

**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 28.04.21 р.

**II частина**

**Дніпро НМетАУ 2021**

УДК 621.7+621.9.

Абрамов С.О., Гришин В.С. Технологія машинобудування (спеціальні та електрофізичні методи обробки поверхні). Частина II: Навч. посібник. – Дніпро: НМетАУ, 2021. – 81 с.

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**

## 7 ПЛАЗМОВА ОБРОБКА

У 1923 р. американські фізики Л. Тонкс та І. Ленгмюр запропонували називати середовище, у якому значна частина молекул або атомів іонізована, плазмою. Плазма – це стан речовини, що є найпоширенішим у космосі.

Найчастіше плазму отримують у електродуговому розряді, у високочастотному електричному полі, за допомогою енергії лазерного випромінювання.

Фізичні властивості плазми – високі значення температур, ентальпія та електропровідність – дозволяють здійснити ряд цікавих фізичних та технічних проєктів. У атомній фізиці, наприклад, «гаряча» плазма з температурою вище  $10^6$  К розглядається як засіб проведення керованих ядерних реакцій синтезу. Функціонує ряд магнітогідродинамічних генераторів, у яких високошвидкісний плазмовий потік служить для прямого перетворення теплової енергії в електричну. Також існують електрореактивні плазмові двигуни.

Плазма знайшла застосування у металургії, у зварному виробництві. Для технологічних цілей використовують так звану «низькотемпературну» плазму з температурою  $10^3 \dots 10^5$  К, що являє собою частково іонізований газ. Для отримання плазми розроблені плазмотрони або плазмові пальники. У дугових плазмотронах плазма з необхідними характеристиками може бути отримана при різних видах взаємодії дуги з плазмоторним газом: аргоном, гелієм, азотом, воднем, киснем та повітрям [1].

Стабілізація дуги у плазмотроні може здійснюватися аксіальним потоком газу 1, який створює шар 2, що обмежує стовп дугового розряду (рис. 7.1).

При тангенційному подаванні газу у дугову камеру плазмотрону стабілізація дуги досягається за рахунок вихрового потоку 1 плазмоторного газу.

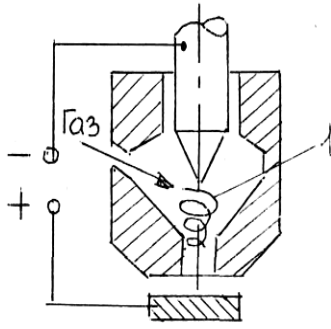


Рисунок 7.1 – Схема стабілізації дуги аксіальним потоком:  
1 – вихровий потік газу

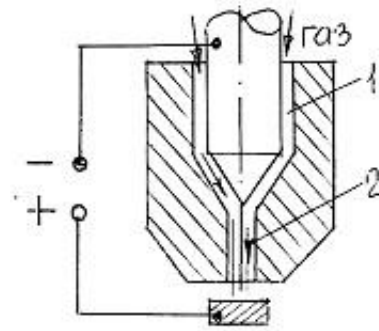


Рисунок 7.2 – Схема тангенційного подавання газу: 1 – газ; 2 – шар газу

Дуже ефективним способом стабілізації дугового розряду у плазмотроні та підвищення його питомих енергетичних характеристик є обмеження діаметру стовпа дугового розряду охолоджуваною стінкою. Плазмотвірний газ, що використовується у плазмотроні, значною мірою визначає технологічні можливості плазмового струменя, і його потрібно обирати в залежності від цілей процесу.

Молекулярні гази – азот, водень, кисень та повітря – дозволяють збільшувати ефективність нагріву за рахунок реакцій дисоціації (розкладання) – асоціації (об’єднання). При цьому відбувається додаткове поглинання теплоти у стовпі дугового розряду.

При попаданні на оброблювану поверхню плазмотвірний газ асоціює (перетворюється з атомного у молекулярний); при цьому виділяється теплота, витрачена на його дисоціацію.

## 7.1 Основні фізичні характеристики та властивості плазми

### 7.1.1 Ступінь іонізації плазми

Це кількісна характеристика, що визначає співвідношення у плазмі заряджених нейтральних частинок:

$$X = n/N \quad (7.1)$$

де  $n$  – концентрація у плазмі заряджених частинок одного знаку (іонів або електронів);

$N$  – число нейтральних молекул або атомів газу до його іонізації.

Ступінь іонізації плазми залежить від багатьох факторів (передусім від температури). Для низькотемпературної плазми її значення може змінюватися у широких межах – 0...100%.

### 7.1.2 Квазінейтральність

Квазінейтральність плазми означає, що у певному об'ємі число негативно заряджених частинок – електронів – дорівнює числу позитивно заряджених частинок – іонів, інакше повинні виникнути електричні поля, що призводять до перерозподілу зарядів. По мірі зниження тиску число частинок зменшується в об'ємі та може настати момент, коли кількість частинок буде настільки мала, що умови квазінейтральності не виконуватимуться.

Об'єм, де порушується квазінейтральність плазми, визначається дебаївським радіусом (від імені нідерландського фізика П. Дебая):

$$r_D = \sqrt{\frac{T_e}{n}}, \quad (7.2)$$

де  $T_e$  – температура (електронна), К;

$n$  – концентрація електронів,  $\text{см}^{-3}$ .

Якщо розміри розглядуваної області плазми є більшими за дебаївський радіус  $r_D$ , умова квазінейтральності виконується ( $n_e \approx n_i$ ), тобто концентрації у плазмі заряджених електронів та нейтронів є рівними. Якщо ж розглядається об'єм плазми радіусом  $r$  є меншим  $r_D$ , у цьому об'ємі плазму не можна вважати квазінейтральною.

Поняття квазінейтральності дозволяє чіткіше визначати плазму як форму речовини, у якій число електронів та іонів у об'ємі настільки велике, що навіть

невелике порушення рівності  $n_e = n_i$  є неможливим через утворення сильних електричних полів. У реальних плазмових пристроях, що застосовуються в технологічних цілях та у вакуумі, величина  $r_D$  визначається значеннями:  $10^{-2} \dots 10^{-3}$  см.

### 7.1.3 Температура плазми

Температура плазми є найважливішою характеристикою, і в реальних плазмотронах вона може досягати  $(2 \dots 5) \cdot 10^4$  К. У ряді випадків плазму можна розглядати як ідеальний газ, оскільки при високих температурах концентрація частинок у плазмі, незважаючи на порівняно високі тиски, є малою і для неї можна вважати справедливим рівняння ідеального газу, у тому числі основний закон газового стану:

$$P \cdot V = R \cdot T \quad (7.3)$$

де  $p$  – тиск газу, Па;

$V$  – об'єм, м<sup>3</sup>;

$T$  – температура, К;

$R$  – універсальна газова стала, ( $R=8,31$  Дж/моль·К).

Для плазми це рівняння зручніше представити у наступній формі:

$$p = \frac{n \cdot R \cdot T}{N}, \quad (7.4)$$

де  $n = n_e + n_i + n_o$  – сумарна концентрація заряджених та нейтральних частинок у плазмі;

$N$  – число Авогадро ( $N=6,02 \cdot 10^{23}$  моль<sup>-1</sup> – число молекул або атомів у 1 молі речовини).

Моль – кількість речовини системи, що містить стільки ж структурних елементів, скільки міститься атомів у вуглеці – 12 масою 0,012 кг.

Закон Авогадро, відкритий у 1811 р. італійським фізиком та хіміком, говорить про те, що при однакових рівних об'ємах ідеальних газів при однакових тисках та температурах міститься однакова кількість молекул.

При розгляданні плазми як сукупності заряджених частинок різних знаків (електронів – “–” та іонів – “+”) вводять наступні поняття:

- електронної температури –  $T_e$ ;
- іонної температури –  $T_i$ .

Такий підхід дозволяє детальніше розглянути енергію окремих частинок, що складають плазму.

На відміну від звичайної газової суміші, усі частинки якої мають однакову середню кінематичну енергію безладного теплового руху, у електронів, іонів та нейтральних атомів ця енергія є різною.

Електронна температура (енергія електрона) завжди є вищою за енергію іонів та нейтральних атомів через велику рухливість електрона. При зниженні густини (тиску) плазми різниця електронної  $T_e$  та іонної  $T_i$  температур може досягти декількох порядків.

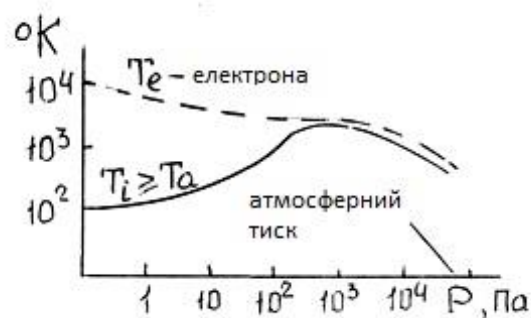


Рисунок 7.3 – Залежність температур від тиску (густина плазми)

Для плазми, що використовується у технологічних пристроях, де тиск є достатньо великим і концентрація частинок складає більше  $10^{15} \text{ см}^{-3}$ , можна з достатньою для практичних цілей точністю вважати, що  $T_e = T_i = T_a$ , тобто температури всіх частинок є рівними. Така плазма носить назву термічної.

#### **7.1.4 Ентальпія плазми**

Ентальпія – це важлива енергетична характеристика плазмового струменя і залежить як від температури, так і від роду застосовуваного плазмотвірного газу. Ентальпія моноатомних газів збільшується з підвищенням температури завдяки підвищенню енергії теплового руху атомів газу та їхньої іонізації. У молекулярних газів у процесі нагрівання ентальпія газу навіть при порівняно невисоких температурах різко зростає за рахунок процесу дисоціації, а потім вже починається підвищення ентальпії за рахунок іонізації. Тому для технологічних процесів, коли не потрібні дуже високі температури (понад  $10^4 K$ ), у якості плазмотвірних газів доцільно використовувати азот, водень, кисень та повітря. Для отримання більш високих температур необхідно застосовувати плазму одноатомних газів (аргону, гелію).

На ентальпію плазмового потоку сильний вплив має витрата плазмотвірного газу. Збільшення витрати газу призводить, як правило, до зниження ефективності теплопередачі від дугового або високочастотного розряду до газового катода, і ентальпія газу зменшується.

У технологічних процесах використовують воднево-азотну або воднево-аргонову суміш газів, у яких об'ємний вміст водню складає 10...20%.

#### **7.1.5 Види плазмових джерел енергії**

При нагріванні плазмою деталей передавання енергії може здійснюватися або тільки за рахунок процесів теплообміну нагрітого газу з твердою або рідкою фазою (деталь не пов'язана електрично з джерелом живлення), або за рахунок сумарної дії теплообміну та електричної взаємодії заряджених частинок плазми з електродом-заготовкою. У зв'язку з цим у практиці плазмової технології склалися три основні принципові схеми плазмотронів. У двох схемах (рисунок 7.4 а,б) для отримання плазми використовують електричний дуговий розряд; у схемі (рисунок 7.4 в) нагрів газу та утворення



плазми здійснюється за рахунок без електродного високочастотного індукційного розряду.

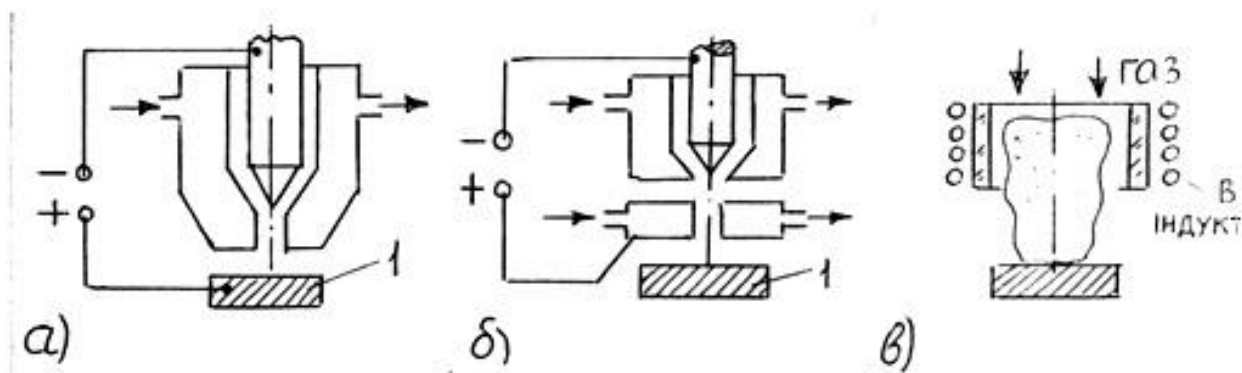


Рисунок 7.4 – Основні схеми плазмотронів: а – прямої дії; б – непрямой дії; в – плазмотрон з високочастотним індукційним розрядом

Схема (а) отримала назву плазмової дуги, а плазмотрон для її отримання – це плазмотрон прямої дії. У схемі (б) виріб 1 гальванічно не пов'язаний з електродом, тому схема називається плазмовим струменем, а плазмотрон носить назву плазмотрону непрямой дії.

### 7.1.6 Характеристики плазмового джерела

Основними характеристиками плазмового джерела енергії є його ефективна теплова потужність та коефіцієнт зосередженості, що визначає розподіл питомого теплового потоку по поверхні оброблюваного виробу.

Для плазмової дуги ефективна теплова потужність дорівнює:

$$q = U \cdot I \cdot \eta_u, \text{ Вт} \quad (7.5)$$

де  $U$  – напруга дуги, В;

$I$  – сила струму дуги, А;

$\eta_u$  – ефективний ККД процесу плазмового нагрівання, що враховує втрати енергії при передаванні її до виробу.

Розподіл температури плазмової дуги та плазмового струменю по радіусу ( $r$ ) та по довжині ( $l$ ) вкрай нерівномірні. Максимальна температура спостерігається у центрі на осі плазмового потоку, причому вона значно вища, ніж у відкритій дугі. Густина теплового потоку для плазмових джерел енергії також є вищою, ніж для відкритої дуги, і вона досягає  $10^6$  Вт/см<sup>2</sup>.

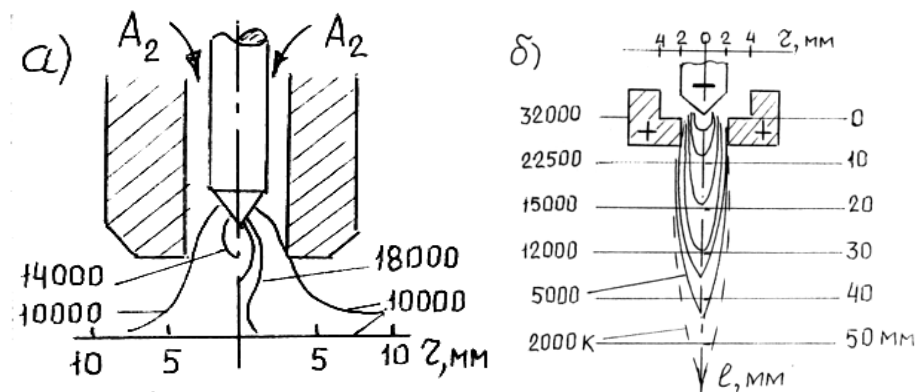


Рисунок 7.5 – Розподіл температури плазмової дуги (а) та плазмового струменю (б) за радіусом  $r$  та по довжині  $l$

Розподіл температури плазмової дуги та плазмового струменю за радіусом ( $r$ ) та по довжині ( $l$ ) вкрай нерівномірні. Максимальна температура спостерігається у центрі на осі плазмового потоку, причому вона є значно вищою, ніж у відкритій дугі.

Густина теплового потоку для плазмових джерел енергії є також вищою, ніж для відкритої дуги, і досягає  $10^6$  Вт/см<sup>2</sup>.

Нагрівання газу у плазмотроні призводить до різкого зменшення густини газу. За рахунок цього збільшується швидкість його впливу. Швидкість потоку є максимальною у центрі, де спостерігається максимальна температура та мінімальна масова витрата газу  $\rho \cdot V^2$ . Максимальна температура складає  $17000^\circ\text{C}$ , а максимальна швидкість досягає 2 км/с. Велика швидкість потоку плазми при його виході з плазмотрону дозволяє отримати значний газодинамічний напір, який зростає зі збільшенням сили струму.

У більшості випадків витрата газу у плазмотроні перевищує 1 л/с і протікання гарячого газу носить турбулентний характер.

Зменшення витрати газу до значень менше 0,1 л/с дозволяє отримати ламінарні плазмові струмені, які відрізняються великою довжиною (до 0,4 м) та високою стабільністю.

У потоці плазми можна отримати практично будь-яку речовину у молекулярній або паровій фазі. Плазмовий нагрів дозволяє отримати у паровій фазі нітриди та карбіди, оксиди тугоплавких металів та неметали високої чистоти. При цьому можна значно збільшити вихід продуктів реакції порівняно з іншими способами проведення хімічних реакцій. Прикладом таких процесів може служити плазмохімічне отримання абразивних матеріалів на основі бору, осадження на робочій поверхні металорізального інструмента нітриду титану і т. д.

