

Міністерство освіти і науки України
Сумський державний університет

Б. А. Ступін, О. В. Івченко, О. Д. Динник, Р. М. Зінченко

***НЕТРАДИЦІЙНІ МЕТОДИ
МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ МАТЕРІАЛІВ***

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

Суми
Сумський державний університет
2016

Міністерство освіти і науки України
Сумський державний університет

***НЕТРАДИЦІЙНІ МЕТОДИ
МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ МАТЕРІАЛІВ***

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

для студентів спеціальностей:

8.05050201 «Технології машинобудування»,
8.05050302 «Інструментальне виробництво»,
8.05050301 «Металорізальні верстати та системи»
усіх форм навчання

Затверджено
на засіданні кафедри
технології машинобудування,
верстатів та інструментів
як конспект лекцій
із дисципліни
«Нетрадиційні методи
механічної обробки матеріалів».
Протокол № 8 від 26.01.2016.



Суми
Сумський державний університет
2016

Нетрадиційні методи механічної обробки матеріалів : конспект лекцій / укладачі: Б. А. Ступін, О. В. Івченко, О. Д. Динник, Р. М. Зінченко. – Суми : Сумський державний університет, 2016. – 149 с.

Кафедра технології машинобудування, верстатів та інструментів

ЗМІСТ

	С.
Вступ	5
1 Електроерозійна обробка матеріалів	7
1.1 Характеристика процесу електричної ерозії ...	7
1.2 Особливості електроіскрової та електро- імпульсної обробки	25
1.3 Технологічні схеми та операції електро- ерозійної обробки	28
2 Променева обробка матеріалів	49
2.1 Світлопроменева обробка	49
2.2 Електронно-променева обробка матеріалів ...	55
3 Ультразвукова обробка матеріалів	61
3.1 Ультразвукові коливання	61
3.2 Кінематика ультразвукової обробки	65
3.3 Джерела енергії інструменту при ультразву- ковій обробці	67
3.4 Методи та технологічні характеристики ультразвукової розмірної обробки матеріалів	71
3.5 Верстати та інструменти для ультразвукової обробки	77
4 Електрохімічний метод обробки матеріалів	82
4.1 Електрохімічна обробка в електролітах	82
4.2 Анодно-гідравлічна обробка	86
4.3 Електрохімічне формоутворення	94
4.4 Анодно-механічна обробка матеріалів	100
4.5 Анодно-абразивна обробка матеріалів	106
4.6 Електроерозійно-хімічна обробка	111
5 Технологія швидкого прототипування	114
5.1 Сутність швидкого прототипування (RP)	114
5.2 Сутність САD-моделювання	119

5.3 Способи матеріалізації 3D CAD-моделей	120
5.4 Технології швидкого прототипування	123
5.5 Практичне застосування RP-технологій	139
Список літератури	148

ВСТУП

Розвиток машинобудування пов'язаний з успішним розробленням та застосуванням принципово нових, більш економічних, продуктивних і технічно досконалих методів технології, зокрема таких, що базуються на використанні електрофізичних та електрохімічних явищ.

Під час обробки тиском і точного лиття використовують штампи, ливарні форми, прес-форми та інші подібні вироби складної конфігурації, трудомісткі у виготовленні.

Отвори, щілини та фасонні прорізи малих розмірів, а також з'єднувальні канали, розміщені у важкодоступних місцях, часто не можна оброблювати на металорізальних верстатах через невідповідність між малою жорсткістю та міцністю інструменту і виниклими великими силами різання або через неможливість виготовлення інструменту потрібних розмірів та форм.

У всіх зазначених випадках ефективно використовують електрофізичні та електрохімічні методи розмірної обробки матеріалів. Вітчизняна промисловість випускає велику кількість різноманітних верстатів для електрофізичної та електрохімічної обробки, якими оснащуються механічні цехи машинобудівних підприємств. Наша країна займає провідне місце у галузі електрофізичних і електрохімічних методів розмірної обробки, а пріоритет відкриття більшості методів електрофізичної та електрохімічної обробки належить радянським ученим і фахівцям.

Під електрофізичними та електрохімічними методами розмірної обробки розуміють сукупність електричних, електромагнітних й електрохімічних процесів і методів безпосереднього одночасного або в різних поєднаннях теплового, механічного чи хімічного впливу на тверде тіло для надання йому заданих форм і розмірів.

Відповідно до прийнятої класифікації застосовані в промисловості електрофізичні та електрохімічні методи

обробки можна поділити на чотири групи. Перша група охоплює електроерозійні методи обробки струмопровідних матеріалів, що базуються на використанні енергії електричних розрядів між інструментом та заготовкою. Електроерозійні методи обробки прийнято поділяти на електроіскрові та електроімпульсні. Друга група методів, що також використовуються для обробки струмопровідних матеріалів, поєднує променеві способи обробки, які ґрунтуються на впливі концентрованих променів із високою густиною енергії на заготовку. Сюди належить обробка світловими, електронними та іонними променями. До третьої групи відносять методи імпульсного ударного впливу на заготовку частинок абразиву з частотою ударів, що відповідає ультразвуковому діапазону. Ці методи використовують для обробки твердих, крихких, а також матеріалів, що не проводять струм. Четверта група поєднує електрохімічні методи, що базуються на явищі анодного розчинення, яке полягає в тому, що електрод, під'єднаний до позитивного полюса-анода, розчиняється.

До основних переваг електрофізичних та електрохімічних методів розмірної обробки матеріалів можна віднести:

1) практичну незалежність продуктивності процесу обробки від твердості та в'язкості оброблюваного матеріалу;

2) можливість відтворення (копіювання) інструмента складної форми відразу по всій поверхні заготовки під час простого поступального руху інструмента;

3) можливість здійснення обробки практично без силового впливу на заготовку;

4) легкість автоматизації процесу обробки і можливість здійснення багатостадійного обслуговування.

1 ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНА ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ

1.1 Характеристика процесу електричної ерозії

Руйнування металів електричними розрядами, що виникають унаслідок пробоя діелектричного проміжку між електродами, називають електричною ерозією. Керована електрична ерозія покладена в основу декількох методів обробки, що розрізняються назвами, технологічними характеристиками, схемами та іншими ознаками.

Явища, що відбуваються при електричних розрядах у міжелектродному проміжку, дуже складні є предметом спеціальних досліджень, тому тут розглянута лише найпростіша схема процесу видалення металу за допомогою електричної ерозії. До електродів 1 і 2 (рис. 1.1 а) підведена напруга, що створює електричне поле в міжелектродному проміжку 3.

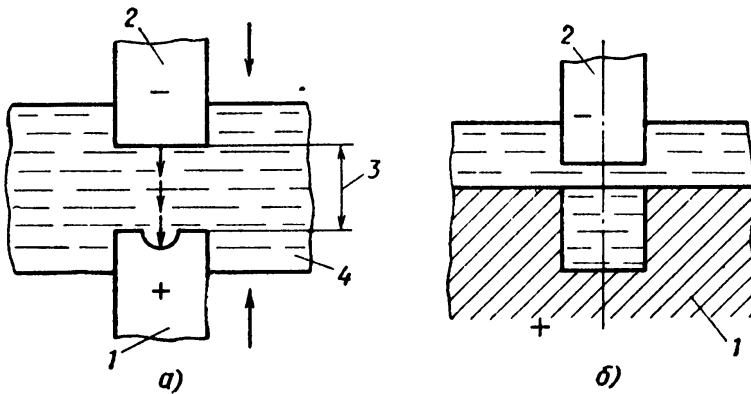


Рисунок 1.1 – Схема руйнування металу імпульсними розрядами електричного струму: а) початок обробки: 1 – електрод-анод; 2 – електрод-катод; 3 – міжелектродний проміжок; 4 – діелектрична рідина; б) відтворення форми катода в аноді після обробки

При зближенні електродів до відстані, достатньої для пробою міжелектродного проміжку, виникає електричний розряд у вигляді вузького струмопровідного каналу. Для підвищення інтенсивності розряду електроди занурюють у діелектричну рідину 4 (газ, мінеральне масло та ін.) На поверхні електродів є мікронерівності різної величини. Напряга електричного поля буде найбільшою між двома найбільш близькими один до одного виступами на поверхнях електродів (рис.1.2), тому саме тут відбувається порушення електричної міцності рідини й виникає електричний пробій проміжку.

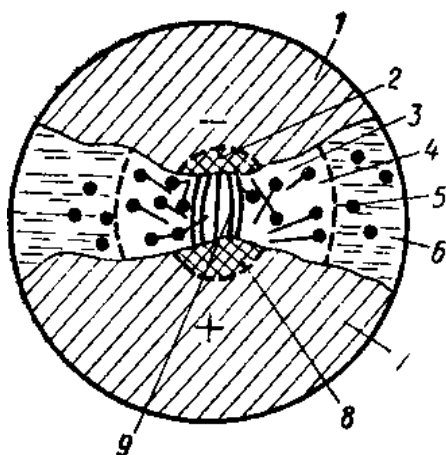


Рисунок 1.2 – Мікрорельєф поверхні та схема розряду між електродами: 1 – катод; 2 – мікропорція металу, виплавлена на поверхні катода; 3 – газовий пухирець; 4 – розплавлені частинки металу; 5 – частинки металу, застигли в робочій рідині; 6 – робоча рідина; 7 – анод; 8 – мікропорція металу, виплавлена на поверхні анода; 9 – канал розряду

Утворюється плазмовий канал розряду. Завдяки високій концентрації енергії в зоні розряду розвивається те-

мпература тисячі й десятки тисяч градусів. Метал на поверхні електродів плавиться й випаровується. Краплі розплавленого металу внаслідок руху за течією рідини в робочій зоні у вигляді ударної хвилі викидаються за межі електродів і застигають у рідині, що оточує електроди, у вигляді дрібних частинок сферичної форми. При електричному розряді в рідині виникає газовий пухирець, який розширюється і своїми стінками також захоплює і виносить частками металу з міжелектродного проміжку.

Від взаємодії рідини з ділянками електродів, нагрітих до температури 100–400 °С, утворюються гнізда пухирців пари, а на межах плазмового каналу розряду відбувається піроліз діелектричної рідини. У результаті в рідині утворюються гази, а також асфальтосмолисті речовини, що відкладаються на частинках металу і здатні при нагріванні утворювати міцну масу. З газового середовища виділяється вуглець, що відкладається на нагрітих поверхнях електродів у вигляді тонкої плівки кристалічного графіту.

У місці дії імпульсу струму на поверхнях електродів залишаються невеликі заглиблення-лунки, що утворилися внаслідок видалення розрядом деякої кількості металу. Величина лунки за інших рівних умов залежить від кількості енергії, що виділяється в розряді, тривалості імпульсу, а також від того, яким чином відбувається видалення з лунки продуктів ерозії.

Можливі кілька варіантів викиду металу з лунки. Найбільший ефект із точки зору знімання металу забезпечується тоді, коли ударна хвиля утворена розрядом, що уразив природний вихідний матеріал заготовки. При цьому із зони розряду виносяться як новоутворені частинки металу, так і частинки, що утворилися раніше. Якщо розряд потрапляє на групу частинками, що залишилися в міжелектродному проміжку від попередніх розрядів, то швидкість знімання металу близька до нуля, проте евакуаційна хвиля

найменш ефективна. Решта варіантів викиду металу за ефективністю знаходиться між цим крайніми варіаціями.

Після розряду впродовж деякого часу відбуваються охолодження стовпа каналу й деіонізація речовини плазми в міжелектродному проміжку. Електрична міцність міжелектродного проміжку відновлюється. Час деіонізації рідкого діелектрика становить 10,6–10,2 с. Він залежить від енергії попереднього розряду. Наступний розряд зазвичай виникає вже у новому місці, між двома іншими найближчими точками електродів. Тривалість інтервалів між імпульсами повинна бути достатньою для видалення із зони розряду продуктів ерозії, а також газового пухирця, що є основною перешкодою для виникнення наступного розряду. У зв'язку з цим частота розрядів зі зростанням їх енергії знижується.

Так відбувається доти, поки розряд не видалить із поверхні електродів усі ділянки металу, що знаходяться на відстані пробою за величини прикладеної напруги. Коли відстань між електродами перевищить пробивну, для відновлення розрядів електроди повинні бути зближеними. Як правило, електрод зближують упродовж усього часу обробки так, щоб електричні розряди не припинялися. Якщо поверхня одного електрода менша, ніж поверхня іншого, то під дією безперервно повторюваних розрядів відбувається руйнування більшого електрода на ділянці, що відтворює форму меншого електрода (див. рис. 1.1 б).

Величина міжелектродного проміжку, енергія та частота розрядів, ступінь насичення проміжку продуктами ерозії мають вирішальний вплив на розвиток електричних імпульсних процесів і створюваний ними ефект.

Параметри робочих імпульсів. Основними параметрами електричних імпульсів, що подаються до міжелектродного проміжку, є їх частота повторюваності, тривалість, амплітуда та шаруватість, а також форма, що визна-

чає максимальну потужність й енергію. Форма та параметри імпульсів істотно впливають на зношеність електрода-інструмента, продуктивність і шорсткість оброблюваної поверхні. Позначимо частоту повторюваності імпульсів, тобто їх кількість за 1 секунду, через f . Тоді $T = 1/f$ буде періодом. Він визначає проміжок часу, через який йде наступний імпульс (рис. 1.3 а). Період T складається з двох частин – тривалості імпульсу t_i та інтервалу (паузи) між двома суміжними імпульсами t_n (рис. 1.3 б).

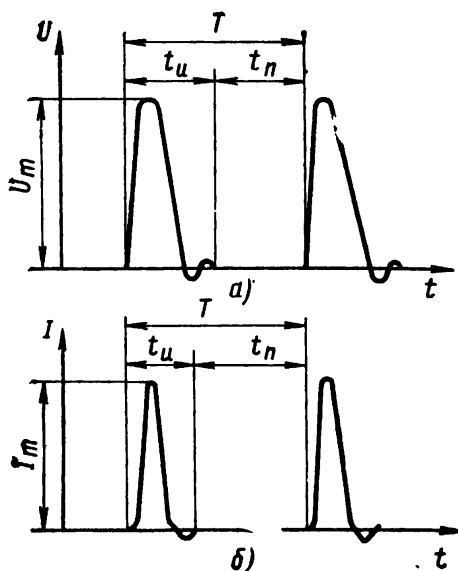


Рисунок 1.3 – Імпульси напруги та струму: U – напру- га на електродах; I – струм у міжелектродному проміжку

Імпульс характеризується амплітудним значенням (або амплітудою) напруги та струму (U_m і I_m). Це максима- льні значення, які набувають напруги й струму за час ім- пульсу. Під час електроерозійної обробки амплітуда на- пруги змінюється від декількох вольтів до кількох сотень

вольтів, а амплітуда струму – від частки ампера до десятків тисяч амперів.

Шпаруватістю імпульсу q називають відношення періоду T до тривалості імпульсу t_i . Діапазон шпаруватостей під час електроерозійної обробки знаходиться в межах від 1 до 30.

Форма імпульсів може бути різною. Напруга і струм можуть змінюватися за гармонічними кривими. Графік напруги та струму може бути гострокутним, прямокутним або пилкоподібним чи іншим, більш складної форми. Форма імпульсу залежить від вихідних параметрів установки, форми імпульсу (генератора імпульсів), а також від параметрів електричного кола, до якого приєднані електроди.

Хоча імпульси струму утворюються під дією імпульсів напруги, форми імпульсів напруги та струму точно не відповідають одна одній, а часто мають істотну розбіжність. Це пояснюється впливом ємності й індуктивності електричних ланцюгів, а також зміщенням процесів за часом (струм, що має практичне значення для електроерозійної обробки, починає проходити через електродний проміжок тоді, коли напруга вже досягає величини, достатньої для пробоя проміжку). Чим більші площі графіків, що охоплюються кривою струму та кривою напруги, тим більшу енергію має імпульс.

Полярний ефект і полярність імпульсу. Висока температура в каналі розряду й динамічні процеси, що відбуваються, викликають ерозію обох електродів. Підвищення ерозії одного електрода порівняно з іншим електродом називається полярним ефектом. Полярний ефект визначається матеріалом електрода, енергією й тривалістю імпульсів, знаком підведеного до електрода потенціалу.

Процеси зміни напруги та струму мають коливальний характер щодо їх нульового значення. При електроерозійній обробці прийнято вважати робочою, або прямою, по-

лярністю імпульсу ту його частину, що викликає найбільший ефект ерозії оброблюваної заготовки, а протилежною частиною імпульсу, що спричиняє посилену ерозію електрода-інструмента. Оброблювану заготовку приєднують до того полюса, ефект ерозії якого за даних умов більший. До протилежного полюса приєднують електрод-інструмент. Наприклад, при коротких імпульсах електроіскрової обробки енергія переважно надходить на анод, за який тут використовують заготовку (пряма полярність). При збільшенні тривалості імпульсів настає перерозподіл теплового потоку на електродах. Це призводить до того, що за певних режимів електроімпульсної обробки ерозія анода стає меншою, ніж ерозія катода. У цьому разі потрібно застосовувати зворотну полярність, використовуючи заготовку як катод.

Електроерозійна оброблюваність. Ефект ерозії різних металів і сплавів, вироблений однаковими за своїми параметрами електричними імпульсами, різний. Залежність інтенсивності ерозії від властивостей металів називають електроерозійною оброблюваністю.

Різний вплив імпульсних розрядів на метали та сплави залежить від їх теплофізичних констант: температур плавлення і кипіння, теплопровідності, теплоємності. Якщо прийняти електроерозійну оброблюваність сталі за одиницю, то електроерозійна оброблюваність інших металів (за тих самих умов) може бути подана в таких відносних одиницях: вольфрам – 0,3; твердий сплав – 0,5; титан – 0,6; нікель – 0,8; мідь – 1,1; латунь – 1,6; алюміній – 4; магній – 6 (зазначені дані справедливі лише за конкретних умов: енергія імпульсу – 0,125 Дж, тривалість – 141,06 с, частота – 1200 1/с, амплітуда струму – 250 А).

Робоче середовище. Більшість операцій при електроерозійній обробці проводять у рідині. Вона забезпечує умови, необхідні для видалення продуктів ерозії з міжеле-

ктродного проміжку, стабілізує процес, впливає на електричну міцність міжелектродного проміжку. Рідини, придатні для електроіскрової обробки, повинні мати відповідну в'язкість, електроізоляційні властивості, хімічну стійкість до дії розрядів і бути безпечними в експлуатації. На рисунку 1.4 показані графіки впливу властивостей діелектричного середовища на величину міжелектродного проміжку і величину пробивної напруги. Під час роботи рідина забруднюється металевими частинками і продуктами її розпаду, що призводить до значного зниження електричної міцності й до збільшення середнього значення міжелектродного проміжку. Графіки показують доцільність застосування діелектричного середовища нафтопродуктів.

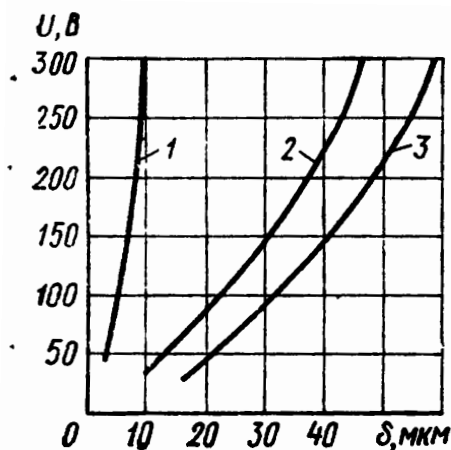


Рисунок 1.4 – Вплив діелектричного середовища на величину пробивної напруги і міжелектродний проміжок: 1 – повітря; 2 – газ; 3 – трансформаторне масло

За відносно рівної продуктивності обробки в середовищі, наприклад, трансформаторного і веретенного масел перевагу потрібно віддати останньому, оскільки темпера-

тура його спалаху вища (165 °C порівняно із 135 °C). Газ застосовують під час прошивання отворів малого діаметра, коли низька в'язкість середовища особливо важлива. У ході обробки збільшуються зольність і в'язкість робочої рідини, тому її необхідно періодично замінювати. Так, індустріальні масла необхідно замінювати при збільшенні зольності до 1,23 % (у незабруднених маслах вона дорівнює 0,007 %) і в'язкості – до 20 см²/с.

Продуктивність електроерозійної обробки залежить від великої кількості факторів: електроерозійної оброблюваності, потужності, реалізованої в міжелектродному проміжку; робочого середовища; правильного вибору матеріалу електрода-інструмента. Термін «продуктивність», що вживається в технології електроерозійної обробки для характеристики інтенсивності процесу за питомим зніманням металу, не завжди однозначний уявленню про продуктивність в одиницях випуску продукції. Так, наприклад, при прошиванні отворів у заготовці порожнистим і суцільним електродом тривалість виготовлення однієї деталі й, отже, продуктивність у штуках будуть різними, хоча обсяг видаленого металу із заготовки може бути однаковим. Чи не будуть пропорційними штучна продуктивність і обсяг металу, безпосередньо зруйнований в електроіскровому проміжку.

При великій площі електродів і проміжку між ними завжди виявляється велика кількість ділянок, підготовлених для проходження імпульсів струму, що сприяє підвищенню продуктивності обробки. При цьому необхідне збільшення вихідної потужності генератора імпульсів. При малій робочій площі електрода-інструмента висока продуктивність недосяжна через неможливість підведення великої потужності, оскільки інтенсивне (значне) виділення газів і велика кількість відокремлюваних частин, електродів, що руйнуються, припиняють нормальний процес обробки. Збільшення в'язкості робочої рідини уповільнює

виведення з міжелектродного проміжку продуктів ерозії й знижує продуктивність. Зменшення в'язкості порівняно з рекомендованою також знижує продуктивність, оскільки погіршуються захоплення рідиною продуктів ерозії та винесення їх із міжелектродного проміжку.

Із підвищенням частоти імпульсів і зниженням робочого струму стабільність робочого процесу погіршується. Це приводить до необхідності збільшити шпаруватість імпульсів. Застосування прямокутних імпульсів істотно підвищує продуктивність.

Продуктивність обробки можна підвищити, якщо застосувати примусове видалення продуктів ерозії з міжелектродного проміжку. Для цього в міжелектродний проміжок під тиском нагнітають рідину (рис. 1.5). Гарні результати дає накладення вібрацій на електрод-інструмент, а також обертання одного або обох електродів. Тиск рідини залежить від глибини отвору та величини міжелектродного проміжку.

