення електрода-інструмента проміжок  $S_2$  зменшується, проте залишається справедливою умова  $S_2 > S_1$ , тобто знімання металу під виступом йде швидше.

Через деякий час у пласкій заготовці буде отримано заглиблення з межею II - II. Форма електрода-інструмента відобразилася на аноді і досягнута розмірна обробка. Це означає, що формоутворення поверхні відбувається за методом відображення (копіювання).

### 3.5.2 Міжелектродний проміжок

Як впливає з рівняння (3.16), чим меншим є міжелектродний проміжок, тим вищими є швидкість анодного розчинення та точність обробки. Проте зі зменшенням проміжку ускладнюється процес його регулювання, зростає опір прокачуванню електроліту, може навіть статися пробиття. Через збільшення газонаповнення при малих проміжках знижується швидкість анодного розчинення. Слід обирати таку величину проміжку, за якої досягаються оптимальні швидкість знімання металу та точність формоутворення.

Для ЕХО отворів та невеликих порожнин, лопаток газотурбінних двигунів, а також при розрізанні заготовок встановлюють та підтримують проміжок 0,1...0,3 мм; для великих порожнин, лопаток енергетичних машин, для схем протягування та точіння задають проміжок – 0,3...0,5 мм; при струменевому методі обробки відстань між електродами обирають у діапазоні 1...15 мм.

При ЕХО використовують три способи регулювання проміжків:

1) При роботі з нерухомими електродами проміжок постійно зростає, а швидкість анодного розчинення знижується. Режим є нестационарним.

2) При постійній швидкості подання інструмента режим обробки з плином часу стає близьким до стаціонарного.

3) При періодичному переміщенні електрода-інструмента відносно заготовки через певні проміжки часу робочий струм вимикають, підводять електрод-інструмент до контакту з заготовкою, потім відводять його на розрахункову відстань і знову вмикають робочий струм.

Час між циклами заміряється секундоміром, тому зміна проміжку в часі є незначною і в розрахунках його можна приймати рівним розрахунковому, а режим вважати стаціонарним.

Припуск на обробку.

Щоб отримати деталь заданої форми, необхідно знати товщину шару металу, який видаляється з заготовки, тобто припуск  $Z$ .

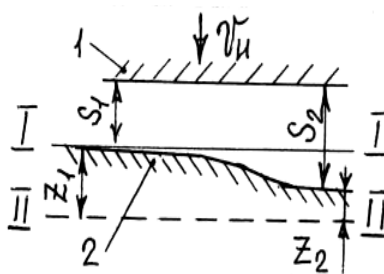


Рисунок 3.10 – Схема до розрахунку припуску на обробку: 1 – електрод-інструмент; 2 – заготовка

Припуск на заготовці 2 може змінюватися в межах допуску ( $Z_1 - Z_2$ ). При цьому проміжок також змінюватиме свій розмір від  $S_1$  до  $S$ . Мінімальний припуск розраховують в залежності від допуску  $[\delta_{dem}]$  на деталь та глибини анодного розчинення металу:

$$Z_{min} \geq Y_1 + [\delta_{dem}] \quad (3.18)$$

де  $Y_1$  – знімання металу на ділянці з мінімальним проміжком.

Мінімальний припуск при обробці нерухомими електродами та протягуванні складає 0,1...0,3 мм в залежності від його нерівномірності (відношення його найменшого значення до найбільшого). Нерівномірність припуску є допустною за такою схемою – 0,4.

За схемою прошивання та розрізання мінімальний припуск та його нерівномірність не мають обмежень.

При точінні та шліфуванні з постійним поданням мінімальний припуск при проміжку до 0,5 мм змінюється в межах 0,1...0,5 мм, а його нерівномірність може бути не більше 0,5.

### 3.6 Технологічні показники ЕХО

#### 3.6.1 Точність обробки

Точність розмірів та форми деталі залежать від похибки електрода-інструмента та від похибки, спричиненої відхиленнями режиму ЕХО від розрахункового. Окрім того, похибка деталі залежить від припуску на обробку, його нерівномірності, стабільності процесу анодного розчинення по оброблюваній поверхні, точності обладнання. Наприкінці обробки похибка деталі  $\Delta_{дет}$  повинна бути в межах допуску  $[\delta_{dem}]$ , тобто  $\Delta_{dem} \leq [\delta_{dem}]$ .

Для ідеального процесу ЕХО похибка деталі може бути представлена через похибку заготовки  $\Delta_o$

$$\Delta_{dem} = \Delta_o - [Y_1(\tau) - Y_2(\tau)] \quad (3.19)$$

де  $Y_1$  та  $Y_2$  – знімання металу наприкінці обробки на ділянках з проміжком  $S_1$  та  $S_2$ ;

$\tau$  – час обробки.

Наближено похибку деталі можна знайти у припущенні, що проміжок:

$$S_2 = S_1 + \frac{\Delta_o + \Delta_{dem}}{2} \quad (3.20)$$

Похибка розмірів деталі залежить від початкової похибки розмірів заготовки, проміжку та припуску на обробку. Крім того, робочій поверхні електрода-інструмента надають форму, яка дещо відрізняється від тієї, яку необхідно отримати в деталі. Цей процес називають коректуванням електрода-інструмента.

Різні фактори неоднаково впливають на загальну похибку обробки:

- найбільший вплив робить нестабільність електропровідності електроліту, проміжку, виходу по струму – до 50%;
- відхилення від розрахункового режиму протікання електроліту – до 20%;
- пружні та температурні деформації – до 15%;
- похибки налаштування та установа – до 15% від загальної похибки.

### 3.6.2 Шляхи зниження похибки

1. Форма вихідної поверхні заготовки повинна мати мінімальний припуск з його мінімальною нерівномірністю;

2. Зменшення міжелектродного проміжку; малі проміжки (0,02...0,05 мм) отримують завдяки установа на поверхні інструмента твердих підпор з ізоляційних матеріалів (алмазних голок, абразивних зерен). Для схеми з нерухомими електродами – з періодичним переставленням електродів.

Один зі способів зменшення міжелектродного проміжку є застосування імпульсної напруги. У період пауз вдається домогтися повного винесення продуктів обробки з проміжку, стабілізувати температуру, склад електроліту.

Імпульсний струм використовують одночасно з прискореним зближенням відводом електрода. Напругу на електроди подають як у момент зближення електродів, вимикаючи його як безпосередньо перед їхнім дотиканням, так і під час відводів електродів після дотикання. Є і інший спосіб – чергувати увімкнення напруги та прокачування електроліту, що дозволяє стабілізувати режим ЕХО та уникнути місцевих дефектів від нерівномірного руху потоку електроліту.

3. Вібрація електродів застосовується спільно з імпульсною напругою або при постійному струмі. Вібрація електродів може здійснюватися паралельно або перпендикулярно напрямку подачі як з однаковою, так і з різною амплітудою коливань в обох напрямках.

4. Локалізація анодного розчинення дозволяє обмежити проходження струму через ділянки заготовки, що прилягають до оброблюваного, і за рахунок цього підвищити точність формоутворення.

5. Для чистової обробки турбінних лопаток застосовують розчини NaCl з малою масовою концентрацією (50...60 г/л). За рахунок малої кількості іонів різко знижується степінь розсіювання.

6. Введення в електроліт повітря та інших газів під напором.

7. Застосування локальної обробки заготовки окремими секціями електрода-інструмента, на які послідовно подають напругу. Послідовність увімкнення секцій спрямована проти руху електроліту, тому всі продукти обробки видаляються з проміжку, оминаючи працюючу секцію.

8. Найширше застосовують локалізацію оброблюваної ділянки шляхом діелектричних покриттів деталі (наприклад, з допомогою фотохімії).

Якби вдалося отримати однакові режими обробки по всій оброблюваній поверхні, то похибка при виготовленні деталей будь-якої складності не перевищувала б декількох мкм.

Так, при прошиванні точних заглиблень бажано було б мати:

- нестабільність напруги в межах 0,1...0,2 В;
- швидкість подання електрода-інструмента – до 1%;

- електропровідність електроліту – 2%.

Стабілізувати параметри в зазначених межах практично не вдається, оскільки вони змінюються по довжині проміжку. Найскладніше домогтися сталості провідності електроліту, яка залежить від температури, кількості газоподібних продуктів обробки. Задача полегшується, якщо у проміжку відсутні газоподібні продукти обробки. Радянськими вченими були запропоновані електроліти, в яких водень в атомарному вигляді одразу вступає в реакцію. Такі електроліти називаються безводневими. Це хлорид амонію, дихлорид заліза, що спричиняють активну корозію обладнання.

Газоподібні продукти видаляють відсмоктуванням по довжині проміжку (похибка знижується в 2...3 рази).

Застосування комбінованих способів обробки (електроалмазного, електроабразивного) з механічною депасивацією поверхні також дозволяє підвищити точність ЕХО.

На теперішній час ЕХО дозволяє отримати:

- при обробці нерухомими електродами зі зніманням по глибині до 0,2 мм – похибку не більше 0,02 мм, при більшій глибині - 0,03...0,050 мм;
- при прошиванні неглибоких отворів ( $\varnothing$  до 2 мм) – точність по 9...10-му квалітету СЕВ СЭВ;
- при обробці порожнин та розрізанні – по 12...14-му квалітету СЕВ СЭВ;
- для схем точіння – точність по 8...10-му квалітету;
- при шліфуванні металевими, електро-абразивними та електро-алмазними кругами – точність по 6...7-му квалітету СЕВ СЭВ.

### **3.7 Якість поверхні**

У технології машинобудування якість поверхні характеризують:

- геометричними (мікрорельєф) показниками;
- фізичними показниками (мікротвердість, знеуглецьований шар) шару матеріалу, що прилягає до поверхні

### 3.7.1 Шорсткість

Формування мікрорельєфу поверхні при ЕХО залежить від:

- структури матеріалу заготовки;
- складу матеріалу, його температури;
- швидкості прокачування електроліту;
- електричних параметрів режиму.

Усі ці фактори постійно змінюються в часі і процес анодного розчинення в кожній точці протікає по-різному. Якщо ЕХО виконують після механічної обробки, то на початку процесу анодного розчинення мікрорельєф повторює профіль заготовки. Характер мікронерівностей залежить від структури оброблюваного матеріалу. Частіше всього спостерігається міжкристалічне розщавлювання, оскільки зерна розчиняються повільніше. Воно і визначає шорсткість поверхні. Чим дрібніше зерно, тим меншою є глибина міжкристалічного розщавлювання.

Глибина мікронерівностей залежить від густини струму. Для більшості сплавів зі збільшенням густини струму шорсткість оброблюваної поверхні знижується. Чим нижчою є температура електроліту (при тій самій густині струму), тим меншою є висота нерівностей. У більшості випадків температура електроліту дорівнює 17...37°C. Для обробки титанових сплавів – 47°C; для чистової обробки нержавіючих сталей – 4°C.