## **7.2 Технологія плазмової обробки**

### **7.2.1 Плазмове нагрівання**

Нагрівання деталей та матеріалів до невисоких температур (нижче точки їхнього плавлення) з допомогою плазмових пальників використовується порівняно рідко, проте останнім часом все частіше застосовується плазмово-механічна обробка металів, де здійснюється таке нагрівання. Сутність цього методу полягає у тому, що при обробці, наприклад, різанням високоміцних металів та сплавів перед різцем встановлюється плазмотрон, що нагріває вузьку зону оброблюваного матеріалу. При цьому міцність знижується, а пластичність підвищується, завдяки чому можна без шкоди для якості поверхні збільшити глибину різання та подання. Немає окиснювання поверхні.

Застосування плазмового нагрівання при обточуванні циліндричних заготовок діаметром 100...350 мм з жаростійких нікелевих сплавів, вольфраму та молібдену показало, що продуктивність обробки збільшиться у 6...8 раз при

зменшенні зносу різців у 5...6 разів. Швидкість знімання металу при цьому може досягати 3...4 кг/хв.

Плазмове нагрівання до більш високих температур може призводити до оплавлення шорсткостей механічно обробленої поверхні, покращуючи тим самим технологічні показники.

### 7.2.2 Плавлення рідини

Плавлення металів та сплавів, а також неметалевих матеріалів з використанням плазмового нагріву стало дуже поширеним. Даний спосіб відрізняється високою стабільністю, простотою та гнучкістю технологічного процесу.

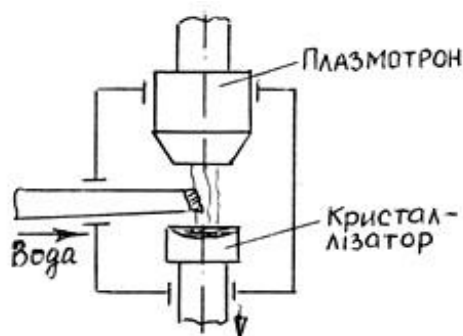


Рисунок 7.6 – Схема печі для плавлення у водоохолоджуваний кристалізатор

Найпоширенішою схемою є схема печі для плавлення у водоохолоджуваний кристалізатор. У таких печах зазвичай виплавляють складнолеговані сплави, наприклад, інструментальні сплави. При цьому, завдяки невеликому вмісту в металі неметалічних включень у вигляді оксидів та кисню, його механічні властивості (особливо пластичність) помітно підвищуються.

Плазмове нагрівання використовується також для плавлення металу з подальшим подрібненням розплавлення та кристалізацією у вигляді малорозмірних крапель.

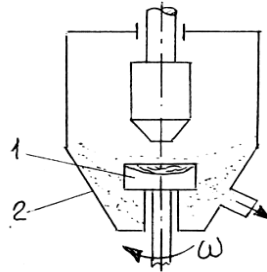


Рисунок 7.7 – Схема плавлення з отриманням малорозмірних крапель

1 – тигель; 2 – кристалізатор

Плазмове нагрівання використовується також для плавлення металу з подальшим подрібненням розплаву та кристалізацією його у вигляді малорозмірних крапель. У подальшому цей матеріал застосовують як вихідний продукт порошкової металургії, для наплавлення і т. д.

Подрібнення металу найчастіше отримують розбрикуванням розплавленого металу при обертанні тиглю 1. Потрапляючи на холодні стінки кристалізатора 2, краплі рідкого металу твердіють та у вигляді гранул збираються на дні камери, причому велика швидкість охолодження розплавленого металу дозволяє отримати нерівноважні структури зі специфічними властивостями.

### 7.2.3 Зварювання та наплавлення

Зварювання з використанням плазмових джерел енергії застосовується все ширше, і таким чином порівняно зі звичайною вільно палаючою електричною дугою вдається отримати велику глибину проплавлення та меншу ширину шва та, відповідно, більш вузьку зону термічного впливу. Процес йде з більшою швидкістю при покращенні якості зварного шва.

Плазмовим зварюванням за 1 прохід зварюють деталі товщиною до 20 мм, що дає можливість істотно підвищити продуктивність процесу, зменшити деформації, що виникають при зварюванні та отримати врешті більш працездатне зварне з'єднання.

Одним з різновидів процесу плазмового зварювання є мікроплазмове зварювання, яке характеризується силою струму плазми близько 0,1...10 А. Товщина зварюваних заготовок зазвичай складає 0,025...1,0 мм (фольга) – іншими методами неможливо зварювати (деталі радіоелектронної техніки).

Плазмове наплавлення використовується для нанесення на оброблювані заготовки поверхневих шарів (найчастіше з металів та сплавів, відмінних за складом від матеріалу підкладки) з метою підвищення експлуатаційних властивостей деталей. Для наплавлення зазвичай застосовують матеріали зі спеціальними властивостями (високою твердістю, підвищеною зносотривкістю, корозійною та термотривкістю). Наплавлення дозволяє отримати вироби з дешевих конструкційних матеріалів з раціональним розподілом властивостей по окремих елементах. При цьому значно знижується витрата дорогих легувальних матеріалів. Товщина наплавлених за 1 прохід шарів може досягати 4...5 мм; можливе багат шарове наплавлення.

Наплавлення проводять плазмовим струменем, що дає можливість регулювати глибину проплавлення основного металу за допомогою зміни відстані між пальником та заготовкою. Щоб забезпечити захист ванни розплавленого металу від взаємодії з атмосферними газами, у якості плазмотвірних газів використовують аргон та водень. Наплавлення робочих лез інструментів дозволяє економити дефіцитні та дорогі інструментальні сталі (Р18, Р6М5). Маса напавленої інструментальної сталі (на звичайну вуглецевисту сталь) зазвичай не перевищує 4...5% від загальної маси інструмента.

За допомогою плазмового наплавлення в ремонтних цілях відновлюють дорогі вузли та деталі (штампи, прес-форми, валки і т. д.) металообробного обладнання.

#### 7.2.4 Напилення

Існує два основні різновиди процесу:

- подавання матеріалу у плазмотрон у вигляді прутка або дроту;
- подавання матеріалу у плазмотрон у вигляді порошку (оксиди, нітриди, карбіди).

Завдяки плазмовому напиленню зазвичай отримують шар малої товщини ( $10^{-6} \dots 10^{-3}$  м). Металеві покриття, що отримуються за допомогою плазмового напилення, найчастіше всього складаються з вольфраму, молібдену, нікелю, кобальту та інших металів та сплавів з достатньо високою температурою плавлення. Продуктивність процесу може досягати декількох кг напилюваного матеріалу на годину, а густина напилюваного шару складає зазвичай 80...90% від густини монолітного металу. Тонкі (до 0,1...0,3 мм) напилені шари мають велику густину та кращу зчепність з напилюваним підшаром, ніж товстіші.

Покриття за призначенням бувають різними: жаротривкі, корозійностійкі, захисні. Для останніх використовують оксиди алюмінію та цирконію.

Напилення підвищує тривкість кокілів, виливниць для лиття; зносотривкість фільтрів для протягування (волочіння) молібденових прутків при напиленні збільшується у 5...10 разів. Одним з різновидів процесу плазмового напилення є іонна технологія нанесення покриттів за допомогою плазмових прискорювачів.

У промисловості іонна технологія використовується для збільшення терміну служби металорізального інструмента та штамсів. При цьому зносотривкість інструмента збільшується у 2...5 разів.

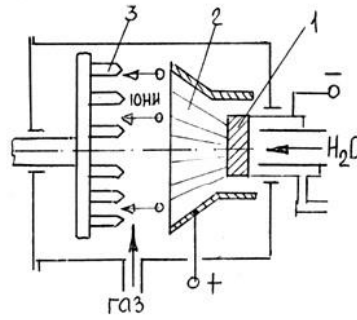


Рисунок 7.8 – Схема іонної технології нанесення покриттів: 1 – катод водоохолоджуваний; 2 – плазма; 3 – оброблювана поверхня

Матеріал покриття отримують випаровуванням у вакуумі водоохолодженого катоду 1. Потім його іонізують у електричному розряді та перетворюють на плазму 2, яка з допомогою електромагнітного поля прискорюється та фокусується у потік в напрямку до оброблюваної поверхні 3.

Значна енергія, яку можна передати іонам у плазмі, дозволяє глибоко вводити їх у оброблювані поверхні та отримувати міцні поверхневі покриття (та металеві плівки).

Завдяки плазмовому формуванню деталей за допомогою напилення отримують тонкостінні деталі та заготовки складної геометричної форми з важкооброблюваних металів (вольфраму, молібдену). Матеріал у вигляді плазми напилюють на оправки або шаблони, які надалі можуть або розчинятися хімічним шляхом (якщо вони виготовлені з алюмінію або міді), або розбиратися на частини.

Як правило, шар, отриманий після напилення, є крихким, має шарувату структуру. Після відпалу він набуває рівноважної дрібнозернистої структури та механічних властивостей, що дозволяють піддавати його механічній обробці та використовувати у конструкціях.

Формування деталей плазмовим напиленням використовують для тиглів, деталей ракетних двигунів та МГД-генераторів.



### 7.2.5 Різання

Це термічне різання, що не залежить від властивостей розрізуваних матеріалів. Існує можливість розрізання заготовок значної товщини (до 250...300 мм), при якій можна отримати розрізи будь-якої конфігурації.

Є два основних різновиди плазмового різання: роздільна та поверхнева – стругання (рис. 7.9).

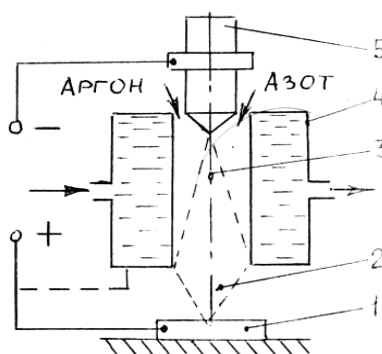


Рисунок 7.9 – Схема плазмової голівки: 1 – заготовка; 2 – плазмовий струмінь; 3 – дуговий розряд; 4 – мідний водо охолоджуваний електрод; 5 – вольфрамовий електрод

При ручних роботах використовується напруга у 180 В, для машинних – 500 В.

При струганні та точінні (для видалення деформованого шару) плазмову голівку ставлять під кутом 40...60° до оброблюваної поверхні.

При мікроплазмовому різанні використовується величина струму у 5...100 А для розрізання заготовок товщиною у 6...8 мм. При цьому ширина розрізу виходить не більше 0,8...1,0 мм.

### 7.3 Контрольні запитання

1. Що таке плазма?

2. Чим відрізняється плазмова дуга від вільно палаючої електричної дуги?
3. Які є основні фізичні характеристики плазми?
4. Які є основні фізико-хімічні ефекти при взаємодії плазми з речовиною?
5. Коли з'явився термін «плазма»?
6. Основні схеми плазмотронів.
7. Який ефект плазмова обробка при зміцненні поверхні?
8. У чому полягає сутність процесів плазмового різання та стругання?
9. У яких випадках доцільно застосовувати плазмове прогрівання при обробці металів різанням?
10. Для яких виробів застосовується плазмове формування поверхонь?
11. У яких випадках доцільно застосовувати плазмове стругання?

## **8. ЕЛЕКТРОГІДРАВЛІЧНА ОБРОБКА**

Процес електрогідравлічної обробки відноситься до методу обробки тиском (рис. 8.1).

Швидка деформація заготовки 1 спричиняється силами  $F_1$ , що діють на її поверхні. Заготовка деформується і при ударі об стінки матриці 2. Сили  $F_2$  створюються внаслідок гідравлічного випаровування деякої речовини 3 при пропусканні через неї короткочасний імпульс струму  $I$ .

Рідина 4 служить для передавання механічних зусиль до заготовки 1, яка фіксується ущільнюючими деталями 6. Імпульсний струм виходить при розряджанні конденсаторної батареї 7, яка приєднується до електродів 5 з допомогою перемикача 9. Конденсатори заздалегідь заряджаються до високої напруги від випростувача 8. При деформації заготовки повітря з порожнини матриці 2 видаляється через отвір 10.

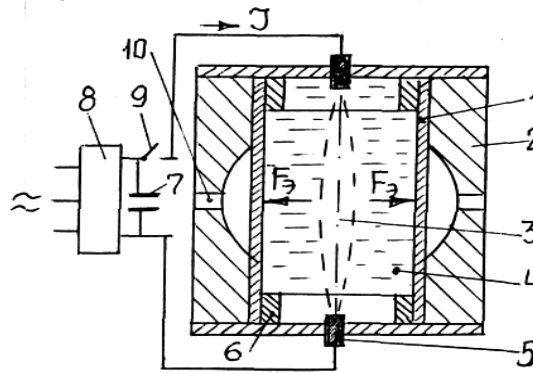


Рисунок 8.1 – Схема електрогідравлічної обробки: 1 – заготовка; 2 – матриця; 3 – речовина; 4 – рідина; 5 – електроди; 6 – ущільнювальні деталі; 7 – конденсаторна батарея; 8 – випростувач; 9 – перемикач; 10 – отвір для видалення повітря

Електрогідравлічна обробка застосовується як для формоутворення, так і для розділення заготовки (штампування, згинання, карбування, витягання, роздавання, а також для подрібнення крихких матеріалів, очищення великих відливок від пригару, різання, розвальцювання труб) [1]. Сама обробка відбувається дуже швидко.

Відомі два основні різновиди електропідривного формоутворення, в яких застосовують:

- високовольтний розряд при пробитті діелектричної рідини, яка використовується як випаровна речовина, а також для передавання механічних зусиль до заготовки;
- електричне підривання провідникової випаровної речовини, поміщеної у рідину, що служить передавачем зусиль до заготовки.

При високовольтному розряді, інша назва якого – електрогідравлічна обробка, використовують електрогідравлічний ефект.

Робочою речовиною, як правило, служить технічна вода. Електричний розряд протікає у герметичній камері. У околі каналу розряду відбувається майже миттєве випаровування рідини, утворюється ударна хвиля, яка і є

джерелом сили для деформації заготовки, а також високий тиск у газопаровій бульбашці, яка перебуває у процесі виникнення. Енергія розряду може досягати десятків кілоджоулів, а тривалість складає декілька десятків мікросекунд (мс), миттєва сила струму досягає 50 кА при довжині розрядного проміжку у декілька сантиметрів. Швидкість фронту ударної хвилі помітно перевищує швидкість звуку у воді та доходить до 3000 м/с (швидкість звуку у воді складає 1500 м/с). Початкова швидкість стінок газової бульбашки може бути більше 100 м/с, найбільший радіус бульбашки – декілька сантиметрів, максимальний тиск у ній – до  $10^{10}$  Па.

Розміри оброблюваних листових заготовок товщиною до 5 мм можуть перевищувати один метр.

При електричному підриванні конденсатор розряджається на провідник у вигляді тонкого дроту (або декількох дротів, фольги або сітки). Провідник розміщують у діелектричній рідині. Початкова напруга розряду у даному випадку досягає декількох кіловольт (значно менше, ніж у першому різновиді процесу). При протіканні струму більшої сили провідник нагрівається і відбувається його підривне випаровування. Виникає газова бульбашка, тиск у якій доходить до  $10^{10}$  Па. У якості матеріалів провідників застосовують мідь, ніхром, константан-сплав міді (основа) плюс 40% нікелю та 1,5% марганцю. Довжина прямого дроту – до декількох десятків сантиметрів, діаметр – 0,1...0,3 мм.

Переваги електрогідравлічного формоутворення:

- а) простота оснащення;
- б) рівномірність навантаження заготовки;
- в) збереження початкової якості поверхні листової заготовки;
- г) можливість виготовити різноманітні деталі з заготовок одного виду;
- д) не потрібні додаткові операції;
- е) обладнання легко вбудовується у автоматичні лінії.

Електрогідравлічні устаткування в залежності від призначення відрізняються будовою камер, розташуванням заготовки, конфігурацією електродів. Ударна хвиля може мати сферичну, циліндричну або пласку форму.

Застосовують ще один різновид електропідривної обробки – електричне підривання у вакуумі електропровідного матеріалу (зазвичай металевого дроту) з метою нанесення покриття. Покриття наносять на різні матеріали (у тому числі кераміку та скло) без попереднього нагріву виробу. За допомогою цього способу виготовляють деталі рентгенівської апаратури та електронних приладів, циліндрів автомобільних двигунів та ін.

## **8.1 Фізика процесу**

### **8.1.1 Формоутворення під дією електричного розряду у рідині**

У схемі рисунку 8.1. напруга  $U_c$  на обкладках конденсатора повинна бути достатньою для пробиття міжелектродного проміжку. Коли напруга  $U_c$  досягне пробивного значення  $U_{np}$ , у розрядному ланцюгу швидко наростає сила струму  $I$ . У рідині виникає канал розряду та газопарова бульбашка. Внаслідок високого тиску у робочій камері заготовка 1 деформується і заповнює порожнину у матриці 2.

### **8.1.2 Пробиття рідини**

Початкова енергія конденсатора підраховується за формулою:

$$E_c = \frac{C \cdot U_c^2}{2} \quad (8.1)$$

де  $C$  – ємність батареї конденсаторів, Ф;

$U_c = U_{np}$  – вважають так, В.

Механізм пробиття робочого середовища загалом такий самий, як і при ЕЕО. Проте технічна вода володіє деякою електропровідністю, завдяки чому відбувається її місцеве закипання ще тоді, коли напруга на електрод  $U_c < U_{np}$ . Тому помітна частина енергії витрачається ще до пробиття (через електропровідність води). Після пробиття у рідині утворюється канал розряду початковим діаметром у десятки частки мм. В оточуючій рідині виникає ударна хвиля. Щоб більша частина енергії конденсаторів перетворилася у енергію ударної хвилі, необхідний розряд з високою швидкістю наростання сили розрядного струму  $I$ . Цього можна досягти підбиранням параметрів розрядного ланцюга.