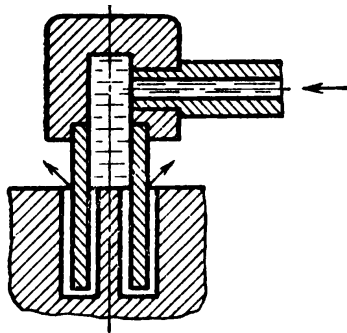


Рисунок 1.5 – Схема підведення рідини в міжелектродний проміжок через порожнистий електрод під час прошивання отвору

Швидкість проникнення електрода-інструмента в заготовку зі збільшенням глибини обробки не знижується, як при обробці без примусової подачі рідини. Створення вібрацій прямолінійно переміщуваного електрода-інструмента також сприяє видаленню продуктів ерозії, але меншою мірою, ніж нагнітання рідини. Вібрації особливо необхідні при електроіскровій обробці глибоких отворів малого діаметра і вузьких щілин. Більшість електроерозійних верстатів забезпечена спеціальною вібраційною головою.

Якість поверхні й точність обробки. Метал електродів зазнає хоча й локального, короточасного, проте достатньо інтенсивного електротермічного впливу. Найвища температура існує на оброблюваній поверхні й швидко зменшується на деякій відстані від поверхні. Велика частина розплавленого металу та його парів видаляється із зони розряду, але деяка частина залишається в лунці (рис. 1.6).

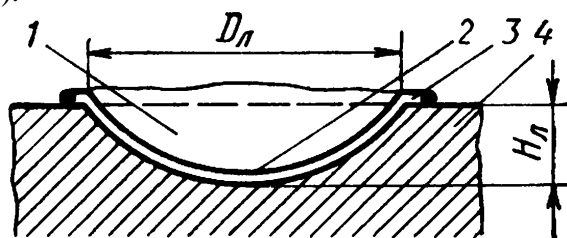


Рисунок 1.6 – Лунка, одержана внаслідок впливу поодиноким імпульсу: 1 – простір, що залишився після виплавлення металу; 2 – білий шар; 3 – валик навколо лунки; 4 – оброблювана заготовка; D_n , H_n – діаметр і глибина лунки

Під час застигання металу на поверхні лунки утворюється плівка, що за своїми властивостями відрізняється від основного металу. Поверхневий шар у розплавленому стані активно вступає в хімічну взаємодію з парами й продуктами розпаду робочої рідини, що утворюються в зоні високих

температур. Результатом цієї взаємодії є інтенсивне насичення металу компонентами, що містяться в рідкому середовищі, а також речовинами, які входять до складу електрода-інструмента. Таким чином, до поверхневого шару можуть бути віднесені титан, хром, вольфрам і т. д. При електроерозійній обробці сталевих заготовок у середовищі, що складається з рідких вуглеводнів (гас, масло), поверхневий шар насичується вуглецем, тобто утворюються карбіди заліза.

Інтенсивне тепловідведення із зони розряду через прилеглі до неї маси холодного металу й робочу рідину створює умови для надшвидкісного загартовування, що одночасно з науглецьованням приводить до утворення дуже твердого шару. Загартований поверхневий шар сталі має підвищену стійкість до стирання і менший, ніж у нетермообробленої сталі, коефіцієнт тертя. Структура поверхневого шару істотно відрізняється від структури основного металу й подібна за структурою до вибіленого шару, що виникає на поверхні деяких чавунів. Тому цей шар одержав назву «білий шар». Глибина білого шару залежить від енергії імпульсів, їх тривалості й теплофізичних властивостей оброблюваного матеріалу. При тривалих імпульсах струму великої енергії глибина білого шару дорівнює десятим часткам міліметра, а при коротких імпульсах – сотим часткам міліметра і мікрометрам.

Унаслідок крихкості й нерівномірної щільності білого шару здебільшого він є дефектним. Він знижує міцні властивості основного металу, оскільки при знакозмінних навантаженнях у ньому легко виникають тріщини, що можуть поширюватися вглиб деталі.

У поверхневому шарі заготовки можливе виникнення залишкових напружень, обумовлене тепловими процесами на поверхні. Величина та глибина поширення залишкових напружень залежать від параметрів імпульсів, теплофізич-

них властивостей оброблюваного матеріалу і фізико-хімічних властивостей оплавленого поверхневого шару. Залишкові напруження зростають зі збільшенням енергії імпульсів або їх тривалості. За певних режимів обробки залежно від матеріалу заготовки залишкові напруження можуть перевищувати межу його міцності, викликаючи утворення сітки мікротріщин. Тому під час виготовлення деталей, призначених для роботи з великими навантаженнями, потрібно видаляти дефектний шар. Для повного відновлення міцності й витривалості деталей необхідно видаляти припуск, що дорівнює приблизно подвоєній глибині оплавленого шару. Проте немає необхідності завжди повністю видаляти поверхневий шар після електроерозійної обробки. У багатьох випадках видаляють лише ту його частину, що безпосередньо знижує експлуатаційні характеристики, наприклад шар, у якому утворюється сітка мікротріщин. Різні види обробки, що здійснюються після електроерозійної, наприклад електрополірування, відрогартування, термообробка та ін., можуть істотно зменшити залишкові напруження в поверхневому шарі або навіть змінити їх знак, завдяки чому втомна міцність деталі може бути одержана практично такою самою, як і при обробці різанням.

Зносостійкість деталей, одержаних електроерозійною обробкою, завдяки наявності білого шару підвищується і значно перевищує (до 1,5 раза) зносостійкість деталей, одержаних механічною обробкою різанням. Це має істотне значення, наприклад, для одержання сталевих штампів. Втомна міцність деталей, одержаних електроерозійною обробкою, дещо знижується.

Профіль обробленої поверхні є наслідком накладання одна на одну лунок, утворених під дією поодиноких електричних розрядів, що руйнують матеріал заготовки (рис. 1.7).

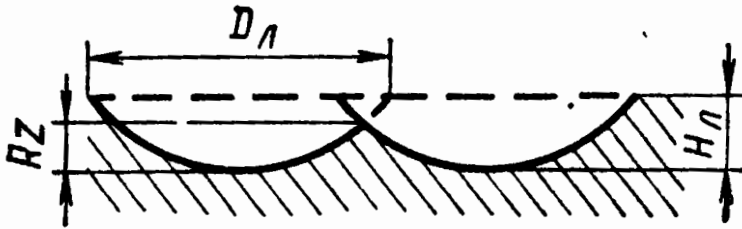


Рисунок 1.7 – Профіль поверхні, обробленої імпульсами струму

Таким чином, оброблена поверхня матиме більшу або меншу шорсткість. Геометричні розміри, утворені при обробці лунок, можна визначити за такими емпіричними формулами:

$$D_{л} = K_1 W^{\frac{1}{3}};$$

$$H_{л} = K_2 W^{1/3},$$

де $D_{л}$ – діаметр лунки, мкм; $H_{л}$ – глибина лунки, мкм; W – енергія імпульсу, мкДж; K_1, K_2 – коефіцієнти, що залежать від матеріалу електродів і складу робочого середовища (при мідних електродах під час обробки у газі $K_1 = 4, K_2 = 0,45$).

Середню висоту нерівностей, що утворюються внаслідок впливу на поверхню заготовки серії імпульсів струму, визначають за формулою $Rz \approx 1/3 H_{л}$.

Для досягнення найвищої продуктивності й одержання необхідної шорсткості обробку потрібно проводити декількома переходами. Спочатку імпульсами великої енергії видаляють основну масу металу. Потім при поступовому зниженні енергії імпульсів здійснюють згладжування й остаточну обробку поверхні. Режими обробки за своїми

технологічними показниками прийнято поділяти на чорнові, або обдирні, чистові та оздоблювальні.

До основних первинних похибок електроерозійної обробки відносять такі: Δk – похибки, що виникають унаслідок поперечних коливань інструмента; Δn – похибки, які є наслідком статичних пружних коливань системи ВПД (верстат – пристосування – інструмент – деталь); $\Delta y.z$ – похибки установки заготовки на верстаті; $\Delta y.i$ – похибки установлення інструмента; Δc – похибки, зумовлені геометричною неточністю верстата; $\Delta v.i$ – похибки, зумовлені неточністю виготовлення інструмента; Δz – похибки, зумовлені зношенням інструмента; Δt – похибки температурних деформацій; $\Delta z.n$ – похибки, викликані внутрішніми залишковими напруженнями; Δm – похибки, обумовлені наявністю міжелектродного електричного проміжку.

Похибки Δk , що виникають під час вібрації інструмента вздовж напрямку подачі, впливають на точність обробки. Ці похибки залежать від жорсткості системи «інструмент – шпindel – вібратор», від мас і конструкцій цих елементів. Похибка Δk може становити 0,01–0,05 мм. Похибка Δn на відміну від аналогічної похибки механічної обробки не залежить від режиму обробки. Вона виникає через відхилення осі шпинделя від свого вертикального положення і незрівноваженості маси інструмента щодо осі шпинделя, що призводить до пружних деформацій у системі «інструмент – шпindel». Ця похибка становить, як правило, незначну величину (0,005 мм).

У зрівноважених системах і при легких електродах-інструментах похибка Δn практично відсутня. Первинна похибка установки заготовки $\Delta y.z$ аналогічна подібній похибці під час механічної обробки. При суміщених настанові і вимірювальних базах і при індивідуальному вивірянні заготовок перед їх обробкою похибка $\Delta y.z$ може бути усунена. Похибка установлення інструмента $\Delta y.i$ залежить

переважно від паралельності геометричній осі 1 інструмента і напрямку подачі S_{np} (рис. 1.8).

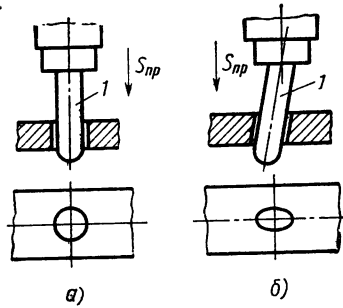


Рисунок 1.8 – Залежність форми отвору при розбіжності положення осі електрода-інструмента з віссю верстата

Похибка $\Delta u.i$ становить 0,01–0,015 мм. Первинна похибка Δc визначається відхиленням осі шпинделя від перпендикуляра до опорної поверхні стола. Для зменшення Δc копіювальних-прошивальних верстатів установлюють жорсткі допуски на перпендикулярність геометричній осі їх шпинделя опорній поверхні стола. Похибки Δc становлять 0,015–0,02 мм і можуть бути виявлені за нормативами точності верстата. Первинна похибка $\Delta i.i$ визначається допусками на розміри інструмента, встановлені за допусками на розміри деталі ($\Delta i.i=0,015-0,1$ мм). Первинна похибка Δi , спричинена зношенням інструмента, залежить від ерозійної стійкості матеріалу інструмента, режиму обробки і глибини впровадження інструменту. Для зменшення похибки Δi використовують такі способи: а) застосовують схему обробки з коловим поступальним рухом електрода-інструмента; б) калібрують прошитий отвір незношеною частиною інструмента; в) застосовують багатоступінчастий електрод-інструмент – заготовку послідовно обробля-

ють кожним виступом інструмента, пом'якшуючи режим (чорновий, чистий, довідний); г) проводять зміну електродів-інструментів при змінах режиму, використовуючи інструменти, що працюють на менш грубих режимах.

Первинна похибка Δt обумовлена нагріванням технологічної системи, що призводить до зміни її лінійних розмірів. Збільшення розрахункового розміру внаслідок нагрівання деталі

$$\Delta l_t = l \alpha_t \Delta \theta,$$

де l – розрахунковий розмір; α_t – коефіцієнт лінійного розширення; $\Delta \theta$ – різниця температур у кінці й на початку процесу обробки. При визначенні величини Δl_t необхідно враховувати і зміну розмірів заготовки внаслідок нагрівання. Первинна похибка Δl_0 виникає при обробці заготовок зниженої жорсткості. Заготовка може деформуватися від напружень поверхневого шару, на окремих ділянках наближатися до електрода-інструмента і зазнавати зайвої ерозії.

Цю похибку виключають, переходячи до менш жорстких режимів (з невеликими значеннями енергії та тривалості імпульсів). Похибка Δm обумовлена нестабільністю процесів у міжелектродному проміжку, особливо при зміні режимів обробки і відповідно зміні міжелектродного проміжку. Ретельна фільтрація робочої рідини, перехід від більш жорстких режимів до чистових і довідних дозволяють істотно зменшити цю похибку. Зазначені похибки мають як випадковий характер, так і системний. Систематичні похибки $\Delta_{\text{сист}} = \Delta_i + \Delta_t$. Решту розглянутих похибок можна віднести до випадкових. Похибки в напрямку вертикальної та горизонтальної подачі різні, оскільки при цьому дія складових первинних похибок різна. Сумарна похибка в напрямку вертикальної подачі:

$$\sum \Delta_B = K \sqrt{\Delta_{i,i}^2 + \Delta_M^2 + \Delta_{y,i}^2 + \Delta_{y,3}^2} + \Delta_{cuct},$$

де K – коефіцієнт, що враховує відхилення закону розподілу похибок від закону нормального розподілу ($K=1,2-1,5$).

Сумарна похибка в напрямку горизонтальної подачі

$$\sum \Delta_G = K \sqrt{\Delta_{i,i}^2 + \Delta_K^2 + \Delta_c^2 + \Delta_{yn}^2 + \Delta_M^2} + \Delta_{cuct}.$$

На електроерозійних верстатах нормальної точності сумарна похибка обробки змінюється в межах від 0,04 до 0,4 мм. Підвищення жорсткості, застосування точних відлікових пристроїв дозволяють зменшити сумарну похибку до 0,02 мм.

Розрахунок припусків на електроерозійній обробці. Мінімальний припуск на обробку може бути визначений за такою формулою:

$$Z_{min} = (Ra + ha) + (\rho a + \Delta_{ycm}),$$

де Ra – середня висота мікронерівностей, одержана на попередньому переході; ha – глибина дефектного шару, одержана на попередньому переході; ρa – сума просторових відхилень взаємозв'язаних поверхонь; Δ_{ycm} – похибка устанавлення під час обробки,

$$\Delta_{ycm} = K \sqrt{\Delta_{y,i}^2 + \Delta_{y,3}^2}.$$

Припуск на електроерозійну обробку, якщо вона відбувається після механічної, визначають за величинами: Ra , ha і ρa , наведена в довідниках для механічної обробки металів. Коли потрібно визначити припуск на механічну об-

робку після електроіскрової або на електроіскрову чистову обробку після електроіскрової чорнової, величини Ra і ha визначають за довідковими даними технологічних вихідних параметрів чорнової електроерозійної обробки. Просторові відхилення взаємозв'язаних поверхонь pa визначають з урахуванням похибок електроерозійної обробки, а похибку Δ_{yct} – з урахуванням похибок механічної або електроерозійної обробки.

При визначенні припуску на чистовий прохід, що виконується на тому самому електроерозійному верстаті без перестановлення заготовки та інструмента, просторові відхилення не виправляються і $pa=0$. Під час роботи на чистовому режимі дефектний шар практично відсутній ($ha=0$). Якщо поверхневий шар видаляти не потрібно, то величину ha під час розрахунку припуску також не враховують. Розміри робочої частини електрода-інструмента коригують за нормлями до його бічної поверхні, на величину, що дорівнює сумі міжелектродного зазору й висоті максимальних нерівностей. Під час застосування осцилювальних головок необхідно враховувати амплітуду коливань інструмента. Корекцію роблять поступово під час виготовлення декількох деталей або партій. Попередні розміри електрода-інструмента встановлюють за місцевими боковими зазорами, які вимірюють щупом, і торцевим зазором, визначеним за індикатором.

1.2 Особливості електроіскрової та електроімпульсної обробки

Залежно від умов обробки, застосовуваних режимів, устаткування й технологічних прийомів, а також одержуваних технологічних характеристик ерозійну обробку електричними розрядами прийнято поділяти на електроіскрову та електроімпульсну, а залежно від частоти повторення розрядів – на низько-, середньо- і високочастотну. Елект-

роіскрова обробка базується на використанні електричних імпульсних розрядів малої тривалості (від часток мікросекунд до кількох сотень мікросекунд) та малої енергії (до 4–5 Дж), що відбувається з великою шпаруватістю і високою частотою (до 1,5–106 кГц). Обробку здійснюють при порівняно невисоких напруженнях, що зазвичай не перевищують 250 В. За цих напружень відстань між електродами дуже невелика і становить кілька сотих часток міліметра. Витрати енергії на знімання 0,1 кг металу становлять 4–5 кВт·год.

Цей вид обробки застосовують переважно для прецизійної обробки невеликих деталей радіоелектронної промисловості, паливної апаратури (дрібні отвори, шліфувальні операції), вирізування фасонних контурів твердосплавних, вирубних штампів не профільованим (дротяним) електродом. При цьому способі обробки досягаються відносно низька шорсткість $Ra=1,2,5-2,5$ мкм за ГОСТ 2789 і висока точність обробки.

Для одержання найбільшої продуктивності під час знімання металу із заготовки та найменшого зношення інструмента електрод-інструмент під'єднують до негативного полюса генератора – катода, а заготовку – до позитивного полюса – анода.

Електроімпульсна обробка – це різновид електроерозійної обробки. Вона характеризується більшою швидкістю знімання металу за відносно високої шорсткості обробленої поверхні. Відповідно й режими обробки, форма використовуваних при обробці імпульсів мають істотні відмінності. Внаслідок збільшення уведеної в зону імпульсної обробки електричної потужності швидкість знімання металу порівняно зі швидкістю знімання при електроіскровій обробці підвищується у 8–10 разів.

Збільшення тривалості імпульсів за низької шпаруватості усунення зворотної півхвилі напруги призводить до

різкого зниження зношення електрода-інструмента. На відміну від електроіскрової обробки застосовують протилежну полярність: анод – інструмент, катод – заготовка.

Завдяки високим швидкостям знімання металу при зниженні відносного зношення інструмента стає можливою обробка фасонних поверхонь великої площі, що вимагають значного знімання металу. Високий ККД генератора імпульсів застосовують при імпульсній обробці, що забезпечує проведення обробки при зниженій питомій витраті електричної енергії.

Процес імпульсної обробки, як і всі електроерозійні процеси, базується на розплавленні малих частин металу в зоні електричних розрядів. Чим вища частота розрядів, тим нижча (за інших рівних умов) шорсткість поверхні. Тому при електроімпульсній обробці використовують, як правило, струми підвищеної частоти, одержувані від спеціальних генераторів.

Режими електроімпульсної обробки відрізняються від режимів електроіскрової обробки застосуванням знижених напруг і відносно великими значеннями середніх струмів. Так, для генераторів імпульсів типу МГІ верхня межа регулювання напруги становить 24–26 В, а нижня 11–12 В. За напруги менше 11 В продуктивність і стабільність процесу різко знижуються. Швидкість знімання металу при електроімпульсній обробці залежить головним чином від сили струму. За достатньої потужності джерела живлення величину струму доводиться обмежувати відповідно до розмірів оброблюваної поверхні, оскільки підвищення сили струму понад оптимальну призводить до оплавлення заготовки, швидкого зношення електрода-інструмента і втрати стабільності процесу. На рисунку 1.9 показана залежність середнього струму $I_{сеп}$ під час електроімпульсної чорнової обробки від площі F оброблюваної поверхні. Необхідний режим обробки встановлюють за номограмами або розра-

ховують. Наприклад, для генераторів із частотою 400 с^{-1} режим за струмом (А) можна орієнтовно встановити за такими залежностями: при $F < 100 \text{ мм}^2$ $I_{\text{ср}} = (12 \div 15) F$; при $F > 150 \text{ мм}^2$ $I_{\text{ср}} = (8-9)F$. Чистові режими обирають виходячи з необхідної якості поверхні, послідовно обробляючи сталеві деталі при $I_{\text{ср}}$, що дорівнюють 50, 30, 20, 10 і 5 А, а деталі з твердих сплавів – при $I_{\text{ср}}$, що дорівнюють 15, 12, 10 і 5 А. Заштрихована область на рис. 1.9 відповідає значенням струму, що забезпечує одержання максимальної продуктивності за даних параметрів. При менших значеннях струму можливості обробки використовуватимуться не повністю, при виході за верхню межу стійкість процесу руйнується.

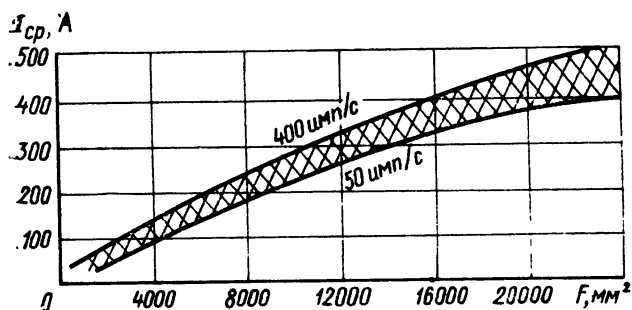


Рисунок 1.9 – Залежність середнього струму при чорновій електроімпульсній обробці від площі оброблюваної поверхні

1.3 Технологічні схеми та операції електроерозійної обробки

Схеми формоутворення. Формоутворення деталей електроерозійним методом можна здійснювати за схемами.

1-ша схема

Копіювання форми профільованого електрода інструмента або його перерізу. При цьому оброблюваний

елемент заготовки за формою є зворотним відображенням робочої поверхні інструмента. Цю операцію називають прошиванням. Існують методи прямого і зворотного копіювання. При прямому копіюванні інструмент знаходиться над заготовкою, а при зворотному – під нею. Метод прошивання, і зокрема прямого копіювання, простий, і його широко використовують у промисловості. На рисунку 1.10 показані деякі технологічні схеми електроерозійної обробки заготовок: 1) методами прямого (а-г) і зворотного (д) копіювань форми профільованого електрода; 2) S_{np} – напрям подач.

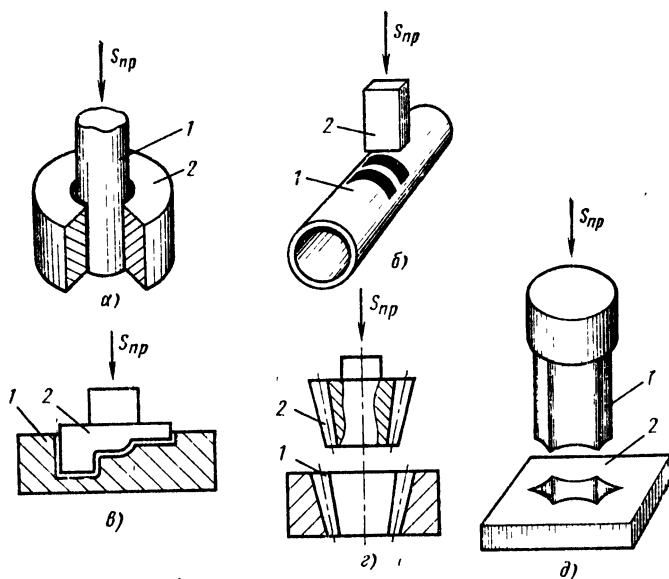


Рисунок 1.10 – Схема формоутворення копіюванням геометричної форми електрода-інструмента

2-га схема

Взаємне переміщення оброблюваної заготовки профільованого електрода-інструмента (рис. 1.11). За схемою можливі операції вирізання складнопрофільних деталей (рис. 1.11 а) і розрізання заготовок 1, що не профілюються електродами 2 (рис. 1.11 б, в), електроерозійного шліфування (рис. 1.11 г) і розточування (рис. 1.11 д).