При обробці в електролітах на базі NaCl шорсткість поверхні різних матеріалів знаходиться в наступних межах:

- конструкційних сталей –  $R_a=0,32...0,1$  мкм;
- нержавіючих сталей –  $R_a=1,25...0,32$  мкм;
- титанових сплавів –  $R_a=2,5...1,25$  мкм;
- алюмінієвих сплавів –  $R_a=2,5...0,63$  мкм.

### **3.7.2 Фізичні властивості поверхні**

Після ЕХО в поверхневому шарі зниження вмісту вуглецю та зміни твердості не спостерігається, відсутній наклеп. Напруги підвищуються внаслідок розщавлювання – є концентрація напруг, оскільки міжкристалітні заглиблення мають менший радіус закруглень. Для зменшення напруг в поверхневому шарі потрібно підвищувати густину струму, застосовувати охолоджені електроліти, використовувати імпульсний струм, стабілізувати параметри електроліту.

Водень, що виділяється в проміжку, призводить до окрихчення поверхні та зниження втомної міцності (особливо в титанових сплавах). Для винесення водню швидкість електроліту повинна бути не нижчою за розрахункову.

### **3.7.3 Вплив якості поверхні після ЕХО на механічні властивості матеріалу**

При експлуатації деталей на них можуть впливати статичні, динамічні (ударні) та циклічні (знакозмінні) навантаження. Низька шорсткість поверхні після ЕХО підвищує механічні властивості матеріалів, оскільки якість поверхні однакова в усіх напрямках. Відсутність же наклепу поверхні через дію інструмента знижує механічні показники, особливо опір утомленості. Якість поверхневого шару погіршують мікророзщавлювання по межах зерен, які є концентраторами напруг та наводнювання сплавів.

Межа міцності при статичних та ударних навантаженнях зразків з конструкційних сталей після ЕХО при розтягуванні, стискуванні, крученні та згинанні така сама, як і в механічно оброблених зразків.

У зразків зі сплавів, схильних до міжкристалітного розщавлювання (нікелевих, титанових), межа міцності на розтягування та кут згинання після ЕХО знижується на 10...15%, тому для деталей високонантажених



конструкції після ЕХО необхідно механічно видаляти припуск на глибину розщавлювання:

- для нікелевих сплавів припуск – більше 0,15 мм;
- для титанових сплавів – більше 0,3 мм.

### 3.7.4 Опір утомленості

За значенням межі витривалості зразки з конструкційних сталей та алюмінієвих сплавів після ЕХО близькі до шліфованих зразків. Деталі з цих матеріалів після ЕХО можна використовувати в конструкціях, що працюють в умовах вібрацій, знакозмінних навантажень. Деталі з нікелевих та титанових сплавів мають знижений опір утомленості (через розщавлювання).

Одним з основних методів підвищення механічних властивостей матеріалів після ЕХО є подальше полірування (віброполірування) для зняття розщавленого шару та виконання наклепу.

ЕХО часто використовують замість точіння, фрезування, довбання, після яких шорсткості складає  $R_z=20\dots40$  мкм. Після ЕХО шорсткість -  $R_a \leq 0,3$  мкм.

Повністю відновлює втомні характеристики сплаву його зміцнення після ЕХО – віброударним, пневмогідравлічним, дробоструминним та ротаційним способами, тільки з дещо меншими зусиллями та часом обробки.

### 3.7.5 Продуктивність

Продуктивність процесу можна виразити через швидкість подання електрода-інструмента. Продуктивність обробки при нерухомих електродах можна оцінити середньою швидкістю розчинення металу

$$V_{cp} = Z / \tau, \text{ мм/с} \quad (3.21)$$

де  $Z$  – припуск на обробку, мм;

$\tau$  – час процесу, с.

В залежності від припуску та початкового міжелектродного проміжку середня швидкість розчинення складає  $V_{cp}=0,001\dots0,01$  мм/с.

При схемах прошивання, розрізання, точіння та шліфування на урізування продуктивність (Q) оцінюють швидкістю подання інструмента з рівняння

$$V_u = \frac{\eta \cdot \varepsilon \cdot \lambda_t \cdot U}{\ell \cdot \rho}, \text{ мм/с} \quad (3.22)$$

В залежності від виду оброблюваної поверхні швидкість подання лежить в межах  $V_u=0,005\dots0,1$ мм/с. Час обробки:

$$\tau = Z/V_u . \quad (3.23)$$

Якщо використовується імпульсний струм, то швидкість подання буде  $V_u^1 = V_u / g$ , мм/с.

де  $V_u$  – швидкість подання для постійного струму, мм/с;

$g$  – шпаруватість.

Для схеми прошивання круглих отворів з концентричним розташуванням електрода-інструмента відносно деталі швидкість подання вздовж оброблюваної поверхні знаходять з урахуванням довжини  $\ell_p$  робочої частини інструмента:

$$V_u = \frac{\ell_p}{\tau} \text{ мм/с.}$$

Підставляючи вираз  $\tau$  з рівняння (3.21), отримуємо:

$$V_u = \frac{\ell_p \cdot \eta \cdot \varepsilon \cdot \lambda_t \cdot U}{Z \left( S_o + \frac{Z}{2} \right) \cdot \rho}, \quad (3.24)$$

Для суцільнотягнутих труб з припуском до 0,5 мм на сторону  $V_u=1,5\dots6$  мм/с.

### **3.8 Проектування технологічних процесів**

#### **3.8.1 Первинна інформація**

1. Матеріал оброблюваної заготовки (марка, густина, структура, твердість, наявність неелектропровідних включень).
2. Допуски на розміри (за кресленням деталі).
3. Припуск на обробку, його мінімальний розмір та нерівномірність.
4. Шорсткість поверхні деталі та заготовки.
5. Розміри заготовки та деталі що виготовляється.
6. Аналіз технологічності деталі з урахуванням виготовлення ЕХО.
7. Відомості про технологічні можливості процесу.

#### **3.8.2 Технологічність деталей при розмірній ЕХО**

Для більш повного використання переваг ЕХО необхідно проектувати деталі з урахуванням особливостей процесу анодного розчинення сплавів. Слід враховувати, що при ЕХО немає поділяння на чорнові та чистові операції – при будь-якому режимі ЕХО висота нерівностей відповідає чистовим операціям механічної обробки, і зі зростанням швидкості знімання металу шорсткість поверхні знижується. На відміну від механічної обробки, технологічні показники ЕХО навіть підвищуються зі збільшенням твердості матеріалу заготовки. Окрім того, при ЕХО інструмент або взагалі не зношується, або зношується незначним чином.

При використування ЕХО необхідно задовольнити наступні вимоги, спільні для всіх видів заготовок та схем обробки:

- 1) поверхня перед ЕХО повинна бути очищена від ожарини та інших неелектропровідних речовин;

2) в місцях, де видалення металу планують виконати із застосуванням ЕХО, не допускається місцеве зачищення поверхні, наприклад, для контролю твердості;

3) ЕХО необхідно проводити після термічної обробки заготовки. Це дозволяє уникнути порушення точності за рахунок жолоблення при термічній обробці, попереджає появу знеуглецьованого шару в готовій деталі;

4) при проектуванні заготовок припуск не повинен бути меншим за деяке граничне значення, що визначається з урахуванням можливого розчинення на оброблюваних та сусідніх поверхнях, де метал може розчинятися за рахунок струмів розсіяння та прискореного знімання металу на крайках деталі;

5) в технологічному процесі не передбачають операції та переходи з видалення задирок та округлення крайок на поверхнях після ЕХО.

Існують специфічні вимоги до технологічності для кожної схеми обробки.

При схемі з нерухомими електродами знімання металу інтенсивно протікає не лише в зоні обробки, але й на більшій відстані від неї. Наприклад, при видаленні задирок з зубчастих коліс профіль зубу збоку торчака зтоншується на 10...30 мкм, що не впливає на точність зачеплення.

При схемі прошивання потрібно допускати похил поверхні за напрямком подання інструмента з похилом  $\alpha = 1 \dots 5^\circ$ .

При виготовленні з допомогою ЕХО великих наскрізних поверхонь їх доцільно прошивати тонкостінним трубчастим електродом-інструментом.

При електрохімічному точінні необхідно передбачати плавні переходи між ділянками з різними параметрами.

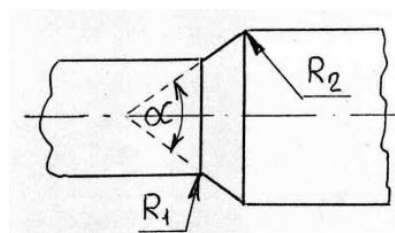


Рисунок 3.11 – Рекомендовані плавні переходи між ділянками при точінні

Кут  $\alpha$  обирають в межах  $45 \dots 80^\circ$ , радіус  $R_1 = 3 \dots 10$  мм,  $R_2 = 1 \dots 3$  мм.

При протягуванні похибка отворів на кінці деталі є вищою, ніж на середніх ділянках. Тому в кресленнях на кінцевих ділянках довжиною  $\ell = 5 \dots 30$  мм слід вказати можливість збільшення внутрішнього діаметру  $d$  на  $0,030 \dots 0,08$  мм (при внутрішньому протягуванні) або зменшення зовнішнього діаметру  $D$  на  $0,05 \dots 0,1$  мм (при зовнішньому протягуванні).

При обробці за схемою шліфування слід передбачити вільний вихід круга за шліфовану поверхню.

### 3.9 Контрольні запитання

1. Хто є творцем методу електрохімічної обробки (ЕХО)?
2. Які технологічні схеми використовуються при ЕХО деталей?
3. Які класичні закони використовують при описуванні процесу ЕХО?
4. Які хімічні реакції протікають на електроді-інструменті та заготовці у процесі ЕХО?
5. Які вимоги при підбиранні електроліту?
6. Яким чином визначають необхідну швидкість прокачування електроліту?
7. Як обрати напругу на електродах?
8. Що таке нерівномірність припуску на обробку і яка його величина?
9. Які існують шляхи зниження похибки обробки?
10. Які електроліти називаються безводневими?
11. Яким чином густина струму впливає на шорсткість поверхні?
12. Яким чином якість поверхні після ЕХО впливає на механічні властивості матеріалів?
13. Які існують основні способи підвищення механічних властивостей деталей після ЕХО?
14. Якою є послідовність побудови технологічного процесу ЕХО?

#### 4. УЛЬТРАЗВУКОВА ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ

Ультразвукові коливання (УЗ) – це пружні хвилі, що поширюються в матеріальних середовищах (твердих тілах, рідинах, газах). За частотою УЗ поширюються від верхньої границі діапазону чутності звуків ( $\approx 16 \cdot 10^3$  Гц) до частоти  $10^8$  Гц. Пружні коливання у всіх діапазонах частот – звукових та УЗ – підкорюються одним і тим самим фізичним законам, але в середовищах, де поширюються УЗ коливання, виникають специфічні ефекти, які в багатьох областях техніки використовуються для інтенсифікації різних процесів. УЗ застосовують також як засіб для отримання інформації при вимірюванні глибини та для виявлення дефектів у виробках; він дозволяє визначити зміни хімічного складу речовини, в'язкість полімерного матеріалу. В медицині УЗД застосовують для визначення статі ще ненародженої дитини. З допомогою УЗ роблять поверхневе зміцнення, розмірну обробку, очищення, зварювання металевих та неметалевих матеріалів, паяння, насичування пористих матеріалів та тканин, пресування та спікання порошків, знегазування і т. д.