Після розрядів у воді накопичуються продукти ерозії електродів та газові бульбашки. Якщо рідину не міняти, то тривалість її використання впливає на значення пробивної напруги, на стійкість пробиття та подальшого розряду, а також на показники самої обробки.

Розряд іноді стабілізують поздовжнім магнітним полем.

### 8.1.3 Процеси у розрядному ланцюгу

Для описування технологічних процесів розрядний ланцюг представляють схемою заміщення – сукупністю ідеалізованих елементів: індуктивних та ємнісних.

Схема заміщення містить ємність  $C$  конденсаторної батареї, а також невелику індуктивність  $L_{\text{екв}}$  підвідних проводів та самого каналу розряду. Активним опором  $R_{\text{екв}}$  враховують усі необоротні втрати енергії, головним чином у каналі розряду.

Схема заміщення містить ємність  $C$  конденсаторної батареї, а також невелику індуктивність  $L_{\text{екв}}$  підвідних проводів та самого каналу розряду. При активному опорі  $R_{\text{екв}}$  враховують усі необоротні втрати енергії, головним чином у каналі розряду.

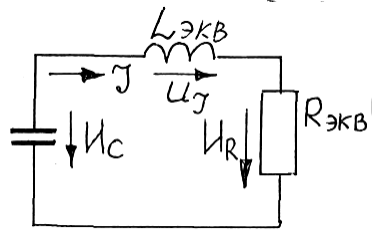


Рисунок 8.2 – Схема заміщення розрядного ланцюгу

Зазвичай приймають те, що розрядний ланцюг лінійний, а  $R_{\text{экв}} = \text{const}$ . Електричний стан ланцюга описують рівнянням, що витікає з 2-го закону Кірхгофа для миттєвих напруг:

$$U_c + U_L + U_R = 0 \quad (8.2)$$

де  $U_c$ ,  $U_L$ ,  $U_R$  – миттєві напруги відповідно на ємнісному, індуктивному та резистивному елементах.

З електротехніки відомо, що ці напруги пов'язані з миттєвим значенням сили розрядного струму  $I$ :

$$U_c = \frac{1}{C} \int I \cdot d\tau; \quad U_L = L \frac{dI}{dt}; \quad U_R = R_{\text{экв}} \cdot I;$$

Технологічні показники обробки значною мірою залежать від характеру розряду. При великому еквівалентному опорі  $R_{\text{экв}}$  розряд є аперіодичним, а при малому опорі  $\left( R_{\text{экв}} < 2\sqrt{\frac{L_{\text{экв}}}{C}} \right)$  – згасаючий періодичний з періодом  $T$ .

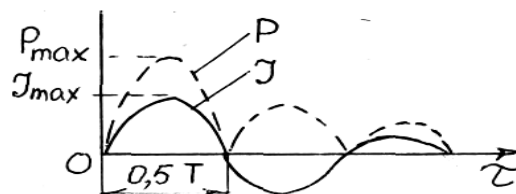


Рисунок 8.3 – Характер розряду

Щоб було швидше наростання струму  $I$  та його опір, повинно бути:

$$R_{\text{экв}} < 2\sqrt{\frac{L_{\text{экв}}}{C}}, \text{ Ом} \quad (8.3)$$

а також миттєва потужність  $P=I^2 \cdot R_{\text{экв}}$  у каналі.

Це є необхідною умовою створення потужної ударної хвилі і перетворення значної частини електричної енергії у механічну.

За перший півперіод  $0 \leq \tau \leq 0,5T$  у каналі виділяється значна частина енергії конденсаторної батареї. Амплітуда сили струму та енергія, що виділяється у каналі, зменшуються по мірі згасання коливального процесу у розрядному ланцюгу.

При початковій умові, тобто  $R_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{L_{\text{экв}}}{C}}$ , найбільша сила струму дорівнює:

$$I_{\text{max}} = 0,5 \cdot U_{\text{пр}} \sqrt{C/L_{\text{экв}}}, \text{ А} \quad (8.4)$$

Ця сила струму досягається приблизно за час  $\tau = \frac{T}{4}$ , де  $T$  – період коливань розрядного ланцюга.

Як відомо з електротехніки:

$$T = 2\pi\sqrt{L \cdot C}, \text{ с} \quad (8.5)$$

звідки  $\frac{T}{4} = 1,6\sqrt{L \cdot C}$ ,

де  $L$  – індуктивність, Гн;

$C$  – ємність, Ф.

У цей момент потужність дорівнює

$$P = R_{\text{экв}} \cdot I_{\text{max}}^2, \text{ кВт} \quad (8.6)$$

Впродовж першої чверті періоду миттєва потужність розряду змінюється приблизно за лінійним законом (рис. 8.3). Можна прийняти те, що миттєва потужність збільшується пропорційно часу:



$$P = P_{\max} \cdot \tau / 0,25 \cdot T, \text{ кВт} \quad (8.7)$$

Канал розряду між електродами для оточуючої рідини представлений циліндричним джерелом енергії. Інтенсивність процесу визначається питомою потужністю  $P/\ell_n$ , де  $\ell_n$  – довжина проміжку між електродами.

Якщо у співвідношення (8.7) підставити вираз (8.4), (8.5), (8.6), то тоді впродовж першої чверті періоду питома потужність виявиться пропорційною часу розряду:

$$P/\ell_n = \kappa_p \cdot \tau, \quad (8.8)$$

$$\text{де } \kappa_p = \frac{0,15 \cdot U_{np}^2}{L_{\text{екв}} \cdot \ell_n}$$

Стала  $\kappa_p$  – одна з найважливіших характеристичних величин, що визначають технологічні показники електрогідравлічної обробки.

З електротехніки також відомо, що у магнітному полі індуктивного елемента накопичується енергія:

$$E_L = \frac{L_{\text{екв}} \cdot I^2}{2}$$

Ця енергія є максимальною наприкінці першої чверті періоду, коли сила струму досягає значення  $I_{\max}$ . Коли струм впродовж другої чверті періоду зменшується, енергія магнітного поля переходить в енергію електричного поля конденсаторів. Запасання енергії у магнітному полі зменшує частку енергії конденсаторів, яка витрачається впродовж першої чверті періоду на створення ударної хвилі. Для підвищення ККД процесу необхідно зменшувати індуктивність розрядного ланцюга.

Ударна хвиля – це область підвищеного тиску, що розповсюджується у рідині в радіальному напрямку від каналу розряду. На невеликій відстані від каналу розряду ударна хвиля має форму циліндра, а при віддаленні від області розряду стає сферичною. На фронті ударної хвилі величини, що описують стан рідини, змінюються стрибком. Зокрема тиск збільшується від  $P_a$  до дуже

високого тиску на фронті  $P_{\phi} \gg P_a$ . Внаслідок стиснення підвищується густина рідини від нормальної  $\rho_{ж}$  до  $\rho_{\phi}$ . На фронті раніше нерухомі частинки рідини набувають швидкості  $V_{сп}$ . Фронт ударної хвилі рухається зі швидкістю  $V_{у.в.}$ .

Для розрахунку показників електрогідравлічної обробки необхідно знати значення зазначених величин на фронті ударної хвилі.

Якщо у системі координат, що рухається разом з фронтом, скласти закон збереження, то величини виявляться взаємозв'язаними. У такій системі нерухома рідина перед фронтом володіє відносною швидкістю –  $V_{у.в.}$ , а швидкість рідини відносно фронту дорівнює  $V = V_{у.в.} - V_{\phi}$ .

Згідно закону збереження мас

$$\rho_{ж} \cdot V = \rho_{\phi} \cdot (V_{у.в.} - V_{\phi}) \quad (8.9)$$

У відповідності до закону збереження імпульсу

$$P_a + \rho_{ж} \cdot V^2 = P_{\phi} + \rho_{\phi} (V_{у.в.} - V_{\phi})^2 \quad (8.10)$$

Після пробиття рідини від осі каналу розходитьсся ударна хвиля. Швидкість фронту ударної хвилі (з теорії ударних хвиль) дорівнює:

$$V_{у.в.} = 0,74 \sqrt{\frac{K_p}{\rho_{ж}}}, \text{ м/с} \quad (8.11)$$

Зазвичай при  $\tau < (0,1 \dots 0,3)$  мкс швидкість фронту  $V_{у.в.} \approx 10^4$  м/с, а радіус  $r_{\phi} \approx 1$  мм.

Швидкість фронту  $V_{у.в.}$  не може бути меншою за швидкість звуку у рідині  $V_{зв}$ , а стала  $K_p$  має найменше допускне значення  $K_{p_{min}}$ , що визначається згідно виразу (8.11)

$$0,74 \sqrt{\frac{K_{p_{min}}}{\rho_{ж}}} > V_{зв} \quad (8.12)$$

Згідно виразу (8.8) та (8.12), у застосовуваній робочій рідині ударна хвиля може виникнути лише при певних співвідношеннях між початковою напругою розряду  $U_{np}$ , довжиною проміжку та індуктивністю розрядного ланцюга  $L_{зкв}$ .

Таким чином, нерівністю (8.12) встановлюються умови здійсненності електрогідравлічного формоутворення.

Тиск на фронті розбіжної ударної хвилі  $P_\phi$  можна знайти, якщо підставити величину  $(V_{y.в.} - V_\phi)$  з виразу (8.9) у рівняння (8.10) і прийняти те, що для води існує зв'язок між тиском та густиною:

$$P_\phi - P_a = 3 \cdot 10^9 \left( \frac{\rho_\phi}{\rho_{жс}} - 1 \right), \text{ Па}$$

Для води тиск на фронті ударної хвилі можна оцінити за формулою:

$$P_\phi = \rho_{жс} \cdot V_{y.в.}^2 - 3 \cdot 10^9, \text{ Па} \quad (8.13)$$

Якщо у співвідношення (8.13) підставити вираз (8.8) та (8.11), то:

$$\rho_\phi = 0,5 \sqrt{\rho_{жс} \cdot K_p} - 3 \cdot 10^9 = 0,2 \cdot U_{np} \sqrt{\frac{\rho_{жс}}{L_{экс} \cdot \ell_n}} - 3 \cdot 10^9 \quad (8.14)$$

Так само, як і швидкість фронту, тиск на фронті не залежить від ємності розрядного ланцюга, проте зростає з підвищенням напруги, зменшенням індуктивності та довжини проміжку.

Співвідношенням (8.14) наперед визначаються основні показники електрогідравлічної обробки при циліндричній ударній хвилі.

Зазвичай швидкість частинок на фронті  $V_\phi > 100$  м/с. Після того, як зростання потужності розряду припиняється, тобто, при  $\tau \geq 0,25 T$ , швидкість фронту, тиск та швидкість частинок рідини починають зменшуватися.

При великому віддаленні від осі каналу ударна хвиля переходить у потужну акустичну хвилю, швидкість фронту якої дещо збільшує швидкість звуку (у воді приблизно 1500 м/с).

Деформація заготовки спричиняється силами, що виникають при підході до заготовки фронту ударної хвилі. Як відомо з фізики, сила, з якою потік діє на нерухому перешкоду (у даному випадку – на заготовку), являє собою суму гідростатичного  $P_\phi$  та динамічного  $(0,5 \cdot \rho_\phi \cdot V_\phi^2)$  тисків.

Густина поверхневих сил  $f_n$  є максимальною, коли фронт ударної хвилі підходить до ще нерухомої заготовки та  $V_3 = 0$ , а гідростатичний тиск потоку дорівнює тискові  $P_\phi$  на фронті ударної хвилі. Тому

$$f_n = P_\phi + 0,5\rho_\phi \cdot V_\phi^2 \quad (8.15)$$

Тиск на фронті зберігається сталим приблизно всю першу чверть періоду, тобто до тих пір, поки ударна хвиля не відійде від вісі каналу на відстань  $0,25 \cdot T \cdot V_{y.в.}$ .

Якщо заготовка розташована від осі розряду на відстані  $\ell < 0,25 \cdot T \cdot V_{y.в.}$ , то тиск на фронті є найбільшим і визначається співвідношенням (8.14).

Густина поверхневих сил повинна перевищувати межу плинності, тобто  $f_n > \sigma_\tau$ .

Експериментально встановлено, що тиск на фронті ударної хвилі у десятки та сотні разів перевищує  $\sigma_\tau$ .

Коли фронт ударної хвилі дістанеться поверхні заготовки, то через деякий час ( $\approx 100$  мкс) починається саме формоутворення. Ударна хвиля частково відображається, а частково переходить у заготовку, де розповсюджуються поздовжні та поперечні хвилі.

При відображенні ударної хвилі від заготовки в рідині можлива кавітація.

Абсолютні швидкості деформації заготовки перевершують 100 м/с.

#### **8.1.4 Штампування фасонних деталей**

На рисунку 8.4 дана залежність міжелектродного проміжку  $\ell_n$  від напруги на електродах  $U_c$ .

Крива 1 відповідає камері малої місткості, криві 2 та 3 – більшій місткості.

При обробці у воді оптимальну довжину міжелектродного проміжку можна визначити за співвідношенням:

$$\ell_n = 1,14 \cdot 10^{-6} \cdot U_c \sqrt{L_{\text{экс}} \cdot C}, \text{ мм} \quad (8.16)$$

де  $U_c$  – задана напруга на конденсаторах, В;

$L_{\text{экс}}$  – індуктивність, Гн;

$C$  – ємність конденсаторів, Ф.

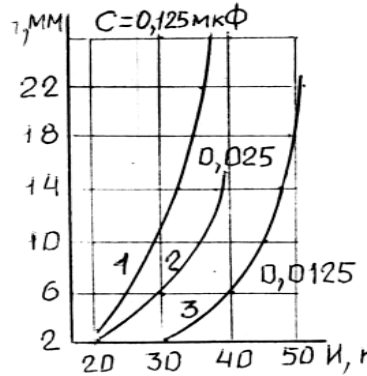


Рисунок 8.4 – Залежність  $\ell_n$  від напруги на електродах  $U_c$

Для електрогідравлічного формоутворення з підривним провідником оптимальні довжину  $\ell_n$  та діаметр  $d_{np}$  дроту також визначають по емпіричних формулах в залежності від показників устаткування:

$$\ell_{np} = 2 \cdot 10^{-6} \cdot U_c \sqrt{L_{\text{экс}} \cdot C}, \text{ мм} \quad (8.17)$$

$$d_{np} = 2,1 \cdot 10^{-3} \sqrt[4]{\frac{U_c \cdot \sqrt{C^5}}{2 \sqrt{L_{\text{экс}} \cdot \gamma_{np} \cdot \rho_{np} \cdot q_{np}}}}, \text{ мм} \quad (8.18)$$

де  $\gamma_{np}$  – питома провідність матеріалів дроту, 1/Ом·см;

$\rho_{np}$  – щільність дроту, г/см<sup>3</sup>;

$q_{np}$  – теплота, необхідна для нагрівання та випаровування одиниці маси провідникового матеріалу, Дж/г.

## 8.2 Схема електропідривної обробки

### 8.2.1 Штампування

Для електрогідравлічного штампування застосовуються імпульси високої напруги, оскільки висока напруга на електродах менше 30 кВт дає несталий розряд. Окрім того, при підвищенні напруги зростає ККД процесу.

Електрогідравлічне об'ємне штампування та кування можуть здійснюватися за допомогою допоміжного елемента, що передає зусилля до заготовки, наприклад, металевого поршня. Причому робота гідросистем 1 повинна бути строго узгоджена за часом з електричними розрядами між електродами.

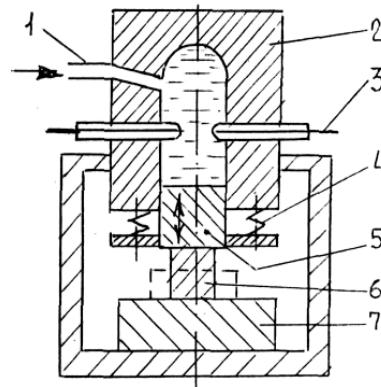


Рисунок 8.5 – Схема електрогідравлічного процесу: 1 – гідросистема; 2 – камера; 3 – електроди; 4 – пружина; 5 – поршень; 6 – заготовка; 7 – стіл

Також відоме електрогідравлічне штампування екструзією (від пізньолатинського слова *extrusion* – виштовхування). Екструдер може бути шнековим або черв'ячним. Для цієї мети декілька пар електродів розташовують у просторі послідовно

Якщо розряди в них виникають також послідовно з невеликою затримкою, то у камері можна отримати високий тиск. Заготовку розміщують за останніми електродами у ресивері, у якому є фільтера з виходом у атмосферу. Завдяки високому тиску у ресивері є можливим екструзійне витискування металу заготовки через отвір фільтери.

## 8.2.2 Очищення виробів

Очищення виготовлених деталей – це одна з найпоширеніших операцій у технології машинобудування. Використання електрогідравлічного очищення значно підвищує продуктивність цієї операції для багатьох видів виробів.

При використанні відомих способів очищення, наприклад, лиття – гідропіскоструминного, дробоструминного, дробометального та ін. дуже складно домогтися повної автоматизації процесу. З цієї точки зору при очищенні ливарних деталей складного профілю з високоміцних матеріалів переваги електрогідравлічного очищення проявляються повною мірою.