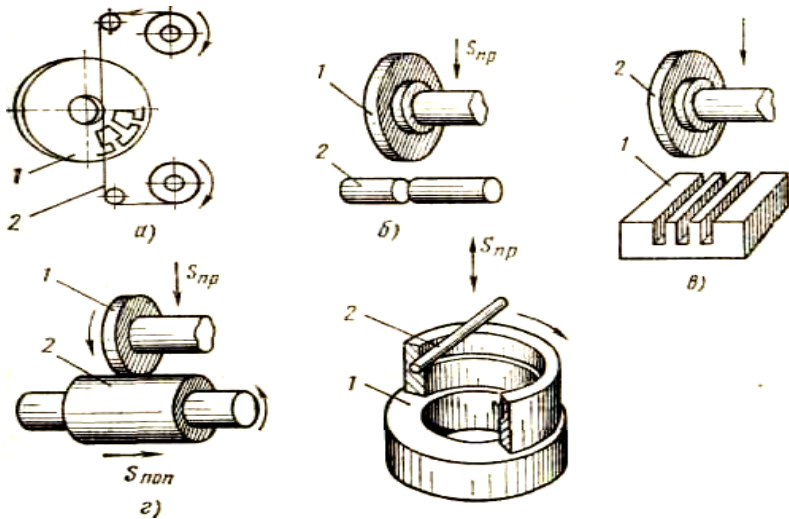


Рисунок 1.11 – Схема електроерозійної обробки непрофільованим електродом

3-тя схема

Посадження переміщення заготовки 1 і профільованого електрода 2 (обгинання або обкатування). Цей метод рідко застосовують, але він дозволяє отримати деталь складної форми за простої форми електрода-інструмента (рис. 1.12).

Обробка порожнин штамів та прес-форм. Операції з обробки порожнин штамів та прес-форм здійснюють на електроерозійних копіювально-прошиваних верстатах

за схемою 1. Ці операції поділяють на операції з прошиванням отворів та з утворенням об'ємних тривимірних поверхонь (кувальних і витяжних штампів, різних прес-форм, об'ємних калібрів т. д.). Перед обробкою заготовки встановлюють на верстаті й закріплюють затискними пристроями. Важкі заготовки іноді не закріплюють. Інструмент установлюють і закріплюють за допомогою затискних пристроїв і магнітних патронів або вивіряючи за розміткою з допомогою відлікових мікроскопів.

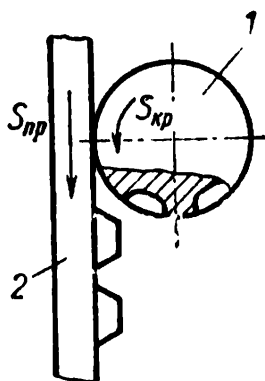


Рисунок 1.12 – Схема формування обкатуванням: 1 – заготовка; 2 – електрод-інструмент; S_{np} , $S_{кр}$ – напрям подачі

Для забезпечення циркуляції робочої рідини в тілі інструмента на відстані 20–40 мм один від одного виконують спеціальні отвори діаметром 1,2–2,5 мм (рис. 1.13). Для стабілізації міжелектродного проміжку рекомендується, щоб відстані між отворами входу і виходу рідини або контуром не відрізнялися більше ніж удвічі.

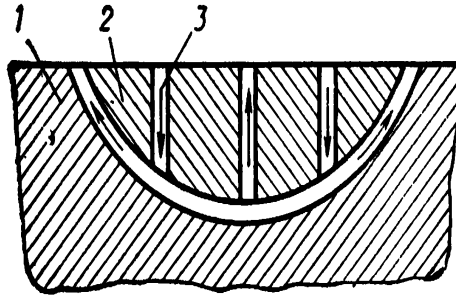


Рисунок 1.13 – Схема обробки штампів:
 1 – заготовка; 2 – електрод-інструмент; 3 – канал для циркуляції робочої рідини

Режим обробки обирають, виходячи з площі обробки, і змінюють його залежно від зміни цієї площі у процесі обробки. Після попередньої обробки інструмент замінюють на новий (чистовий). Не доходячи до одержання остаточного вертикального розміру на 0,4–0,5 мм, електричний режим «пом'якшують». Остаточну обробку виконують на чистових високочастотних режимах. Ці режими визначають за необхідною шорсткістю поверхні. Іноді використовують більш зручний показник інтенсивності процесу – лінійне переміщення електрода-інструмента. За правильного електричного режиму для поверхні площею 200–250 см² ця швидкість лежить у межах від 0,3 до 0,6 мм.

Для забезпечення необхідних розмірів деталі на чорнових та напівчистових режимах роблять корекцію розмірів інструмента на величину $2(a + Z_{min})$, де a – величина зазору; Z_{min} – мінімальний припуск для наступного переходу.

Обробка елементів робочих коліс турбін і насосів

Робочі колеса парових і газових турбін, а також таких, що працюють за дуже важких умов, виготовляють із важкооброблюваних матеріалів (корозійностійких сталей, жаромі-

цних сплавів, тугоплавких матеріалів і т. п.). Особливо трудомістка операція механічної обробки міжлопаткових каналів аеродинамічного профілю. Електроіскрова обробка дозволяє легко подолати ці труднощі. Якщо лопатки встановлені по периметру диска (або ротора), то для обробки його встановлюють на оправці ділильного пристрою, фіксуючи під час обробки кожного каналу і послідовно повертаючи для обробки подальших каналів. Фасонну поверхню одержують копіюванням конфігурації електрода-інструмента, який виготовляють у вигляді зворотного відображення порожнини каналу, але з меншими розмірами по нормалі до точок оброблюваної поверхні. Обробку виконують електродами марок ЕЕГ або МПГ. В оптимальному режимі швидкість проникнення інструмента становить 0,5–2 мм/хв. Обробку виконують послідовно на чорновому й чистовому режимах, використовуючи зношений на чистовому режимі інструмент для чорнової обробки.

Якщо лопатки розміщені на торці диска (рис. 1.14 а), електроерозійну обробку виконують інструментом (рис. 1.14 б), утвореним із секцій або виготовленим монолітним, формуючи одночасно всі канали.

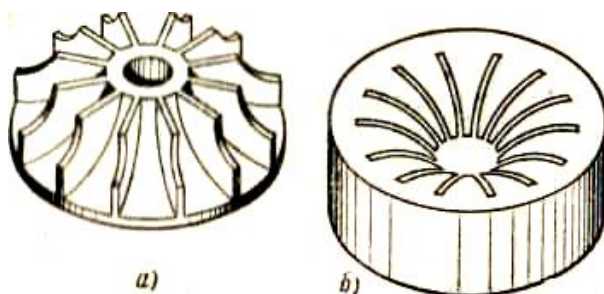


Рисунок 1.14 – Робоче колесо насоса, оброблене на електроерозійному верстаті, та електрод-інструмент

Прошивання вікон, щілин та отворів. Прошивання вікон, щілин та отворів виконують на універсальних електроерозійних верстатах. До цих операцій відносять прошивання вікон у матрицях штампів, вузьких щілин у ливарних формах, отворів в електромагнітах, криволінійних отворів, каналів у корпусах машин та гідроапаратури, глибоких отворів малого діаметра.

Електроерозійний метод дозволяє обробляти елементи вирубних штампів із загартованих заготовок. Особливостями прошивання отворів у штампах є необхідність точного з'єднання контура матриці та пуансона, а також зменшення впливу зворотної конусності. Зменшення конусності прошованого отвору з боку рубочної кромки матриці досягається застосуванням багатоступеневих електродів-інструментів, відсмоктуванням робочої рідини, зміщенням інструмента в бік робочої поверхні вікна або доданням інструмента орбітального руху (рис. 1.15). При цьому методі обробки міжелектродний зазор збільшується на величину $2r$, завдяки чому поліпшуються умови видалення із зазору продуктів ерозії. Обробка поверхні заготовки проводиться різними ділянками електрода-інструмента, завдяки чому точність і якість обробленої поверхні підвищуються. Контур обробленого отвору є еквідистантним щодо кривої, по якій переміщається центр планетарного руху електрода-інструмента. Наявне обладнання дозволяє одержати зазор 0,03–0,08 у з'єднанні пуансона і матриці. На прецизійних верстатах можливе забезпечення зазору 0,01–0,02 мм. Шорсткість поверхні $Ra = 1,25\text{--}2,5$ мкм.

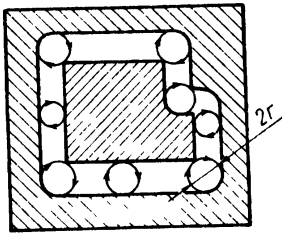


Рисунок 1.15 – Обробка отвору інструментом, що виконує планетарний рух

до 100 мм. Для забезпечення видалення продуктів ерозії з міжелектродного проміжку електрод-інструмент роблять *T*-подібної форми або зменшують товщину хвостової частини порівняно з робочою частиною на кілька десятків часток міліметра. Прошивка щілин становить 0,5–0,8 мм/хв, шорсткість обробленої поверхні до $Ra=2,5$ мкм.

Великий практичний інтерес становлять можливості обробки глибоких циліндричних отворів. Тут одержання отворів можливої глибини і заданого діаметра залежить від виду електрода-інструмента, що забезпечує ту чи іншу інтенсивність обміну робочого середовища в міжелектродному проміжку. При прошиванні отворів суцільним електродом (рис. 1.16 а) їх гранична глибина характеризується кривою 1. Крива 2 характеризує відносне зниження продуктивності Q обробки (порівняно з початковою) для електрода діаметром $d=0,5$ мм, а крива 3 – для електрода діаметром $d=5$ мм.

Застосовуючи трубчастий електрод і виробляючи прокачування робочої рідини (рис. 1.16 б), вдається підвищити граничну глибину L обробки (крива 4). Відносне

Глухі отвори виконують за кілька переходів, виробляючи заміну електродів і послідовно «пом'якшуючи» режими обробки, закінчуючи обробку довідним режимом.

Електроерозійним способом прошивають щілини шириною 0,4–0,8 мм, глибиною до 20 мм або щілини шириною 2,5–10 мм, глибиною

зниження продуктивності при обробці отворів трубчастим електродом діаметром 0,5 мм характеризується кривою 5, а електродом діаметром 5 мм – кривою 6. Крива 7 визначає граничну глибину отвору при обробці з прокачуванням робочої рідини й установці всередині трубчастого електрода пластина (рис. 1.16 в), що зменшує поперечний переріз, який залишається всередині електрода стрижня. Отвір практично необмеженої глибини можна одержати, надаючи йому обертання (рис. 1.16 г, крива 8), оскільки пластина повністю руйнує внутрішній стрижень. Продуктивність обробки при цьому зберігається сталою (рис. 1.16, крива 9). Схема установки для обробки обертовим електродом показана на рис. 1.17. Частота обертання електрода-інструмента – близько 100 об/хв. При прошиванні отворів діаметром і глибиною в кілька сотень міліметрів можна використовувати лише спосіб, показаний на рис. 1.16. При цьому елемент, розміщений усередині електрода-інструмента, виготовляють із квадратним, трикутним або прямокутним перерізом, а також порожнистим.

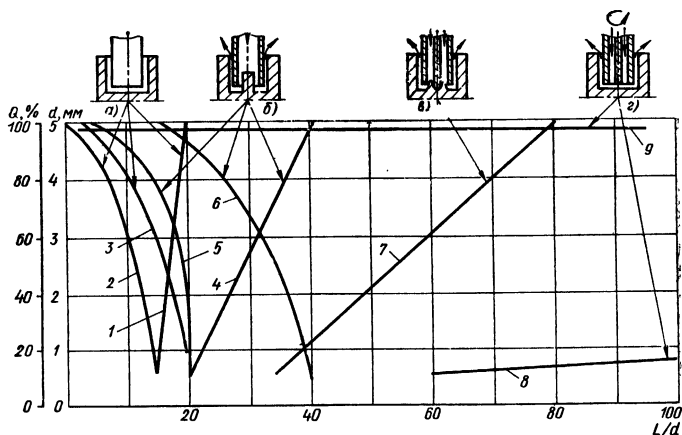


Рисунок 1.16 – Схеми прошивання глибоких отворів, їх технологічні характеристики

Обробка деталей типу сіток і сит. Створені електроерозійні верстати, що дозволяють обробляти деталі типу сіток і сит із кількістю отворів до декількох десятків тисяч. Верстати можуть обробляти одночасно понад 800 отворів діаметром 0,2–2 мм у листах із корозійностійких сталей, латуні та інших матеріалів товщиною до 2 мм. Продуктивність обробки – 10 000 отворів за годину.

Застосування в електровакуумних приладах суцільних сіток покращує характеристики приладів і підвищує їх довговічність.

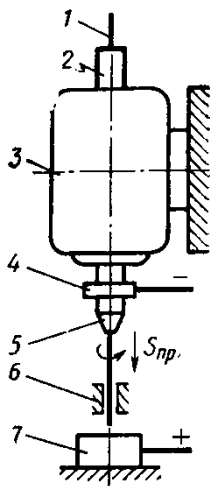


Рисунок 1.17 – Електроіскрова обробка глибоких отворів обертовим електродом-інструментом:

1 – дріт-електрод; 2 – вал електродвигуна; 3 – електродвигун; 4 – контактне кільце, 5 – патрон; 6 – кондуктор, що спрямовує рух обертового електрода; 7 – оброблювана заготовка

Електроерозійна обробка забезпечує можливість одержання з будь-яких тугоплавких матеріалів, а також із ду-

же малою товщиною і високою проникністю перемичок.

Вимоги до якості цих сіток дуже великі (допуски на ширину перемичок $\pm 0,002$ мм, на крок перемичок – $0,005$ мм, на зовнішні сітки $0,01$ мм; висота мікронерівностей $Ra = 0,32\text{--}0,16$ мкм). Ці вимоги забезпечуються одночасним виготовленням усієї сітки. Інструмент (рис. 1.18) – це стрижень із пазами на робочому кінці.

Ширину стрижня обирають відповідно до ширини перемичок. Вібрація інструмента із частотою близько 100 Гц (амплітуда менше $0,01$ мм) та інтенсивне відведення продуктів ерозії з робочої зони підвищують знімання металу в $2\text{--}3$ рази і стабілізують процес обробки. Вимушене нагнітання рідини через порожнистий електрод дозволяє істотно поліпшити технологічні характеристики процесу.

Нарізування різі. Електроерозійне нарізування різей може бути виконане за методом копіювання і схемами, аналогічними механічній обробці різі. Схема виникнення внутрішньої різі методом копіювання показана на рис 1.19.

Електроду-інструменту надано форму пустотілого гвинта 2. Цей гвинт проходить крізь кондукторну гайку 3 і, набуваючи обертання від змінних шестерень 6, утворює різь у заготовці 1 при подачі S_{np} у бік заготовки.

Діаметр різі кондукторної гайки та електрода-інструмента повинен бути виконаний з урахуванням величини міжелектродного зазору і зносу електрода інструмента. Для нарізування дрібних різей діаметром $5\text{--}10$ мм при глибині обробки $5\text{--}10$ мм у деталях із твердого сплаву на середніх режимах діаметр різі електрода-інструмента роблять на $0,05\text{--}0,06$ мм меншим від номінальної різі, яку одержуємо із заготовки. Електроіскрову обробку здійснюють як нагнітанням рідини під тиском, так і при вільній подачі рідини в міжелектродний зазор (із насадки 4 у воронку 5, закріплену на верхній частині електрода-інструмента).

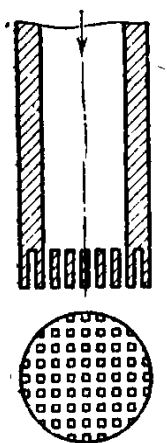


Рисунок 1.18 – Електрод-інструмент для електроерозійної обробки сіток методом вакуумних приладів

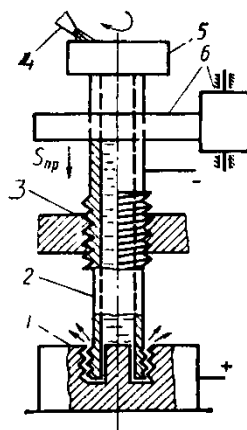


Рисунок 1.19 – Нарізування різи електроерозійним методом

Електроерозійне шліфування. Одним із різновидів електроерозійної обробки є електроерозійне шліфування, що використовується для обробки заготовок із важкооброблюваних металів і твердих сплавів. Видалення металу під час електроерозійного шліфування відбувається під впливом імпульсних розрядів між обертовим електродом-інструментом і оброблюваною заготовкою, а не внаслідок механічного впливу, як при абразивному шліфуванні. Електроерозійне шліфування передбачає кругле (зовнішнє, торцеве і внутрішнє) і плоске шліфування (рис. 1.20). Воно здійснюється за схемою, аналогічною до схем звичайного абразивного шліфування. У зв'язку з цим для електроерозійного шліфування можуть бути застосовані чашкові, циліндричні та брусківі електроди-інструменти.

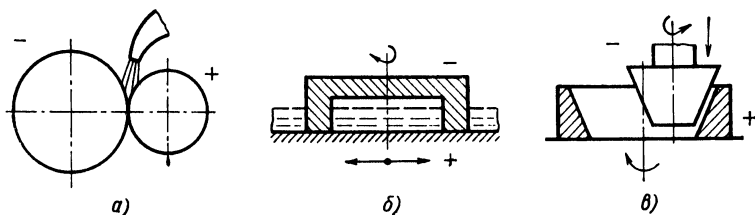


Рисунок 1.20 – Схема електроерозійного шліфування:
 а) круглої; б) плоскої; в) конічної поверхні

Робочим середовищем при електроерозійному шліфуванні є масло, подачу рідини здійснюють поливанням. Для того, щоб почати обробку, необхідно порушити масляну плівку на поверхні деталі притисненням шліфувального диска до заготовки під тиском $6-8 \cdot 10^5$ Па. Продуктивність зі збільшенням швидкості руху інструмента підвищується, тому для круглого зовнішнього, торцевого і плоского електроерозійного шліфування доцільно мати частоту обертання інструмента в межах 25–30 м/с. Швидкість інструмента при внутрішньому шліфуванні обмежена його розмірами.

Обробка непрофільним електродом-дротом Методи прямого і зворотного копіювання мають істотний недолік, що полягає в необхідності використання складних фасонних електродів-інструментів. Трудомісткість виготовлення електродів-інструментів часто буває дуже високою. Зношення електрода-інструмента відбивається на точності виготовлення деталі, тому одним електродом-інструментом вдається виготовити не більше 5–10 деталей. Електроіскровий метод обробки непрофільним електродом вигідно відрізняється від методів копіювання тим, що тут інструментом є тонкий дріт із латуні, міді або вольфраму діаметром від декількох мікрометрів до 0,5 мм, що вмикається в електричну схему катодом. Схема обробки показана на рис. 1.21. Для усунення впливу зносу дроту на точ-

ність обробки дріт безперервно перемотується з котушки на котушку, що дозволяє брати участь у роботі новим її елементам. При перемотуванні дроту здійснюється необхідний натяг; біля оброблюваної заготовки встановлені ролики, що орієнтують дріт щодо оброблюваного елемента заготовки.

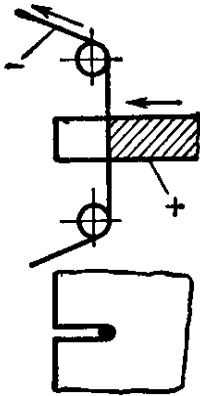


Рисунок 1.21 – Схема обробки непрофільним електродом

Обробку непрофільним електродом застосовують при прецизійному різанні заготовок, різанні точних щілин, різанні напівпровідникових матеріалів типу кремнію, індію тощо; при криволінійному різанні заготовок із твердого сплаву, магнітних матеріалів, вольфраму і т. д.; при виготовленні пуансонів і матриць згинальних і вирубних штампів, робочої частини фасонних призматичних різців, витяжних та висадних матриць і т. ін. Використовуючи різні копіювальні пристрої, цим методом здійснюють обробку складних контурів. Непрофільним електродом виконують обробку наскрізних фігур із прямолінійною твірною; виготовлення закритих порожнин типу прес-форм кувальних штампів тут неможливе.

До основних переваг електроерозійної обробки дротяним електродом-інструментом належать висока точність, можливість, широкої автоматизації процесу обробки. Сучасні верстати для обробки дротяним електродом можуть бути забезпечені системою числового програмного керування і фотокопіювальною головкою для вирізання деталі

безпосередньо за кресленням. Схема установки для вирізання за фотокопією показана на рис. 1.22. Координатний стіл 11 поєднує в собі жорстко зв'язані робочий столик із заготовкою 5 і столик 9 фотокопіювальної системи. Стіл рухається у двох взаємно перпендикулярних напрямках за допомогою двигунів 10 і 13. Освітлений джерелом світла 12 копіїр проектується через оптичну систему 6 на фотодатчик 7, що перетворює положення лінії копіювання в електричний сигнал, який діє через електронний, слідкувальний пристрій 8, на електродвигуни подачі так, що копійр своїм краєм безперервно переміщається перед об'єктивом. Еквідистантно обходу копіра щодо дроту-інструмента переміщається робочий столик із заріпленою на ньому заготовкою. Для забезпечення електроерозійного процесу до заготовки й електрода-дроту підводять струм від спеціального генератора імпульсів 2. Дротяний електрод 4 безперервно перемотується з подавальної котушки на приймальну електродвигуном перемотування 3.

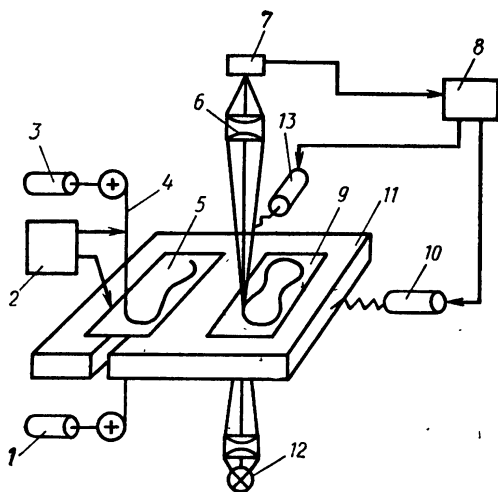


Рисунок 1.22 – Кінематична схема електроіскрового верстата, що працює непрофільним електродом із копіювальним апаратом

Електродвигун 1, увімкнений у загальмованому режимі, створює натяг дроту. Робочими рідинами служать гас і вода (промислова та дистильована). Застосування як робочої рідини де іонізованої води збільшує продуктивність.