Теоретичні аспекти УЗ вивчає акустика, яка як розділ фізики отримала значний розвиток вже в ХІХ столітті. Основи теорії коливань та нелінійної акустики були розроблені Дж. У. Релеєм. Більше глибоке дослідження УЗ коливань стало можливим після відкриття ефекту магнітострикції (Дж.П. Джоулем) та п'єзоелектрики (П. Кюрі). Магнітострикція – здатність феромагнітних металів та сплавів змінювати розміри поперечного перерізу та довжину осердя у змінному магнітному полі. Матеріали: нікель, залізо кобальтові сплави (пермендюр), залізоалюмінієві сплави (альфер), ферити та інші матеріали.

При виникненні електромагнітного поля розміри поперечного розрізу осердя зменшуються, а оскільки його об'єм залишається постійним, то довжина осердя збільшується. При зникненні поля первинні розміри осердя відновлюються.

При УЗО використовуються коливання електромагнітного поля з УЗ частотою в межах 18...44 (16...30) кГц. Амплітуда коливань осердя складає 5...10 мкм. Для збільшення амплітуди коливань до осердя прикріплюють довгий тонкий стрижень-концентратор (резонансний хвилевід змінного поперечного розрізу), що дозволяє отримати амплітуду коливань його торчача до 50...80 мкм. До концентратора прикріплюють робочий інструмент-пуансон.

Завдяки дослідженням фізиків-акустиків УЗ став широко застосовуватися у промисловості.

Наприкінці 50-х років ХХ століття дослідники виявили, що якщо торчак УЗ випромінювача наблизити до поверхні посудини, в якій знаходиться абразивна суспензія, то поверхня в місці контакту торчача випромінювача з посудиною руйнується, причому форма отриманого заглиблення повторює рельєф торчача випромінювача. Це дозволило створити новий різновид розмірної обробки [1].

#### **4.1 Схема ультразвукової обробки заготовок**

Існує декілька схем розмірної обробки заготовок.

##### **4.1.1 Розмірна обробка заготовок з твердих крихких матеріалів абразивними зернами, що рухаються за рахунок дії УЗ інструмента**

Даний спосіб застосовується для обробки скла, кераміки, ситалів, кремнію, германію, тобто для матеріалів, які складно обробляти іншими методами.

Під пуансоном-інструментом 3 встановлюють заготовку 5 і до зони обробки під тиском подають абразивну суспензію, що складається з води та абразивного матеріалу: карбїду бору, карбїду кремнію або електрокорунду. Інструмент підтискують до заготовки з силою 1...60 Н. Обробка виглядає наступним чином: інструмент 3, що коливається з УЗ частотою, вдаряє по

зерна абразиву 4, що лежать на оброблюваній поверхні, зі статичною силою  $P_{ст} = 30 \dots 200 \text{ Н}$ ; абразивні зерна сколюють частинки матеріалу заготовки 5. Велика кількість абразивних зерен, що вдаряються одночасно, а також висока частота повторення ударів (до 30 тисяч разів в секунду) обумовлюють інтенсивне знімання матеріалу.

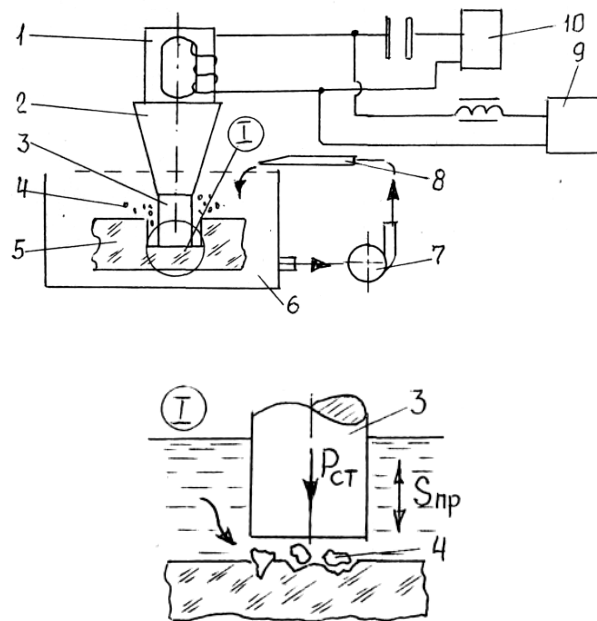


Рисунок 4.1 – Схема прошивання отворів: 1 – УЗ-перетворювач; 2 – концентратор; 3 – інструмент-пуансон; 4 – суспензія абразивна; 5 – заготовка; 6 – ванна; 7 – помпа; 8 – патрубок; 9 – джерело струму; 10 – генератор УЗ частоти

Кавітаційні явища в рідині сприяють інтенсивному перемішуванню абразивних зерен під інструментом, заміні зношених зерен на нові, а також руйнуванню оброблюваного матеріалу.



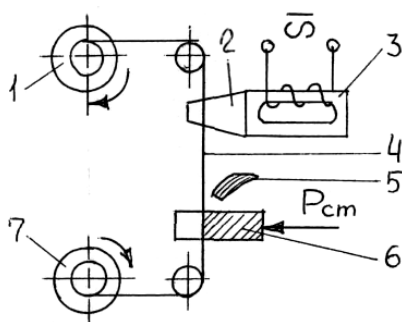


Рисунок 4.2 – Схема розрізання непрофільованим інструментом – тонким дротом: 1,7 – котушки; 2 – концентратор; 3 – перетворювач; 4 – дріт-інструмент; 5 – сопло для подавання суспензії; 6 – заготовка

Прокачування суспензії помпою виключає осідання абразивного порошку на дні ванни та забезпечує подання до зони обробки абразивного матеріалу.

Між пуансоном та заготовкою забезпечують постійний проміжок 50...80 мкм.

Повідомляючи інструментові та заготовці різні види подавань (поздовжнє, поперечне) та змінюючи профіль перерізу інструмента, можна прошивати глухі та наскрізні отвори, обробляти площини, заглиблення, пази при прямому та зворотному копіюванні, розрізати заготовки великих розмірів, обробляти криволінійні та кільцеві пази за копиром, робити шліфування та полірування.

Принцип роботи наступний. Ультразвуковий концентратор 2, з'єднаний з перетворювачем 3, збуджує коливання в дроті-інструменті 4, що перемотується з котушки 1 на котушку 7. Заготовка 6 притискується з невеликим зусиллям  $P_{cm}$  до дроту 4, а з сопла 5 до зони їхнього контакту подається абразивна суспензія.

За такою схемою роблять контурне вирізання, обробку пазів та щілин, розрізання заготовок.

#### 4.1.2 Інтенсифікація процесів різання при повідомленні вимушених УЗ коливань металевим або абразивним різальним інструментом

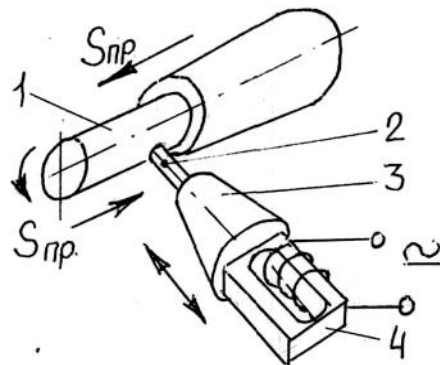


Рисунок 4.3 – Схема різання: 1 – заготовка; 2 – інструмент; 3 – концентратор; 4 – УЗ перетворювач

На різальний інструмент 2 подаються УЗ коливання від концентратора 3, з'єданого з УЗ перетворювачем 4. Різальному інструментові повідомляється поздовжнє подання. Заготовка 1 має поздовжнє подання та обертання.

До місця контакту інструмента та заготовки подається абразивна суспензія. Такий спосіб використовується при свердлінні, зенкеруванні, розгортанні, нарізанні різьб у важкооброблюваних матеріалах, при точінні та зубодовбанні заготовок з в'язких металів, при шліфуванні, абразивно-алмазній доводці.

Ультразвукова обробка дозволяє підвищити продуктивність, якість поверхневого шару, знизити сили різання та крутильний момент. (Наприклад, при нарізанні різьби позначниками крутильний момент зменшується на 25...50%).

### 4.1.3 Очищення шліфувальних кругів

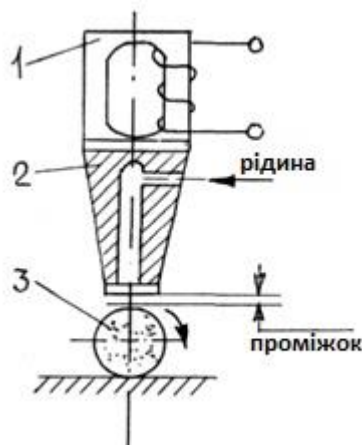


Рисунок 4.4 – Схема очищення: 1 – перетворювач; 2 – концентратор-інструмент; 3 – шліфувальний круг

Коливний з УЗ частотою інструмент 2, з'єднаний з УЗ перетворювачем 1, розташовується на деякій відстані від шліфувального круга 3.

До простору між кругом та інструментом подається очищувальна рідина, в якій при дії на неї УЗ коливань виникають ефекти, що сприяють інтенсивному очищенню поверхні шліфувального кола від засалювання

### 4.1.4 Ультразвукове зміцнення поверхні

Це – чистова обробка. Ультразвуковий інструмент 2 виконано у вигляді кульки, що сполучена з концентратором 3 коливань, що поступають від перетворювача 4. Кулька 2 може бути жорстко закріплена (припаяна), але може і не мати жорсткого контакту з концентратором.

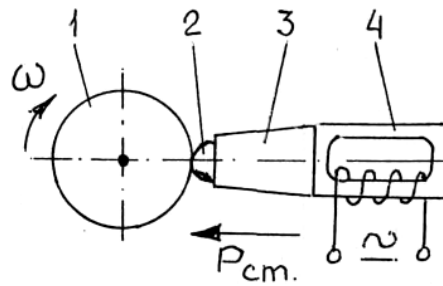


Рисунок 4.5 – Схема ультразвукового зміцнення: 1 – заготовка; 2 – інструмент; 3 – концентратор; 4 – перетворювач

Інструмент притискується з невеликим зусиллям  $P_{ст}$  до обертової заготовки 1. Ультразвукові коливання значно знижують опір пластичної деформації поверхневого шару заготовки 1, який набирає наклеп. Цей спосіб є особливо ефективним при виготовленні нежорстких тонкостінних деталей.

#### 4.1.5 Обробка дрібних деталей вільним абразивом

Дана схема застосовується в основному для зняття задирок.