При використанні одного електроду необхідно підтримувати сталу висоту його розташування над заготовками, оскільки від неї залежать параметри розряду, а отже, і якість очищення виробів.

Зазвичай для цього застосовують механічні копіри, за допомогою яких електроди переміщуються в залежності від зміни положення оброблюваних поверхонь заготовок. Площа поверхні заготовки, яка надійно очищується одним розрядом, зазвичай обмежена колом діаметром 150...400 мм. Тому необхідно узгоджувати час між розрядами з відстанню, пройденою електродом.

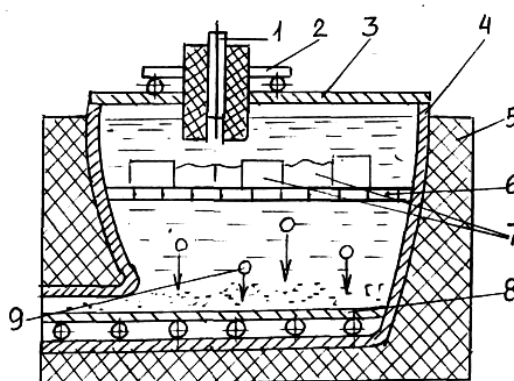


Рисунок 8.6 – Схема устаткування для електрогідравлічного очищення ливарних деталей: 1 – електрод; 2 – візок; 3 – траверса; 4 – ванна; 5 – основа; 6 – решітка; 7 – заготовки (деталі); 8 – транспортер; 9 – осаджені частинки

При очищенні декількома електродами їх встановлюють на відстані 300...400 мм один від одного. Очищення необхідно проводити відразу після лиття. Під дією електричних розрядів формувальна суміш відділяється від опок та лиття і разом зі стрижневими складами випадає через решітку у транспортер 8. Відходи йдуть знову у виробництво.

#### **8.2.2.1 Електрогідрравлічне очищення безперервно рухомої стрічки**

Схема очищення стрічки полягає у наступному. Крізь ущільнення стрічка входить у ванну з водою. Електроди встановлені над забрудненою стороною стрічки. Швидкість стрічки та число електродів обирають з вищенаведених умов.

#### **8.2.2.2 Електрогідрравлічне очищення у барабанах**

Дрібні заготовки очищують у даних пристроях. У барабан заливають робочу рідину. Один або декілька електродів випускають розряди. При обертанні барабану дію розрядів поступово випробовують на собі всі заготовки. Для стабілізації процесу необхідне певне навантаження за об'ємом барабану (коефіцієнт заповнення) заготовками.

Очищення барабану проводиться нагнітанням робочої рідини.

#### **8.2.2.3 Електрогідрравлічне очищення великих заготовок**

Великі заготовки очищують за схемою «швабри» (рис. 8.7). На заготовку 6 крізь прокладку 1 встановлюється кулястий ковпак 3, у якому змонтовані патрубки 2 для подавання робочої рідини, а також електроди 5 та механічний маніпулятор 4 для переміщення ковпака по заготовці.



Переваги цього способу – у простоті пристрою, малій витраті робочої рідини. Цей спосіб застосовується для очищення корпусів суден «на плаву».

Електрогідравлічне очищення здійснюється за схемою, коли в результаті розряду у порожнині з неї крізь вузьке сопло викидається струмінь абразивної суспензії з дуже великою швидкістю.

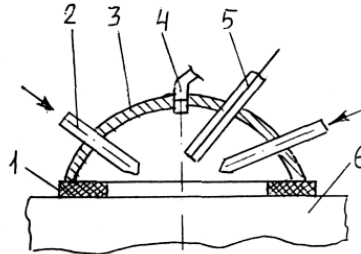


Рисунок 8.7 – Схема електрогідравлічного очищення великих заготовок: 1 – гумова прокладка; 2 – патрубок для робочої рідини; 3 – ковпак кулястий; 4 – механічний маніпулятор; 5 – електроди; 6 – заготовка

У робочу рідину безпосередньо перед її виходом з сопла можна додавати абразивний матеріал.

Для підвищення ефективності очищення у якості робочого середовища використовують електроліт, а на заготовку або на робоче середовище подають потенціал. Таким способом можна виробляти та розрізати заготовки товщиною до 6 мм.

### **8.3 Отримання нероз'ємних з'єднань електрогідравлічним способом**

Електрогідравлічну обробку використовують для розвальцювання, обтискування та інших подібних технологічних операціях. Це дозволяє механізувати наймасовіші операції, що раніше виконувалися вручну.

У суднобудуванні, енергетичному машинобудуванні, хімічній промисловості широко застосовуються трубчасті теплообмінники. Щоб

покращити робочі властивості теплообмінників, їх виготовляють з високолегованих сталей, що погано піддаються зварюванню.

Для кріплення труб у трубних решітках почали застосовувати електрогідравлічне запресування. Процес здійснюється за допомогою спеціальних патронів одно- або багаторазової дії.

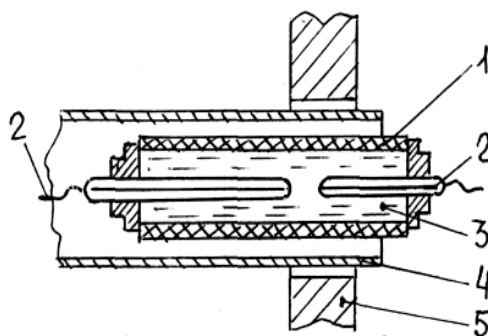


Рисунок 8.8 – Патрон одноразового використання: 1 – герметизована гумова трубка; 2 – електроди; 3 – робоча рідина; 4 – труба; 5 – трубна решітка (колектор)

При електрогідравлічній обробці виходить гарантований натяг. Якість з'єднання труби з колектором покращують завдяки цілому ряду конструктивних та технологічних заходів. Таким чином, на поверхні отворів колектора передбачають особливі рівчаки, які при розряді заповнюються пластично деформованим металом труби, завдяки чому підвищується зчепність труби і тим самим підвищується зчеплення труби з колектором (щільність).

Іноді на спряжені поверхні колектора та труби наносять шар речовини, яка при запресуванні заповнює всі нерівності на поверхнях зчеплення.

Для підвищення якості запресування необхідно дотримуватися ряду умов:

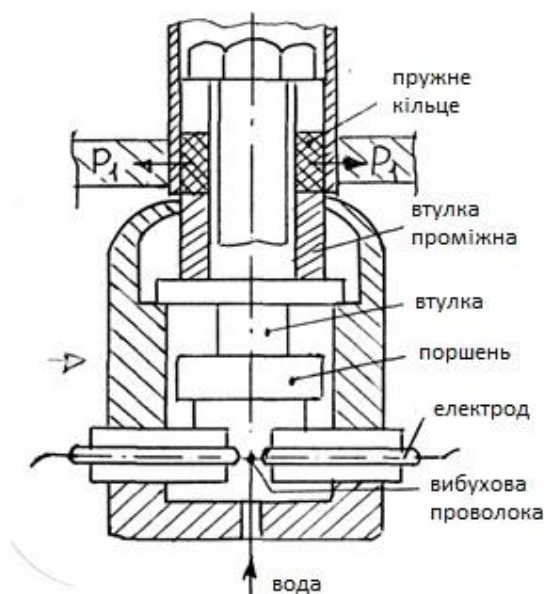
- діаметральний проміжок між внутрішньою поверхнею труби та зовнішньою поверхнею патрона не повинен складати більше 4% внутрішнього діаметру труби;

- довжина гільзи патрону дорівнює або є трохи меншою за довжину запресування (товщини трубної решітки – колектора);
- проміжок між трубою та стінкою отвору у колекторі не повинен перевищувати 2% зовнішнього діаметру труби;
- сполучувані поверхні повинні бути ретельно зачищеними та знежиреними.

Патрон багаторазової дії відрізняється тим, що область розряду винесена за межі труби. Принцип його роботи оснований на тому, що після вибуху дроту ударна хвиля діє на пружне кільце крізь поршень та дві втулки. В результаті пружне кільце стискається в осьовому напрямку та роздається у радіальному; з'являється сила  $P_1$ , яка здійснює розвальцювання. Для операції обтискування підричний дріт намотують на ізольовану поверхню циліндричної заготовки, попередньо покриту ізоляційним матеріалом (наприклад, лаком).

Шаг намотування та розмір дроту обирають таким чином, щоб необхідну деформацію заготовки отримати за 1 розряд.

При подаванні імпульсної напруги дріт вибухає, а деталь обтискує основу. Міцність з'єднання при цьому на 20...30% вища, ніж при запресуванні механічним способом. В результаті продуктивність вища, витрата енергії менша, а собівартість менша у 2,5 рази.



## Рисунок 8.9 – Схема патрону багаторазової дії

Електропідривною обробкою можна виправити браковані вироби: відновити роздаванням розміри зношеного поршневого пальця; виправити пом'ятість на заготовці, яку поміщають у контрольну форму і т. д.

### **8.4 Подрібнення матеріалів**

Електрогідравлічне подрібнення застосовується для здрібнення лише крихких матеріалів. Відомі два способи обробки: зовнішнім та внутрішнім розрядом. При зовнішньому розряді один електрод встановлюють над подрібнюваним матеріалом, який служить у якості другого електроду.

При багатократних розрядах матеріал поступово розкришується та провалюється крізь сітчасте дно (сито). При внутрішньому розряді у подрібненому тілі просвердлюють отвори, у які входять електроди. Подрібнення відбуваються внаслідок розрядів у об'ємі самого тіла.

Якщо необхідно подрібнити шматки металу, то їх змішують з яким-небудь в'язким діелектриком (пластмасою) у об'ємному відношенні 1:5. В результаті розрядів руйнуються переважно ті шматки металу, які потім відокремлюються від в'язкого наповнювача завдяки різниці густин.

На показники процесу подрібнення істотно впливає частота слідування розрядів. При великій частоті знижується ККД процесу, оскільки властивості робочого середовища не встигають відновитися.

У незмінюваному робочому середовищі оптимальна частота розрядів складає 15...25 Гц, а при змінюваному робочому середовищі частота розрядів є вищою.

На ступінь подрібнення впливає швидкість надходження матеріалу скоростю до розрядної зони. Надлишок матеріалу призводить до його ущільнення, але не до подрібнення.

При електрогідравлічному подрібненні у подрібнених частинок залишаються гострі краї, що виникають при крихкому розколюванні більших шматків. Таким чином бетон, отриманий на щебені, подрібненому на електрогідравлічному устаткуванні, володіє підвищеною міцністю, оскільки зменшується сумарна поверхня подрібнених частинок.

Звертаємо увагу на те, що абразив після електрогідравлічної обробки не має ані пласких, ані голчастих зерен, що покращує його технологічні властивості, оскільки виходить більше граней, гострих крайок.

При електрогідравлічному подрібненні зона обробки займає не більший об'єм. Тому можна використовувати обладнання, яке не відрізняється високою міцністю до ударних навантажень. Таке обладнання повинно мати просту будову та низьку металоемність.

Завдяки цьому продуктивність при подрібненні дрібних фракцій досягає 450 кг/ч, а при подрібненні великих фракцій – до 2,5 т/г.

## **8.5 Зміна властивостей поверхні**

Електрогідравлічний ефект використовують для зміни властивостей поверхні, зокрема для нанесення покриттів, зміцнення та наклепу, спікання та ущільнення.

### **8.5.1 Нанесення покриттів**

Можливо наносити як металеві, так і неметалеві покриття на поверхні заготовок. Процес протікає у вакуумі або у газовому робочому середовищі.

Дротовому електродові надають форму поверхні заготовки та розташовують його на відстані, при якій область дії електричного вибуху охоплювала б усю напилювану поверхню. Параметри імпульсу напруги задають задля умови, щоб увесь дровий електрод перетворився на пар, а не на

краплі розплаву. При цьому забезпечується надійне зчеплення наношуваного металу з поверхні заготовки.

Якщо наноситься неметалеве покриття, то початковий матеріал поміщають до порожнистого електроду. Коли провідник вибухає, цей матеріал, випаровуючись, покриває оброблювану поверхню.

Обирають параметри на випаровування матеріалу, а не на його спалювання.

Можливо отримати багатокомпонентне, а також багат шарове покриття завдяки подальшому чергуванню процесів з різними випарними матеріалами.

### **8.5.2 Зміцнення та наклеп**

Ці два явища майже завжди супроводжують електрогідравлічне формоутворення, оскільки на заготовку діють значні механічні навантаження. Можна здійснити і спеціальну технологічну операцію, у ході якої на заготовку діють також зусилля, що спричиняють лише зміцнення та наклеп, та не змінюють її форми.

Якщо вимоги до якості поверхні деталі невисокі, то замість другого електрода використовують саму заготовку. У протилежному разі застосовують два електроди, а зусилля до заготовки передають через проміжне діелектричне пружне («неслаба» ланка) тіло. Дану технологічну операцію застосовують, наприклад, для зміцнення дроту, а у якості електрода служить безперервно подаваний дріт.

### **8.5.3 Спікання та ущільнення**

При електрогідравлічному розряді у масі ошурок або стружки завдяки високому тискові матеріали ущільнюються, а термічна дія струму призводить до їхнього спікання. Цей процес застосовують для брикетування стружки. Відомі й інші області застосування електрогідравлічного ефекту: знегажування

(видалення газів), перемішування рідин, видалення шлаків та домішок, отримання емульсій розплавів металів, деемульгування, для створення вібрації заготовок.

Електрогідравлічний ефект можна використовувати разом з іншими діями на заготовку. Так, при штампуванні або деформації великих та товстостінних заготовок спочатку застосовують електрогідравлічне формоутворення, при якому знижується  $\sigma_T$  оброблюваного матеріалу. Потім без паузи на дану ділянку заготовки діють підриванням звичайної вибухової речовини, і саме цим і завершується деформація заготовки.

Електрогідравлічний ефект застосовують для помпування робочих середовищ при ЕХО або ЕЕО, коли декілька пар електродів встановлюють по тракту руху робочого середовища та завдяки їхньому послідовному включенню здійснюється прокачування середовища.

## **8.6 Контрольні запитання**

1. Назвіть два основних різновиди електропідривного формоутворення.
2. Яким є принцип електрогідравлічного формоутворення при електричному розряді у рідині?
3. Поясніть принцип нанесення покриттів електричним підриванням провідників.
4. Які є основні технологічні схеми електрогідравлічного формоутворення?
5. Поясніть принцип електрогідравлічного штампування.
6. У чому полягає принцип електрогідравлічного запресування елементів і які є особливості даної операції?
7. Поясніть процес електрогідравлічного подрібнення матеріалів та зміни властивостей поверхні.

## 9 МАГНІТНОІМПУЛЬСНЕ ФОРМОУТВОРЕННЯ

Магнітноімпульсне формоутворення відноситься до методів обробки тиском. За технологічними параметрами цей вид обробки близький до електропідривного формоутворення. Сила, що спричиняє деформацію, створюється за рахунок електромагнітних ефектів безпосередньо у самій заготовці, виконаній з електропровідного матеріалу.

У даному випадку не потрібно жодних проміжних робочих середовищ для передавання механічних зусиль на заготовку. Схема методу показана на рисунку 9.1.

Від випростувача 1 заряджається батарея конденсаторів 2, у електричному полі яких до початку обробки накопичується енергія:

$$E_c = \frac{C \cdot U_c^2}{2} \quad (9.1)$$

де:  $C$  – ємність батареї конденсаторів, Ф;

$U_c$  – напруга на обкладках конденсаторної батареї, кВ.

Ємність батареї доходить до 100 мкФ,  $U_c$  – десятків кіловольт.

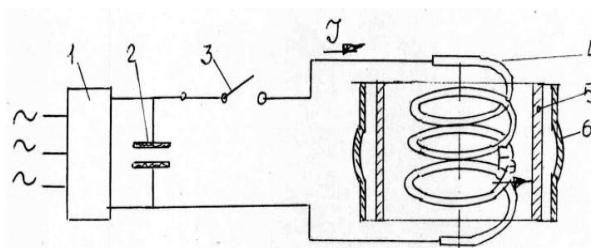


Рисунок 9.1 – Схема магнітноімпульсного формоутворення: 1 – випростувач; 4 – обвитка збудника; 2 – батарея конденсаторів; 5 – заготовка; 3 – перемикальний пристрій; 6 – матриця

За допомогою перемикального пристрою 3 заряджена батарея конденсаторів під'єднується до обвитки 4 збудника, призначеного для створення магнітного поля певної просторової конфігурації. Конденсатори



впродовж дуже короткого часу розряджаються на обвитку збудника, максимальна сила розрядного струму  $I$  доходить до сотень і тисяч кілоампер. В околі збудника, де встановлена заготовка 5, створюється швидкозмінне магнітне поле, яке призводить до виникнення електромагнітної сили  $F_m$ . Ця сила спричиняє деформацію листової заготовки, яка приймає форму матриці 6. Таким чином, у даному процесі енергія електричного поля конденсаторів перетворюється на енергію магнітного поля збудника, а потім на роботу деформації заготовки та частково у теплоту.

Формоутворення протікає дуже швидко. Час операції визначається в основному тривалістю зарядження конденсаторів та допоміжним часом на заміну заготовок.