Продуктивність при електроерозійній обробці непрофільованим електродом прийнято оцінювати швидкістю, $\text{мм}^2/\text{хв.}$, збільшення площі однієї з поверхонь, утвореної при обробці паза. За такого вираження продуктивність практично не залежить від діаметра електрода-дроту, оскільки зі збільшенням діаметра дроту збільшується і гранична швидкість, яку можна підвести для формоутворення.

Залежно від призначення й виду оброблюваної заготовки обробленням непрофільним електродом використовують три режими: м'який, середній і грубий.

На рис. 1.23 показана схема зняття припуску заготовки непрофільним електродом.

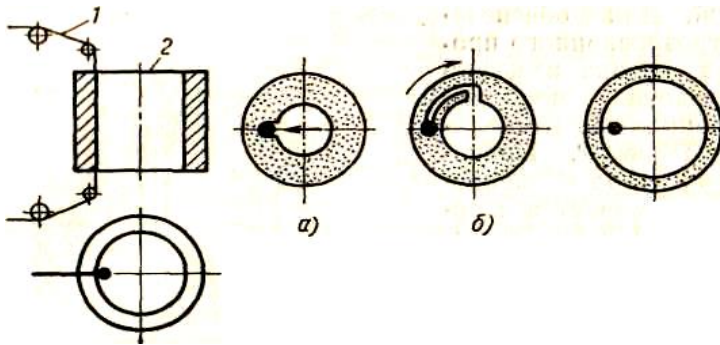


Рисунок 1.23 – Схема зняття припуску в отворі втулки непрофільним електродом: 1 – електрод-дріт; 2 – оброблювана заготовка; а–в – послідовність обробки

Досяжна точність виготовлення деталей непрофільним електродом-дротом $\pm (0,02-0,003)$ мм. Сумарна похи-

бка складається з ряду первинних похибок, основними з яких є: компараторна похибка процесу обробки (до 0,03 мм); похибка зовнішніх вібрацій (до 0,02 мм); похибка відліково-вимірювальних систем (до 0,005 мм); похибка, що виникає через недостатню жорсткість системи (до 0,015 мм); температурні похибки (до 0,035 мм); похибки, викликані коливаннями дроту.

Під дією електричних імпульсів дріт-електрод зношується. Величин зношення залежить від режиму обробки, товщини заготовки і швидкості перемотування дроту. Електрод-дріт використовується одноразово, оскільки після проходження через зону обробки він стає непридатним для повторного використання незалежно від ступеня зношення. Вплив ерозії різко проявляється при застосуванні дротів малого діаметра, оскільки величина ерозії від поодинокого розряду порівняна з діаметром дроту. На рис. 1.24 показаний переріз дроту-електрода після робочого проходу. Розміри дроту, що бере участь у процесі обробки, істотно змінюються.

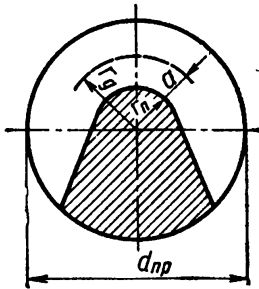


Рисунок 1.24 – Переріз дроту-електрода після виходу із зони обробки

Електроконтактний метод обробки. Електроконтактна обробка матеріалів є різновидом електроерозійної. Відмінність полягає у тому, що імпульси електричної енергії генеруються внаслідок взаємного переміщення електродів або переривання електричного розряду при прокачуванні рідини під тиском. Електроконтактну обробку можна проводити при

постійному і змінному струмах, у повітрі або рідині (вода з антикорозійними домішками). При обробці електрод-інструмент і заготовкою повністю занурюють у рідину або подають рідину в зону обробки (у міжелектродний проміжок) поливанням або розпиленням. Обробку проводять за значних струмів (до 5000 А) і напруги холостого ходу джерел живлення 18–40 В.

Електроконтактним методом проводять напівчистове точіння тіл обертання, чистове різання, прошивання циліндричних, фасонних отворів і об'ємних порожнин (із прокачуванням рідини під високим тиском), фрезерування, шліфування, обробку фасок листової заготовки під зварювання. Електроконтактний метод ефективний при обробці заготовок із важкооброблюваних сталей та сплавів, а також чавунів високої твердості, монокристалів, матеріалів із високими теплофізичними властивостями. Принципова схема установки для електроконтактної обробки тіл обертання показана на рис. 1.25. Оброблювана заготовка 1 і електрод-інструмент 5 під'єднані до електричного ланцюга з генератором 3 (як джерело живлення може бути також використаний випрямляч або трансформатор). Заготовка та електрод-інструмент здійснюють обертальний рух навколо своїх осей. При наданні електроду-інструменту або заготовці поступального руху та за додержання умов, необхідних для виникнення й розвитку електроерозійних процесів, відбувається знімання металу із заготовки в напрямку подач S_{np} і S_{non} . Струм до електродів подається через щиткові елементи 2. Резистор 4 увімкнений для обмеження і регулювання сили робочого струму.

Тривалість та енергія імпульсу струму залежать від механічних параметрів. Найбільше на перебіг електроерозійного процесу впливають колові швидкості електрода-інструмента і заготовки. Зі збільшенням колових швидкостей електродів імпульси струму стають більш короткочасними, частота їх збільшується.

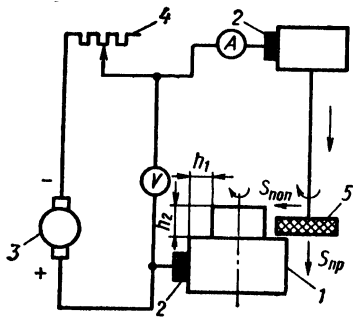


Рисунок 1.25 – Схема установки для електроконтактної обробки тіл обертання

Для постійного процесу обробки швидкість електрода-інструмента не повинна бути меншою за певну межу, що залежить від електричного режиму. За інтенсивних режимів мінімальна колова швидкість дорівнює 6–7 м/с. Зменшення швидкості електрода-інструмента нижче за цю межу призводить до різкого погіршення всіх показників обробки,

оскільки розряд втрачає імпульсний характер і набуває властивостей дуги. Верхня межа швидкості електрода-інструмента обмежена зручністю експлуатації, міцністю верстата й потужності привідного двигуна.

Колову швидкість заготовки залежно від умов обробки встановлюють у межах 0,02–0,2 м/с. Зі збільшенням колової швидкості заготовки збільшується площа, на яку впливає імпульс, що несприятливо відбивається на продуктивності.

Зміцнення поверхневого шару металів. Однією з переваг електроіскрового методу обробки матеріалів є те, що за певних умов різко підвищуються міцнісні властивості поверхні заготовки: твердість, зносостійкість, жаростійкість й ерозійна стійкість. Цю особливість використовують для підвищення зносостійкості різального інструмента, штампів, прес-форм і деталей машин, зміцнюючи металеві поверхні електроіскровим способом.

При електроіскровому зміцненні застосовують протилежну полярність (заготовка є катодом, інструмент –

анодом) обробку виконують, як правило, у повітряному середовищі і вібрацією електрода. Апаратура, за допомогою якої здійснюється процес зміцнення, малогабаритна й дуже проста в експлуатації. Основні переваги електроіскрового способу нанесення покриттів полягають у такому: покриття мають більшу міцність зчеплення з матеріалом основи; покритві поверхні не вимагають попередньої підготовки; можливе нанесення не лише металів та їх сплавів, а й їх композицій; на обмежених ділянках оброблюваної поверхні можна проводити найскладніші мікрометалургійні процеси.

Сутність зміцнення полягає в тому, що при електроіскровому розряді в повітряному середовищі відбувається полярне перенесення матеріалу електрода на заготовку. Перенесений матеріал електрода легує метали заготовки і, хімічно з'єднуючись із дисоційованим атомарним азотом повітря, вуглецем і матеріалом заготовки, утворює дифузійний зносостійкий зміцнений шар. При цьому в шарі виникають складні хімічні сполуки, високі стійкі нітриди і карбонітриди, а також гартівні структури.

Питання для самоперевірки

1. У чому призначення і сутність електроерозійної обробки?
2. Які основні параметри електричних імпульсів, що подаються до міжелектродного проміжку, ви знаєте?
3. Що таке полярний ефект? Чим він визначається?
4. У чому полягає електроерозійна оброблюваність? Від чого вона залежить?
5. Які властивості повинні мати рідини, придатні для електроіскрової обробки?
6. Від яких факторів залежить продуктивність електроерозійної обробки?

7. Які шляхи підвищення продуктивності електроерозійної обробки ви знаєте?
8. Які основні первинні похибки електроерозійної обробки ви знаєте?
9. Якими параметрами характеризується електроімпульсна обробка?
10. За якими схемами можна здійснювати формування деталей електроерозійним методом?

2 ПРОМЕНЕВА ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ

2.1 Світлопроменева обробка

Світлопроменеву обробку матеріалів виконують за допомогою оптичних квантових генераторів, що мають назву лазерів. Лазер здатний створювати вузькі спрямовані пучки видимого світла, що характеризуються надзвичайно високою густиною теплової енергії. Завдяки цьому за допомогою лазера можна виконувати ряд різних технологічних операцій, обробку надтвердих і тугоплавких матеріалів (різання, свердління, зварювання, плавлення). Існують три види лазерів: твердотілі (кристалічні), рідинні та газові.

Активні тіла твердотілих лазерів є складними мікросистемами, що складаються з ядер та електронів. Енергія відносного руху частинок твердих тіл може набувати строго певних значень або рівнів енергії. Рівень із мінімальною енергією є основним, інші рівні – збуджені. Якщо атому, що перебуває на основному рівні, надати додаткової енергії (енергії «накачування»), то він може стрибкоподібно здійснити перехід з одного рівня енергії на інший – перейти на один із рівнів збудженого стану. При «переході» атома зі збудженого стану на основний рівень атом випромінює порцію енергії – квант світла.

Найпростіша схема кристалічного лазера показана на рис. 2.1. Рубіновий стрижень 1 оснащується імпульсною лампою 3, наповненою ксеноном та конденсатором джерела живлення, що запалюється при імпульсному розряді, 4 (джерела енергії накачування). На торцях стрижня встановлені непрозора 2 (із коефіцієнтом віддзеркалення) і напівпрозора (із коефіцієнтом відображення 0,5) пластини 5. Світловий промінь 6, що виникає внаслідок збудження атомів, виходить назовні через пластину 5.

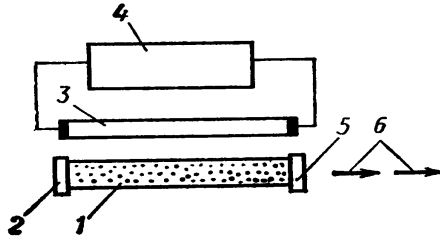


Рисунок 2.1 – Схема твердотілого (кристалічного) лазера

На рис. 2.2 показаний процес утворення лазерного променя. Атоми хрому (чорні точки), що містяться в рубіні, перебувають у збудженому стані (рис. 2.2 а). Під дією фотонів світла від лампи атоми хрому переходять у збуджений стан (рис. 2.2 б). Частина випромінюваної енергії розсіюється крізь стінки стрижня і проявляється у формі люмінесцентного світіння рубінового кристала. Інша частина енергії, спрямована паралельно осі стрижня (рис. 2.2 а), по шляху свого руху викликає ланцюгову реакцію утворення нових фотонів, багаторазово відбивається від пластин 1 і 2, лавиноподібно наростаючи при кожному відбитті, й у вигляді потужного світлового променя виривається з торця із напівпрозорим покриттям (рис. 2.2 г).

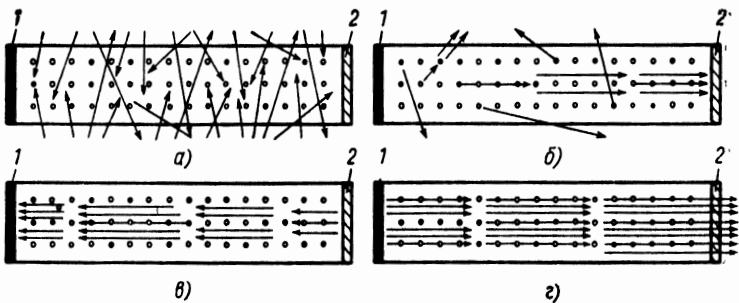


Рисунок 2.2 – Розвиток процесів у стрижні лазера

Найпростіша установка для лазерної обробки показана на рис. 2.3. Особливістю променя лазера є його висока когерентність, тобто паралельність руху, синхронність у фазі й амплітуді складових його фотонів, унаслідок чого розбіжність променя, що випускається лазером, не перевищує 1. Випромінювання оптичного квантового генератора концентрується на оброблюваній заготовці за допомогою оптичної системи. Сферичною оптикою випромінювання фокусується в точку, а циліндричною оптикою – в лінію, довжина якої визначається поперечним перерізом променя генератора.

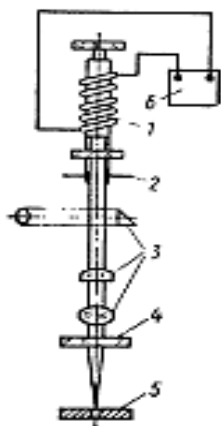


Рисунок 2.3 – Схема установки для лазерної обробки матеріалів: 1 – оптичний квантовий генератор; 2 – діафрагма; 3 – оптичний мікроскоп для наведення променя; 4 – захисне скло; 5 – оброблювана заготовка; 6 – блок живлення

Перший лазер на кристалічному рубіні (плавлений окис алюмінію із домішкою 0,04–0,05 % атомів тривалентного хрому) був створений у 1960 р. разом із рубіновими лазерами. Значного поширення набули лазери на скляній основі, що мають ряд таких переваг, як великі розміри стрижнів (до 2 000 мм), довжина рубінових стрижнів до 300 мм, простота виготовлення зразків будь-якої форми, висока оптична однорідність, простота масового виробництва. Найбільш цікавим за своїми можливостями вважають твердий лазер на

ітрієво-алюмінієвому рубіні з домішкою неодиму. Це єдиний твердий лазерний матеріал, на якому вдалося одержати в безперервному режимі потужність понад 1 кВт. Однак цей матеріал дорогий і не вдається вирощувати стрижні довжиною більше 12 см. Термін служби твердотілих лазерів визначається терміном служби лампи розжарювання і досягає 1 500 годин, ККД їх досить невеликий (ККД кращого рубінового лазера не перевищує 1,5 %).

Газовими називають лазери, в яких активним середовищем є газ, суміш декількох газів або суміш газу з парами металу. Особливість газового активного середовища – його висока оптична однорідність, що дає можливість застосувати великі оптичні резонатори й одержувати високу спрямованість і монохроматичність випромінювання. Значною перевагою газових лазерів є також їх здатність працювати як у безперервному, так і в імпульсному режимі. Газові лазери збуджуються поздовжніми електричними розрядами, поперечними електричними розрядами і за допомогою інших принципів.

У рідинних лазерах активним середовищем є рідина. Рідкі активні середовища мають істотні переваги порівняно з твердими й газоподібними. Розміри твердого резонатора обмежені технологічними можливостями. Об'єм рідкого середовища може бути будь-яким. Важливою перевагою рідкого середовища є відсутність втрат випромінювання внаслідок неоднорідностей структури активної речовини, що спостерігається у твердих резонаторах. Легко вирішується проблема відведення тепла (за рахунок циркуляції рідини резонатора). Порівняно із газоподібним активним середовищем рідке середовище характеризується більшою концентрацією активних молекул, тому воно більш придатне для одержання потужного безперервного випромінювання. На сьогодні використовують рідкі активні середовища трьох класів: розчини рідкоземельних хела-

тів, розчини органічних барвників та розчини неорганічних сполук рідкоземельних елементів. Накачування здійснюється за допомогою лампи-спалаху або імпульсних пристроїв спеціальної конструкції.

При обробці заготовок лазерами за допомогою порівняно нескладної оптичної системи можна сфокусувати промінь на площину діаметром у кілька мікрометрів. Тоді за потужності генератора в кілька кіловатів можна одержати щільність потоку випромінювання в зоні впливу до 10^{10} Вт/см². Температура в точці додавання променя досягає величин, достатніх для розпалювання і перетворення в пару будь-якого з існуючих матеріалів. У більшості випадків ця температура знаходиться в інтервалі 5 000–9 000 °С (великі значення – для сильнопоглинальних матеріалів, менші – для напівпрозорих із високою відбивальною здатністю).

Взаємодія випромінювання високої інтенсивності з речовиною викликає в зоні впливу виділення великої кількості тепла, що призводить до розплавлення і випаровування речовини. У зоні впливу розвивається досить високий тиск парів речовини, й відбувається викид продуктів «світлової ерозії». Це справедливо для більшості металевих і неметалевих матеріалів. Процес має вибуховий характер, оскільки час випромінювання при імпульсному впливі надзвичайно малий (0,001–0,00001 с).

Дещо інший характер має процес видалення речовини під час одержання отворів в алмазах (наприклад, отримання філь'єр). У цьому разі під впливом високої температури відбувається вигорання вуглецю.

Основними факторами, що визначають оброблюваність матеріалів лазером, є їх теплофізичні властивості й насамперед температури плавлення й кипіння, теплоємність, теплопровідність. Різна твердість і шорсткість поверхні практично не впливають на результати обробки. Ма-

теріали мають різну відносну оброблюваність: вольфрам – 0,7; алюміній – 3,3; титан – 4,5; мідь – 1,0; сталь У10 – 4,0; олово – 20,0.

Досить легко обробляються сфокусованим променем лазера кераміка та синтетичні камені.

У більшості металевих і неметалевих деталей вхідний отвір виявляється оточеним валиком викинутої з кратера рідкої речовини. Виняток становить алмаз, при обробці якого рідка фаза відсутня. Оброблений променем лазера отвір має неоднакові у поздовжньому перерізі розміри (по глибині). Можна виділити три основні зони, що відрізняються своїми розмірними характеристиками: вхід, середня частина та дно. Розміри цих зон для різних матеріалів не однакові і визначаються теплофізичними властивостями матеріалів. Середня частина отвору має відносно циліндричну форму по всій глибині. Тому для одержання циліндричних отворів у пластинах доцільно застосовувати такий технологічний прийом. На заготовку накладають пластину з того самого матеріалу, товщина якої дорівнює величині вхідної зони. Внаслідок обробки конусна частина, утворена спочатку, опиняється на цій пластині. Продукти, що видаляються, також залишаються на пластині, а основні отвори заготовки одержують нормальної циліндричної форми.

При прошиванні променем лазера наскрізних отворів вони в поздовжньому перерізі мають корсетну форму.

Перспективним методом більш точної обробки отворів є багатоімпульсний метод. При цьому методі формування отвору здійснюється не за один імпульс, а упродовж серії імпульсів певної потужності й тривалості.

Досить ефективно газолазерне різання матеріалів (різання променями лазера із використанням газу, що подається в зону різання). Тип газу залежить від виду оброблюваного матеріалу. Піддування газу дозволяє підвищити

швидкість різання й одержати більш якісний розріз. У технологічних установках для лазерного різання використовують як імпульсні лазери, так і лазери безперервної дії (як правило, на вуглекислому газі з потужністю випромінювання $P=100-1000$ Вт).

Значний вплив на швидкість різання матеріалів випромінюванням лазера чинить тиск газового струменя. При високому тиску робоча зона краще очищується від продуктів руйнування, і процес відбувається більш ефективно. Для різання крихких матеріалів (напівпровідники, кераміка, скло та ін.) необов'язково здійснювати наскрізний розріз. Ці матеріали можуть бути розділені шляхом нанесення на їх поверхню неглибоких подряпин із подальшим зламом по цих лініях. Такий процес називають скрабуванням.

Досяжна точність обробки променем лазера становить близько 1 % від величини діаметра одержуваного отвору, а шорсткість обробленої поверхні відповідає $Ra=0,32-1,25$ мкм.

2.2 Електронно-променева обробка матеріалів

Електронно-променевими називають методи, при яких для технологічних цілей використовують гостро сфокусований пучок електронів, що рухаються з великою швидкістю.

Метод електронно-променевої обробки (плавлення, зварювання, різання) базується на використанні тепла, що виділяється під час різкого гальмування потоку електронів поверхнею оброблюваної заготовки. При електронно-променевої обробці деталь поміщають у герметичну камеру, в якій завдяки безперервній роботі вакуумних насосів забезпечується високий ступінь розрідження (до 10 Па). Оскільки електрони не змінюють хімічних властивостей твердого тіла, то обробка ними у вакуумі є істотною пере-

вагою цього методу, оскільки при обробці не відбувається хімічного забруднення заготовки газами.

Істотною передумовою для використання в техніці електронного променя як термічного інструмента для обробки матеріалів є відносна простота одержання великої кількості вільних електронів. Якщо нагріти у вакуумі металевий, наприклад танталовий або вольфрамовий, дріт, то з поверхні останнього емітуються електрони (термоелектронна емісія), кількість і швидкість яких залежать від температури нагрівання. Кінетична енергія цих електронів, що безладно рухаються у просторі, що оточує емітер, порівняно невелика. Її можна значно підвищити шляхом прискорення руху електронів у певному напрямку впливом електричного поля, створюваного високою різницею потенціалів між емітером, що є в даному випадку катодом та анодом. Для цього використовують спеціальний пристрій – електронну гармату, яка разом з електронно-оптичною системою створює гостро сфокусований пучок електронів, емітованих катодом, прискорюються у вакуумі електричним полем з різницею потенціалів до 150 кВ. Швидкість електронів при цьому може досягати 100 000 км/с і більше.

Установки для оброблення матеріалів сфокусованим пучком електронів складаються з трьох основних пристроїв: електронної гармати, що фокусує системи та робочі камери (схема установки для електронно-променевої обробки показана на рис. 2.4). Джерелом електронного променя є катод 1, вольфрамова спіраль, що нагрівається до температури 2 600–2 800 °С. При цьому відбувається інтенсивна термоелектронна емісія з катода. Електрони, що емітуються катодом електронної гармати, формуються в пучок електродом 2, розміщеним безпосередньо за катодом, на який подається негативна щодо катода напруга зсуву, прискорюються під дією різниці потенціалів між катодом та анодом 3. Потім за допомогою магнітних полів двох пар ко-

тушок 4, що впливають на нього, пучок електронів спрямовується в електронно-оптичний центр фокусувальної магнітної системи 6.

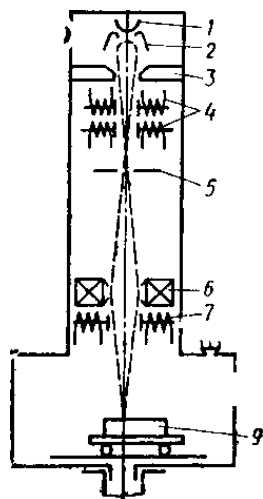


Рисунок 2.4 – Установа для електронно-променевої обробки матеріалів

ні відхильні котушки 7, які служать для автоматичного переміщення променя за заданим напрямком. Заготовка поміщається в робочу камеру 5, в якій створюють розрідження.