Деталі 3 поміщаються у ванну 1, в яку заливають абразивну суспензію 2. Ультразвукові коливання в рідині збуджуються інструментом 4, торчак якого служить у якості дна ванни. Інструмент є сполученим з УЗ перетворювачем б через концентратор 5. Деталі 3 знаходяться в рідині у завислому стані. Для прискорення процесу до рідини прикладають статичний тиск  $P_{ст}$ . Видалення задирок відбувається в результаті кавітаційного руйнування та обробки абразивними зернами.

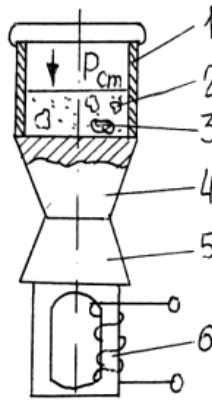


Рисунок 4.6 – Схема обробки вільним абразивом: 1 – ванна; 2 – абразивна суспензія; 3 – деталь; 4 – інструмент; 5 – концентратор; 6 – перетворювач

Щоб спроектувати технологічний процес, потрібно конструювати апаратуру, знати фізичний механізм дії УЗ коливань, вміти правильно підбирати, а при необхідності – розрахувати УЗ перетворювач, розрахувати, спроектувати та виготовити робочі інструменти.

## 4.2 Технологічні показники ультразвукової обробки

### 4.2.1 Вплив технологічних та акустичних параметрів на розмірну обробку

Процес ультразвукової розмірної обробки залежить від багатьох технологічних параметрів, які, як правило, взаємно впливають один на одного: твердості та концентрації абразиву, частоти та амплітуди коливань інструмента, його зносу, статичного навантаження. Кожен з цих факторів впливає на продуктивність та якість виготовлення.

Матеріал заготовки значною мірою визначає характер його руйнування. Усі матеріали поділені за характером деформації та руйнування при УЗО на три групи. В основу цього поділу покладено критерій крихкості –  $t_x$ . Це – відношення отношение опоры зсуву до часового опоры на розривання.

Перша група,  $t_x > 2$  – скло, кварц, ситал, кераміка, германій, кремній, ферити. При УЗО вони практично не зазнають пластичної деформації.

Друга група,  $1 < t_x < 2$  – тверді сплави; загартовані, цементовані та азотовані сталі, сплави титану та вольфраму. При УЗО поряд з пружними деформаціями відбуваються і мікропластичні деформації. Чим більшу роль відіграють пластичні деформації, тим гіршою є обробність.

Третя група  $t_x \leq 1$  – майже вся робота абразивних зерен витрачається на мікропластичну деформацію поверхневих шарів; руйнування матеріалу майже не спостерігається. Піддавати їх УЗО недоцільно.

#### 4.2.2 Абразивна суспензія

Зерна абразиву за твердістю не повинні поступатися оброблюваному матеріалові.

Зазвичай застосовують карбід бору, який добре змочується водою і завдяки порівняно невеликій густині задовільно переноситься рідиною.

Карбід кремнію та електрокорунд застосовуються для виготовлення деталей зі скла, германію. Якщо продуктивність обробки скла карбідом бору прийняти за одиницю, то продуктивність обробки карбідом кремнію – 0,8...0,85, а електрокорундом – 0,7...0,75.

У якості рідини зазвичай використовують воду, що володіє малою в'язкістю, задовільною змочувальною здатністю та добрими охолоджувальними властивостями. До води додають інгібітор корозії.

Використання домішок, що чинять хімічну дію на оброблюваний матеріал – 15%-го водного розчину сірчаної кислоти міді – підвищує продуктивність обробки твердих сплавів у 1,7...2,5 рази.

Розмір зерна абразиву – це ширина зерна під мікроскопом. Зменшення розміру абразивних зерен викликає зниження продуктивності (особливо якщо

розміри зерна є меншими за амплітуду коливань). З іншого боку, чим меншим є зерно тим вищою є точність виготовлення.

### 4.2.3 Концентрація абразиву у суспензії

Оптимальна концентрація – це та, при якій по всій оброблюваній поверхні укладається один шар зерен абразиву. При більшій концентрації (у декілька шарів) збільшується частка роботи, що йде на подрібнення самих зерен.

Амплітуда та частота коливань інструмента визначають швидкість поздовжніх коливань інструмента, тобто головного руху різання

$$V = \frac{4 \cdot f \cdot A}{10^3}, \text{ м/с} \quad (4.1)$$

де  $f$  – частота коливань (16...30 кГц);

$A$  – амплітуда коливань інструмента, мкм.

Чим більшими є амплітуда та частота коливань, тим вищою є продуктивність ( $Q_s$ ).

Оптимальна амплітуда коливань інструмента пов'язана з середнім розміром  $d_a$  абразивного зерна основної фракції.

При  $2A/d_a > 1$  головним чином відбувається не введення зерен в оброблювану поверхню, а їхнє подрібнення. Якщо амплітуда коливань мала, а зерна абразиву більші  $2A/d_a < 0,5$ , імпульс ударної сили, що діє на зерно, не є достатнім для введення зерен в оброблюваний матеріал та його руйнування. Максимальна продуктивність досягається за умови  $2A/d_a = 0,6 \dots 0,8$ . Гранично допустима амплітуда коливань обмежується, окрім вищевикладених міркувань, утомною міцністю матеріалу інструмента та концентратора.

Статичне навантаження. При УЗО інструмент притискується до поверхні заготовки з постійною силою  $P_{cm}$ . Ця сила (сила подавання) чинить значний вплив не лише на значення ударних імпульсів, але й на сам стан зерен та

концентрацію абразиву під торчком інструмента. Оптимальне значення  $P_{cm}$  залежить від площі та конфігурації інструмента, амплітуди, зерен середнього розміру та властивостей оброблюваного матеріалу. Збільшення  $P_{cm}$  (в певних межах) призводить до збільшення імпульсу ударних сил та глибини введення зерен абразиву, тобто до збільшення продуктивності. З іншого боку, збільшення  $P_{cm}$  зменшує відстань між інструментом та оброблюваною поверхнею заготовки та погіршує умови надходження до робочої зони свіжого абразиву та видалення з неї продуктів зносу.

#### 4.2.4 Точність розмірної обробки

Точність УЗ розмірної обробки, тобто стабільність проміжку між контурами виробу та інструмента, визначається багатьма факторами: геометрична точність верстату та його пристроїв, розмір зерен абразиву, твердість оброблюваного матеріалу, форма інструмента та розмір поперечних коливань.

Мінімальна похибка обмежується граничними змінами розміру бічного проміжку. Зазвичай цей розмір у 1,5 рази більший за середній розмір зерна абразиву  $d_a$  основної фракції.

В основному зношується торчак інструмента. Поздовжній відносний знос (відношення довжини зношеної частини до глибини обробленої порожнини, у %) інструмента залежить головним чином від фізико-механічних властивостей заготовки та матеріалу інструмента, товщини стінок інструмента та зернистості абразиву. Поперечний знос відбувається внаслідок дії абразиву, що знаходиться між бічною поверхнею інструмента та стінками оброблюваного отвору — на інструменті з'являється конусність. Особливо збільшується поперечний знос при використанні кільцевого інструмента з товщиною стінки менше 1 мм. Оптимальна товщина стінки повинна бути в межах 1...1,5 мм. Інтенсивність зносу збільшується за поганих умов підведення свіжої абразивної суспензії та



відведення продуктів обробки. У той же час сила подання  $P_{cm}$  та амплітуда не чинять істотного впливу на його знос. Щоб зменшити знос інструмента, передусім необхідно підібрати матеріал, що володіє достатньою зносотривкістю. Наприклад, при обробці скла інструмент повинен бути з твердого сплаву, а при обробці твердого сплаву – з загартованої інструментальної сталі.

Доцільним є виготовляти інструменти зі зворотною конусністю або застосовувати «грибковий» інструмент з калібрувальною стрічкою висотою 1...3 мм, причому діаметр калібрувальної стрічки повинен бути на 0,6...1 мм більшим за стрижень інструмента. За рахунок цього зменшується сила тертя, покращується циркуляція суспензії, добре видаляються продукти обробки.

Через поперечні коливання інструмента відбувається «розбивання» отвору. Може спотворюватися і форма отвору.

Зазвичай при суворій прямолінійності вісей та співвісності перетворювача, концентратора та інструмента, а також при точному вивірненні інструмента та заготовки некруглість отворів, отримувана при чистових операціях, не перевищує 10 мкм (в несприятливих випадках – 30...60 мкм)

Розбивання отворів зростає зі збільшенням розмірів абразивних зерен та глибини обробки.

Для зменшення конусності наскрізних отворів їх обробляють послідовно з обох боків.

При наскрізному прошиванні, свердлінні та розрізанні використовується інструмент, що складається з двох ділянок: чорнової та чистової (діаметр чистової є більшим за діаметр чорнової ділянки).

При УЗ розмірній обробці похибка виготовлення досягає 20 мкм.

#### **4.2.5 Якість поверхні**

Шорсткість поверхні при УЗО залежить від розмірів зерен абразиву, фізико-механічних властивостей заготовки, амплітуди коливань інструмента,

шорсткості поверхні інструмента та типу рідини, що несе абразив. Найбільше на шорсткість впливає зернистість абразиву. Шорсткість є пропорційною зернистості. Властивості оброблюваного матеріалу – структура (крупнозерниста) – визначають шорсткість. Чим вищою є амплітуда коливань інструмента, тим шорсткішою поверхня виходить при обробці.

Якщо в якості рідини, що несе абразив, замість води застосувати машинну оливу, то шорсткість поверхні зменшується, але продуктивність знижується у декілька разів, погіршуються умови підводу та циркуляції абразиву.

Шорсткість оброблюваної поверхні залежить і від шорсткості робочих поверхонь інструмента – нерівності інструмента копіюються на поверхні заготовки.

При чистових операціях висота мікронерівностей робочих поверхонь інструмента повинна бути в 2...3 рази меншою за необхідну висоту мікронерівності деталі.

Окрім шорсткості, якість оброблюваної поверхні характеризується її структурним станом. При УЗО твердих сплавів та загартованих сталей відбувається зміцнення поверхневого шару та з'являються стискуючі залишкові напруги.

При УЗО дрібними шліфпорошками (№3) та мікропорошками при амплітудах коливань 15...20 мкм шорсткість поверхні  $R_a=1,2...0,4$  мкм, а при доведенні  $R_a=0,2$  мкм.

#### **4.2.6 Продуктивність розмірної УЗО**

Продуктивність УЗ розмірної обробки залежить в першу чергу від амплітуди коливань інструмента, фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу, складу та властивостей абразивної суспензії та способу її підведення, сили подавання, площі поперечного перерізу

інструмента, глибини обробки. Вона характеризується швидкістю знімання матеріалу заготовки та при постійному поперечному перерізові інструмента однозначно визначається швидкістю подавання.

Продуктивність  $Q_s$  можна розрахувати за емпіричною формулою

$$Q_s = \psi (A^2 \cdot P_{ct})^a \cdot f^b, \text{ мм}^3/\text{хв} \quad (4.2)$$

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

$A$  – амплітуда коливань інструмента, мкм;

$P_{cm}$  – сила подавання, Н;

$f$  – частота коливань, Гц;

$a$  та  $b$  – показники степеню, що залежать від умов обробки ( $a=0,5\dots 1$ ;  $b=0,5\dots 1$ ).