Устаткування для магнітноімпульсної обробки (МІО) під час деформації заготовки не взаємодіє з зовнішнім середовищем, час обробки триває 100 мкс. МІО застосовується для виготовлення деталей товщиною менше 3 мм з листових заготовок зі сталі, латуні, алюмінію, міді та навіть зі сплавів з малою пластичністю.

Перше устаткування було створене академіком П.Л. Капіца у 20-х роках ХХ століття. На цьому устаткуванні вдалося досягти напруги магнітного поля  $H=10^7$  А/м. Наприкінці 50-х та на початку 60-х років дослідниками були побудовані устаткування, що створюють магнітні поля з напругою  $H=10^9$  А/м. Одночасно у всьому світі розроблялися пристрої промислового призначення МІО для технологічних цілей.

Переваги магнітноімпульсного формоутворення:

- простість обладнання;
- відсутність інструмента;
- можливість отримання деталей складної конфігурації;
- відсутність рухомих вузлів;
- простість автоматизації процесу;
- відсутність робочого середовища;
- відсутня необхідність герметизації робочого простору;

- формоутворення можна проводити крізь непровідну оболонку.

Однак при цьому існує потреба у ретельному обґрунтуванні застосування даного методу, оскільки сили, що спричиняють деформацію, істотною мірою залежать від фізико-хімічних та геометричних властивостей заготовки [7].

## 9.1 Фізика процесу

### 9.1.1 Різновиди магнітноімпульсного формоутворення

Магнітноімпульсне формоутворення здійснюється двома способами:

- електродинамічним – при взаємодії струмів у збуднику та заготовці, яка включена до ланцюгу розряду конденсаторів;

- індукційним – при взаємодії імпульсного магнітного поля, яке створюється збудником, зі струмами, наведеними у заготовці самим же полем; при цьому заготовку не включають до електричного ланцюга.

1. Електродинамічний спосіб оснований на електромеханічній взаємодії провідників, у яких протікають струми.

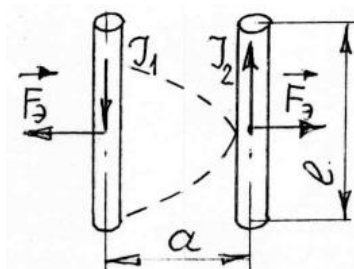


Рисунок 9.2 – Схема електромеханічної взаємодії провідників

Як відомо з електротехніки, паралельні проводи з однаково спрямованими струмами  $I_1$  та  $I_2$  притягуються, а з протилежно спрямованими – відштовхуються. Сила тяжіння (або відштовхування) прямо пропорційна

створенню сил струмів  $I_1, I_2$ , довжині провідів  $\ell$  та обернено пропорційна відстані між проводами  $a$ :

$$F_s = \frac{K_F \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot \ell}{a} \quad (9.2)$$

де  $K_F$  – коефіцієнт пропорційності.

В даному випадку циліндрична заготовка 1 та збудник 2 з'єднані послідовно за допомогою електропровідної кільцевої перекладки 3 та підключені до конденсаторної батареї. Струмом  $I$  розряду у збудникові 2 створюється магнітне поле з індукцією  $B$ , яке, взаємодіючи зі струмом  $I$  тієї самої сили у заготовці 1, створює у ній стискувальні сили  $F_s$ . Заготовка опресовує матрицю 4.

Оскільки струми у заготовці та збудникові відповідним чином розподілені за їхніми об'ємами, то загальні співвідношення для розрахунку електромагнітних сил  $F_s$  виявляються доволі складними. Ці сили зростають зі збільшенням сили струмів та зменшенням відстані між збудником та заготовкою. Недоліком електродинамічного способу є необхідність включення до розрядного ланцюга деформованої заготовки, що не завжди є можливим.

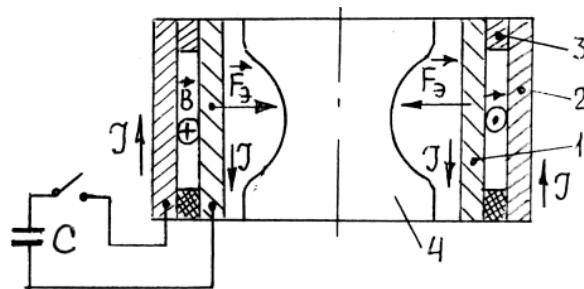


Рисунок 9.3 – Схема електродинамічного способу формоутворення:

1 – заготовка; 3 – кільцева перекладка; 2 – збудник; 4 – матриця

2. Індукційний спосіб більш поширений. Заготовку не включають до жодних електричних ланцюгів. Наприклад, всередині збудника 2 встановлена трубчаста заготовка 3, яка під дією електромагнітних сил  $F_s$  опресовує форму

(матрицю) 4. З фізики відомо, що густина енергії магнітного поля дорівнює  $0,5\vec{B} \cdot \vec{H}$ .

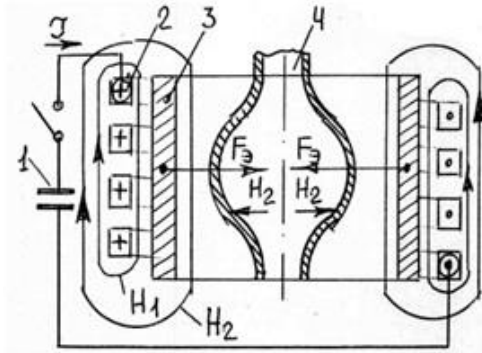


Рисунок 9.4 – Схема індукційного формоутворення: 1 – батарея конденсаторів; 2 – збудник; 3 – заготовка; 4 – матриця

Для повітря:

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot \vec{H} \quad (9.3)$$

де  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  – магнітна стала, Гн/м.

На початку розряду конденсатора 1 (впродовж десятків мкс) поблизу обвитки 2 на зовнішній стороні заготовки 3 напруженість магнітного поля  $H_1$  велика, а на внутрішній стороні напруженість  $H_2$  мала.

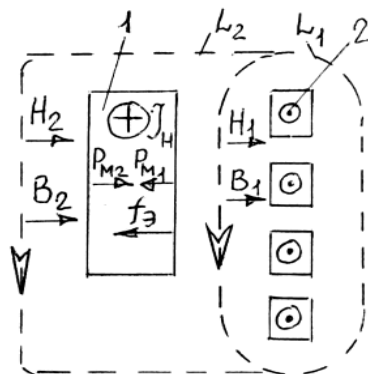


Рисунок 9.5 – Фрагмент індукційного способу

У поодинокому об'ємі простору зовнішньої частини заготовки густина магнітної енергії дорівнює:

$$0,5\vec{B}_1 \cdot \vec{H}_1 = 0,5\mu_0 \cdot H_1^2 \quad (9.4)$$

Так само у внутрішній частині:

$$0,5\vec{B}_2 \cdot \vec{H}_2 = 0,5\mu_0 \cdot H_2^2 \quad (9.5)$$

де  $\vec{B}_1$   $\vec{B}_2$  – значення магнітної індукції відповідно на зовнішній та внутрішній сторонах заготовки.

Розмірність густини енергії так сама, як і в тиску. Тому густинам енергії по обидві сторони заготовки відповідають різні магнітні тиски  $P_{m_1}$  та  $P_{m_2}$ . Густиною  $f_3$  електромагнітних сил на ділянці заготовки 1 називається різниця магнітних тисків  $P_{m_1} - P_{m_2}$  з зовнішньої та внутрішньої сторін. Ці магнітні тиски є перпендикулярними векторові  $\vec{B}$  та кількісно дорівнюють місцевим густинам магнітної енергії.

$$P_{m_1} = 0,5 \cdot \mu_0 \cdot H_1^2; \quad P_{m_2} = 0,5 \cdot \mu_0 \cdot H_2^2$$

Поверхнева густина електромагнітних сил дорівнюватиме:

$$f_3 = P_{m_1} - P_{m_2} = 0,5 \cdot \mu_0 (H_1^2 - H_2^2) \quad (9.6)$$

Вектор  $f_3$  спрямований до тієї сторони, де магнітне поле є слабшим.

Щоб відбулося магнітноімпульсне формоутворення, потрібно, щоб напруженості магнітного поля по обидві сторони листової заготовки істотно відрізнялися одна від одної.

Напруженість  $H_2$  магнітного поля всередині заготовки слабшає за рахунок струму  $I_n$ , наведеного змінним магнітним полем струму  $I$  у електропровідній заготовці. За правилом Ленца, наведений струм має напрямок, при якому його магнітне поле є зустрічним тому, яке створюється збудником 2 всередині контуру, де виникає наведений струм. Заготовка, а точніше, ланцюг наведеного струму, володіє певною інерційністю, що характеризується у найпростішому випадку сталою часу  $\tau_n$ .

$$\tau_n = L_n / R_n \quad (9.7)$$

Чим більшою  $\tau_n$  є у порівнянні з тривалістю протікання розрядного струму, тим сильніше виражена електромагнітна інерційність електропровідної заготовки і тим слабшим на початку розряду є магнітне поле, що характеризується величинами  $\vec{B}_2$  та  $\vec{H}_2$  на її внутрішній стороні. Звідси висновок такий: час розряду конденсаторної батареї, тобто часу наростання магнітного поля, повинен бути якомога меншим.

Іноді електромагнітні сили  $F_3$  створюються швидкопадаючим магнітним полем, яке отримуємо розривом ланцюга (наприклад, за допомогою плавкого запобіжника).

На нагрівання заготовки витрачається до 20% енергії, накопиченої конденсатором.

Оскільки магнітний тиск діє перпендикулярно векторові магнітної індукції, то останній повинен бути спрямованим паралельно первинній поверхні заготовки. Для цього обираються відповідну конфігурацію збудника. Наприклад, для трубчастої заготовки індукція магнітного поля повинна бути спрямована вздовж бічної поверхні заготовки. Для листової заготовки магнітне поле повинно бути паралельним площині листа.

Щоб збільшити місцеву деформацію заготовки, магнітне поле у певній області зосереджують насадками з електропровідних матеріалів.

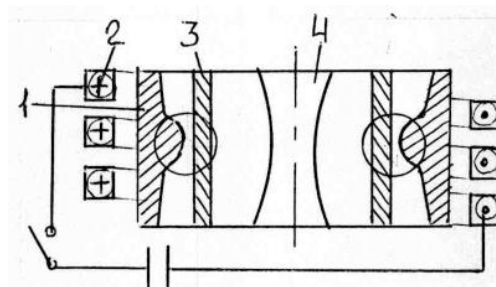


Рисунок 9.6 – Схема зосередження магнітного поля насадком: 1 – насадок; 3 – заготовка; 2 – збудник; 4 – матриця

З електротехніки відомо, що завдяки поверхневому ефектові швидкозмінний магнітний потік не проникає вглиб провідника. Тому лінії магнітного поля, так би мовивши, обтікають поверхню насадка, приймаючи в околі заготовки необхідну конфігурацію.

Також відомі й інші способи передавання механічних сил заготовці:

- для матеріалів з низькою питомою провідністю між заготовкою та збудником встановлюють тонкі електропровідні (алюмінієві) прокладки (супутники);

- також застосовують рідину, яка стискується деформованою прокладкою.

## **9.2 Контрольні запитання**

1. Поясніть принцип дії устаткувань для магнітноімпульсного формоутворення індукційним та електродинамічним способами.
2. Хто створив перше устаткування для отримання сильних магнітних полів і коли?
3. Чи є безпосереднє використання магнітноімпульсного формоутворення для виготовлення деталей з неелектропровідних матеріалів можливим?
4. Чому магнітноімпульсне формування дуже тонких заготовок є неможливим?
5. Чому не можна безмежно скорочувати час заряду конденсатора з метою підвищення продуктивності устаткування?

## **10 МАГНІТНО-АБРАЗИВНА ОБРОБКА**

Стан поверхонь та приповерхневого шару деталей та різальних інструментів значною мірою визначає їхні експлуатаційні властивості.

Для виробів та інструментів, до яких висуваються вимоги довговічності та надійності, важливими є такі характеристики поверхні, як коефіцієнт тертя, тривалість припрацювання, зносотривкість, наявність дефектів у вигляді

мікротріщин, внутрішні остаточні напруги, корозійна тривкість. Для інших виробів важливими можуть виявитися світловідображальні властивості поверхні, її здатність поглинати гази та атомні частинки, електрична та магнітна провідність поверхневого шару.

Загальновідомо, що фізико-хімічні та механічні властивості приповерхневого шару можуть істотно відрізнятися від властивостей основного матеріалу деталі. При цьому остаточні властивості поверхні є результатом дії на деталь у процесі виготовлення, особливо на фінішних операціях. Оскільки вимоги до поверхонь зростають і розширюються, існує потреба у вдосконаленні існуючих технологічних способів, які розширюють можливості обробної та зміцнювальної технології. Окрему увагу доводиться приділяти станіві поверхонь різальних інструментів, оскільки від них залежать тривкість і витрата інструментів, а також продуктивність, якість обробки інструментами, стабільність її результатів. Вищезазначені тенденції зумовили появу магнітно-абразивного полірування (МАП) та магнітної обробка (МО) деталей та інструментів.

Перші пропозиції використати магнітне поле для абразивної обробки відносяться до 1938 року. Перші публікації про дослідження та застосування абразивної обробки з використанням магнітного поля з'явилися у 60-х роках ХХ століття та належать вченим: Барону Ю.М., Вerezубу В.Н., Герасеменку Ю.В., Хохлову Б.А., Шальному В.А., Шулеву Г.С. Великий внесок у цю роботу зробили: Калінінградський технологічний інститут рибної промисловості та господарства, Ленінградський політехнічний інститут, Фізико-технічний інститут, Уфимський авіаційний інститут, Інститут проблем матеріалознавства А.Н. УРСР, Інститут надтвердих матеріалів А.Н. УРСР.

У процесі магнітно-абразивного полірування оброблюваний матеріал піддається механічному абразивному впливові, впливові змінного за величиною та напрямком магнітного поля, яке сприятливо відображається на експлуатаційних властивостях поверхневого шару виробів. Ця обставина



дозволяє виокремити магнітну обробку у самостійний спосіб зміцнювальної обробки [7].

## 10.1 Різновиди магнітно-абразивної обробки

### 10.1.1 Видалення задирок

Заготовка, здійснюючи рух осциляції  $n_{oc}$  у вертикальному напрямку, рухається поступально зі швидкістю  $V_n$  у міжполюсному просторі електромагніту, заповненому феромагнітним абразивним порошком. Завдяки цьому способу за 12...15 с машинного часу на заготовках зі сталі марки 10X18H9T повністю видаляються первинні задирки (після вирубання) висотою 0,2...0,4 мм.

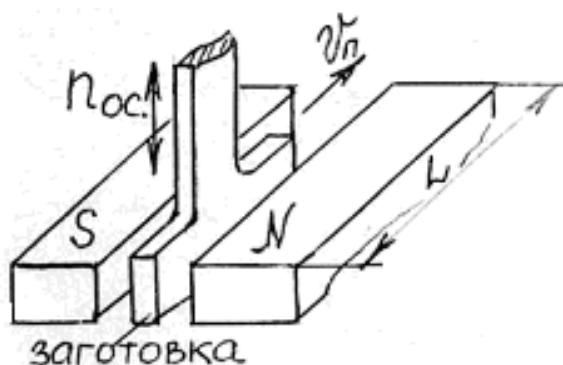


Рисунок 10.1 – Схема МАО з видалення задирок

Феромагнітний абразивний порошок – це кришиво загартованого чавуну зернистістю 1000/630 мкм. Пластина 1 з заготовкою 2 встановлюється у міжполюсний простір електромагніту. Туди ж насипають феромагнітний абразивний порошок.

### 10.1.2 Скруглення крайок та видалення задирок у розсвердлених отворах

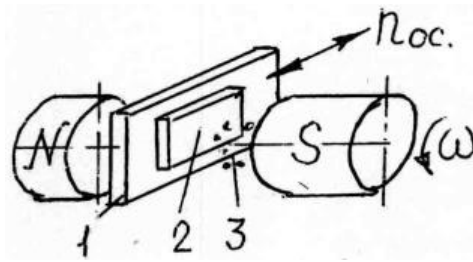


Рисунок 10.2 – Схема округлення крайок: 1 – пластина; 2 – заготовка; 3 – феромагнітний абразивний порошок

Пластина разом із заготовкою здійснює робочий рух – осциляцію з частотою  $n_{oc} = 12 \dots 23 \text{ c}^{-3}$ . Один полюс електромагніту обертається з частотою  $n = 12 \dots 23 \text{ c}^{-3}$ . При обертанні він тягне разом з собою феромагнітний абразивний порошок 3, який здійснює видалення задирок та скруглення крайок [Патент 112092 ГДР].

### 10.1.3 Очищення катаного дроту від ожарини

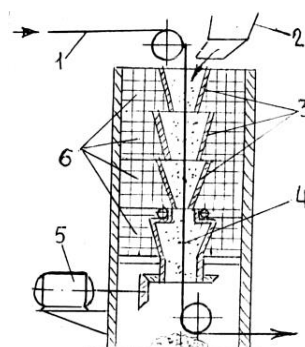


Рисунок 10.3 – Схема очищення дроту: 1 – дрiт; 4 – воронка рухома; 2 – бункер для абразивного порошку; 5 – електропривод; 3 – воронки нерухомі; 6 – електромагнітна котушка

Дріт 1 з високою швидкістю протягується крізь воронки 3 та 4, які заповнюються феромагнітним абразивним порошком з бункера 2. Воронки (не магнітні) розміщені всередині електромагнітних котушок 6, що живляться постійним струмом. Для підвищення інтенсивності очищення дроту нижню воронку 4 приводять у обертальний рух за допомогою електроприводу 5.