На рис. 2.5 показаний механізм видалення речовини сфокусованим пучком електронів. Через нерівномірний розподіл густини енергії по перерізу пучка (область у центрі пучка з високою густиною оточена областю з меншою густиною) і більш інтенсивне виділення тепла у внутрішніх шарах розплавлення твердого тіла починається в зоні, розміщеній по осі симетрії пучка електронів і на не-

Між магнітними системами (4 і 6) встановлена вольфрамова діафрагма 5 із водяним охолодженням. Ця діафрагма служать для уловлювання розсіяних електронів. Фокусна відстань магнітної лінзи 6 може змінюватися при зміні струму, що пропускається через обмотку, що використовується для установки як робочого режиму (робочої точки), так і необхідного поперечного перерізу променя в місці зустрічі його з поверхнею оброблюваної заготовки 9. Нижче фокусувальної системи розміщені

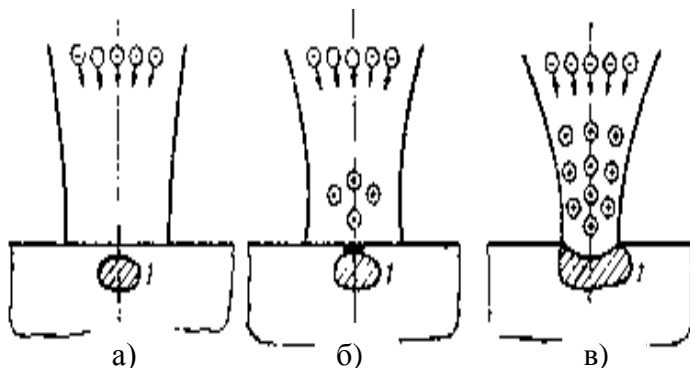


Рисунок 2.5 – Механізм видалення речовини сфокусованим пучком електронів

великі й відстані від зовнішньої поверхні заготовки (рис. 2.5 а, б). За рахунок гальмування електронів заготовка на цій мікроділянці у зоні 1 нагрівається до температури, при якій руйнуються молекулярні зв'язки: атоми вже не утримують один одного, і по осі симетрії виникає імпульс високого тиску, що створює умови для вибухів подібного випаровування (рис. 2.5 в). За рахунок лавиноподібного наростання щільності електронного пучка процес видалення речовини відбувається з вибухоподібним випаровуванням частинок матеріалу у вигляді центрального струменя факела. Після кожного імпульсу на поверхні утворюється невелика лунка-кратер. Площа кратерів зростає залежно від щільності електронного пучка й тривалості імпульсу. В результаті діаметри отворів, одержуваних електронно-променевим методом, при великих за часом імпульсах утворюються великими. Глибина кратера під час електронного пучка значною мірою залежить від теплофізичних властивостей матеріалу: в менш тугоплавких матеріалах глибина кратера за інших рівних умов більша. Міцність і твердість матеріалу істотного впливу не мають.

Завдяки короткочасності дії електронних променів і великій щільності потоку випромінювання оброблений матеріал плавиться і випаровується настільки швидко, що тепло не встигає поширитися в боки від місця падіння променя (практично зона плавлення не більша за поперечний переріз променя в місці потрапляння його на заготовку). У напрямку випромінювання промінь електронів діє на набагато більшу глибину, що дорівнює приблизно 100 діаметрам променя. Таким чином, електронним променем можна різати матеріали без утворення дефектного шару, практично без відходів і з високою продуктивністю.

Електронним променем обробляють деталі з вольфраму, титану, твердих сплавів, синтетичних каменів, також здійснюють зварювання та паяння.

Пучком електронів легко керувати, впливаючи на відхильні котушки 1 (рис. 2.6).

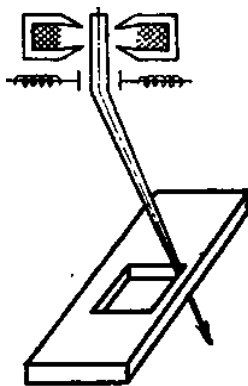


Рисунок 2.6 – Схема керування переміщенням електронного променя

Зважаючи на малий діаметр пучка електронних променів, локальність дії створюваного ними тепла й відсу-

тність впливу зношення інструмента можна одержати при обробці високу точність розмірів і малу шорсткість поверхні. Пучки електронів діаметром 5 мкм дозволяють виконувати прецизійну обробку з точністю ± 1 мкм.

Електронно-променевий метод особливо ефективний під час обробки малих отворів і вузьких щілин у філь'ерах та інших деталях. Використання електронних променів для різання матеріалів обмежується їх товщиною.

Такі матеріали, як ферити, леговані сталі, товщиною до декількох міліметрів різуться порівняно добре. Наприклад, сталевий лист товщиною 1 мм можна різати зі швидкістю 20 мм/с за відносно невеликого споживання енергії.

Час обробки залежить від низки факторів: оброблюваного матеріалу, площі оброблюваної поверхні та ін. Наприклад, для обробки паза шириною 0,05 мм і довжиною 3 мм у сталевій пластині завтовшки 0,5 мм потрібно близько 20 с.

Питання для самоперевірки

1. Які різновиди лазерів ви знаєте? Назвіть їх особливості й характеристики.
2. Опишіть процес утворення лазерного променя та його особливості.
3. Які фактори, що визначають оброблюваність матеріалів лазером, ви знаєте?
4. У чому сутність газолазерного різання матеріалів?
5. На чому базується метод електронно-променевої обробки?
6. Опишіть механізм видалення речовини сфокусованим пучком електронів.
7. Опишіть схему установки для електронно-променевої обробки.
8. Галузь застосування методів електронно-променевої обробки.

3 УЛЬТРАЗВУКОВА ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ

3.1 Ультразвукові коливання

Ультразвуковими називаються пружні коливання матеріального середовища із частотою, що перевищує верхню межу чутливості людського вуха (понад 18 000 Гц). Ультразвукова енергія передається у вигляді хвилі, яка на графіку можна зображена гармонічною кривою (рис. 3.1).

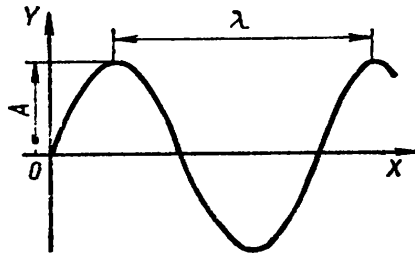


Рисунок 3.1 – Графік хвильового руху

По осі абсцис відкладено відстань у напрямку поширення хвилі, а по осі ординат – зміщення частинок від їх первинного положення. Основними величинами, що характеризують гармонічні коливання, є: λ – довжина хвилі, відстань між двома суміжними точками, що знаходяться в одній фазі; A – амплітуда коливань, найбільше зміщення від положення рівноваги; f – частота коливань, число коливань за одиницю часу; T – період коливань, час поширення хвильового руху на відстань, що дорівнює довжині хвилі в секундах або частотах секунди. Період коливань T є величиною, оберненою частоті коливань $T = 1/f$.

Швидкість поширення звукових хвиль C пов'язана з довжиною хвилі й частотою коливань такими залежностями:

$$C = \lambda \cdot f; C = \lambda/T; \lambda = C \cdot T; \lambda = C/f.$$

Малі довжини хвиль дають можливість ультразвуку поширюватися в середовищах спрямованими пучками, які одержали назву ультразвукових променів. Ультразвукові промені одержують збільшенням частоти коливань. Так, наприклад, при частоті коливання 100 кГц у твердому тілі довжина хвилі буде близько 4 см. При хвильовому русі матеріальної точки в кожен момент часу частинка має певне значення зміщення, швидкості й прискорення. Момент часу t , миттєве значення зміщення $l = a \cdot \sin \omega \cdot t$, де ω – колова частота, тобто число коливань за час $6,28$ с.

Швидкість частин, що коливаються,

$$V_T = A \cdot \omega \cdot \cos \omega \cdot t.$$

Прискорення

$$a_T = \omega^2 \cdot A \cdot \sin \omega \cdot t - A \cdot \omega^2.$$

Ультразвукові хвилі можуть поширюватися в будь-яких пружних середовищах: рідких, твердих і газоподібних. Розрізняють три ультразвукові хвилі – поздовжні, поперечні та поверхневі (рис. 3.2).

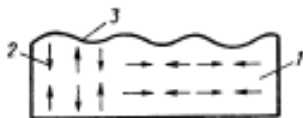


Рисунок 3.2 – Види ультразвукових хвиль: 1 – поздовжні; 2 – поперечні; 3 – поверхневі

У твердих тілах можуть поширюватися хвилі всіх трьох видів, у рідких і газоподібних – лише поздовжні.

Якщо до якого-небудь твердого тіла застосувати силу, то в ній відбудуться деформації, тобто деякий зсув одних частинок стосовно до інших. У результаті може змінитися як обсяг, так і форма тіла. Таким чином, тверді тіла мають лише об'ємну пружність, а й пружність форми. Тому у твердих тілах поряд із нормальними можуть виникати й дотичні напруження зсуву, а разом з ними і поперечні хвилі. Під час впливу механічної сили на гази та рідини відбувається лише зміна обсягу, форма ж залишається без зміни й залежить від форми посудини, в якій вони знаходяться. Таким чином, у рідині або газі не можуть виникати дотичні напруження і вони мають лише об'ємну пружність.

Швидкість поширення поздовжніх хвиль у стрижнях сталого перерізу, найбільший поперечний розмір яких менший за довжину хвилі, визначається за формулою

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}},$$

де E – модуль Юнга; ρ – густина матеріалу.

Швидкість поширення поздовжніх хвиль у сталевому стрижні дорівнює 5170 м/с; у воді – 1494 м/с; у повітрі – 331 м/с.

У більш товстих стрижнях позначається ефект поперечного стиску – збільшення інерції внаслідок радіальних коливань, це викликає зменшення швидкості поширення поздовжніх хвиль. Швидкість поширення ультразвукових хвиль у таких стрижнях визначають за більш складними залежностями. Швидкість поширення поздовжніх хвиль у сталевому стрижні завдовжки 12 см залежить від радіуса r .

Швидкість поширення поздовжніх хвиль значно більша за швидкість поширення поперечних хвиль:

$$\frac{C_{\text{попер}}}{N_{\text{менш}}} = 0,63.$$

Поширення ультразвукових хвиль у твердих тілах супроводжується втратами енергії на внутрішнє тертя, теплопровідність і пружний гістерезис. Втрати енергії залежать від фізико-механічних властивостей і структури матеріалу, а також від частоти коливань.

Відносне значення втрат енергії для деяких матеріалів: алюміній відпалений – 0,015; титан відпалений – 0,14; сталь відпалена – 0,8; мідь відпалена – 1,1; скло – 2,0; каучук – 200. Алюміній і титан мають малі втрати та високі акустичні властивості, однак не всі матеріали придатні для виготовлення інструменту і деталей хвилеводів ультразвукових установок. Так, алюміній та його сплави мають низьку міцність при статичних і динамічних навантаженнях.

Коли ультразвукова хвиля потрапляє на межу поділу між двома середовищами, то частина звукової енергії з першої переходить на другу, а частина енергії відбивається назад. При цьому розподіл енергії між тою, що перейшла в інше середовище і відбитої від неї залежить від співвідношення акустичних опорів даних середовищ. За нормально-го падіння плоскої хвилі коефіцієнт відбиття K_o є відношенням інтенсивності відбитої і падаючої хвиль, який можна розрахувати за формулою

$$K_o = \frac{(Z_{02} - Z_{01})^2}{(Z_{02} + Z_{01})^2},$$

де Z_{01} і Z_{02} – акустичний опір першого та другого середовищ.

Для сталі й латуні втрата енергії ультразвукової хвилі при відбитті від другого середовища (латуні) становить 1,9 %. Для сталі та води втрата енергії становить 88 %. Під

час руху ультразвукової хвилі зі сталі в повітря відбивається 99,96 % енергії.

Коли ультразвукова хвиля під час свого поширення відіб'ється від якоїсь поверхні тіла, що має іншу густину, вона складеться з прямою хвилею. Взаємне накладання хвиль, біжучих 1 (рис. 3.3) і відбитих 2 хвиль створює так звану стоячу хвилю, що відіграє дуже важливу роль в ультразвуковій техніці. Ті місця, де амплітуда обох хвиль (прямой та зворотної) дорівнює нулю, називають вузами стоячих хвиль, а місця, де амплітуда максимальна, – пучностями.

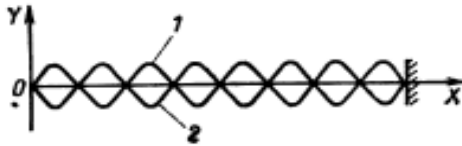


Рисунок 3.3 – Схема утворення стоячої хвилі

3.2 Кінематика ультразвукової обробки

Для будь-якого процесу різання, зокрема й ультразвукового, що супроводжується сколюванням найдрібнішої стружки, необхідно розрізнити два рухи: головний – рух різання і допоміжний – рух подачі. Під час розмірної ультразвукової обробки головним рухом потрібно вважати поздовжні коливання інструмента з ультразвуковою частотою, які є джерелом енергії абразивних зерен. Робочий хід відбувається при переміщенні інструмента вниз, холостий хід – при переміщенні інструмента вгору.

Час одного періоду

$$T = T_{р.х} + T_{х.х},$$

де $T_{р.х}$ – час робочого ходу, с; $T_{х.х}$ – час холостого ходу, с;

Час робочого ходу

$$T_{р.х} = \frac{L}{V_{р.х}}$$

Час холостого ходу

$$T_{х.р} = \frac{L}{V_{х.х}}$$

де L – довжина робочого ходу інструмента, мм;

$V_{р.х}$ – середня швидкість робочого ходу, м/с;

$V_{х.х}$ – середня швидкість холостого ходу, мм/с.

Оскільки з достатньою точністю можна вважати, що $V_{р.х} = V$, а $L = 2A$ та $f = 1/T$, тоді одержуємо

$$\frac{1}{f} = \frac{4A}{V}, \text{ звідки } V = \frac{4A}{1000} \cdot f \text{ в/с.}$$

Для вживаних діапазонів частот і амплітуд коливань інструмента швидкість головного руху під час розмірної ультразвукової обробки перебуває в досить широких межах – 0,66 м/с. Максимальна швидкість коливання в 1,5 раза більша, ніж середня. Наприклад, при $f = 20$ кГц та $A = 0,03$ мм швидкість головного руху становить 2,4 м/с, максимальна швидкість – 3,8 м/с.

Допоміжні рухи – рухи подачі при ультразвуковій обробці можуть бути різними: поздовжня подача – $S_{позд}$, поперечна подача – $S_{поп}$ і колова подача – $S_{кол}$, залежно від виду руху заготовки або інструмента. Залежно від виду подачі або комбінації подач, а також профілю в поздовжньому і поперечному перерізах інструмента можна здійснювати різні операції ультразвукової обробки (рис. 3.4).

Найбільшого промислового застосування дістали процеси ультразвукового свердління, прошивання та різання, що мають гранично просту кінематику – головний коливальний рух та поздовжню подачу.

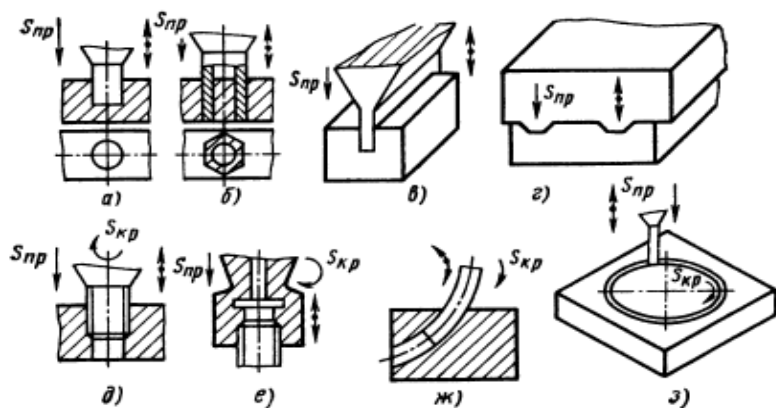


Рисунок 3.4 – Схеми ультразвукової обробки за використання комбінації подач: а), б) обробка отворів; в), г) обробка пазів і напрямних; д) обробка внутрішньої різи; е) обробка зовнішньої різи; ж) обробка отвору з криволінійною віссю; з) обробка криволінійних кільцевих пазів

3.3 Джерела енергії інструмента під час ультразвукової обробки

Джерелом коливальної енергії інструмента є досить потужний, зазвичай ламповий, генератор струму високої частоти. Електричні коливання перетворюються в механічні у спеціальних пристроях, що мають назву перетворювачів, або вібраторів. При цьому електрична енергія перетворюється на енергію пружних коливань так, що вібратор поперемінно подовжується та укорочується. Для розмірної обробки принципово можуть бути застосовані перетворювачі двох типів: п'єзоелектричні й магнітострикційні. Для верстатів промислового типу, що працюють у діапазоні частот $f = 16\text{--}40$ кГц, найбільш доцільне застосування магнітострикційних вібраторів. Ці вібратори мають такі осно-

вні переваги перед п'єзоелектричними вібраторами: мають значно більші величини відносних деформацій, тобто амплітуду, більший термін служби, більшу міцність; значно менш чутливі до температурних впливів, невелике значення повного електричного опору, тому не вимагають високих напруг.

Під час ультразвукової обробки у магнітострикційних перетворювачах використовується ефект поздовжньої магнітострикції, що полягає у зміні довжини стрижня із феромагнітного матеріалу, поміщеного у магнітне поле. Найбільшу магнітострикцією мають залізокобальтові сплави (альфер) і нікель.

Амплітуда одержана у вібраторних ультразвукових коливань зазвичай виявляється недостатньою для здійснення обробки різанням. Тому до торця коливного перетворювача приєднується концентратор з акустичним хвилеводом.

Принципова схема установки для обробки ультразвуковими коливаннями абразивних зерен показана на рис. 3.5. Магнітострикційний перетворювач 1, зв'язаний з концентратором 2, до кінця якого приєднаний інструмент 3, впливає на абразивні частинки суспензії 5. У заготовці 4 обробляється отвір, що копіює форму та розміри (у перерізі) інструмента. Суспензію 5 подають у ванну насосом 6. Електричний високочастотний струм до перетворювача подається від генератора 7. Під час роботи установки перетворювач охолоджують проточною водою.

Перетворювач і концентратор утворюють коливальну систему, до вихідного кінця якої прикладене акустичне навантаження. Щоб одержати достатньо велику амплітуду коливань, перетворювач виконують резонансним, тобто його розмір у напрямку поширення коливань беруть таким, що дорівнює або кратний половині довжини хвилі на обраній для роботи частоті. Концентратор також є резонансним.

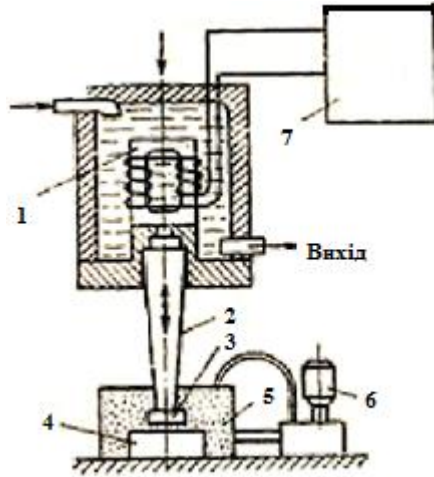


Рисунок 3.5 – Принципова схема установки для обробки ультразвуковими коливаннями абразивних зерен

Щоб одержати максимальне збільшення амплітуди коливань, концентратор повинен мати спеціальну форму. Площа поперечного перерізу концентратора вздовж поширення коливань змінюється за певним законом. Застосовують переважно концентратори трьох типів: експоненціальні, конічні й ступінчасті (рис. 60). Закон зміни площі експоненціального концентратора

$$F_x = F_0 e^{-\frac{2\pi f}{c}x},$$

де F_x – площа перерізу експоненціального концентратора на будь-якому рівні x ; F_0 – площа перерізу, відповідна діаметру D_0 ; x – координата центра площі перерізу від торця з діаметром D_0 ; e – основа натуральних логарифмів.

Під час ультразвукової обробки важливо оцінити величину підсилення концентратора. Ефективність застосування концентратора характеризується коефіцієнтом поси-

лення амплітуди або коефіцієнтом концентрації K_n . Для підсилення експоненціального концентратора

$$K_n = \frac{D_o}{d} = \sqrt{\frac{F_o}{F_x}},$$

тобто дорівнює відношенню верхнього діаметра концентратора до нижнього. Для ступінчастого симетричного концентратора

$$K_n = \frac{D_o^2}{d^2}.$$

Великого поширення набули експоненціальній ступінчасті концентратори, що пояснюється простотою їх розрахунку, великою ефективністю і конструктивною простотою. Резонансну довжину експоненціального концентратора можна визначити із виразу

$$l = \frac{c}{2nf} \sqrt{\pi^2 n^2 + l_{\text{пх}}^2 K_n},$$

де n – число півхвиль, що укладаються у хвилеводі, для основної частоти $n=1$; $l_{\text{пх}}$ – довжина півхвилі за даної частоти.

Максимально можливе значення D_o і мінімальне значення d обмежені такими залежностями:

$$D_o \leq \frac{\lambda}{2}; d \geq D_{0e} \frac{\pi f_{\text{пх}}}{c}.$$

Резонансна довжина ступінчастого концентратора

$$l = \frac{c}{2f} = \frac{1}{2f} \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho}}.$$

Коефіцієнт посилення концентратора залежить від відношення довжини кожної із ланок до загальної довжини концентратора. Дослідження показують, що найбільший коефіцієнт посилення буде за рівності ланок $a = b$.

Порівнюючи експоненціальний і ступінчастий концентратори, можна відзначити, що ступінчастий концентратор забезпечує більше посилення. Однак ця розбіжність спостерігається лише за незначного навантаження. Зі збільшенням навантаження коефіцієнт посилення ступінчастого концентратора швидко знижується, наближаючись до коефіцієнта посилення експоненціального концентратора. Ступінчастий концентратор має дуже гостру криву резонансу, тому вимагає ретельного настроювання, він чутливий до впливу навантаження на його коливальний режим. Крім того, у ньому виникають великі концентрації напружень, які за деяких умов можуть порушити цілісність хвилеводу в перехідних перерізах. До позитивних властивостей ступінчастого концентратора відносять простоту виготовлення. Істотна перевага експоненціального концентратора у тому, що під час роботи на навантаження він менше, ніж інші концентратори, змінює свій коливальний режим.