Чим вищою є твердість абразиву та розмір зерен, тим більшим є знімання матеріалу та продуктивність (враховує коефіцієнт  $\psi$ ).

Оптимальна сила подавання підбирається зазвичай експериментальним шляхом та складає при розмірній обробці  $P_{cm} = 30\dots 200$  Н.

Тиск притискача інструмента  $P_{np} = P_{cm} / S$  складає в середньому  $0,1\dots 1$  МПа. Тут  $S$  – площа торчака інструмента.

Продуктивність обробки залежить від глибини та площі оброблюваного отвору, що відображається в значеннях показників степеню  $a$  та  $b$ .

Поздовжній та поперечний знос інструмента впливає на продуктивність, оскільки амплітуда коливань зменшується.

Амплітуда коливань зменшується і при збільшенні площі інструмента. Якщо площа більша, то умови циркуляції абразиву є гіршими. Підвищити продуктивність можна різними способами.

Для покращення умов циркуляції абразивної суспензії необхідно:

- періодично піднімати та опускати інструмент;
- підводити суспензії через порожнистий концентратор;
- підводити суспензії фонтаном знизу;

- застосовувати інструмент з кільцевими та спіральними рівчачками на бічних поверхнях;
- застосовувати інструмент зі зворотною конусністю;
- прокачувати суспензію під тиском (0,1...0,5 МПа);
- відсмоктувати суспензії;
- забезпечити обертання заготовки або інструмента під час обробки;
- створити ексцентриситет вісей обертання та заготовки.

Збільшення швидкості головного руху (поздовжніх коливань інструмента) відбувається за рахунок застосування матеріалів з високим опором утомленості.

Для збільшення опору втомленості проводять: дробоструменевий наклеп, гідрополірування, ультразвукову обробку.

На теперішній час широко застосовується ультразвукова обробка алмазним інструментом.

### **4.3 Контрольні запитання**

1. У чому полягає ефект магнітострикції?
2. Які існують типи УЗ хвиль?
3. Назвіть основні схеми УЗО?
4. Який є механізм руйнування матеріалу при УЗ розмірній обробці вільним абразивом?
5. Для яких матеріалів доцільно застосовувати УЗ розмірну обробку?
6. Яким чином УЗ коливання впливають на зміцнювально-чистову обробку?
7. З яких елементів складається УЗ коливальна система?
8. Чим обмежена максимальна амплітуда коливань концентратора та робочого інструмента при УЗО?

## 5 ЕЛЕКТРОННОПРОМЕНЕВА ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ

Винайдення електронної лампи поклало початок широкому використанню в науці та техніці потоків електронів. Наприкінці XIX століття було розроблено перший електроннопроменевий осцилограф, у якому електронний промінь використовувався для відтворення на екрані параметрів різних швидкоплинних процесів. У 1904 р. професор Петербурзького університету Б.Л. Розінг розробив конструкцію електроннопроменевого кінескопу. Після винайдення у 1905 г. А.С. Поповим радіо почався бурхливий розвиток радіотехніки, електроніки, а потім телебачення та радіолокації. У фізиці сформувався спеціальний напрямок – електронна оптика, яка вивчає питання отримання електронних згустків потрібної конфігурації та інтенсивності. Необхідність створення електронних приладів призвела до виникнення нової галузі промисловості – електронної техніки – та сприяла розвитку вакуумної техніки та технології.

На теперішній час електронно-променева технологія сформувалася як самостійний напрямок у сфері обробки матеріалів, що володіє широкими технологічними можливостями. Електронний промінь як технологічний інструмент дозволяє здійснити нагрівання, плавлення та випаровування практично всіх матеріалів, зварювання та розмірну обробку, нанесення покриттів та запис інформації. Проте електронний промінь як джерело енергії не всюди отримав широке застосування через високу вартість обладнання, через необхідність високої кваліфікації обслуговуючого персоналу, через складність засобів забезпечення безпеки, створення глибокого вакууму (близько  $10^{-6}$  мм.рт.ст.) або  $10^{-3} \dots 10^{-4}$  Па. [1].

Формування електронного променя для технологічних цілей можна представити таким, що складається з наступних основних стадій:

- отримання вільних електронів;
- прискорення електронів електростатичним або магнітним полем та формування електронного згустку;

- зміна поперечного перерізу електронного згустку (частіше для його фокусування на оброблюваній поверхні);
- відхилення електронного променя та забезпечення потрібної траєкторії переміщення точки його зустрічі з оброблюваною поверхнею.

Для отримання електронного променя та керування ним застосовуються пристрої, що називаються електронними гарматами.



Рисунок 5.1 – Схема електронно-променевого устаткування

Джерелом електронів в устаткуванні є термемісійний катод з вольфраму або танталу, що володіють високими емісійними характеристиками. Його температура перебуває в межах 1600...2800°K. Через важкі температурні умови термін служби катодів не перевищує декілька тисяч годин. На деякій відстані від катоду знаходиться анод 2, виконаний у вигляді масивної деталі з отвором.

Між катодом та анодом від спеціального високовольтного джерела живлення 8 прикладається прискорююча напруга 30...150 кВ (за рахунок генератора та імпульсного трансформатора). Електрони прискорюються цією напругою до значних швидкостей, більша частина яких проходить крізь отвір 2, і в заанодному просторі вони рухаються за інерцією.

Для фокусування променя з потоку в електронній гарматі використовується система діафрагм та магнітних лінз. Магнітна лінза 3 являє собою соленоїд з магнітопроводом, яке створює магнітне поле спеціальної

форми, яке при взаємодії з рухомих електронів зміщує його траєкторію у напрямку вісі системи. У фокусі електронний промінь може володіти суттєво високою густиною енергії, що досягає  $5 \cdot 10^{12}$  Вт/м<sup>2</sup>.

До конструкції електронної гармати зазвичай входить так само відхильна система 4, що служить для переміщення променя по оброблювальній поверхні. Електронна гармата зазвичай має дві пари відхильних котушок, що забезпечують переміщення променя за двома взаємно перпендикулярними напрямками. Як правило, електронна гармата виконується у вигляді функціонального блоку, що прикріплюється до робочої камери 5.

Оброблювана заготовка 6 улаштовується у робочу камеру 5, обладнану ілюмінаторами для спостереження за процесом обробки.

При малій площі обробки (менше 10x10 мм) зазвичай достатньо переміщення променя, а заготовка може залишатися нерухомою.

## **5.1 Фізичні основи електронно-променевої обробки**

### **5.1.1 Отримання вільних електронів**

Вільний, не сполучений з атомом електрон можна отримати, якщо надати атомові надлишкову енергію, поглинаючи яку електрон переходить на більш віддалені від ядра орбіти та може втратити при цьому зв'язок з ядром. Це відбувається при нагріванні металів, які при цьому починають випускати термоелектрони. Цей процес називається термоелектронною емісією. Для нього необхідно отримати густину струму на катоді близько  $(0,1 \dots 1,5) \cdot 10^{-4}$  А/м<sup>2</sup>. При цьому температура катода повинна бути 2400...2700°К. Чим більшою є температура, тим меншим є термін його служби.

Для гексабориду 5 лантану LaB<sub>6</sub> T=1600...2000°К.

Окрім термоемісійних катодів, застосовують плазмові катоди, що використовують електрони з плазми газового розряду. Ці катоди не містять

розжарюваних елементів, вони простіші за конструкцією і мають значно більший термін служби навіть за найважчих умов експлуатації.

### 5.1.2 Прискорення електронів

Для надання електронам необхідної енергії використовують найпростіший і найпоширеніший спосіб – прискорення електронів електричним полем.

На електрон у полі діє електростатична сила

$$F = e \cdot E \quad (5.1)$$

де  $e$  – заряд електрону ( $e=1,602 \cdot 10^{-19}$  Кл(с·А));

$E$  – напруженість поля.

При русі в полі при різниці потенціалів  $U$  під дією сили  $F$  електрон отримує енергію:

$$W = e \cdot U \quad (5.2)$$

Це прирощування енергії електрона відбувається за рахунок збільшення кінематичної енергії (швидкості) його руху:

$$e \cdot U = m_e \cdot (V^2 - V_o^2) / 2 \quad (5.3)$$

де  $m_e$  – маса електрона ( $m_e=9,109 \cdot 10^{-31}$  кг);

$V$  – кінцева швидкість електрона, км/с;

$V_o$  – початкова швидкість електрона ( $V_o=0$ ).

Тому  $e \cdot U = m_e \cdot V^2 / 2$ , звідси:

$$V = \sqrt{\frac{2 \cdot e \cdot U}{m_e}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \cdot U}{9,109 \cdot 10^{-31}}} = 593,2 \text{ км/с}$$

Тобто при прискорювальній напрузі 1 В швидкість електрона складає 593,2 км/с.

У електронних гарматах прискорювальна напруга може досягати  $2 \cdot 10^5$  В (200000 В).



Низьковольтні системи ( $U=15\dots30$  кВ) є найпростішими за конструкцією та в експлуатації і застосовуються переважно для операцій, пов'язаних з плавленням та зварюванням різних матеріалів.

### 5.1.3 Керування електронним променем.

Електронним променем можна керувати з допомогою електростатичних або магнітних полів. На практиці ширше розповсюджені магнітні системи фокусування та керування переміщенням променя.

На електрон, що рухається у магнітному полі, згідно законів електродинаміки, діє сила

$$F=B \cdot V \cdot \sin \alpha, \quad \text{Н} \quad (5.4)$$

де  $B$  – магнітна індукція,  $T_{л}=Bб/м^2$ ;

$V$  – швидкість руху електрона, км/с;

$\alpha$  – кут між вектором швидкості та магнітною силовою лінією поля.

Під дією цієї сили електрон рухатиметься у магнітному полі по колу, перпендикулярному силовим лініям поля. Траєкторія лінії руху електрона (під дією магнітного поля та інерційних сил) має вигляд спіралі.

Створюючи по вісі електронного променя за допомогою спеціальної магнітної системи – магнітної лінзи – магнітне поле певної форми, можна забезпечити збіжність траєкторії електронів в одній точці (фокусування).

Для переміщення електронного променя по оброблюваній поверхні зазвичай використовують його взаємодію зі схрещеними поперечними магнітними полями, що створюються відхильною системою.

Завдяки малій масі електронів достатньо легко переміщувати промінь по оброблюваній поверхні в широкому діапазоні швидкостей при будь-якій формі траєкторії.

### 5.1.4 Вакуум як необхідний фактор електроннопроменевої технології

Електронний промінь можна отримати тільки у вакуумі, оскільки за рахунок співударів з молекулами атмосферних газів електрони віддають їм свою енергію і промінь «розсіюється».

### 5.1.5 Взаємодія електронного променя з речовиною

В результаті зустрічі потоку електронів з оброблюваною речовиною кінетична енергія електронів, що перебувають у русі, перетворюється на інші види енергії.