#### 10.1.4 Очищення друкованих плат

У процесі виготовлення та подальшої експлуатації на друкованих платах (на мідному покритті) з'являються оксидні плівки, які погіршують їхню електропровідність. Оксидну плівку необхідно періодично видаляти. Для цього застосовують наступний спосіб (рис. 10.4):

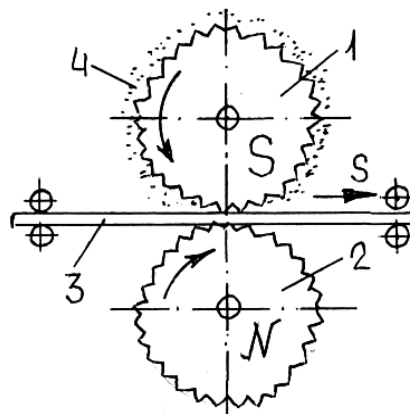


Рисунок 10.4 – Схема очищення друкованих плат: 1,2 – полюси електромагніту; 3 – друкована плата; 4 – феромагнітний порошок

Полюси електромагніту виконані у вигляді рифлених валиків 1 та 2, що обертаються з певною коловою швидкістю назустріч один одному. У проміжку між ними протягується забруднена друкована плата 3, на яку подається феромагнітний порошок 4. За рахунок магнітних сил порошок постійно знаходиться на провідному валику 1 та видаляє оксидну плівку з друкованої плати 3.

### 10.1.5 Отримання рельєфних зображень на поверхнях.

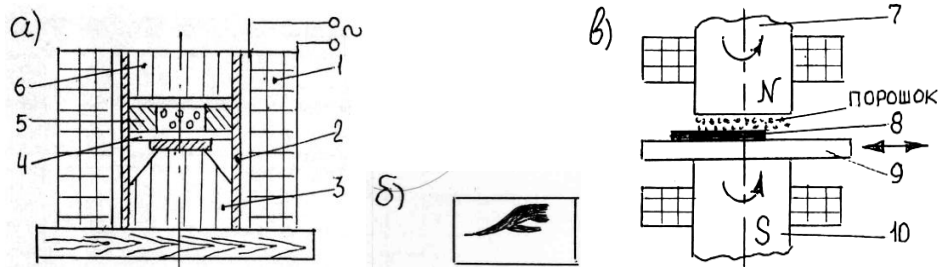


Рисунок 10.5 – Схема отримання рельєфних зображень на поверхнях:

1 – соленоїд; 5 – форма; 2 – немагнітна труба; 7, 10 – полюси електромагніту; 3, 6 – осердя; 8 – шаблон; 4, 9 – заготовка

Всередині соленоїда 1 розміщують немагнітну трубу 2 з вмонтованими в ній осердями 3 та 6. Над заготовкою 4 з крихкого матеріалу розташовують форму 5, порожнина якої своїм контуром повторює контур майбутнього рельєфного зображення. Порожнину заповнюють шматочками постійних магнітів. Поверхня кожного шматочка покрита абразивним шаром. При підключенні соленоїда до джерела змінного струму магнітики всередині порожнини форми 5 отримують вертикальні переміщення та здійснюють абразивну обробку. (Цей пристрій може бути використаний для свердління наскрізних отворів у крихких матеріалах). Напруженість магнітного поля складає  $10 \dots 100$  А/м, а частота імпульсів –  $10^4 \dots 10^5$  Гц.

Рисунок 10.5 – в. Тут заготовку 9 з шаблоном 8 поміщають між обертовими полюсами електромагнітів 7 та 10. Простір між оброблюваною поверхнею та верхнім полюсом заповнений феромагнітним абразивним порошком. Заготовці передають зворотно-поступальний рух. При цьому порошок здійснює видалення певного припуску з ділянок верхньої поверхні заготовки, не захищених шаблоном.

### 10.1.6 Подрібнення матеріалів

Устаткування для подрібнення матеріалів побудоване наступним чином.

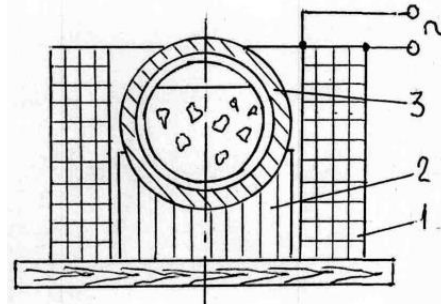


Рисунок 10.6 – Схема пристрою для подрібнення матеріалів: 1 – соленоїд; 2 – осердя; 3 – контейнер

Всередині соленоїда 1 розміщується осердя 2, а на ньому – контейнер 3 з немагнітного матеріалу. У контейнер поміщають суміш подрібненого матеріалу та постійних магнітів з абразивним покриттям. При увімкненні змінного магнітного поля магнітним частинкам передається рух зі значними амплітудами. У контейнер додатково подають циркулюючу рідину.

За допомогою накладення магнітного поля можна інтенсифікувати галтовку, вібро-абразивну, піскоструминну обробку.

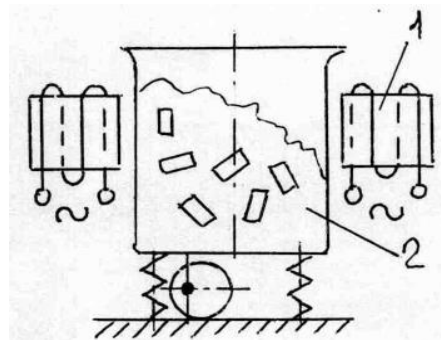


Рисунок 10.7 – Схема устаткування для інтенсифікації обробки за допомогою накладення магнітного поля: 1 – електромагніт; 2 – контейнер; 3 – вібратор

Наприклад, при увімкненні електромагніту 1 (рис. 10.7), що охоплює віброуючий контейнер 2, імпульсне або обертове магнітне поле перешкоджає рухові феромагнітних заготовок разом з абразивним середовищем.

В результаті збільшується швидкість переміщення абразивних елементів відносно заготовок та збільшується продуктивність віброабразивної обробки.

У випадку немагнітних заготовок для отримання аналогічного ефекту абразивне середовище повинно володіти феромагнітними властивостями.

Найпоширенішою областю застосування магнітно-абразивної обробки (МАО) є зниження шорсткості на оброблюваних поверхнях водночас з підвищенням якісних характеристик поверхневого шару.

Сукупність способів, що переслідують саме ці цілі, має назву магнітно-абразивне полірування (МАП).

## 10.2 Магнітно-електричне шліфування

Сутність магнітно-електричного шліфування (МЕШ) полягає у тому, що електропровідний шліфувальний круг вводиться у контакт з оброблюваною поверхнею деталі, а на круг і деталь подається постійний електричний струм, причому зона обробки поміщується у магнітне поле, вектор магнітної індукції якого є перпендикулярним векторові електричного струму. Деталь та шліфувальний круг приводяться у обертальний рух з різною кутовою швидкістю.

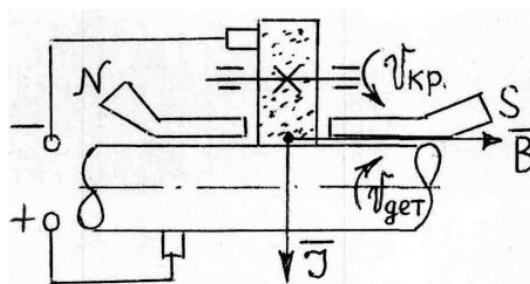


Рисунок 10.8 – Схема магнітно-електричного шліфування

Фізична сутність МЕШ полягає у наступному:

1) при контакті інструмента-круга з поверхнею оброблюваної деталі замикається електричний ланцюг «круг-деталь», при цьому відбуваються всі фізичні явища, властиві контактній магнітно-електричній обробці (МЕО) (розігрівання поверхні, її розм'якшування, розплавлення, викид розплаву та пластичного матеріалу).

2) при контакті абразивного круга з оброблюваною поверхнею утворюється стружка, яка, по мірі руху зерна, збільшується та замикає міжелектродний проміжок  $\delta$  між деталлю та кругом.

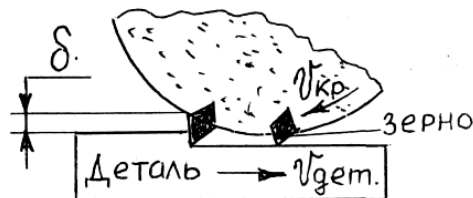


Рисунок 10.9 – Схема взаємодії зерна круга з деталлю

Таке коротке замикання призводить практично до миттєвого її розплавлення, розпилення магнітним полем та видалення продуктів розплаву з великою швидкістю з зони обробки, при цьому очищується зерно і круг не засалюється, а розплав нагрівають та обробляють набігаючи поверхню деталі. При подібному явищі позаду зерна, що стоїть (що є подальшим), розплав та пластичний матеріал створюють додаткову опору задній поверхні зерна, збільшуючи різальну здатність, оскільки може сприймати більше зусилля.

Завдяки дослідженню було встановлено, що абразивні зерна володіють п'єзоелектричним ефектом (що є зміною об'єктів при накладенні різниці потенціалів або зміною потенціалу при його деформації). Оскільки процес протікає при імпульсному струмі різних частот та гармонік, то зерна вібрують, осцилюючи з тією ж частотою, що інтенсифікує процес шліфування, покращує якість поверхні та змінює фізико-хімічні властивості. Користуючись цим

ефектом, можна керувати процесом МЕШ, оскільки найбільший імпульс відбувається при руйнуванні зерна. Якщо звук підсилювати через підсилювач, то можна почути, як зерно «кричить», що сигналізує про його граничну різальну спроможність.

Оскільки у якості абразивного матеріалу та шліфувальних кругів часто використовується електрокорунд ( $Al_2O_3$  – рубін), то при накладенні електричного потенціалу магнітного поля відбувається збудження енергії кристалу (його «нагнітання»), а отже, він може випромінювати кванти енергії. Це, у свою чергу, діє на оброблювану поверхню, інтенсифікує процес, додатково знімає матеріал деталі та призводить до змін фізико-хімічних властивостей поверхні.

Усі ці основні фактори дозволяють вести процес шліфування з продуктивністю, яка є значно вищою за продуктивність звичайного шліфування.

### 10.2.1 Особливості абразивного різання при магнітно-абразивному поліруванні

Схема переміщення зерен порошку у робочій зоні при зовнішньому круглому поліруванні надана на рисунку 10.10:

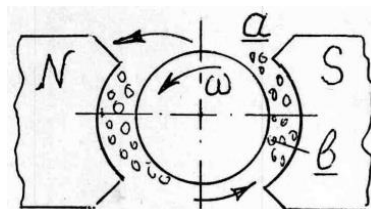


Рисунок 10.10 – Схема переміщення зерен порошку у робочій зоні

Заготовка 1 розміщується між полюсами магнітного індуктора. Простір між полюсами індуктора частково або повністю заповнений магнітно-



абразивним порошком, це – робоча зона. Простір між полюсами індуктора та оброблюваною поверхнею має назву робочого проміжку.

Порція магнітно-абразивного порошку при увімкненні магнітного поля утримується силами магнітного поля у робочому проміжку, виявляється притиснутою до оброблюваної поверхні і здійснює полірування при обертанні заготовки відносно індуктора (або навпаки). При цьому видаляється припуск та формується поверхня з новим мікрорельєфом та зміненими фізико-механічними властивостями поверхневого шару.

Механізм утворення різання (зафіксований за допомогою швидкісного кінознімання) зводиться до наступного. Уся порція порошку у робочому проміжку під дією сил тертя з боку рухомої заготовки зміщується до виходу з робочого проміжку та ущільнюється, зустрічаючи там основну протидію з боку магнітного поля.

Сили тертя між зернами та поверхнею полюсу допомагають магнітному полю утримати порошок усередині робочого проміжку. Не пов'язані між собою зерна порошку переміщуються усередині робочого проміжку. Зокрема, зерна «а», що межують з заготовкою, повільно рухаються до виходу з робочого проміжку. Швидкість зерна значно менша за швидкість оброблюваної поверхні. При швидкості оброблюваної поверхні в межах 0,...2,1 м/с швидкість зерна складає всього лише 0,01...0,02 м/с, тобто менше у 60...105 разів.

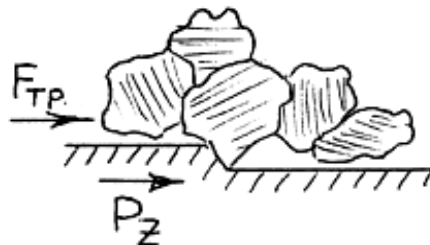


Рисунок 10.11 – Сили, що діють на зерно

З урахуванням цього відношення можна прийняти те, що швидкість різання – це і є різниця між швидкостями оброблюваної поверхні та зерна.

Підійшовши до межі робочого проміжку, кожне з зерен «а» може або зупинитися (здійснюючи тут коливальні рухи вздовж дуги околу), або вийти з робочого проміжку разом з оброблюваною поверхнею. При невеликій частоті обертання заготовки ці зерна можуть переходити до протилежного проміжку разом з обертовою поверхнею заготовки.

При збільшенні швидкості заготовки на перехідні зерна діють збільшені відцентрові сили, які спільно з магнітними силами змушують перехідні зерна відриватися від заготовки та осідати на неробочих поверхнях полюсів. Розкидання зерен є однією з причин поступового зниження інтенсивного видалення припуску зі збільшенням тривалості полірування. Вільні місця зерен «а» можуть займати зерна «в» (впродовж короткого часу) з глибших шарів порошкової маси. На кожне зерно діє сила різання  $P_z$  (якщо зерно проникло у поверхню та здійснює мікрорізання), або сили тертя  $F_{тр}$ .

Ці сили прагнуть потягти контактуюче зерно разом з рухомою поверхнею та повернути його відносно власного моменту інерції. Оточуючі зерна, які під дією сил магнітного поля утворюють достатньо щільну масу, перешкоджають рухові зерен разом з поверхнею заготовки та їхнім поворотам. Якщо сила різання перевищить опір повороту зерна (через збільшену мікронерівність), то таке зерно робить поворот і у контакті з заготовкою вступають його нові ділянки та нові різальні крайки. Саме цими поворотами пояснюється переривчастий характер рисок – слідів абразивного різання на поверхні заготовки.

При передаванні порошковій масі додаткових рухів за допомогою осциляції (коливань) заготовки (або полюсів) або пульсуючого магнітного поля контакт зерен із заготовкою набуває більш переривчастого характеру. Сили тертя  $F_{тр}$  зменшуються і порошок краще утримується магнітними силами у робочому проміжку. Водночас збільшується рухливість зерен всередині робочих проміжків та інтенсифікується входження в контакт із заготовкою нових різальних крайок. Це явище має назву самозаточування порошкової маси.

Природнім чином у процесі поліруванні відбувається поступове руйнування зерен шляхом виривання з м'якої феромагнітної основи зерна (матриці) вкраплених в неї різальних центрів або шляхом стирання матриці. При цьому також відбувається оголювання нових різальних крайок.

Зерна феромагнітного порошку у процесі полірування контактують з заготовкою різними ділянками своєї поверхні, які відрізняються твердістю та геометричною формою, що також означає і різною здатністю здійснювати різання.

Оброблена поверхня являє собою сукупність рисок – слідів різання та вигладжених ділянок. Напрямок рисок визначається швидкостями робочих рухів заготовки та магнітного індуктора.

### **10.2.2 Стружкоутворення**

Встановлено, що 9...15% об'єму подряпин видалено диспергуванням (лат. *Dispergo* – розсіюю), тонким подрібненням металу в стружку, а решта об'єму металу витіснена з подряпин пластично у бічні навали.

Співвідношення розмірів стружки – довжини та товщини – лежить в межах 5...20. На їхній поверхні видно окремі сильно деформовані елементи. Слідів оплавлення стружок не виявлено. При однакових розмірах радіус кривини стружок МАП є на порядок меншим (тобто, в 10 разів), ніж у стружок, отриманих при шліфуванні абразивною стрічкою. Це непрямо свідчить про більш високу ступінь пластичних деформацій подрібненого металу у процесі магнітно-абразивного полірування. Результатом пластичного деформування поверхні є підвищення твердості тонкого приповерхневого шару та утворення у ньому залишкових напружень стиснення.

У теорії абразивної обробки встановлено, що стружкоутворення є можливим при певному співвідношенні між глибиною  $h$  проникнення різальних вершин зерен абразивного інструмента в оброблювану поверхню та радіусами скруглень  $r_{окр}$  цих вершин.

Для інструментальної сталі У8 (випаленої) це співвідношення лежить в наступних межах:  $\varepsilon = \frac{h}{r_{окр}} > 0,2$ . При меншому співвідношенні можливим є лише пластичне або пружне деформування.