3.4 Методи та технологічні характеристики ультразвукової розмірної обробки матеріалів

Великого поширення набув метод розмірної ультразвукової обробки твердих і крихких матеріалів незв'язаним абразивом, зерна якого одержують енергію від інструмента, що створює коливальні рухи. Руйнування оброблюваного матеріалу в цьому разі відбувається головним чином за рахунок ударної дії інструмента по частинках абразиву. Коливальний інструмент, б'ючи по абразивних зернах, передає їм енергію. Абразивні зерна, б'ючи по заготовці, відколюють невеликі частин матеріалу заготовки. На рис. 3.6 показана принципова схема процесу. Інструмент

коливається з ультразвуковою частотою (16–30 кГц) і невеликою амплітудою (0,01–0,06 мм). До робочої зони подається завислий у рідині абразив 3. Зерна абразиву під дією ударів інструмента, що коливається, поступово здійснюють обробку заготовки 2. Як абразив зазвичай застосовують карбід бору, як рідину – воду. Відносно висока продуктивність ультразвукової обробки, незважаючи на нехтовно малу продуктивність кожного окремого удару, обумовлена високою частотою коливань інструмента, великою кількістю зерен, що одночасно рухаються із прискоренням (20000–100000 зерен на 1 см^2).

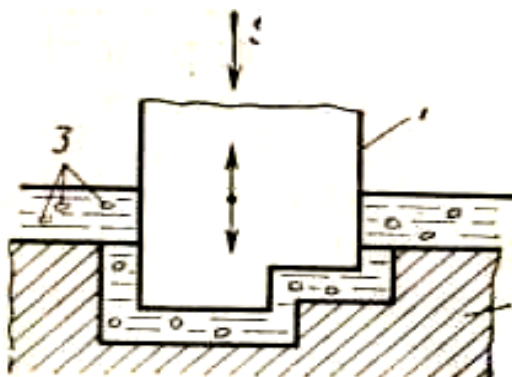


Рисунок 3.6 – Схема обробки матеріалів ультразвуком у середовищі абразивної суспензії

Знімання матеріалу відбувається здебільшого із площин, розміщених перпендикулярно до напрямку коливання інструмента. Ультразвуковий спосіб обробки – це складний комплекс процесів, однак переважно знімання матеріалу відбувається внаслідок прямого удару зерен абразиву об оброблювану деталь.

Продуктивність розмірної ультразвукової обробки можна оцінити величиною подачі інструмента $S_{позд}$, об'ємним і питомим зніманням матеріалу.

Середня подача інструмента при обробці неглибоких отворів без виведення інструмента для заповнення порожнини абразивом

$$S_{noz\partial 1} = h l / t_1,$$

де $h l$ – глибина обробки порожнини, мм; t_1 – час обробки, хв.

Середня подача інструмента під час обробки глибоких отворів із виведенням інструмента для заповнення порожнини абразивом

$$S_{noz\partial 2} = \frac{(n+1)h l}{t_1 - t_2},$$

де n – кількість виходів інструмента, t_2 – число виходу інструмента.

Звичайно $S_{noz\partial 1} > S_{noz\partial 2}$.

Машинний час

$$t = h / S_{noz\partial},$$

де h – глибина обробки, мм.

Середнє хвилинне знімання оброблюваного матеріалу

$$Q_v = S_{noz\partial} \cdot F,$$

де F – площа поперечного перерізу інструмента.

Під час обробки глухих отворів і порожнин суцільним інструментом найбільш доцільний критерій Q_v , а при наскрізній обробці продуктивність зручніше характеризувати величиною хвилинної подачі $S_{noz\partial}$. Величина подачі $S_{noz\partial}$ чисельно дорівнює питомій продуктивності ультразвукової обробки. Під питомою продуктивністю розуміють обсяг оброблюваного матеріалу, знятий одиницею робочої

поверхні інструмента за одиницю часу, тобто відношення Q_v до F . Продуктивність ультразвукової обробки залежить від таких основних чинників: фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу, амплітуди та частоти коливань, статичного навантаження між інструментом і заготовкою, виду абразиву, концентрації суспензії та способу її подачі у зону обробки, площі інструмента та його зношення, матеріалу інструмента.

Усі матеріали, оброблювані ультразвуковим методом, умовно можна поділити на три основні групи. До першої групи відносять такі матеріали, як скло, кераміки, алмаз, кремій та інші, що мають під час обробки характер крихкого руйнування. Ультразвуковий метод обробки найбільш ефективний при обробці саме цієї групи матеріалів. Сюди відносять також виготовлення деталей зі скла і кварцу в оптичній і радіоелектронній промисловості; виготовлення деталей із напівпровідників; обробку алмазів із синтетичних каменів.

До другої групи матеріалів належать жароміцні й тверді сплави, загартовані сталі та ін. Під час обробки цих матеріалів під дією абразивних зерен поряд із пружними відбуваються і мікропластичні деформації. Чим більшу роль відіграють пластичні деформації, тим гірше обробляється матеріал ультразвуковим способом. Краще за інших обробляються тверді сплави. У цих випадках ультразвукову обробку застосовують для виготовлення вирубних штампів та висадних матриць, профілювання та заточування твердосплавного інструмента. Ультразвукова обробка матеріалів цієї групи не завжди доцільна.

До третьої групи відносять м'які сталі, мідь, свинець та ін. Під час ультразвукової обробки таких матеріалів майже вся робота абразивних зерен витрачається на мікроскопічну деформацію поверхневих шарів. Руйнування матеріалу майже не спостерігається. Тому ультразвукова ро-

змірна обробка абразивом, що набуває коливальної енергії від інструмента, для третьої групи непридатна.

Як було показано, акустичні параметри – частота й амплітуда коливань – визначають швидкість головного руху. Продуктивність ультразвукової обробки у відомих межах лінійно зростає зі збільшенням швидкості основного руху.

Таким чином, продуктивність обробки може бути підвищена збільшенням амплітуди й частоти коливань. За більш точного аналізу впливу амплітуди коливань інструмента на продуктивність потрібно враховувати відношення подвійної амплітуди $2A$ та середнього розміру абразивного зерна d_3 . Оптимальне відношення

$$\frac{2A}{d_3} = 0,6-0,8.$$

Статичне навантаження (сила подачі, що забезпечується акустичною голівкою) істотно впливає не лише на величину ударних імпульсів передавання абразивним зернам, а й на стан зерна, а також на концентрацію абразивної суспензії під торцем інструмента.

Під час ультразвукової обробки спостерігається деяке оптимальне значення тиску інструмента на заготовку, при якому продуктивність максимальна (рис. 3.7). За сталої амплітуди коливань і тиску інструмента максимальна продуктивність досягається за деякої оптимальної зернистості абразиву (рис. 3.8). Оптимальна зернистість за різних амплітуд перебуває в межах 90–120 (розміри зерна 180–150 мкм). Із підвищенням концентрації абразиву до певного значення спостерігається зростання продуктивності внаслідок збільшення кількості зерен під інструментом і досить сприятливих умов циркуляції абразиву в робочій зоні. Оптимальні умови забезпечують при концентрації, що дорівнює 25–50 %, або за вагового відношення абразиву до

води від 1:1 до 1:2. За подальшого збільшення концентрації абразиву суспензії стає дуже густою і свіжі зерна абразиву замість зношених надходять до зони обробки недостатньо інтенсивно.

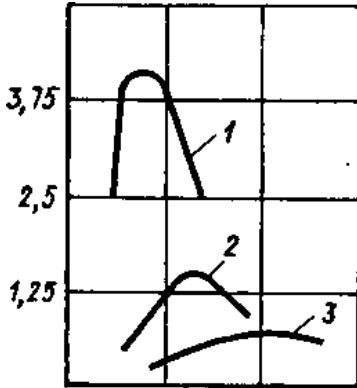


Рисунок 3.7 – Залежність поздовжньої подачі інструмента під час ультразвукової обробки від сили подачі P і діаметра обробки d при обробці скла: 1 – $d = 6$ мм, 2 – $d = 12$ мм, 3 – $d = 40$ мм

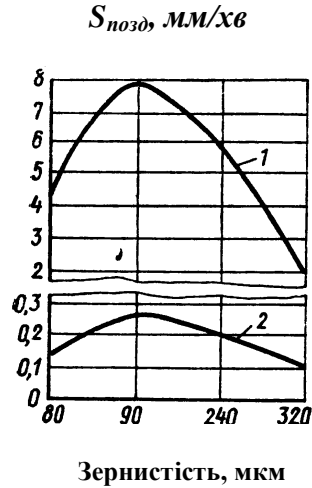


Рисунок 3.8 – Залежність швидкості обробки від величини зернистості абразиву: 1 – обробка спеціальної кераміки; 2 – обробка сплаву ВК8

Якість поверхні під час ультразвукової обробки залежить від зернистості абразиву, фізико-хімічних властивостей оброблюваного матеріалу, амплітуди коливальних, шорсткості поверхні інструмента, типу рідини, що має абразив.

За допомогою абразивного електроліту обробляють наскрізні й глухі отвори в деталях із кераміки, у кристалах

кварцу, синтетичних каменях глибиною до 15 діаметрів, здійснюють фрезерування глухих канавок. Цей метод вирізняється високою продуктивністю і точністю. Процес ультразвукового фрезерування алмазним інструментом глухих канавок містить елементи ультразвукової обробки, алмазного шліфування і фрезерування інструментом типу кінцевої фрези. Використання ультразвуку під час алмазної обробки глухих отворів підвищує продуктивність у 8–10 разів, а зношення інструмента знижується в 3–4 рази. При ультразвуковому алмазному фрезеруванні пазів зміна амплітуди у межах 0–15 мкм приводить до зростання продуктивності у 2,5–2,8 раза; найбільш висока вона за амплітуди 3–8 мкм.

За подальшого збільшення амплітуди продуктивність процесу значно не підвищується. Зношення інструменту мінімальне за амплітуди 5–8 мкм (0,012 %), що в 6 разів менше, ніж при звичайному фрезеруванні.

Ультразвукова електрохімічна обробка абразивним електролітом відрізняється найбільшою продуктивністю при відносно невеликому зношенні інструмента. Обробка здійснюється на основі електрохімічного анодного розчинення заготовки з одночасним видаленням продуктів розчинення під час подачі в робочий зазор абразивного електроліту і під час впливу на нього ультразвукових коливань інструмента. Цей вид обробки використовують переважно як чорновий під час виготовлення деталей із твердосплавного матеріалу.

3.5 Верстати та інструменти для ультразвукової обробки

Під час ультразвукової обробки неметалевих матеріалів обертовим алмазним інструментом на металевій зв'язці вдається істотно підвищити точність обробки, знизити витрату алмазів. Рекомендована концентрація алмазів

у зв'язці $K = 100\%$ (4,39 карата алмазів на 1 см^3 алмазоносного шару – близько 25% його обсягу). Найкращі різальні властивості показують інструменти на металевих зв'язках М1 і М5–10 із алмазами марок А, САМ та АСК.

Алмазний інструмент для обробки пазів і глибоких отворів – це стрижень довжиною, кратною довжині $\lambda/2$ півхвилі, діаметром 3–15 мм із каналом для подачі МОР (рис. 3.9). За допомогою нарізного хвостовика він закріплюється в ультразвуковій головці.

Для обробки матеріалів на існуючих фрезерних верстатах розроблена універсальна ультразвукова головка (рис. 3.10), що живиться від серійного генератора УЗГ-3-0,4.

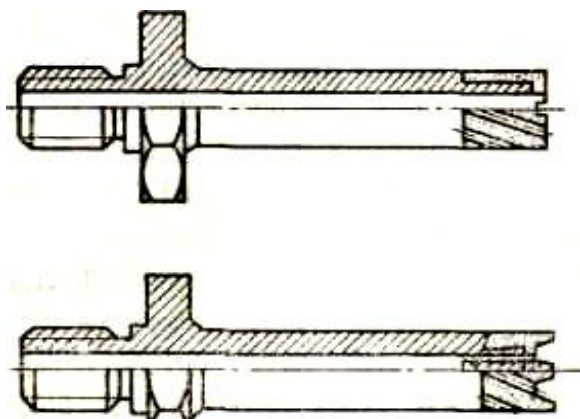


Рисунок 3.9 – Алмазний інструмент для ультразвукової обробки пазів і глибоких отворів

Інструмент для ультразвукової обробки в абразивній суспензії виготовляють із низьковуглецевих термооброблених сталей (сталь 20, сталь 35).

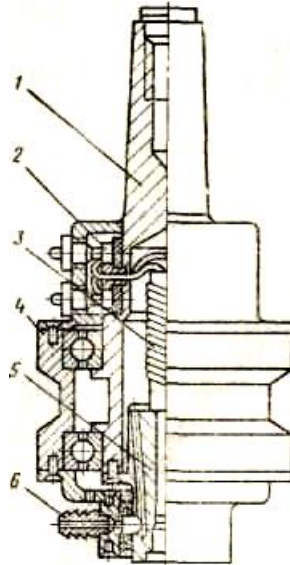


Рисунок 3.10 – Пристрій універсальної ультразвукової головки: 1 – корпус руховий; 2 – щітка; 3 – обмотка; 4 – корпус нерухомий; 5 – концентратор; 6 – штуцер

Якщо інструмент виготовляють як одне ціле з концентратором, то застосовують сталі з підвищеним вмістом вуглецю, що мають малі втрати на внутрішнє тертя (сталі 45, 45Х, 65Г та ін.) Інструмент для утворення отворів малого діаметра виготовляють зі сталей У8А. Точність виготовлення інструмента повинна бути високою. Так, якщо точність операції має порядок 0,01–0,02 мм, то інструмент потрібно виготовляти з точністю 0,005–0,008 мм. Шорсткість поверхні не нижче від $Ra=0,634-1,25$ мкм. Під час виготовлення інструмента необхідно враховувати його вплив на резонансну частоту та амплітуду коливань. Так, наприклад, збільшення довжини і маси інструмента призводить до зниження резонансної частоти, а також до зменшення амплітуди коливань. Приєднання малої маси інструмента (при площі інструмента менше від площі ниж-

нього торця концентратора) призводить до збільшення амплітуди коливань робочого торця інструмента. Інструмент потрібно виготовляти якщо можна порожнистим, щоб при наскрізному прошиванні він вирізав лише частину матеріалу. Бажано, щоб контур внутрішньої порожнини такого інструмента повторював контури зовнішнього контуру. У цьому разі зношення інструмента буде рівномірним по всьому перерізу. Необхідно мати на увазі, що надмірне полегшення інструмента шляхом збільшення його внутрішньої порожнини призводить до зменшення жорсткості й може викликати нерівномірний розподіл амплітуди коливань по периметру. Щоб інструмент служив довше, його роблять із деяким запасом по довжині. При цьому резонансна частота коливань системи буває дещо нижчою за номінальну. У міру зношування інструмента резонансна частота збільшується, а амплітуда коливань спочатку зростає, а потім, пройшовши резонансну частоту, починає зменшуватись. Інструмент використовують доти, поки подальший його знос не знизить амплітуду коливань до величини, за якої швидкість обробки помітно зменшиться або поки зношення інструмента виявиться на точності обробки. Для ультразвукового верстата середньої потужності допустимі відхилення робочої частоти від номінальної резонансної становлять 6 %.

Під час проектування нового інструмента доцільно передбачати припуск 3–5 мм на підгонку частоти. При підгонці частина припуску зрізується, якщо резонансна частота головки з цим інструментом виявляється занадто низькою. Проектуючи інструмент, потрібно також урахувати бічне розбивання отвору, величина якого (0,06–0,36 мм) залежить від розміру зерна абразиву.

У процесі обробки необхідно забезпечити безперервне переміщення інструмента (рух подачі), а також створити певне статичне навантаження між ним і заготовкою.

Крім того, при обробці глухих отворів і порожнин необхідно періодично виводити інструмент для заповнення порожнини свіжим абразивом і видалення продуктів зношення. Ці функції виконує акустична головка. Акустична головка дозволяє автоматично і вручну здійснювати необхідні переміщення шпинделя верстата, підтримує заданий режим роботи. Прилади встановлені на акустичній головці, дозволяють визначити необхідну силу подачі.

Питання для самоперевірки

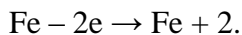
1. Охарактеризуйте ультразвукові коливання, їх види та швидкість поширення звукових хвиль.
2. Які процеси ультразвукової обробки набули найбільшого промислового застосування ?
3. Наведіть характеристику джерел енергії інструмента під час ультразвукової обробки.
4. Які основні операції ультразвукової обробки ви знаєте?
5. Охарактеризуйте процес обробки матеріалів ультразвуком у середовищі абразивонесучої суспензії.
6. Які функції виконує акустична головка під час ультразвукової обробки?
7. За яких умов досягається максимальна продуктивність під час ультразвукової обробки?
8. Які матеріали застосовують для виготовлення інструмента для ультразвукової обробки в абразивній суспензії?
9. Які існують вимоги до інструмента для ультразвукової обробки?
10. Які матеріали обробляють за допомогою ультразвукової електрохімічної обробки?

4 ЕЛЕКТРОХІМІЧНИЙ МЕТОД ОБРОБКИ МАТЕРІАЛІВ

4.1 Електрохімічна обробка в електролітах

Електрохімічними називаються методи обробки металів, що базуються на використанні явища електролізу, тобто явищ, що виникають при проходженні електричного струму через розчини електролітів. У більшості електрохімічних методів обробки використовується переважно процес анодного розчинення – перехід металу, поміщеного в електролітичну ванну як анод, із металічного стану в різні неметалічні сполуки (солі, гідроокиси, окисли).

В електролітах молекули речовини розпадаються на електрично заряджені частинки – іони, кожен з яких переносить один або кілька електричних зарядів. Число позитивних і негативних зарядів, що переносяться іонами, однаково, і тому в цілому електроліт електрично нейтральний. Наприклад, молекула хлористого натрію, розчиняючись у воді, розпадається на катіон натрію Na^+ і аніон хлору Cl^- , крім того, вода містить іони водню H^+ і гідроокису OH^- . Якщо до електродів, занурених у цей розчин, додати різницю потенціалів, то аніони гідроокису OH^- і хлору Cl^- рухатимуться до анода, а катіони водню H^+ і натрію Na^+ – у бік катода (рис. 4.1). Електричний ланцюг (джерело живлення – електрод – електроліт – електрод – джерело живлення) при цьому замкнеться, і джерело живлення буде переміщувати електрони із зовнішнього ланцюга. Іони металу Me будуть переходити в розчин. Для заліза, наприклад, це можна записати так:



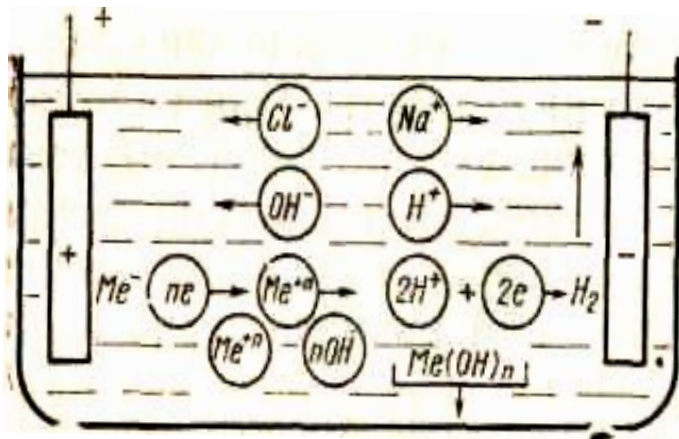
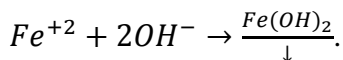
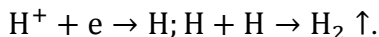


Рисунок 4.1 – Схема анодного розчинення металу

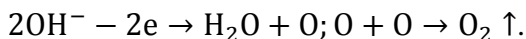
Утворений іон металу Me зв'язується з іоном гідроксиду OH^- , утворюючи гідрат окису металу $Me(OH)_n$, що погано розчиняється у воді і випадає в осад:



Іони водню H^+ розряджаються на катоді, утворюючи атоми водню, які у вигляді бульбашок виходять з розчину:



Крім зазначених основних електродних реакцій, можливі й інші побічні. Наприклад, виділення газоподібного кисню на аноді:



Іони хлору і натрію, що перебувають в розчині, переносять електричні заряди, їх наявність може викликати або утворення луку $NaOH$ і хлористого заліза $FeCl$, або виді-

лення газоподібного хлору на аноді.

Класифікація операцій електрохімічної обробки. Операції електрохімічної обробки, здійснювані за одним і тим самим принципом, за існуючою класифікацією можуть бути поділені на дві різні (з техніки проведення та за результатами) групи:

1) при невисокій густині струму в стаціонарному електроліті;

2) при високій густині струму в протитечійному електроліті (анодно-гідралічна обробка).

Електрохімічну обробку в стаціонарному електроліті поділяють на полірування, профілювання (копіювання), загострення (загострювання), доведення.

Електрохімічну обробку в протитечійному електроліті поділяють на профілювання (копіювання), різання, прошивання, протягування та калібрування.

Під час електрохімічної обробки з високою густиною струму необхідне інтенсивне видалення із зони обробки продуктів анодного розчинення. Останнє може здійснюватися одним і трьох способів: потоковим електролітом, прокачуванням під тиском через зону обробки; механічним, електроерозійним та ультразвуковим впливом на оброблювану поверхню; механічним видаленням шліфувальним диском, хонами або абразивними частинками, що вільно перебувають в електроліті.

На рис. 4.2 показана принципова схема електрохімічної обробки у стаціонарному електроліті для найбільш типових операцій – електролітичного шліфування або полірування. Електричний струм, проходячи через електроліт 3 та електроди 8 і 5, викликає розчинення поверхні анода 5 в електроліті й утворення продуктів розчинення 6, які, затримуючись у поглибленнях шорсткості поверхні, ізолюють останні проходження струму, зосереджуючи його силові лінії на незахищених ділянках поверхні анода. Відбу-

вається швидко розчинення виступів, і поверхня анода згладжується.