Потужність, або густина потоку енергії електронного згустку у місці його зустрічі з оброблюваним матеріалом дорівнює:

$$P = U \cdot I_d \cdot \eta, \text{ Вт} \quad (5.5)$$

де  $U$  – прискорювальна напруга, В;

$I_d$  – сила струму променя, А;

$\eta$  – ефективний ККД нагрівання.

Питома поверхнева потужність променя у зоні його дії на речовину:

$$P_o = P/S, \text{ Вт/м}^2 \quad (P_o = 10^{12} \dots 10^{13}) \quad (5.6)$$

де  $S$  – площа перерізу променя на поверхні речовини.

При даному (max) значенні  $P_o$  можна проводити розмірну обробку матеріалів за рахунок їхнього локального випаровування. При менших значеннях  $P_o$  (за рахунок розфокусування променя) проводять плавлення, зварювання, нагрівання у вакуумі. При прискорювальній напрузі  $U = 20$  кВ та питомій поверхневій потужності  $P_o = 10^{10}$  В/м<sup>2</sup> за час  $\tau = 10^{-5} \dots 10^{-6}$  с у поверхневих шарах різних матеріалів розвиваються наступні температури (у дужках зазначені  $T_{\text{кипіння}}$ ), °К. Al-(2593) 4423; Ti-(3773) 5313; нержавіюча сталь-(3323) 5373; Si-(2773) 6273; Ni-(3273) 7113; W- (5673) 15873.

Знімання металу з оброблюваної поверхні за рахунок його випаровування та вибухового закипання лежить в основі розмірної електроннопроменевої обробки.

Електронний потік, що падає на поверхню оброблюваної заготовки, викликає вторинну електронну емісію з оброблюваної поверхні та термоелектронну емісію з розігрітої зони обробки. Потужність, що втрачається, при цьому складає 1%.

Тиск потоку електронів  $P_e$  (Па) на оброблюваний матеріал визначається як відношення суми імпульсів до площі поверхні. Його знаходять за емпіричною формулою

$$P_e = 3,5 \cdot 10^{-6} \cdot j \cdot \sqrt{U}, \text{ Па} \quad (5.7)$$

де  $j$  – густина струму у промені, А/м<sup>2</sup> ( $1,3 \cdot 10^{-4}$  А/м<sup>2</sup>);

$U$  – прискорювальна напруга, В ( $U=20$  кВ).

Густина струму у промені знаходиться в межах  $j=(0,1 \dots 1,5) \cdot 10^{-4}$  А/м<sup>2</sup>.

## **5.2 Основні технологічні процеси електроннопроменевої обробки**

### **5.2.1 Особливості електронного променя**

Головні переваги електроннопроменевої обробки з технологічної точки зору є наступними:

- 1) можливість за рахунок фокусування променя плавно змінювати у широких межах питому енергію у зоні нагрівання;
- 2) велика потужність (від десятків ват до мегават);
- 3) порівняльна простота керування просторовим положенням променя за допомогою магнітної системи та можливість модулювання променя по потужності;
- 4) наявність вакууму як робочого середовища;

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

Недоліки:

1) необхідність забезпечення високого вакууму, що для ряду виробів складно здійснити;

2) складність виготовлення та експлуатації електроннопроменевого обладнання, дорожнеча, потреба у захисті від рентгенівського випромінювання.

Усі основні технологічні операції електроннопроменевої обробки можна умовно розбити на три групи:

- плавлення (локальне переплавлення, плавлення у вакуумі, зварювання);
- випаровування (випаровування у вакуумі, розмірна електроннопроменева обробка);
- термообробка без зміни агрегатного стану речовини.

### **5.2.2 Локальне переплавлення**

Локальне переплавлення дає можливість отримувати надзвичайно високі швидкості кристалізації металу у зоні плавлення.

Також можна отримати й інші структури; розширюються межі розчинності для твердих розчинів, подрібнюється мікроструктура, значно підвищуються пластичність та твердість.

Швидке холонення розплавленого металу призводить до подальшого додаткового загартовування і за час  $\tau = 10^{-3} \dots 1$  с температурного циклу нагрівання-охолодження у загартовуваних сталей утворюється структура дрібнозернистого мартенситу з дуже високою твердістю.

Введення цих зон до більш пластичного основного металу підвищує зносотривкість поверхні.

Іноді таке поверхнєве оплавлення матеріалу називають «ушляхетнювальним», оскільки використовується недорогий початковий матеріал.

### 5.2.3 Електроннопроменеве плавлення

Електроннопроменеве плавлення застосовується в тих випадках, коли необхідно виплавити особливо чисті метали, включаючи хімічно активні. Воно дозволяє отримати більш високий перегрів рідкого металу у ванні і найповніше виконувати знегазування металу, відгін летких домішок, видалення неметалевих включень (рафінування). Сплави на основі Ti, W, Mo, Ni виплавають у вакуумі.

Починаючи з 60-х років ХХ століття усі тугоплавкі та хімічно активні метали виплавають в електроннопроменевих печах при тискові

$P = 10^{-1} \dots 10^{-4}$  Па, що дозволяє отримати зливки масою до 20 т.

Для виплавлення сталі є печі потужністю 1200 кВт, в яких отримують зливки масою по 12 т. Вони йдуть на виготовлення валів та лопаток турбін, камер спалювання, високошвидкісних кулькопідшипників.

Переплавлений метал може бути у будь-якому вигляді: шихта, пруток, скрап, спечені штабики, губка.

### 5.2.4 Електроннопроменеве зварювання

Відмітною особливістю даного зварювання є отримання швів з глибоким проплавленням, яке також називають «кинджаловим». Таке проплавлення дає можливість за один прохід зварювати без оброблювання крайок заготовки товщиною до 100 мм. Глибоке проплавлення дозволяє отримувати зварні з'єднання принципово нової форми, які не можна отримати іншими способами, а саме: дотикове при великій товщині та таврове. Малий об'єм ванни розплавленого металу, який отримуємо при електроннопроменевому зварюванні, різко знижує деформації зварних виробів. Завдяки всьому цьому відкривається можливість зварювати конструкції з вже остаточно оброблених деталей. Також можливим є зварювання термооброблених виробів. Зона

знеміцнювання металу дуже мала, що не позначається на працездатності виробу у цілому.

Приклад виготовлення шевронного колеса. Спочатку виготовляють два окремих косозубих блоки з допомогою пальчикової фрези, а потім їх зварюють. Їх встановлюють у дуже відповідальних конструкціях авіаційних двигунів.

Виготовлення товстостінних конструкцій – це проплавлення глибиною до 200...300 мм (атомні реактори, бойлери електростанцій).

Мікрозварювання для з'єднання мікросхем. Зварюють різні виводи та контактні елементи товщиною менше 0,3 мм та провідники діаметром 10...300 мкм.

Виробництво заготовок для стрічкових пилок. Ножівкове полотно з інструментальної сталі висотою до 3мм приварюється до в'язкої конструкційної сталі – основи.

Зварювання електронним променем розглядається як один з основних процесів для монтажу та ремонту у космосі різних конструкцій та агрегатів. На висоті 200 км тиск знаходиться в межах  $P = 10^{-4}$  Па. У 1969 році на «Союзі-6» вперше були проведені експерименти на устаткуванні «Вулкан».

### **5.2.5 Електроннопроменеве випаровування матеріалу**

Випаровування матеріалу з охолоджуваного тигля дає можливість отримувати тонкі плівки покриття високої чистоти, оскільки при цьому майже повністю виключена реакція випаровуваного матеріалу з матеріалом тигля. Можна здійснювати випаровування різних речовин і з одного тигля, якщо до нього подають матеріали з декількох бункерів. За допомогою таких способів отримують, наприклад, потрібний псевдосплав з 90% титану, 6% алюмінію та 4% ванадію.

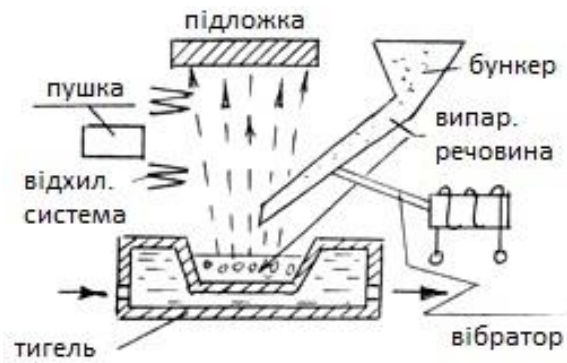


Рисунок 5.2 – Схема випаровування матеріалів

Дана технологія застосовується у мікроелектроніці, оптичній промисловості.

### 5.2.6 Розмірна обробка електронним променем

Щоб отримати точні розміри без оплавлення країв, необхідно: забезпечити суворе дозування енергії електронного променя шляхом імпульсної дії променю на поверхню або організовуючи переміщення променя по поверхні з суворо заданою швидкістю.

Таким чином можна визначити три режими розмірної обробки:

- 1 – моноімпульсний, коли отвір отримують за час одного імпульсу;
- 2 – багатоімпульсний;
- 3 – багатоімпульсний з переміщенням електронного променя по заготовці з певною швидкістю.

Параметри електронно-променевої розмірної обробки пов'язані з фізичними характеристиками матеріалу заготовки (температурою плавлення, теплоємністю, питомою теплотою випаровування, пружністю пари) і не залежать від його механічних властивостей (міцності, твердості, пластичності).

Електронний промінь застосовують в першу чергу для розмірної обробки твердих матеріалів-алмазів, кварцу, кераміки, кристалів кремнію та германію. Утворення порожнин електронним променем ведуть у багатоімпульсному

режимі ( $\tau_u = 10^{-7} \dots 10^{-3}$  с) у глибину не більше 15...20 мм. Найкращі зразки устаткування дозволяють при глибині різання до 5 мм отримувати похил стінок  $\alpha \leq 1^\circ$ .

Мінімальна ширина розрізу може досягати 5...10 мкм.

Особливим різновидом розмірної обробки є перфорація (отримання дрібних наскрізних отворів) різних матеріалів – металеві та керамічні елементи фільтрів, штучну шкіру – для повітряної проникності. При цьому продуктивність складає  $10^5$  отворів в секунду. Похибка розмірів - всього  $\pm 5$  мкм. Шорсткість поверхні  $R_z = 5$  мкм.

При виробництві штучних волокон широко застосовуються фільтри з різних твердих сплавів, кераміки, скла. Випускають фільтри діаметром до 30...50 мм при товщині 1...3 мм; вони можуть містити до 500 отворів. Поперечний переріз отворів може бути різного розміру 20 мкм.

### **5.2.7 Термообробка**

Загартування застосовується для зміцнення лез інструмента зі швидкорізальної сталі (ресурс роботи збільшується вдвічі).

Термообробка листового матеріалу або фольги зазвичай проводиться у спеціальних устаткуваннях для отримання матеріалів з покриттями; їх наносять у вакуумі на знежирений та заздалегідь нагрітий до 200...400°C метал.