Для МАП характерним є проникнення зерен  $h \leq 0,1 \dots 0,4$  мкм. Для порошку 23АМ40Fe (білий електрокорунд з зернистістю М40)  $r_{окр}$  вершин зерен повинен складати 3...4 мкм. Утворення стружки при МАП сталей (на відміну від шліфування) відбувається при  $\varepsilon \leq 0,005 \dots 0,13$ , тобто за більш несприятливих умов. Сили, що є необхідними для стружкоутворення, при МАП виявляються меншими, ніж при шліфуванні. Для МАП феромагнітних сталей тиск порошку на оброблювану поверхню складає 0,3...0,2 МПа. При перерахунку цих тисків до окремого контактуючого зерна зусилля, яке визначає проникнення зерна в оброблювану поверхню, може складати 0,025...0,125 Н.

Б.Г. Македонський, використовуючи формулу:

$$F_y = C_y \cdot \varepsilon \cdot P_y \cdot r_{окр}^2, \text{ Н} \quad (10.1)$$

де:  $C_y = 3,14$  – постійний коефіцієнт, який враховує властивості матеріалу;

$\varepsilon = 0,25$  – співвідношення між глибиною  $h$  та  $r_{окр}$ ;

$P_y = 8240$  Па;

$r_{окр} = 6 \dots 12$  мкм – радіус округлення вершин зерен.

при шліфуванні сталі Ш15Х, визначив, що сила, необхідна для стружкоутворення, повинна знаходитися в межах  $F_y = 0,23 \dots 0,93$  Н, і це значно більше, ніж середнє значення сил, що діють при магнітно-абразивному поліруванні.

Особливості стружкоутворення МАП пояснюються підвищеною пластичністю оброблюваних сталей у присутності змінного магнітного поля.

С.Т. Кишкін та А.А. Клишин у своїй публікації описали виявлене ними зниження на 250% напруження плинності  $\sigma_t$  вуглецевистої сталі у присутності поперечного до напрямку навантаження магнітного поля величиною  $B = 0,005$  Тл.

Присутність у ЗОР поверхнево-активних речовин знижує поверхневу енергію металу, знижує роботу, необхідну для руйнування та пластичного деформування поверхні, збільшуючи мікротріщини, попередньо руйнуючи поверхневий шар. У цьому випадку продуктивність МАП різко збільшується.

Збільшення швидкості різання (швидкості деформації) супроводжується зміцненням матеріалу, що перебуває у процесі руйнування. Глибина проникнення зерен порошку в оброблювану поверхню автоматично зменшується, а знімання металу на однаковому шляху різання зменшується.

З урахуванням викладених особливостей МАП глибина проникнення зерен порошку в оброблювану поверхню може бути виражена залежністю степеневого виду:

$$h = C_h \cdot \frac{F_y^m}{r^r \cdot (K_m \cdot H)^s}, \quad \text{мкм} \quad (10.2)$$

де  $C_h$  – коефіцієнт, який враховує зміну зміцнюючих властивостей поверхневого шару порівняно з основним оброблюваним матеріалом (в результаті дії ЗОР, швидкості деформації, попереднього наклепу і т. д.);

$F_y$  – сила, що притискує зерно, Н;

$r$  – радіус вершин зерна, мкм;

$H$  – твердість оброблюваного матеріалу;

$K_m = H_m / H$  – коефіцієнт, що враховує зміну твердості матеріалу у присутності змінного магнітного поля;

$m, r, s$  – показники степеню. [7]

### 10.3 Контрольні запитання

1. Коли почали застосовувати магнітне поле для абразивної обробки матеріалів?
2. Які є різновиди магнітно-абразивної обробки?
3. У чому полягає сутність магнітно-електричного шліфування?

4. У чому полягають особливості абразивного різання при магнітно-абразивному поліруванні?

## 11 КОМБІНОВАНІ МЕТОДИ ОБРОБКИ МАТЕРІАЛІВ

Електрофізичні та електрохімічні способи виготовлення деталей мають ряд істотних переваг перед традиційними методами. До цих переваг можна віднести:

- високу точність ЕЕО;
- велику продуктивність електрохімічної розмірної обробки;
- хорошу якість поверхні, отримувану ультразвуковими методом.

Проте технологам хотілося б, щоб існували методи обробки, у яких поєднувалися б усі вищезазначені достоїнства. [1] З цією метою почали оптимізувати процеси шляхом комбінування відомих методів, посилюючи їхні позитивні якості. Більшість відомих комбінованих методів вже були запропоновані, досліджені та застосовані у виробництві радянськими вченими та інженерами.

При об'єднаному використанні анодного розчинення металу з дією абразиву – (анодно-абразивна обробка) – на оброблювану поверхню, тверді частинки (абразивні зерна або наповнювач) пошкоджують плівку, активуючи тим самим процес електрохімічної обробки. Розміри абразивних зерен, що визначають міжелектродний проміжок, як правило, не перевищують десятих часток мм. При таких малих проміжках густина струму буде значно більшою, ніж у випадку з розмірною ЕХО. Різко зростає швидкість знімання металу у зоні дії абразивних зерен інструмента. Окрім того, частина припуску видаляється механічним шліфуванням. На відміну від звичайного шліфування при анодно-абразивній обробці (ААО) на поверхні заготовки не утворюється міцніший наклепаний шар, а продуктивність шліфування підвищується.

Отже, інтенсивність знімання металу при анодному розчиненні зростає внаслідок механічного видалення пасивуючої плівки та прискорення процесу

винесення продуктів обробки з проміжку, а електрохімічне розчинення частини металу, в свою чергу, сприяє підвищенню швидкості механічного шліфування. Окрім зазначених складових знімання металу при малих проміжках може мати місце електроерозійний процес.

Розрізняють декілька різновидів використання магнітно-абразивної обробки:

- 1) абразивонесучим струмопровідним інструментом;
- 2) електронейтральним інструментом та вільним абразивом.

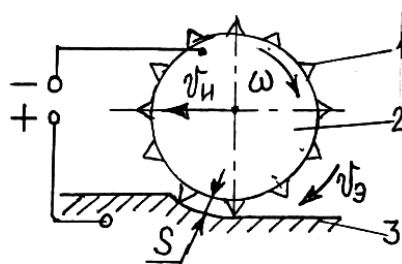


Рисунок 11.1 – Схема анодно-абразивного шліфування: 1 – абразивне зерно; 2 – інструмент (круг); 3 – заготовка

У першому випадку інструмент має форму кругів, брусків, які застосовуються при механічному шліфуванні або які повторюють форму оброблюваних ділянок деталі. Проте в усіх випадках зв'язка абразивного інструмента повинна бути електропровідною.

Розрізняють електро-абразивне та електро-алмазне шліфування, полірування, притирання.

При шліфуванні інструмент 2 виконано у формі абразивного або алмазного круга на металевій зв'язці. Абразивні зерна 1 можуть бути рівномірно розподілені по всьому об'єму інструмента 2 або розташовуватися лише на його поверхні. Алмазні зерна зазвичай закріплюють у формі кільця на зовнішньому околі інструмента або їх втискають у зовнішню поверхню оправки. Інструмент 2 і заготовку 3 підключають до полюсів джерела

живлення. У процесі обробки інструмент обертають та подають на урізування зі швидкістю  $V_u$ . Міжелектродний проміжок  $S$  обмежений виступанням зерен абразиву 1, тому немає необхідності застосовувати складні системи стеження для підтримання постійних проміжків. Електроліт подають поливанням на поверхню або нагнітають через внутрішню порожнину інструмента. В останньому випадку він повинен мати пори для протікання рідини. Завдяки обертанню інструмента електроліт протікає через проміжок зі швидкістю до 15...20 м/с. Отже, у просторі між інструментом 2 та заготовкою 3 є усі умови для інтенсивного процесу ЕХО: малі проміжки, достатня швидкість протікання електроліту, можливість протікання струму.

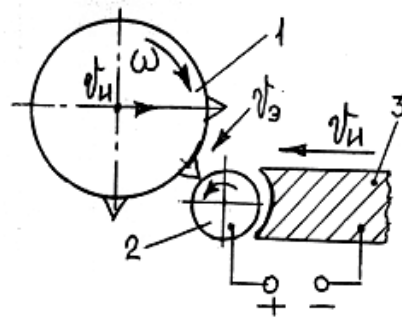


Рисунок 11.2 – Схема анодно-абразивного шліфування електронейтральним інструментом: 1 – абразивний круг; 2 – заготовка; 3 – електроінструмент

Виступні зерна в залежності від зусилля притискування інструмента до заготовки видаляють як зрізаний матеріал заготовки, так і продукти анодного розчинення.

У другому випадку, коли використовують діелектричний абразивний круг 1, то напругу подають на спеціальний електрод-інструмент 3. Такий різновид методу називають електронейтральним інструментом.

Він може застосовуватися для шліфування, полірування, притирання, хонінгування, суперфінішних операцій. Тут вже необхідні спеціальні пристрої



для підтримання проміжку між електродом-інструментом 3 та заготовкою 2. З цією метою зазвичай застосовують діелектричні підпорки. При шліфуванні абразивний інструмент (круг) 1 має швидкість до 25...30 м/с. Круг та електрод-інструмент 3 подають до заготовки 2 зі швидкістю  $V_u$ . Електроліт надходить через проміжок зі швидкістю  $V_s$ .

Процес знімання металу протікає за рахунок абразивного знімання та анодного розчинення.

При операції притирання замість абразивного інструмента може застосовуватися притир з пластмаси або дерева. Притир служить лише для механічного видалення плівки оксидів з оброблюваної поверхні та сприяє прискоренню процесу анодного розчинення заготовки.

При ААО незв'язані абразивом абразивні зерна не є зв'язаними з заготовкою або інструментом, тому їх називають вільними. Зерна можуть і не мати абразивних властивостей, тож у такому разі їх називають наповнювачем.

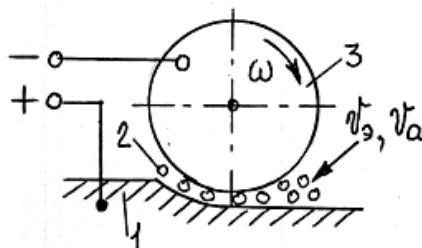


Рисунок 11.3 – Схема анодно-абразивної обробки вільним абразивом:

1 – заготовка; 2 – вільний абразив; 3 – інструмент

Абразивні зерна або наповнювач 2 разом з електролітом подають у проміжок між струмопровідним інструментом 3 та заготовкою 1. Абразив переміщується інструментом зі швидкістю  $V_a$ , видаляє частину припуску і разом з електролітом виносить продукти анодного розчинення з проміжку. Необхідний проміжок підтримується абразивними зернами, що знаходяться між інструментом 3 та заготовкою 1.

Якщо потрібно лише видалити плівку, яка спричиняє пасивацію оброблюваної поверхні, застосовують наповнювач з порцелянових, скляних або пластмасових кульок, діаметр яких є меншим за задане значення проміжку між інструментом та заготовкою.

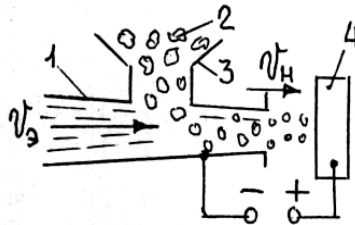


Рисунок 11.4 – Схема подавання наповнювача до заготовки: 1 – сопло; 3 – дозатор; 2 – наповнювач; 4 – заготовка

Якщо область обробки видалена від інструмента, то наповнювач 2 можуть подавати струменем електроліту або за допомогою відцентрових сил, що виникають при обертанні заготовки, наприклад, крильчатки вентилятора або колеса помпи. При подаванні наповнювача струменем електроліт прокачують зі швидкістю  $V_э$  крізь сопло 1. У струмінь з дозатора 3 вводять наповнювач 2, який набуває швидкості  $V_н$  та транспортується струменем до оброблюваної поверхні заготовки 4.

Для підвищення електропровідності середовища наповнювач може бути виготовлений зі струмопровідних матеріалів: кульок з металу або графітових композицій. Перед повторним використанням електроліт відокремлюється від наповнювача (наприклад, з допомогою сита).

До комбінованих методів відноситься електроерозійно-хімічна обробка.

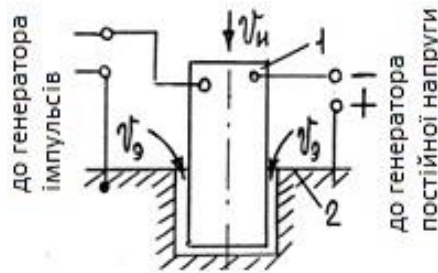


Рисунок 11.5 – Схема комбінованого електроерозійно-хімічного методу: 1 – електрод-інструмент; 2 – заготовка

У даній схемі електрод-інструмент 1 та заготовку 2 підключають до двох джерел:

- генератора постійної напруги, що застосовується для розмірної електрохімічної обробки (ЕХО);
- генератора імпульсів, що застосовується для електроерозійної обробки (ЕЕО).

Іноді використовують одне джерело живлення, у якому формується потрібна форма напруги. У якості робочого середовища застосовують електроліт. За допомогою цього методу отримують отвори, заглиблення, пази. Швидкість подання електрода-інструмента  $V_n$  у декілька разів вища, ніж при ЕЕО та ЕХ прошиванні.

Також поєднують електрохімічну (ЕХО) та ультразвукову обробку (УЗО).

Знімання металу з заготовки 4 відбувається у середовищі електроліту з абразивними зернами. Суспензія надходить з сопла 3 зі швидкістю  $V_s$  у міжелектродний проміжок  $S$ , який регулюється розмірами. Інструмент 2, окрім поступального переміщення до заготовки 4, коливається вздовж осі з ультразвуковою частотою. Ці коливання передаються інструментові від ультразвукового перетворювача 1.

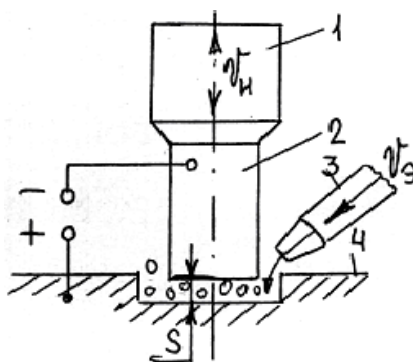


Рисунок 11.6 – Схема поєднання ЕХО та УЗО: 1 – ультразвуковий перетворювач; 3 – сопло для подання суспензії; 2 – інструмент-електрод; 4 – заготовка

Процес видалення матеріалу відбувається як за рахунок сколювання частинок заготовки 4, так і за рахунок анодного розчинення припуску.

Використання ЕХО з накладенням УЗ коливань різко підвищує продуктивність процесу та знижує знос інструмента (при УЗ обробці).

При виготовленні круглих отворів можна використовувати абразивонесучий інструмент. Заготовка обертається, а інструментові, що виконаний у формі абразивного круга з отвором для підводу електроліту або який має порувату конструкцію, передають ультразвукові коливання. Електроліт пропомпується з певною швидкістю у зону обробки.

Ультразвукові коливання використовуються при світлопроменевої обробці. На заготовку, у якій за допомогою лазерного променя робляться отвори, подають УЗ коливання, зазвичай поздовжні. При дії ультразвуку розплавлений метал, що утворює наплив навколо крайки оброблюваного отвору, не затікає у отвір, а розпилюється. Це підвищує точність форми та розмірів отворів.

При обробці алюмінію, нержавіючої сталі та бронзи з дією УЗ коливань (частотою 20 кГц, амплітуда 20...40 мкм) найбільший ефект досягається при обробці алюмінію, найменший – при обробці бронзи. Зі збільшенням амплітуди

коливань ефект зростає. Цей метод може бути застосований і при світлопроменевому різанні.

Якщо простір міжелектродного проміжку при ЕХО опромінити лазером, то різко зростає швидкість анодного розчинення. При цьому виникає можливість прискорити знімання металу з тих ділянок, де припуск максимальний. Завдяки цьому можна підвищити точність виготовлення деталей.

Такий метод комбінованої обробки має назву електрохіміко-променевого. У місці опромінення необхідно завбачливо вбудувати прозоре вікно з матеріалу, стійкого до дії тепла та струменю електроліту. Промінь, потрапляючи у зону протікання процесу анодного розчинення, нагріває електроліт та підвищує його електропровідність. Відповідно зростає густина струму, тобто прискорюється знімання металу з заготовки. Недоліком даного методу є сильне поглинання променевої енергії електролітом, особливо забрудненим.

При використанні комбінованих методів в основному застосовують електроліти з тим же складом, що є в електролітів, які використовуються при електрохімічній розмірній обробці. Іноді до них додають антикорозійні компоненти.

## **11.1 Технологічні показники**

До технологічних показників комбінованих методів обробки матеріалів відносяться: точність обробки, якість поверхні, продуктивність, режим обробки, знос інструмента.

### **11.1.1 Точність обробки**

Анодно-абразивний метод використовується і для чорнових, і для чистових операцій. При чорновій обробці режими обирають, виходячи з умови

отримання максимальної продуктивності. Для чистових операцій необхідно забезпечити високу точність та хорошу якість обробленої поверхні.

Похибка після електро-абразивного шліфування – у межах 0,02...0,05 мм, а після електро-алмазного – 0,01...0,02 мм. Для порівняння: похибка алмазного шліфування складає 1...5 мкм. Зниження точності при накладенні струму пояснюється підвищенням знімання металу на крайках та видаленням його з поверхні, яка начисто оброблена абразивом. Для підвищення точності обробки перед останніми ходами інструмента струм перемикають та здійснюють виходжування.

Електроерозійно-хімічний дозволяє отримати потрібні розміри такої самої точності, як і при ЕЕО та ЕХО. Якщо глибина отворів невелика, похибки не перевищують 0,1...0,3 мм.