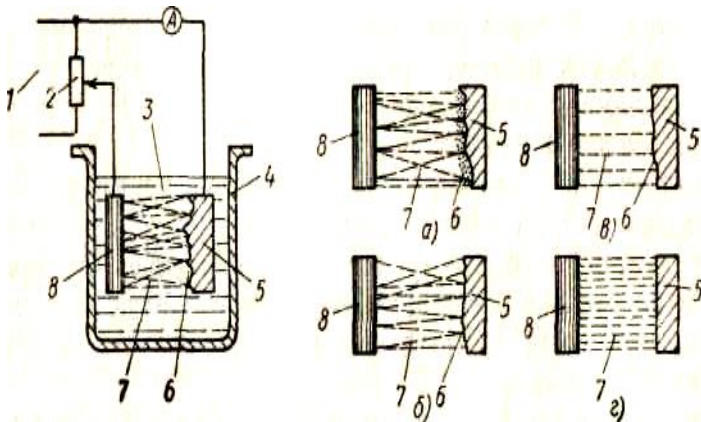


Рисунок 4.2 – Схема електрохімічної обробки в стаціонарному електроліті: а) схема установки; б), д) послідовні стадії згладжування поверхні; 1 – джерело струму; 2 – резистор; 3 – електроліт; 4 – ванна; 5 – заготовка; 6 – плівка продуктів розчинення в западинах поверхні; 7 – силові лінії струму; 8 – катод

Електрополірування має багатоаспектне використання. Найкраща якість поверхні досягається під час електрополірування чистих і однорідних металів та сплавів. Полірування турбінних лопаток із легованих і важкооброблюваних сплавів (видалення поверхнево напружених шарів металу після механічної обробки, підвищення корозійної стійкості і зменшення шорсткості поверхні, зниження трудомісткості операції), полірування зубів зубчастих коліс (видалення дефектного поверхневого шару, зниження трудомісткості операції), зовнішнє і внутрішнє полірування труб і легованих сталей та спеціальних сплавів (поліпшення якості поверхні і зниження трудомісткості).

Процес профілювання здійснюється за рахунок анодного розчинення заготовки, вміщеної всередину порожнього циліндричного катода. Розчинення відбувається інтенсивніше на ділянках, більш близьких до катода, наслідком чого є зміна форми, у даному разі – заокруглення заготовки. Електроліт – розчини кислот і солей.

Загострювання різального інструмента здійснюють за рахунок створення на лезі підвищеної густини струму, що забезпечується відповідним розміщенням леза інструмента щодо катода; характер загострення залежить також від первісного кута заточування. Електролітом є розчини кислот.

Доведення електрохімічним методом при стаціонарному електроліті використовують для обробки поверхонь штампів, прес-форм та ливарних форм після електроерозійної обробки. Під час загострювання і доведення можна одержати точність до 0,1 мм при висоті мікронерівностей оброблених поверхонь $Ra = 0,32-0,63$ мкм.

Переваги електрохімічної обробки у стаціонарному електроліті: можливість одержання поверхонь із малою висотою мікронерівностей, відсутність необхідності у спеціальному інструменті. Недоліки: невисока питома продуктивність, чутливість до змін складу електроліту та його стану, що виявляється в порушенні стабільності процесу, вплив на процес неоднорідності будови заготовки.

4.2 Анодно-гідралічна обробка

Під час анодно-гідралічної обробки застосовують струми високої густини. Локалізація процесу обробки забезпечується конструкцією інструмента і створенням малих міжелектродних зазорів. Утворені при електролізі продукти розчинення видаляються з міжелектродного проміжку потоком електроліту. На рис. 4.3 наведена принципова схема електрохімічної обробки у проточному електроліті. Струм, проходячи між катодом-інструментом 3 і анодом-

заготовкою 1, викликає розчинення поверхні анода, внаслідок чого в ньому відтворюється профіль катода-інструмента у вигляді заглиблення 4 дефектної форми. На початку процесу окремі ділянки катода 3 розміщуються значно ближче до заготовки-анода, і через них за рахунок меншого опору електроліту 2 проходить струм більшої величини. У результаті ділянки заготовки піддаються анодному руйнуванню швидше.

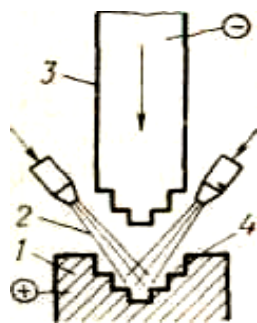


Рисунок 4.3 –
Схема електрохімічної обробки в проточному електроліті – відтворення профілю катода на аноді

Електричний струм проходить і на інших ділянках, але за рахунок меншої густини струму на цих ділянках швидкість їх анодного розчинення менш інтенсивна.

Наприкінці обробки, коли анод набирає відображеної форми катода, густина струму вирівнюється по всій поверхні. У реальних умовах процес значно ускладнюється, що призводить до нерівномірного знімання металу. Тому робоча частина електрода – катода являє собою, у свою чергу, трохи відкоригований профіль оброблюваного елемента заготовки.

Склад електролітів залежить від хімічного складу оброблюваного матеріалу. Для застосування них під час обробки більшості марок конструкційних сталей це водні розчини кухонної солі NaCl із концентрацією 10–20 %. Для обробки заготовок із титану рекомендується 25 % розчин сірчаної кислоти. Для обробки деталей з алюмінієвих сплавів іноді застосовують розчини, що містять 10 % кухонної солі і 10 г/л лимонної кислоти. Застосовуються електроліти й інших хімічних складів; дані

про них наведені у довідковій літературі.

Живлення установок розмірної електрохімічної обробки, як правило, проводиться випрямленим струмом однофазного або трифазного напівпровідникового випрямляча.

До переваг електрохімічної обробки в проточному електроліті належать: висока продуктивність, що досягає десятків тисяч кубічних міліметрів за хвилину; відсутність зношення електрода-інструмента; можливість підвищення продуктивності із збереженням або підвищенням точності обробки за необхідної шорсткості поверхні. Недоліки: висока енергоємність процесу; необхідність вжиття спеціальних заходів для видалення осадів гідроокисі і газів, що інтенсивно виділяються; труднощі керування процесом під час обробки заготовок складного профілю з високою точністю; необхідність забезпечення інтенсивної циркуляції електроліту при обробці; певне зниження виходу за струмом при зростанні густини струму.

Продуктивність процесу може характеризуватися інтенсивністю анодного розчинення металу або швидкістю знімання металу, $\text{мм}^3/\text{хв}$, з оброблюваної поверхні. Швидкість знімання металу з оброблюваної поверхні можна розрахувати за формулою

$$Q_v = 0,1 \frac{\eta K U X_{ef}}{\delta},$$

де K – електрохімічний еквівалент, $\text{мм}^3/\text{хв}$; U – напруга на електродах, В; X_{ef} – ефективна електропровідність (проміжку), $\text{Ом}^{-1} \text{см}^{-1}$; δ – міжелектродний зазор, мм; 0,1 – вихід за струмом, % (являє собою співвідношення кількості металу, що фактично розчинився до теоретичного, розрахованого з припущення, якщо на аноді відбувається лише одна реакція розчинення металу).

На величину знімання, як і на інші технологічні показники, крім властивостей електроліту, впливають багато

факторів електричного і гідродинамічного характеру, що змінюються в широких межах.

Вибір швидкості потоку електроліту визначається значною мірою допустимим нагрівом його в проміжку. Процес відбувається стійко, якщо перепад температур на вході і виході електроліту не перевищує $8-10^{\circ}\text{C}$; при цьому витрата електроліту повинна становити $200-300$ л/хв на кожні 1000 А.

Швидкість формоутворення під час анодно-гідравлічної обробки залежить від анодної густини струму. Гранична густина струму в міжелектродному проміжку лімітується мінімальним зазором, допустимим за умов видалення гідроксиду металу, нагріванням електроліту і можливістю електричного пробою-проміжку. При анодно-гідравлічному прошиванні обробці поверхонь невеликих площ (до $50-100$ см²) із рівномірним припуском мінімальний міжелектродний зазор може бути знижений до $0,1-0,3$ мм. Швидкість обробки у цьому випадку досягає $0,5-2$ мм/хв. Під час обробки поверхонь ($0,5-2$ м²) із більшою нерівномірністю припуску обробку проводять при великих зазорах ($1-10$ мм). Швидкість знімання металу в цьому разі становить $0,02-0,2$ мм/хв.

Продуктивність, оцінювана інтенсивністю розчинення металу, залежить від кількості електрики, реалізованої в міжелектродному проміжку. Джерела струму, що випускаються, дозволяють збільшити інтенсивність знімання металу до $100-250$ Н/год.

Точність обробки і якість поверхні. Під час анодно-гідравлічної обробки похибки залежать від неточності виготовлення верстатів, інструментів і пристроїв та інших факторів, загальних для механічної та електрохімічної технологій. Однак не ці фактори визначають відносно низький рівень точності електрохімічного формоутворення. Основною причиною виникнення похибок під час анодно-

гідравлічної обробки є зміна електродного зазору під впливом специфічних для процесу коливань електрохімічного і гідродинамічного характеру. У початковий момент обробки міжелектродний зазор у різних перерізах визначається початковою нерівномірністю поверхні заготовки (рис. 4.4), тому процес анодного розчинення заготовки відбувається з різною швидкістю. Там, де зазор менший, а густина струму вища, знімання відбувається інтенсивніше. Міжелектродний зазор поступово вирівнюється, нерівності на оброблюваній поверхні зменшуються, досягаючи у кінці обробки деякої величини Δ_k .

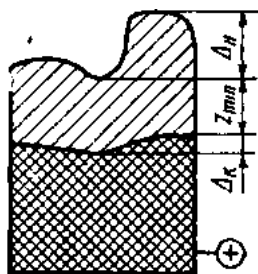


Рисунок 4.3 –
Схема вирівнювання
поверхні під час анодно-гідравлічної обробки

При однорідному складі електроліту за відсутності концентраційних змін у міжелектродному проміжку процес вирівнювання профілю супроводжується видаленням металу, що в десятки разів переважає реально необхідний припуск. Коефіцієнт вирівнювання змінюється від 0,1 до 0,9 і залежить від складу електроліту, матеріалу заготовки,

Чим швидше відбувається вирівнювання, тим швидше стабілізуються електрохімічні та гідродинамічні умови процесу, тим меншими будуть похибки, що переносяться із заготовки на готову деталь. Вирівнювальні властивості процесу можна оцінити за показником

$$K_B = \frac{\Delta_H - \Delta_k}{z_{\min} - \Delta_H},$$

де K_B – коефіцієнт вирівнювання; z_{\min} – мінімальний припуск (за западиною), мм; Δ_H – висота початкових нерівностей, мм; Δ_k – висота кінцевих нерівностей, мм.

міжелектродного зазору, температури електроліту та інших факторів. Склад електроліту і матеріал заготовки здебільшого, ніж інші чинники, впливають на коефіцієнт вирівнювання K_B .

У міру посилення пасивувальних явищ процес вирівнювання прискорюється. При застосуванні електролітів, здатних захищати западини від розчинення, коефіцієнт вирівнювання підвищується. Наприклад, при обробці в розчинах хлорно-водокислого натрію процес знімання відбувається в основному по виступах при високому темпі вирівнювання. Зі зменшенням міжелектродного зазору вирівнювання також прискорюється. Точність обробки досягає 0,05–0,15 мм при прошиванні отворів і 0,2–0,5 мм під час обробки порожнин складної форми.

Шорсткість поверхні, обробленої анодно-гідралічним способом, залежить від складу електроліту, густини струму, форми кривої струму і напруження, швидкості потоку електроліту та його температури. Склад електроліту, його відповідність конкретному матеріалу заготовки є найважливішим чинником, що впливає на шорсткість поверхні. Найбільш поширений електроліт – розчин хлористого натрію – дає можливість (при відповідних параметрах процесу) одержати оброблену поверхню з висотою мікронерівностей до $Ra = 0,32–0,64$ мкм. Із підвищенням температури електроліту шорсткість обробленої поверхні збільшується. Із підвищенням густини струму шорсткість поверхні зменшується. Це особливо помітно при зміні густини струму від 2 до 8 А/см². Збільшення густини струму понад 15 А/см² помітного зниження шорсткості не дає.

Регулювання процесу анодно-гідралічної обробки

Стійкість електрохімічного процесу за необхідних продуктивності та якості обробки забезпечується системою регулювання.

Спрямоване анодне розчинення без істотного іскроу-

творення забезпечується при міжелектродних зазорах певної величини, що залежать від конкретних умов обробки. У зв'язку з цим усі існуючі системи регулювання електрохімічних верстатів побудовані на принципі підтримки оптимального зазору між електродами. При роботі з малими зазорами особливо важливо узгодити між собою швидкість $V_{пр}$ руху інструмента-катода і лінійну швидкість Qv розчинення оброблюваного металу. Це важливо для забезпечення необхідної продуктивності процесу і виключення можливості короткого замикання.

У реальних умовах величина Qv не залишається сталою, тому регулювання подачі катода повинно проводитися відповідно до її зміни. Лінійну швидкість розчинення можна назвати прямим параметром регулювання. Проте визначити значення Qv з точністю, достатньою для практичного використання, не є можливим через складні процеси, що відбуваються при розмірній електрохімічній обробці. Співвідношення між $V_{пр}$ і Qv найбільш доцільно було б визначати щодо зміни міжелектродного зазору безпосередньо. Але й це неможливо, оскільки в процесі роботи зазор неможливо виміряти.

У цих умовах контроль міжелектродного зазору здійснюють за допомогою так званих непрямих параметрів регулювання, що функціонально залежать від величини зазору. До числа таких параметрів можна віднести напругу на електродах, силу та і густину струму, тиск рідини в зазорі.

При використанні плоских катодів площа оброблюваної поверхні не змінюється упродовж усього процесу. У цьому випадку омичний опір стовпа електроліту між електродами визначають за формулою

$$R_e = \frac{\rho_e \cdot \delta}{S_0},$$

де ρ_e – питомий опір електроліту; δ – величина зазору

між електродами (величина стовпа електроліту); S_0 – площа оброблюваної поверхні.

Якщо упродовж процесу обробки площа оброблюваної поверхні стала, то відповідно до закону Ома можна з достатньою для практичного використання точністю судити про зміну зазору за значеннями сили струму і напруження.

Однак явище поляризації електродів (і зміна питомого опору стовпа електроліту в міжелектродному зазорі) виключає досить достовірне визначення зазору.

Міжелектродний зазор, через який прокачують електроліт, можна представити як дросель. Витрата рідини через дросель

$$Q = C \cdot \Delta p^\alpha,$$

де C – коефіцієнт, що визначається величиною відкриття щілини дроселя і станом робочої рідини; Δp – перепад тисків на дроселі (у цьому випадку – на міжелектродному зазорі); α – показник степеня, що залежить від конструктивних параметрів дроселя.

Витрата рідини в процесі обробки визначається подачею насоса, яку можна вважати сталою. Величини C і α залежать лише від розмірів зазору. Таким чином, при встановленому зазорі фіксується цілком певне значення Δp , яке в ході електрохімічного процесу може бути еталоном регулювання. У міру врізання катода в оброблювану заготовку площа обробки S_0 і шлях проходження електроліту збільшуються. Це призводить до зміни Δp і погіршення процесу регулювання за перепадом тиску на міжелектродному зазорі.

Найбільш універсальним можна вважати регулювання процесу за анодною густиною струму. З формули, за якою визначається омичний опір стовпа електроліту в

міжелектродному зазорі, впливає, що зі збільшенням площі обробки при збереженні параметра регулювання постійний зазор повинен зменшуватися ($\rho\delta = R_e S_0$). Це сприяє підвищенню точності обробки до кінця процесу. Щоб уникнути надмірного зменшення зазору в кінці обробки, початковий зазор повинен бути визначений з умови

$$A = \frac{U_H}{\rho\delta_H} = \frac{U_K}{\rho\delta_K}, \text{ або } \frac{U_H}{\delta_H} = \frac{U_K}{\delta_K},$$

де U_H, U_K – напруга на електродах на початку і в кінці обробки; δ_H та δ_K – величини міжелектродного зазору на початку і в кінці обробки.

Величину δ_K кінцевого зазору необхідно вибирати таким чином, щоб виключити можливість іскроутворення. Напруга на початку процесу може бути взята такою, що дорівнює рівним ЕРС джерела живлення; напруга в кінці обробки в кожному окремому випадку визначається дослідним шляхом. Запобігання короткому замиканню забезпечується зняттям напруги живлення, оскільки здійснити досить швидко розведення електродів неможливо. Зняття напруги здійснюється за сигналом схеми попередження коротких замикань про наявність або наближення такого небезпечно-го режиму (за 0,02–0,05 с до короткого замикання, що достатньо для спрацювання автоматики захисту).

4.3 Електрохімічне формоутворення

Висока ефективність електрохімічного формоутворення досягається при обробці багатьох заготовок складної форми. Одним із поширених видів цієї обробки є обробка робочого профілю турбінних лопаток (рис. 4.4). Заготовку 2 поміщають між двома латунними копірами – електродами 1 – відповідної форми на відстані 0,3–0,5 мм від них. Через зазор під тиском близько 1 МПа прокачують 10 %

розчин кухонної солі, що подається через штуцер 3. Режим формоутворення: напруга на електродах 8–11 В, густина струму 15–20 А/см², швидкість подачі 0,3–0,4 мм/хв. Метал із заготовки видаляється зі швидкістю подачі при шорсткості обробленої поверхні $Ra = 1,25\text{--}2,5$ мкм.

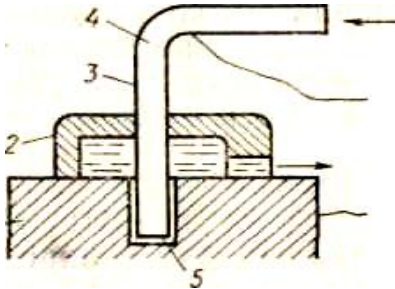


Рисунок 4.4 – Анодно-гідралічний спосіб обробки турбінної лопатки

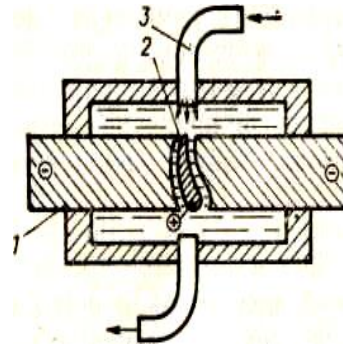


Рисунок 4.5 – Схема прошивання отвору анодно-гідралічним способом

Виходячи з особливостей електрохімічного формоутворення, вважають, що максимальний припуск, що видаляється з оброблюваної поверхні, повинен бути не більший від подвійного мінімального припуску. Так, якщо в середньому з будь-якої точки знімають по 0,8 мм, то мінімальне знімання в будь-якій частині заготовки повинне бути не меншим ніж 0,4 мм.

У процесі електрохімічного формоутворення одночасно виявляються дефекти оброблюваної поверхні, зокрема мікротріщини. Таким чином, при обробці здійснюється не лише формоутворення, а й контроль якості, що особливо важливо для відповідальних деталей, наприклад турбінних лопаток.

Практика показує, що електрохімічні методи формоутворення в 4–10 разів продуктивніші від механічної обробки. Електрохімічний метод обробки особливо ефективний при обробці заготовок із важкооброблюваних сталей і сплавів.

Електрохімічне прошивання отворів. Прошивання отворів анодно-гідравлічним методом виконують порожнистим електродом (рис. 4.5). Інструментом слугує металева трубка 4, покрита зовні тонким ізоляційним шаром 3. У трубці під тиском подають електроліт. Трубка включена в електромережу як катод, а оброблювана заготовка 1 – як анод. Інтенсивне анодне розчинення металу з поверхні металу під торцем трубки призводить до утворення порожнини 5, глибина якої може бути задана довільно поступальним переміщенням трубки з електролітом. Діаметр трубки 4, як правило, вибирається меншим, ніж діаметр отвору 5, приблизно на 0,25–0,05, а іноді й на 0,1 мм на бік. Електроліт, що виходить із трубки, повертається по зазору між стінками отвору і трубки і через місцеву ванну 2 відкачується в систему циркуляції.

Електролітом є розчин солей, зокрема, хлористого натрію. Густина струму залежно від інтенсивності прокачування електроліту, складу оброблюваного матеріалу та інших факторів знаходиться в межах 100–300 А/см² при напрузі 4–12 В. Іноді густина струму доходить до 600 А/см². Швидкість заглиблення, як правило, знаходиться в діапазоні 1–6 мм/хв. Отвір може бути будь-якої конфігурації, що визначається профілем перерізу інструмента.

У потоці електроліту виробляють операції обробки шліців, мальцевих каналів і порожнин у трубах, зношування сферичних поверхонь і т. ін.

Особливості електрохімічного формоутворення глибоких точних отворів. Деталі з глибокими і точними отворами широко застосовують у промисловості. Технологічні

прийоми механічної обробки таких отворів, як правило, складні, супроводжуються значними затратами ручної праці і часто дають низьку якість оброблених поверхонь. Тут, особливо на оздоблювальних операціях, електрохімічний метод обробки дуже ефективний.

Розмірну електрохімічну обробку глибоких отворів виконують із нерухомим або рухомим катодом. Застосування нерухомих катодів без осьової подачі має такі недоліки: труднощі точного центрування довгого катода, необхідність застосування фасонного катода для обробки комбінованих східчастих отворів, копіювання дефектів поверхні катода оброблюваної поверхні.

Для підвищення якості обробки катода-інструмента (або заготовки) надають обертання. При значному незбігові параметрів заготовки та інструмента застосовують схему з ексцентричним розміщенням нерухомого інструмента при обертанні заготовки із частотою 5–20 об/хв. Нерухомі катоди рекомендується застосовувати при обертанні заготовки та у разі забезпечення необхідної жорсткості ($l/d < 10$, де l – довжина катода; d – діаметр оброблюваного отвору).

Застосування рухомих катодів зменшує або виключає недоліки нерухомих катодів. До переваг цього виду обробки належать: можливість використання катодів простої форми, наприклад, гладких або східчастих із циліндричними ділянками; забезпечення необхідного центрування, що здійснюється застосуванням ізольованих напрямних втулкою і пластин; практичного виключення копіювання дефектом поверхні інструмента оброблюваної поверхні.

Схеми електрохімічної обробки отворів рухомими катодами показані на рис. 4.6. Застосування рухомих катодів дозволяє різко збільшити продуктивність процесу, оскільки обробка отворів відбувається за всією його довжиною. Обробку доцільно виробляти при вертикальному

розміщенні заготовки та катода інструмента для зменшення його прогину.

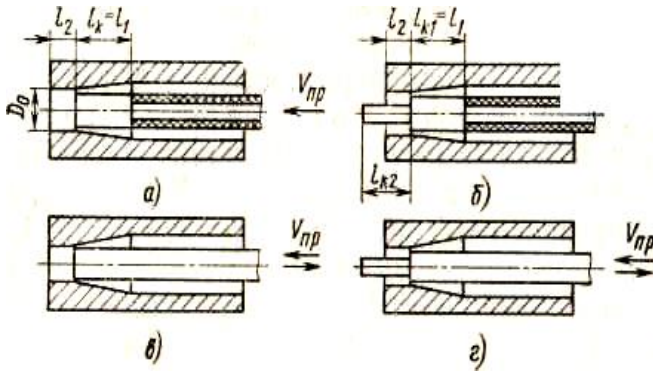


Рисунок 4.6 – Схеми електрохімічної обробки отворів рухомим катодом

На рис. 4.6 а, б показані схеми обробки короткими рухомими електродами, на рис. 4.6 в, г – довгими. З довжиною l_1 робочої ділянки, що дорівнює довжині перехідного конуса l_k , катод, рухаючись в отворі заготовки D_0 , утворює фасонний отвір, що складається з циліндричної і конічної ділянок. Двоступінчастий електрод (рис. 4.6 б, г) дозволяє обробити ділянку l_2 .