Для рівномірного нагріву матеріалу зазвичай використовують сканування – (кероване просторове переміщення світлового променя, згустку електронів) променя по оброблюваній поверхні за допомогою магнітної відхильної системи.

### **5.3 Контрольні запитання**

1. Які основні етапи формування електронного променя?



2. Вимоги до катодів електронних гармат.
3. Принцип прискорення електронів в гарматах.
4. Яким чином можна керувати положенням електронного променя у просторі?
5. Яка роль вакууму в у електронно-променевої технології і якою повинна бути його величина?
6. У чому є особливості взаємодії променя з речовиною?
7. Для яких цілей використовується електроннопроменеве нагрівання поверхні?
8. У яких областях застосовують електроннопроменеве плавлення?
9. У чому основні особливості електроннопроменевого зварювання?
10. Де застосування електроннопроменевого випаровування є найдоцільнішим?
11. Переваги та недоліки розмірної електроннопроменевої обробки.

## **6 СВІТЛОПРОМЕНЕВА ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ**

Світло як джерело енергії здавна привертало до себе увагу людини. По мірі розвитку науки та техніки все ширше застосовуються в наукових та промислових цілях різні фізичні явища, пов'язані зі світловим випромінюванням.

Створення хвильової теорії світла та удосконалення технології виготовлення оптичних лінз, скла та дзеркал дозволили створити цілий ряд різноманітних оптичних приладів. Було створено принципову можливість фокусування світлового потоку на відносно невеликих поверхнях та отримання високих питомих густин енергії, достатніх для нагрівання та плавлення різних матеріалів. У якості джерела світлового випромінювання використовувалося Сонце. Сонячна енергія, яка потрапляє на земну поверхню (приблизно  $40 \text{ Вт/м}^2$ ), стимулює розвиток різних способів її перетворення на інші види енергії, передусім у теплову та електричну.

Подальше вивчення фізичної природи світлового випромінювання призвело до відкриття його квантового характеру (фотон оптичного випромінювання), що дозволило здійснити новий підхід до отримання світлової

енергії. На початку ХХ століття у фізиків склалася думка, що звичайне поліхроматичне (багатокольорове) світло (сім хвиль різної довжини) можна отримати випромінюванням різних тіл або з електричного газового розряду.

У 1917 р. А. Ейнштейн висловив припущення, що світлові хвилі суворо визначеної довжини можна отримати за рахунок індукованого (вимушеного) випромінювання атомів та молекул речовини. [1]. Це був початок нового напрямку науки та техніки — квантової електроніки. Вона випромінює різні ефекти, пов'язані з отриманням та застосуванням електромагнітних коливань оптичного діапазону. Особливу цінність являє отримання когерентного (монохроматичного) світла, тобто світлової хвилі строго визначеної довжини. У 1940 р. вчений В.А. Фабрикант вперше експериментально підтвердив висунуте А. Ейнштейном положення про вимушене випромінювання, а у 1952 р. Н.Г.°Басовим та А.М. Прохоровим було запропоновано новий принцип генерації та посилення надвисокочастотних електромагнітних коливань на основі використання вимушеного випромінювання. Було створено квантові генератори та посилювачі хвиль сантиметрового та дециметрового діапазонів, які зараз відомі під назвою лазерів.

У 1961 р. було розроблено перший зразок оптичного квантового генератора (ОКГ), у якому у якості робочого тіла був синтетичний рубін. Термін «лазер» отримано завдяки використанню перших літер англійського виразу: *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* (посилення світла з допомогою індукованого випромінювання). У 1961 р. було створено газовий лазер (робоче тіло - гелій+неон). З їхньою допомогою можна отримати безперервне випромінювання потужністю до сотень кВт. Потім з'явилися напівпровідникові лазери. Робочий діапазон випромінювання ОКГ охоплює область від ультрафіолетового з довжиною хвилі 0,3 мкм до інфрачервоного з довжиною хвилі 300 мкм. Лазери знайшли широке застосування (для передачі інформації та зв'язку, для зміни відстаней з високою точністю). Особливе місце посідає лазерна технологія – використання ОКГ для нагрівання, плавлення,

випаровування, зварювання та різання матеріалів. За густиною потоку енергії (до  $10^{13}$  Вт/м<sup>2</sup>) лазер поки що не має собі рівних.

## 6.1 Фізичні основи отримання та застосування світлопроменевих джерел енергії

### 6.1.1 Поліхроматичне світло та його використання для технологічних цілей

Звичайне світлове випромінювання – поліхроматичне світло – складається з різних частот, що лежать в діапазоні видимої частини спектра.

За довжинами хвиль  $\lambda$  (мкм) діапазон світлового випромінювання умовно поділяється на декілька областей:

ІЧ	750...0,76 мкм
Червона	0,76...0,62 мкм
Помаранчева	0,62...0,59 мкм
Жовта	0,59...0,56 мкм
Зелена	0,56...0,50 мкм
Блакитна	0,50...0,48 мкм
Синя	0,48...0,45 мкм
Фіолетова	0,45...0,40 мкм
УФ	0,40...0,005 мкм.

Поліхроматичне випромінювання виникає в результаті нагріву тіл. Це випромінювання відбувається у вигляді окремих порцій – квантів або фотонів.

Енергія фотону:

$$\varepsilon = h \cdot f, \quad \text{Дж} \quad (6.1)$$

де  $h=6,625 \cdot 10^{-34}$  – стала Макса Планка (1858...1947 рр.) – німецького фізика, який отримав у 1918 р. Нобелівську премію;

$f$  – частота випромінювання, Гц.

За звичайних умов атоми речовини випромінюють одночасно кванти різної енергії, оскільки перехід електронів з одних орбіт (з далеких на близькі) на інші не носить організаційний характер.

Для застосування енергії світла для тих або інших технологічних процесів потрібне фокусування променя; поліхроматичність грає у даному випадку негативну роль.

Оскільки хвилі різної довжини мають різний коефіцієнт заломлення, то поліхроматичне світло (проходячи крізь лінзу) фокусується у вигляді плями досить значних розмірів. Це явище носить назву хроматичної аберації (відхилення від норм, спотворення). Діаметр світлової плями досягає сотень і тисяч мкм. В результаті максимальна густина енергії у плямі нагріву не перевищує  $10^7$  Вт/м<sup>2</sup>, що є сумірним з нагрівом від полум'я газового пальника і у  $10^4 \dots 10^5$  разів менше, ніж для монохроматичного променя лазера.

Система лінз  $\varnothing 75 \dots 120$  мм не дає можливості отримати у фокусі пляму діаметром менше  $1 \dots 2$  мм, а сферичне дзеркало діаметром 1 м фокусує сонячні промені у пляму діаметром  $20 \dots 60$  мм.

У промисловості світлову енергію використовують від джерел світла у вигляді ламп розжарювання або дугових газорозрядних ламп. Їхня потужність – до декількох десятків кВт (у кварцових корпусах).

Кварцові лампи нагрівають поверхні до температури  $600 \dots 1200^\circ\text{K}$ ; газорозрядні (з системами фокусування) – до  $1800 \dots 2000^\circ\text{K}$ , чого цілком достатньо для плавлення ряду матеріалів.

### **6.1.2 Когерентне випромінювання**

Якщо частота  $f$  і довжина хвилі  $\lambda$  є сталими і не залежать від часу  $t$ , то хвиля є монохроматичною. Якщо амплітуда, частота, фаза, напрямок розповсюдження та поляризації електромагнітної хвилі є сталими у часі або змінюються за певним законом, то така хвиля є когерентною. Монохроматична хвиля завжди когерентна, а когерентність двох немонахроматичних хвиль

означає, що вони володіють однаковим набором частот  $f$ , а різниця їхніх фаз є сталою у часі. Чим коротшою є довжина хвилі, тим меншою є розбіжність паралельних згустків енергії цих хвиль. Ця особливість використовується (для) при локації та визначенні відстаней до предметів. Для монохроматичного випромінювання теоретично досяжним є діаметр сфокусованого променя, що складає 0,4...1 мкм (але через відсутність ідеальної монохроматичності та когерентності променя цей діаметр є дещо більшим).

Отримати когерентне світлове випромінювання вдалося лише засобами квантової електроніки.

### 6.1.3 Основна схема ОКГ

Будь-який ОКГ незалежно від конструктивного виконання містить наступні основні елементи:

1 – робоче тіло (речовина), що складається з ансамблю атомів та молекул, для яких може бути створена інверсія заселеності (нерівноважний стан речовини);

2 – система, яка дозволяє здійснити інверсію;

3 – оптичний резонатор (струна, стрижень), що служить для здійснення взаємодії випромінювання з робочою речовиною і в якому відбувається відбирання енергії від ансамблю частинок, що генерують випромінювання;

4 – пристрій для виведення енергії з резонатора;

5 – система керування концентрацією енергії та просторовим положенням отриманого згустку світла;

6 – різні спеціальні системи, пов'язані з конкретним застосуванням ОКГ.

Для інверсії заселеності в ОКГ застосовують наступні види нагнітання:

- оптичне нагнітання за рахунок опромінювання речовини потужним світловим потоком;

- електричне нагнітання (проходження електричного струму крізь речовину);

- хімічне нагнітання, коли інверсія виникає за рахунок хімічної реакції, в якій бере участь робоча речовина.

В залежності від режиму ОКГ поділяються на пристрої, що працюють у безперервному та імпульсно-періодичному режимах.

Робота ОКГ основана на принципі стимульованого генерування світлового випромінювання.

Атом речовини, маючи певний запас енергії, знаходиться у стійкому енергетичному стані та розташований на певному енергетичному рівні. Для того, щоб вивести атом зі стійкого (стабільного) енергетичного стану, його потрібно збудити.

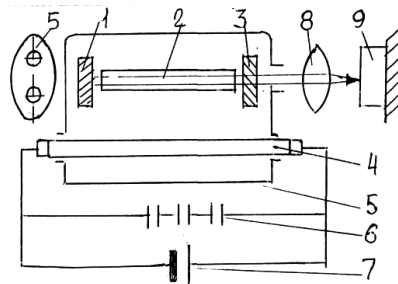


Рисунок 6.1 – Схема твердотілого ОКГ: 1 – дзеркало з щільним непрозорим шаром світла; 2 – рубіновий стрижень; 3 – дзеркало посріблене (коефіцієнт пропускання світла  $\sim 8\%$ ); 4 – газорозрядна лампа-спалах; 5 – відбивальний кожух з поперечним перерізом у формі еліпсу; 6 – високовольтна батарея конденсаторів; 7 – джерело живлення; 8 – система оптичних лінз; 9 – заготовка

Збудження («нагнітання») активної речовини здійснюють світловою імпульсною лампою. Частість повторення імпульсу світла лампи-спалаху залежить від часу заряджання батареї конденсаторів, а також від умов охолодження стрижня (рубінового) – резонатора. Імпульс світла триває до  $10^{-6}$  с

з інтервалами між ними  $3 \cdot 10^{-6} \dots 10^{-3}$  с. Збуджений атом, отримавши додатковий фотон від системи нагнітання, випромінює одразу два фотони, в результаті чого відбувається своєрідна ланцюгова реакція генерації лазерного випромінювання.