При накладенні УЗ коливань похибка розмірів складає 0,1...0,15 мм. Така похибка є значно гіршою, ніж при звичайній ультразвуковій обробці, де похибки не перевищують 0,05 мм.

### **11.1.2 Якість поверхні**

Через постійне оновлення абразивних зерен зусилля різання при анодно-абразивній обробці (ААО) є у 1,5...2,0 рази нижчим, ніж при шліфуванні. При цьому знижується наклеп поверхні, не утворюються мікротріщини. Метал, що знімається з заготовки, не прилипає до інструменту, тож сильне нагрівання через тертя контактних поверхонь виключене і місцеві припікання не виникають. Такі дефекти є особливо небезпечними для високонавантажених деталей, що працюють в умовах знакозмінних навантажень (зубчастих коліс, елементів шліцьових з'єднань).

Відсутність шліфувальних припікань дозволяє підвищити ресурс деталей. Шорсткість поверхні після електро-алмазної та електро-абразивної обробки зменшується через анодне розчинення вершин мікронерівностей. Середня висота нерівностей  $R_z$  може бути визначена за залежністю:

$$R_z = \kappa \cdot R_{z_{ш}}, \text{ мкм} \quad (11.1)$$

де  $R_{z_{ш}}$  – висота нерівностей після шліфування, мкм;

$\kappa = 0,1 \dots 0,5$  – коефіцієнт, що враховує скруглення виступів при накладенні струму.

З метою підвищення точності останні ходи виконують без струму, і тоді шорсткість електро-алмазної та електро-абразивної обробки є близькою до тієї ж зернистості, отримуваної після шліфування інструментом.

Якщо застосовують електрично нейтральний інструмент, то обробку виконують весь час, не вимикаючи струм. Це забезпечує отримання мінімального наклепу, відсутність припікань поверхні, зниження висоти нерівностей до  $R_a = 0,1 \dots 0,15$  мкм.

При обробці вільним абразивом вдається отримати шорсткість штампованих або литих деталей не нижче  $R_a = 4,5$  мкм.

Такі операції дозволяють механізувати ручну працю при доведенні важкодоступних поверхонь.

Електроерозійно-хімічний метод дає можливість отримати у сталевих деталей загартований поверхневий шар, завдяки якому підвищується їхня зносотривкість. Товщина цього шару є дещо меншою, ніж після електроерозійної обробки (ЕЕО). Проте внаслідок розрядів помітно погіршується шорсткість поверхні при порівнянні з ЕХО.

На чорнових операціях середня висота нерівностей при обробці сталей  $R_z = 100 \dots 150$  мкм, при чистових режимах  $R_a = 2 \dots 2,5$  мкм.

При накладенні ультразвукових коливань на електрохімічний процес шорсткість дещо знижується порівняно зі звичайною УЗО. Це пояснюється скругленням вершин виступів.

Опромінення зони обробки лазером не має помітного впливу на якість поверхні.

### 11.1.3 Продуктивність

Усі комбіновані методи прискорюють процес знімання металу.

При чорнових режимах ААО знімання металу відбувається в основному за рахунок ерозії. Чорнова обробка виконується при підвищених напругах.

При використанні електронеітрального інструмента швидкість знімання зростає через анодне розчинення, а головне – через інтенсифікацію процесу різання абразивним інструментом.

Продуктивність процесу ААО із застосуванням вільного абразиву або накопичувача є у декілька разів вищою, ніж при аналогічних операціях механічної обробки.

Швидкість знімання металу при електроерозійно-хімічному методі може бути оцінена залежністю:

$$Q = I_1 \cdot \kappa_1, \quad (11.2)$$

де  $I_1$  – сумарна сила струму крізь міжелектродний проміжок, А;

$\kappa_1$  – коефіцієнт, що враховує матеріали електродів, режим обробки та умови евакуації продуктів обробки.

Значення  $\kappa_1$  залежить передусім від глибини отримуваної порожнини або отвору. Так, на початку процесу швидкість подання електрода-інструмента може дійти 1,5 мм/с ( $\kappa_1=20\dots30$ ), проте вже на глибині 2...4 мм вона знижується у 5...10 разів. Швидкість подання електрода-інструмента залежить від швидкості помпування електроліту.

Швидкість знімання металу при накладенні УЗ коливань на ЕХО може бути у декілька разів вищою, ніж при УЗО

$$Q = \kappa \cdot Q_{\text{УЗ}} \quad (11.3)$$

де  $\kappa = 3\dots12$  – коефіцієнт, що враховує зміну швидкості знімання металу при накладенні струму.

Якщо УЗ коливання накладають на абразивонесучий інструмент, то швидкість процесу порівняно з обробкою без ультразвуку зростає на 20...50%.



Швидкість анодного розчинення при опроміненні лазером може зрости у 15...20 разів.

#### **11.1.4 Режим обробки**

При проєктуванні процесу обробки слід обирати та розраховувати:

1) Склад електроліту в залежності від оброблюваного сплаву.

При електро-абразивному та електро-алмазному шліфуванні застосовують розчини, що містять хлориди натрію та калію, нітрат та нітрит натрію. Масова частка нітриту натрію у розчині не перевищує десятих часток відсотку (для захисту деталей обладнання та заготовки від корозії). Для зниження в'язкості до розчину додають декілька відсотків фториду натрію. Для підвищення якості поверхні додають олеїнову кислоту, сульфати, фосфати.

Шліфування електронейтральним інструментом виконують із застосуванням водних розчинів бури, нітратів натрію та калію. Для твердих сплавів до електроліту додають рідке скло.

Обробку електролітом з твердим наповнювачем проводять у розчині хлориду натрію. Застосування навіть слабкого (2...3%) розчину кислоти сприяє значному підвищенню електропровідності електроліту.

Електроерозійно-хімічна обробка може здійснюватися у 10...13%-вих розчинах хлориду або нітрату натрію ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ). Для зниження зносу інструмента у робочу зону подають вуглецевмісні гази, зокрема бутан.

2) Температуру електроліту у баку.

При застосуванні всіх методів комбінованої обробки вона залишається такою самою, як і при електрохімічній обробці – більше 20°C.

3) Напругу на електродах.

При анодно-абразивній обробці для чорнових операцій – 15...32 В, для чистових – 3...15 В. Для твердих сплавів – нижні межі. Якщо використовується електропровідний накопичувач, то напруга на електродах може бути до 80 В. При електроерозійно-хімічній обробці – 12...30 В; для прошивання отворів –

25...30 В; при розрізанні обертовим електродом-інструментом напруга повинна бути менше 20 В.

При накладенні ультразвукових коливань значення напруги залежить від розмірів абразивних зерен. Напруга розраховується за експериментальною залежністю:

$$U = 4,5 + 0,1 \cdot \ell, \text{ В} \quad (11.4)$$

де  $\ell$  – розмір абразивного зерна, мкм.

При опроміненні зони обробки лазером напругу можна знизити у 1,5...2 рази.

4) Тиск інструмента на заготовку.

Для електро-абразивного та електро-алмазного шліфування зв'язаним та вільним абразивом для отримання найвищої продуктивності та точності тиску інструмента на оброблювану поверхню повинно бути 0,2...0,5 МПа. При шліфуванні електронейтральним інструментом електрод-інструмент не торкається заготовки. При поліруванні та хонінгуванні - 0,05...0,3 МПа. Він забезпечує шорсткість до  $R_a = 0,04$  мкм.

5) Вибір обладнання, електрода-інструмента, зернистості абразиву та накопичувача.

Виконується за рекомендаціями.

6) Розрахунок швидкості переміщення робочої частини інструмента відносно оброблюваної поверхні, тобто руху, не пов'язаного з поданням інструмента.

Збільшення швидкості руху інструмента покращує винесення продуктів обробки та сприяє прискоренню процесу, підвищенню якості деталі. Проте колова швидкість обмежена міцністю кругів та можливостями подавання електроліту.

Для шліфування абразивним та алмазним інструментами зі зв'язаним та вільним зерном частота обертання  $n$  кругу діаметром  $D_k$  складе:

$$n = \frac{V}{\pi \cdot D_k},$$

де  $V=18...30$  м/с – швидкість на периферії інструмента;  $V = \omega \cdot R_x$ .

При електронейтральному інструменті колова швидкість кола при шліфуванні така сама, а при хонінгуванні вона визначається кількістю ходів бруска в одиницю часу (зазвичай 0,5...1,5 подвійних ходів в секунду) та частотою обертання заготовки.

Загальну швидкість  $V_{обц}$  знаходять шляхом додавання швидкості  $V_1$  руху інструмента 1 вздовж осі отвору та швидкості  $V_2$  від обертання заготовки 2 (рис. 11.7):

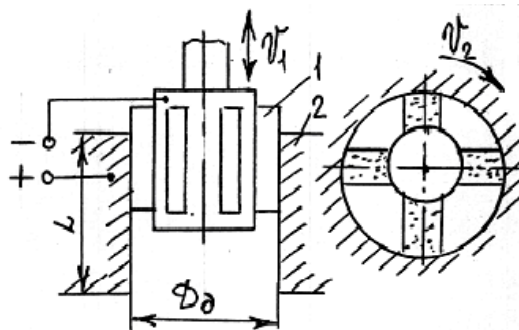


Рисунок 11.7 – Схема хонінгування: 1 – інструмент; 2 – заготовка

$$V_{обц} = \sqrt{V_1^2 + V_2^2} \quad (11.5)$$

$$\text{где } V_1 = L \cdot n_1 \quad (11.6)$$

де:  $L$  – довжина оброблюваного отвору, м;

$n_1$  – кількість подвійних ходів в секунду.

$$V_2 = \pi \cdot D_o \cdot n \quad (11.7)$$

де  $D_o$  — діаметр отвору, м;

$n$  – частота обертання заготовки,  $\text{с}^{-1}$ .

Загальна швидкість  $V_{обц}$  може складати 1...10 м/с. Швидкість переміщення накопичувача залежить від швидкості електроліту та вимірюється в широких межах (1...30 м/с).

Накладення УЗ коливань призводить до прискорення руху абразивних частинок. Швидкість тут задають через частоту  $f$  та амплітуду коливань інструмента, як при звичайній УЗО.

### **11.1.5 Знос (та профілювання)**

Круги для електро-алмазної та електро-абразивної обробки, отримані пресуванням або литтям, мають високу швидкість. Їх знос при обробці навіть фасонних поверхонь не перевищує 2% від об'єму знятого металу (у 80...100 разів менше, ніж при звичайному шліфуванні). У кругів з графітовим наповнювачем знос є на порядок (у 10 разів) вищим і їх необхідно часто правити. Круги, виготовлені гальванічним методом та накачуванням, мають тонкий робочий шар; коли він зношується, круг стає непридатним.

При електроерозійно-хімічному методі відносний знос інструмента залежить від густини струму на аноді та площі оброблюваної поверхні. Так, за збільшенням густини струму з 1 до 5 А/мм<sup>2</sup> знос зростає у 6...8 разів та для графітових матеріалів складає 0,5...3,0%, для чавуну – 4...8%, для латуні та міді – до 5% об'єму знятого металу.

Знос інструмента при накладенні УЗ коливань залежить від густини струму. Густину струму обмежують значеннями 0,15...0,2 А/мм<sup>2</sup>. При цьому знос інструмента є у 8..10 разів нижчим, ніж при ультразвуковому прошиванні.

### **11.1.6 Профілювання круга**

При профілюванні круга застосовують електроерозійну та електрохімічну обробку: точіння твердосплавними та мінералокерамічними різцями (різці виконують у формі роликів та їх набирають на оправку); точіння алмазними різцями та обертовими роликами (чистове профілювання); пластичною деформацією (інструмент-ролик) с нагріванням зони обробки.

Таблиця 11.1 Характерні показники нових методів обробки металів

Обробка	Мах $V$ знімання металу, $\frac{см^3}{хв.}$	Споживана $N$ , $кВт$	Швидкість різання, $\frac{м}{хв.}$	Швидкість плавлення, $\frac{см}{хв.}$	Точність, $мкм$		Типовий верстат	
					Досугнута	При макс швидкості знімання металу	$N$ , кВт	Вартість $T$ , грн *
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Токарна	1640		61	—	2,5	125	20	6,5
Шліфування	820	10	3	—	2,5	125	20	10
Плазмова	164	20	15	25,4	250	2500	200	8,5
Ерозійна	5	40	—	12,7	12	125	10	10
Електрохімічна	16,4	160	—	12,7	50	24	200	88
Ультразвукова	0,82	200	—	0,5	5	25	20	4,2
Електронним променем	0,008	10.000	61	15	5	25	10	66
Рубіновим лазером	0,0048	60.000	—	10	50	125	10	4,2

## 11.2 Контрольні запитання

1. Що таке комбіновані методи обробки?
2. Охарактеризуйте анодно-абразивну обробку.
3. Поясніть спосіб електро-абразивного шліфування електронейтральним інструментом.
4. Які фактори впливають на знімання металу при використанні вільного абразиву або наповнювача?
5. У чому полягає сутність електроерозійно-хімічної обробки?
6. Який вплив на технологічні показники процесу УЗО має анодне розчинення металу?
7. Яким чином світловий промінь впливає на процес ЕХО?

## 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

<b>7</b>	<b>ПЛАЗМОВА ОБРОБКА</b> .....	<b>3</b>
7.1	Основні фізичні характеристики та властивості плазми.....	4
7.1.1	Ступінь іонізації плазми.....	4
7.1.2	Квазінейтральність.....	5
7.1.3	Температура плазми.....	6
7.1.4	Ентальпія плазми.....	8
7.1.5	Види плазмових джерел енергії.....	8
7.1.6	Характеристики плазмового джерела.....	9
7.2	Технологія плазмової обробки.....	11
7.2.1	Плазмове нагрівання.....	11
7.2.2	Плавлення рідини.....	12
7.2.3	Зварювання та наплавлення.....	13
7.2.4	Напилення.....	15
7.2.5	Різання.....	17
7.3	Контрольні запитання.....	17
<b>8</b>	<b>ЕЛЕКТРОГІДРАВЛІЧНА ОБРОБКА</b> .....	<b>18</b>
8.1	Фізика процесу.....	21
8.1.1	Формоутворення під дією електричного розряду у рідині..	21
8.1.2	Пробиття рідини.....	21
8.1.3	Процеси у розрядному ланцюгу.....	22
8.1.4	Штапування фасонних деталей.....	28
8.2	Схема електропідривної обробки.....	29
8.2.1	Штапування.....	29
8.2.2	Очищення виробів.....	30
8.2.2.1	Електрогідрравлічне очищення безперервно рухомої стрічки.	32
8.2.2.2	Електрогідрравлічне очищення у барабанах.....	32
8.2.2.3	Електрогідрравлічне очищення великих заготовок.....	32
8.3	Отримання нероз'ємних з'єднань електрогідрравлічним способом.....	33
8.4	Подрібнення матеріалів.....	36
8.5	Зміна властивостей поверхні.....	37
8.5.1	Нанесення покриттів.....	37
8.5.2	Зміцнення та наклеп.....	38
8.5.3	Спікання та ущільнення.....	38
8.6	Контрольні запитання.....	39
<b>9</b>	<b>МАГНІТНОІМПУЛЬСНЕ ФОРМОУТВОРЕННЯ</b> .....	<b>39</b>
9.1	Фізика процесу.....	42
9.1.1	Різновиди магнітно-імпульсного формоутворення.....	42
9.2	Контрольні запитання.....	47
<b>10</b>	<b>МАГНІТНО-АБРАЗИВНА ОБРОБКА</b> .....	<b>47</b>
10.1	Різновиди магнітно-абразивної обробки.....	49
10.1.1	Видалення задирок.....	49

10.1.2	Скруглення крайок та видалення задирок у розсвердлених отворах.....	50
10.1.3	Очищення катаного дроту від ожарини.....	50
10.1.4	Очищення друкованих плат.....	51
10.1.5	Отримання рельєфних зображень на поверхнях.....	52
10.1.6	Подрібнення матеріалів.....	53
10.2	Магнітно-електричне шліфування.....	54
10.2.1	Особливості абразивного різання при магнітно-абразивному поліруванні.....	56
10.2.2	Стружкоутворення.....	59
10.3	Контрольні запитання.....	61
11	<b>КОМБІНОВАНІ МЕТОДИ ОБРОБКИ МАТЕРІАЛІВ.....</b>	<b>62</b>
11.1	Технологічні показники.....	69
11.1.1	Точність обробки.....	69
11.1.2	Якість поверхні.....	70
11.1.3	Продуктивність.....	72
11.1.4	Режим обробки.....	73
11.1.5	Знос (та профілювання).....	76
11.1.6	Профілювання круга.....	76
11.2	Контрольні запитання.....	77
	<b>ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....</b>	<b>78</b>



Навчальне видання

Абрамов Сергій Олексійович  
Гришин Володимир Сергійович

ТЕХНОЛОГІЯ МАШИНОБУДУВАННЯ

II частина

«СПЕЦІАЛЬНІ ТА ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ МЕТОДИ ОБРОБКИ ПОВЕРХНІ»

Навчальний посібник

Тем. план 2021, поз. 107

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

Облік.-вид.арк. 4,76. Умов. друк. арк. 4,70.Замовлення № 84.

Національна металургійна академія України

49005, м. Дніпро, пр. Гагаріна, 4

---

Редакційно-видавничий відділ НМетАУ