У твердому ОКГ робочим елементом-речовиною є рубіновий стрижень, що складається з окису алюмінію ( $Al_2O_3$ ), активованого 0,05% Cr (хрому). Для рубіну потужність нагнітання, що поглинається кристалом, складає  $\sim 2$  кВт на  $1 \text{ см}^3$  об'єму кристалу. Коефіцієнт використання світлової енергії лампи-спалаху складає 10...15%, тому її потужність повинна складати десятки, а то й сотні кВт. 40...70% енергії, яку поглинає стрижень, йде на його нагрівання. Щоб генерація когерентного випромінювання не припинялася, стрижень необхідно охолоджувати (повітрям, водою або рідким азотом). Випромінювання, що почалося у робочому тілі (стрижні) ОКГ, розповсюджується по всьому об'єктові стрижня-резонатора і через багаторазове відображення від дзеркал залучає до процесу генерації когерентного випромінювання усі оптично активні атоми у напрямку вісі стрижня. Частина когерентного випромінювання виходить через напівпрозоре дзеркало 3 з резонатора.

Через 0,5 мікросекунди більше половини атомів хрому входять у стан збудження, система стає нестійкою і вся енергія, що запасена у стрижні рубіну, одночасно вивільнюється і кристал пускає сліпуче яскраве червоне світло – червона флюоресценція рубіну – фотони з довжиною хвилі  $\lambda = 0,6943$  мкм.

Сумарна потужність рубінового ОКГ при енергії імпульсу лампи від 20 до 100 Дж та частоті їхнього повторення до декількох десятків герц може досягати десятків кВт (довжина стрижня при цьому складає 200...250 мм, діаметр 15 мм). Ця енергія виділяється у мільйонні частки секунди та зосереджується у промені діаметром 10 мкм за рахунок системи оптичних лінз, що забезпечує температуру у межах 6000...8000°C. У результаті цього поверхневий шар матеріалу заготовки 9, що знаходиться у фокусі променя, миттєво нагрівається та випаровується.

## **6.2 Технологія світлопроменевої обробки матеріалів**

### **6.2.1 Технологічні особливості випромінювання ОКГ**

Використання потужних ОКГ дає цілий ряд технологічних переваг, які і визначають їхнє широке застосування:

1. Енергію у вигляді світлового променя можна передавати на відстань (по спеціальному світловоду або крізь прозорий роздільний переділ).
2. Відсутній механічний та електричний контакт між джерелом енергії з виробом у місці обробки.
3. Висока концентрація енергії у плямі нагріву у простому фокусуванні.
4. Можна плавно регулювати густину променистого потоку у плямі нагріву за рахунок зміни фокусування променя.
5. Високі температури у зоні дії випромінювання.
6. Можна отримати як імпульси дуже малої тривалості (до  $10^{-9}$  с.), так і безперервне випромінювання.
7. Малі розміри зон обробки (до декількох мкм.).
8. Можна переміщувати промінь з високою точністю та швидкістю.
9. Потужність променя можна модулювати за необхідним законом.
10. Технологічний процес можна вести у будь-якому оптично прозорому середовищі.

### **6.3 Контрольні запитання**

1. Хто є основоположником розробки ОКГ-лазеру і коли?
2. У чому полягають основні переваги та недоліки поліхроматичного світла як джерела енергії для технологічних цілей?
3. Які основні фізичні принципи покладені в основу роботи ОКГ?
4. Яким чином отримують когерентне випромінювання за допомогою ОКГ?
5. Які речовини використовуються у лазерах для генерації випромінювання?



6. Яким чином здійснюється нагнітання (збудження) енергією твердотілих ОКГ?
7. Яким чином робиться вивід випромінювання з ОКГ?
8. За допомогою чого здійснюється фокусування випромінювання лазера?
9. Якими є основні особливості взаємодії світлового променя з речовиною?
10. Де технологічне застосування лазерного променя є найдоцільнішим?
11. Назвіть основні переваги та недоліки обробки матеріалів з допомогою ОКГ?

### **ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ**

1. Артамонов Б.А., Волков Ю.С., Дрожалова В.И. и др. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов. Учебное пособие (в 2-х томах). / под ред. В.П. Смоленцева. М. : Высшая школа, 1983, 247 с.
2. Бирюков Б.Н. Электрофизические и электрохимические методы размерной обработки. / Б. Н. Бирюков М. : Машиностроение, 1981, 128 с.
3. Фотеев Н.К. Технология электроэрозионной обработки. / Н.К. Фотеев М. : Машиностроение, 1980, 184 с.
4. Мороз И.И. Электрохимическая обработка металлов. / И. И. Мороз М. : Машиностроение, 1969, 208 с.
5. Подураев В.Н., Камалов В.С. Физико-химические методы обработки. / Подураев В.Н., Камалов В.С. М. : Машиностроение, 1973, 346 с.
6. Попилов Л.Я. Электрофизическая и электрохимическая обработка материалов. / Л.Я. Попилов. Справочник. 2-е изд. доп. и перераб. М. : Машиностроение, 1982, 400 с.
7. Барон Ю.М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов. / Ю. М. Барон Л. : Машиностроение, Ленинградское отделение, 1986, 176 с.
8. Горохов В.А. Технология обработки материалов: учебное пособие. / В.А. Горохов Мінск, Беларуская навука, 2000, 439 с.

9. Дальский А.М. Технология конструкционных материалов. / А.М. Дальский - 2-ое., доп. и перераб. М. : Машиностроение, 1990, 351 с.
10. Комарова О.С. Технология конструкционных материалов. / Под общей ред. О.С. Комарова Минск : Знание, 2005, 559 с.
11. Петруха П.Г. Технология обработки конструкционных материалов. / Под ред. П.Г. Петрухи М. : Высшая школа, 1991, 512 с.

## ЗМІСТ

1	Вступ. Історична довідка. Класифікація фізико-хімічних методів обробки металів.....	3
	Вступ.....	3
1.1	Історична довідка.....	4
1.2	Класифікація фізико-хімічних методів обробки металів.....	9
1.3	Контрольні запитання.....	12
2	ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНА ОБРОБКА МЕТАЛІВ.....	12
2.1	Загальний опис процесу.....	18
2.2	Стадії протікання.....	20
2.3	Система очищення та подавання робочої рідини у електроерозійному верстаті .....	21
2.4	Контрольні запитання.....	23
3	РОЗМІРНА ЕЛЕКТРОХІМІЧНА ОБРОБКА.....	24
3.1	Теоретичні основи електрохімічного процесу формоутворення (ЕХО).....	30
3.1.1	Закони електролізу М.Фарадея.....	30
3.2	Підбір електроліту.....	33
3.3	Гідродинамічні процеси у міжелектродному проміжку.....	36
3.4	Напруга.....	39
3.5	Електрохімічне формоутворення.....	40
3.5.1	Копіювання електрода-інструмента на заготовці.....	40
3.5.2	Міжелектродний проміжок.....	41
3.6	Технологічні показники ЕХО.....	43
3.6.1	Точність обробки.....	43
3.6.2	Шляхи зниження похибки.....	44
3.7	Якість поверхні.....	46
3.7.1	Шорсткість.....	47
3.7.2	Фізичні властивості поверхні.....	48
3.7.3	Вплив якості поверхні після ЕХО на механічні властивості матеріалу.....	48
3.7.4	Опір утомленості.....	49
3.7.5	Продуктивність.....	49
3.8	Проектування технологічних процесів.....	51
3.8.1	Первинна інформація.....	51
3.8.2	Технологічність деталей при розмірній ЕХО.....	51
3.9	Контрольні запитання.....	53
4	УЛЬТРАЗВУКОВА ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ.....	54
4.1	Схема ультразвукової обробки заготовок.....	55
4.1.1	Розмірна обробка заготовок з твердих крихких матеріалів абразивними зернами, що рухаються за рахунок дії УЗ інструмента.....	55
4.1.2	Інтенсифікація процесів різання при повідомленні вимушених УЗ коливань металевим або абразивним різальним інструментом.....	58
4.1.3	Очищення шліфувальних кругів.....	59
4.1.4	Ультразвукове зміцнення поверхні.....	59

4.1.5	Обробка дрібних деталей вільним абразивом.....	60
4.2	Технологічні показники ультразвукової обробки.....	61
4.2.1	Вплив технологічних та акустичних параметрів на розмірну обробку.....	61
4.2.2	Абразивна суспензія.....	62
4.2.3	Концентрація абразиву у суспензії .....	63
4.2.4	Точність розмірної обробки.....	64
4.2.5	Якість поверхні.....	65
4.2.6	Продуктивність розмірної УЗО.....	66
4.3	Контрольні запитання.....	68
<b>5</b>	<b>ЕЛЕКТРОННОПРОМЕНЕВА ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ.....</b>	<b>69</b>
5.1	Фізичні основи електронно-променевої обробки.....	71
5.1.1	Отримання вільних електронів.....	71
5.1.2	Прискорення електронів.....	72
5.1.3	Керування електронним променем.....	73
5.1.4	Вакуум як необхідний фактор електроннопроменевої технології.....	74
5.1.5	Взаємодія електронного променя з речовиною.....	74
5.2	Основні технологічні процеси електроннопроменевої обробки.....	75
5.2.1	Особливості електронного променя.....	75
5.2.2	Локальне переплавлення.....	76
5.2.3	Електроннопроменеве плавлення.....	77
5.2.4	Електроннопроменеве зварювання.....	77
5.2.5	Електроннопроменеве випаровування матеріалу.....	78
5.2.6	Розмірна обробка електронним променем.....	79
5.2.7	Термообробка.....	80
5.3	Контрольні запитання.....	80
<b>6</b>	<b>СВІТЛОПРОМЕНЕВА ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ.....</b>	<b>81</b>
6.1	Фізичні основи отримання та застосування світлопроменевих джерел енергії.....	83
6.1.1	Поліхроматичне світло та його використання для технологічних цілей.....	83
6.1.2	Когерентне випромінювання.....	84
6.1.3	Основна схема ОКГ.....	85
6.2	Технологія світлопроменевої обробки матеріалів.....	87
6.2.1	Технологічні особливості випромінювання ОКГ.....	87
6.3	Контрольні запитання.....	88
	<b>ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....</b>	<b>89</b>

Навчальне видання

Абрамов Сергій Олексійович

Гришин Володимир Сергійович

ТЕХНОЛОГІЯ МАШИНОБУДУВАННЯ

I частина

«СПЕЦІАЛЬНІ ТА ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ МЕТОДИ ОБРОБКИ ПОВЕРХНІ»

Навчальний посібник

Тем. план 2021, поз. 107

Підписано до друку 20.05.2021. Формат 60x84 1/16. Папір друк. Друк плоский.

Облік.-вид.арк. 5,47. Умов. друк. арк. 5,40. Замовлення № 84.

Національна металургійна академія України

49005, м. Дніпро, пр. Гагаріна, 4

---

Редакційно-видавничий відділ НМетАУ