Для виконання отворів високої точності застосовують обробку при малих міжелектродних зазорах (до 0,01 мм) із центральним та ексцентричним розміщенням інструмента. Ексцентричне розміщення інструмента дозволяє проводити обробку заготовок із діаметром отворів, набагато більшим, ніж діаметр застосовуваного електрода. Практичне застосування при цьому знаходять такі варіанти схеми: 1) інструменту надають обертання з коловою швидкістю 5–15 м/с при радіальній подачі до 0,1 мм/хв; частота обертання заготовки 15–20 об/хв (рис. 4.6 а); 2) інструменту, виконаному у вигляді зрізаного конуса (конусність

2–3), надають обертання зі швидкістю 5–15 м/с і поздовжню подачу до 150 мм/хв; частота обертання заготовки 5–60 об/хв (рис. 4.6 б); цю схему застосовують при обробці отворів діаметром 50–200 мм; 3) інструменту надають лише радіальну подачу, а заготовку приводять в обертання зі швидкістю 5–20 м/с (рис. 4.6 в).

Розмірна електрохімічна обробка за зазначеними варіантами має такі переваги: можливість одержання високої точності і мінімальної шорсткості обробленої поверхні; зниження вимог до стабілізації параметрів процесу; зниження енергоємності процесу обробки за рахунок зменшення електричного опору в зазорі.

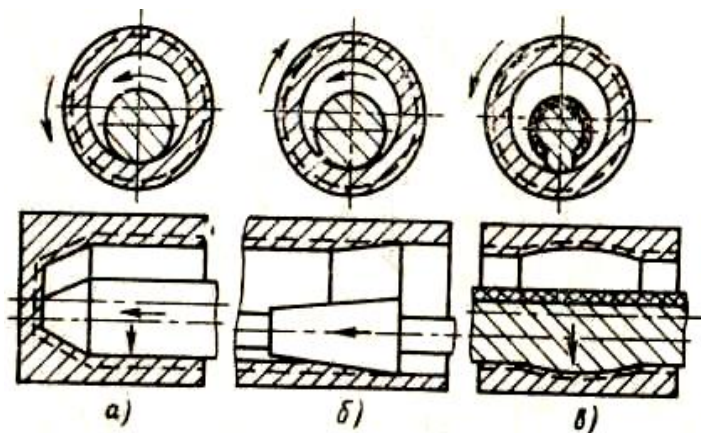


Рисунок 4.7 – Схеми електрохімічної обробки отворів з ексцентричним розміщенням катода-інструмента

Схему вибирають залежно від заданої шорсткості оброблюваних поверхонь, точності та інших вихідних параметрів. Розмірна електрохімічна обробка при живленні постійним струмом, як правило, не забезпечує високої точності та якості оброблюваних поверхонь. Можна істотно підвищити точність обробки та її якість, застосовуючи ім-

пульсно-циклічну схему електрохімічної обробки. При цьому обробка проводиться при коротких імпульсах технологічного струму тривалістю $t_i = 0,002-0,004$ с. Щоб зменшити вплив температури, загазованості і захарашченості електроліту на електропровідність, тривалість пауз вибирається з умови повної заміни електроліту в міжелектродному проміжку. У цих умовах можна одержати похибку формоутворення (копіювання) не менше 0,05 мм при істотно зменшеній шорсткості оброблених поверхонь. Електрохімічний метод дозволяє також проводити операції протягування та калібрування фасонних отворів.

Електрохімічне розрізання заготовок проводять металевим чи без механічного контакту з нею між диском і заготовкою рухомим електродом. Колова швидкість диска досягає 30–40 м/с, забезпечуючи продуктивність 1–3 мм/хв. Знос інструмента відсутній.

4.4 Анодно-механічна обробка матеріалів

Анодно-механічну обробку проводять при підвищеній густині струму. Анодне руйнування матеріалу доповнюється інтенсивним електроерозійним впливом численних теплових факторів, що виникають у точках контакту поверхонь І катода і анода. Під термічним впливом електричного струму знімання металу помітно збільшується. Специфічна особливість цього процесу полягає в тому, що одночасно плавляться невеликі ділянки оброблюваної поверхні, які виникають у точках контакту заготовки та електрода-інструмента. У той самий час процес плавлення є короткочасним, що запобігає проникненню тепла в масу металу заготовки, тому тепло впливає лише на тонкий поверхневий шар, в якому можуть відбутися незначні структурні зміни. Оскільки розмір ділянок активної поверхні невеликий, локальні густини струму досягають досить значних розмірів (до декількох тисяч А/см²). Зважаючи на

це, метал в окремих точках поверхні, нагріваючись до дуже високих температур, плавиться, частково випаровується і виноситься із зони обробки. Там, де метал видалено, процес припиняється, виникаючи в інших місцях. Завдяки зсуву цих явищ процес знімання відбувається безперервно.

Робочим середовищем при анодно-механічній обробці є електропровідний електроліт – водний розчин силкату натрію (рідке скло):



Важливою характеристикою цього електроліту є модуль M , що обчислюється за формулою

$$M = \frac{A}{D} \cdot 1,032,$$

де A – процентний вміст кремнезему; D – процентний вміст окису натрію; 1,032 – процентне співвідношення молекулярної ваги окису натрію до молекулярної ваги кремнезему).

Питома вага робочої рідини $(1,28-1,32) \cdot 10^{-4} \text{Н/см}^3$, модуль $M = 2,6-3$.

У результаті виникнення електроерозійних явищ і анодно-механічної обробки зі збільшенням стає продуктивнішим і підвищується шорсткість оброблюваних поверхонь. Тому цей вид обробки застосовують в основному для чорнових операцій.

Анодно-механічне різання металів. Характерним видом анодно-механічної обробки є різання металів. Анодно-механічне різання металів базується на комбінованому ВІМ дії електричних, теплових та механічних факторів нарізання заготовки і здійснюється на спеціальних верстаках. Схема установки для анодно-механічного різання показана на рис. 4.8. Розрізану заготовку 1 здебільшого уста-

новлюють на верстаті нерухомо, а електрод-інструмент передає складний рух щодо заготовки; швидкий основний рух і рух подачі. У зону різання підводиться робоча рідина. Різання супроводжується інтенсивним утворенням іскор, що викидаються із зони різання. Ці іскри являють собою частинки розплавленого металу, покриті оболонкою з робочої рідини. Ширина різання залежить від товщини електрода - інструмента і, як правило, становить 1,8–2,5 цієї товщини.

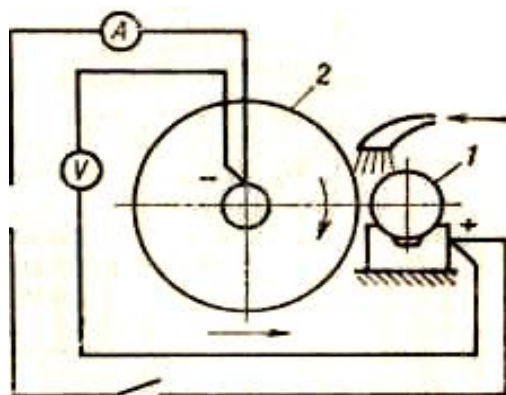


Рисунок 4.8 – Схема анодно-механічного різання матеріалів

При анодно-механічній обробці механічні властивості оброблюваного матеріалу помітно не впливають на інтенсивність процесу обробки. На інтенсивність анодно-механічної обробки роблять деякий вплив такі властивості матеріалу, як температура плавлення, теплопровідність і теплоємність.

Висока продуктивність різання може бути досягнута лише при інтенсивних електричних режимах, що характеризуються напругою і силою струму. Напруга, необхідна для анодно-механічного різання, становить 20–28 В, і рі-

зання вибирають залежно від розмірів поперечного перерізу заготовок – сила струму при цьому коливається в значних межах і залежно від розмірів заготовки та інтенсивності процесу може досягати декількох сотень ампер.

На продуктивність процесу різання істотно впливає швидкість основного руху електрода-інструмента. Оптимальний інтервал швидкості головного руху 15–25 м/с. При малій швидкості інструмента невелика кількість електричних розрядів, при більшій – скорочується тривалість їх впливу, в тому й іншому випадках продуктивність різко знижується, нормальний режим обробки передбачає також і оптимальний тиск електрода-інструмента на заготовку, що розрізається. Тиск інструмента на заготовку повинен знаходитися в інтервалі 0,08–0,2 МПа.

Анодно-механічне заточування різального інструмента. Анодно-механічний метод обробки успішно застосовують для заточування інструмента, оснащеного твердосплавними пластинами. Схема анодно-механічного заточування інструмента показана на рис. 4.9. Інструмент 1, що заточується, і обертовий заточний диск 2 з'єднують із джерелом 5 постійного струму через регульовальний резистор 4. Проміжок між заточуваною поверхнею інструмента і диском заповнюється робочою рідиною. Напруга до інструмента подається через комутаторне кільце 3.

Інтенсивність знімання металу і шорсткість оброблюваної поверхні залежать від матеріалу інструмента, що заточується, складу і кількості робочої рідини в зоні заточування, напруги джерела живлення, величини міжелектродного проміжку і сили струму. Швидкість знімання при заточуванні інструмента із твердого сплаву значно нижча за швидкість знімання металу при заточуванні сталі.

Робоча рідина повинна знаходитися в достатній кількості в міжелектродному проміжку. Це досягається часто: подачею рідини і застосуванням дисків, на робочій частині

яких є канавки, що полегшують доступ робочої рідини в зону заточування. Найкращі результати дає робоча рідина, приготовлена з рідкого скла і води, з об'ємною вагою $(1,36-1,38) \cdot 10^{-4} \text{ Н/см}^3$.

Зниження швидкості знімання після тривалої роботи свідчить про непридатність робочої рідини, в цьому випадку необхідно її замінити свіжим складом.

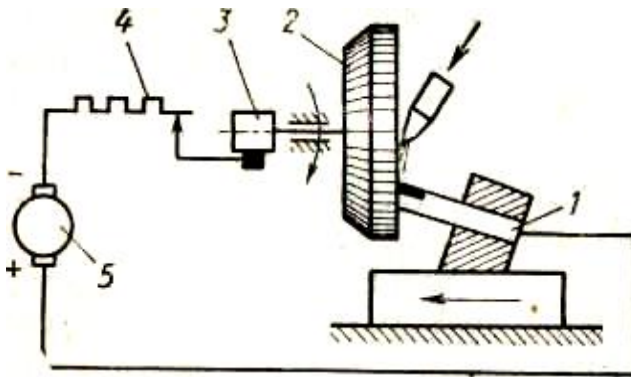


Рисунок 4.9 – Схема анодно-механічного заточування інструмента

Напруга генератора (або іншого джерела постійного струму), як правило, становить 14–28 В, густина струму 1–25 А/см² (залежно від виду виконуваного переходу). Високу швидкість знімання металу можна одержати при тиску між електродами 0,15 МПа. Колова швидкість диска повинна бути такою, щоб своєчасно відбувалося видалення розплавлених частинок металу із зони заточування. При надмірній колій швидкості диска утруднюються потрапляння робочої рідини в зону заточування і збільшується розбризкування. Найбільша швидкість знімання металу відбувається при колій швидкості диска 8–18 м/с.

Для забезпечення високих швидкостей знімання металу і необхідної шорсткості поверхні потрібно зберегти

сталим протягом часу обробки обрані значення напруги й сили струму. У той самий час у процесі обробки при анодному заточенні інструмента внаслідок знімання металу з інструмента, що заточується, величина міжелектродного проміжку безперервно зростає, а отже, змінюються сила струму і напруга на електродах. Для збереження міжелектродного проміжку сталим необхідно наближати інструмент і диск зі швидкістю, що відповідає швидкості знімання металу. Для підтримки постійного міжелектродного проміжку використовують регулятори (рис. 4.10).

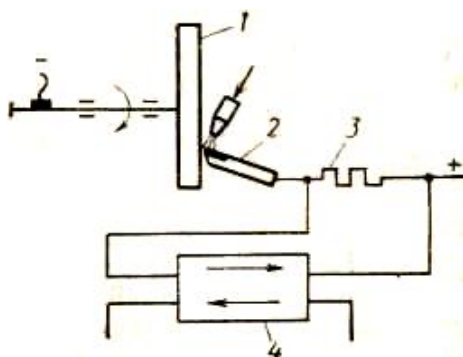


Рисунок 4.10 – Схема регулювання міжелектродного проміжку при анодному заточенні інструмента

Регулятор 4 перебуває під дією двох напруг: напруги, що знімається «з регульованого резистора 3, та напруги постійного джерела живлення. Перша напруга залежить від сили струму, а отже, від величини міжелектродного проміжку. Під дією цієї напруги регулятор намагається розвести інструмент на диск. Напруга стороннього джерела не залежить від перебігу процесу і є постійною. Під дією цієї напруги регулятор наближає електроди. Налаштування регулятора проводиться, таким чином, щоб при заданій силі струму напруга, що знімається з резистора, до-

рівнює напрузі стороннього джерела. Якщо включити подачу при розведених електродах, то в ланцюзі 4 струму не буде.

Регулятор під дією напруги стороннього джерела почне швидко наближати інструмент і диск до того часу, поки на резисторі не з'явиться напруга, що відповідає заданій силі струму. Якщо з яких-небудь причин (наприклад, коротке замикання інструмента і диска) сила струму різко зросте, регулятор швидко розведе електроди і встановить міжелектродний проміжок, при якому відбувається рівність напруг, тобто встановлений режим обробки.

Для того, щоб забезпечити необхідну шорсткість поверхні, заточку твердосплавного інструмента, як правило, виконують за декілька переходів, один з яких забезпечує високу швидкість знімання при великій шорсткості поверхні, а інший – низьку швидкість знімання і більш якісну оброблену поверхню. На попередньому режимі знімають більшу частину припуску – 80–90 %; на чистовому – 15 %. Знімання металу в 3–4 рази нижче, ніж при попередньому режимі.

4.5 Анодно-абразивна обробка матеріалів

Поєднання анодного розчинення і механічного (абразивного) впливу на заготовку значно розширює можливість застосування електрохімічних процесів для розмірної обробки матеріалів.

Електроабразивне шліфування. На рис. 4.11 показана схема електроабразивного круглого шліфування. Струмopовідне абразивне коло 3 ковзним контактом 2 з'єднане з негативним полюсом джерела постійного струму. Оброблювана заготовка 4 приєднується до позитивного полюса. Резистор «Я» дозволяє регулювати силу струму в ланцюзі. У зону обробки подається електроліт, наприклад, розчин рідкого скла, з об'ємною вагою (1,24–1,34) x

$\times 10^{-4}$ Н/см³. Напряга джерела струму 30–32 В, найменша напруга 7–8 В, максимальний струм до 50 А. При збільшенні анодної густини струму інтенсивність знімання металу зростає, при цьому підвищується шорсткість поверхні. Тому процес обробки доцільно проводити в два переходи (шліфування і доведення), що відрізняються електричними режимами.

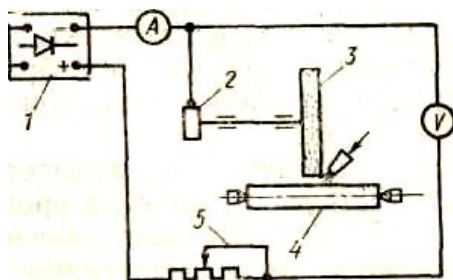


Рисунок 4.11 – Схема електроабразивного шліфування

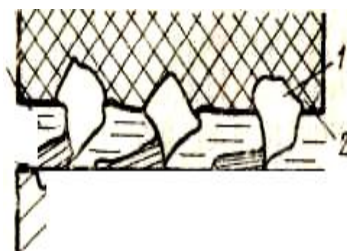


Рисунок 4.12 – Схема процесу електроабразивної обробки

Основне знімання металу забезпечується шліфуванням. Припуск на доведення залишають не більше 0,05 мм.

На рис. 4.12 показана схема процесу електроабразивної обробки. Електроабразивне коло складається з абразивних зерен 1 і зв'язки 2. У зазор 4, утворений абразивними зернами, безперервно подається робоча рідина 6. При проходженні електричного струму заготовка анод 3 піддається анодному розчиненню з утворенням плівки 5 із високим електричним опором. При обертанні кола абразивні зерна видаляють продукти анодного розчинення із заготовки і захоплюють частинки електроліту, безперервно оновлюючи його в робочій зоні. Працездатність абразивного круга підтримується його самозагострюванням процесі роботи. Абразивні зерна зношуються і руйнуються, внаслідок чого зазор між оброблюваною заготовкою та

електропровідною зв'язкою кола зменшується. Відбувається пробій тонкого шару електроліту, що призводить до вигорання графіту і бакеліту і відновлення колишньої величини проміжку.

Показники процесу значною мірою залежать від співвідношення частки металу, знятого механічним різанням, і загального об'єму знятого металу. Із збільшенням частки механічного різання зростає зусилля шліфування і підвищується знос шліфувальних кругів. Так, при плоскому шліфуванні торцем кола частка електрохімічного знімання металу переважає, а при шліфуванні периферією круга частка електрохімічного знімання в середньому становить лише 55–58 % загального знімання металу. Об'ємна продуктивність обробки цим методом становить $4\,000\text{ мм}^3/\text{хв}$, шорсткість поверхні $Ra = 0,16\text{ мкм}$.

Електроалмазне шліфування. Сутність процесу електроалмазного шліфування полягає в поєднанні анодного розчинення з алмазним різанням. Особливостями електроалмазного шліфування є: висока густина струму (до 200 А/см^2), що досягається за рахунок високої електропровідності шліфувального круга та малого зазору між кругом із заготовкою; низька напруга (6–10 В), що запобігає можливості виникнення ерозії в процесі обробки; безперервне видалення із зони різання не лише продуктів анодного розчинення, а й різання оброблюваної заготовки.

Установлено, що 0,9 товщини шару, що знімається в процесі обробки, видалається за рахунок електрохімічного процесу, а лише 0,1 – за рахунок різання. Тому знос алмазного диска при електроалмазному шліфуванні зменшується майже в 10 разів порівняно з механічним алмазним шліфуванням.

Режим обробки залежить від співвідношення кількості сталі і твердого сплаву на поверхні, що шліфується, а також вимог до якості й продуктивності обробки. Найкра-

щі показники досягаються при використанні кіл на зв'язках МВ1, МО13Е і алмазах АСР і АСВ із зернистістю 125/100 або 160/125 100 % концентрації. Швидкість знімання 600–900 мм³/хв при питомій витраті алмазів 1–4 мг/г, шорсткість поверхні до $Ra = 0,16$ мкм.

Швидкість різання при електроалмазному шліфуванні знаходиться в межах 20–25 м/с, при більш високих швидкостях підвищується зношування круга.

Тиск круга на оброблювану заготовку робить значний вплив на розвиток електрохімічного процесу, оскільки змінюється величина зазору між заготовкою та кругом і процес різання твердого сплаву алмазними зернами. Величина оптимального тиску становить 0,4–0,6 МПа.

Анодно-механічне шліфування отворів проводиться або за кілька проходів із поперечною подачею, або зі зняттям припуску за один прохід. У твердому сплаві можна обробляти отвори зі зніманням 0,4–0,6 мм за один прохід при подовжній подачі 0,03–0,04 мм/хв.

Анодно-механічне фрезерування і точіння виконуються металевим інструментом, профіль якого відповідає профілю деталі. Для поліпшення потрапляння електроліту в міжелектродний проміжок, що утворює диск (інструмента), роблять прорізи. Анодно-механічне точіння проводиться торцем фасонного електрода при обертальній заготовці, чим забезпечується перенесення профілю інструмента на заготовку. Спосіб ефективний при обробці складних фасонних поверхонь. На швидкість знімання і шорсткість обробленої поверхні при анодно-механічному фрезеруванні і точінні впливають густина струму, швидкість обертання інструмента або заготовки, напрямок подачі електроліту й інші фактори. Електроліт вибирають залежно від оброблюваного матеріалу.

Анодно-механічне хонінгування і суперфінішування. Анодно-абразивним хонінгуванням називають обробку, при якій видалення продуктів анодного розчинення проводиться механічними діями абразивної суспензії і неметалевих притирань за наявності додаткового катода 1 (рис. 4.13) або абразивними брусками, що встановлюються в хонінгувальну головку, яка є катодом. При анодно-механічному хонінгуванні основний припуск видаляється анодним розчиненням; роль мікрорізання зводиться до механічної депасивації поверхні заготовки. Шорсткість поверхні, обробленої абразивними брусками, $Ra = 0,04-0,16$ мкм, відхилення циліндричності при обробці – отвори 3–5 мкм на довжині 100 мм, відхилення від круглості не перевищує 0,8–2 мкм. Знімання металу за діаметром до 0,3 мм/хв, знос брусків 0,1–0,2 мг/м.

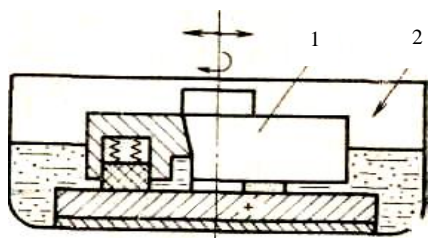


Рисунок 4.13 – Схема анодно-механічного хонінгування

Продуктивність анодно-механічного суперфінішування в 15 разів вища від звичайного. Цей вид обробки можна застосовувати безпосередньо після точіння або чорнового шліфування. Наприклад, при обробці пінолі верстака діаметром 75 мм і довжиною 300 мм із сталі 40Х швидкість знімання становить 400–500 мм³/хв. Похибка форми у поперечному перерізі 0,6–1,0 мкм при початковій похибці 5–6 мкм, відхилення від циліндричності 1–2 мкм на довжині 100 мм.

4.6 Електроерозійно-хімічна обробка

Електроерозійно-хімічна обробка стосується перспективного методу, що використовує комбіновані процеси формоутворення, при яких знімання металу здійснюється шляхом впливу електричних розрядів у потоці електроліту і анодного розчинення. При суміщеній обробці електрод-інструмент є катодом, заготовка – анодом (пряма полярність). Електроди розділені проміжком, у який через отвір в інструменті подається електроліт, наприклад, 10 % розчин хлористого натрію. Як джерело живлення застосовують ЕФС або імпульсний генератор.

Процес обробки відбувається так. При напрузі на електродах, меншій від напруги пробую, формоутворення заготовки відбувається за рахунок анодного розчинення, як при електрохімічній обробці. При підвищенні напруги до напруги пробую міжелектродного проміжку в місці з найменшою діелектричною міцністю утворюється канал електричного розряду. Тут відбувається місцеве руйнування матеріалу заготовки, як і при електроерозійному способі обробки (утворюється лунка). У місцях, не заповнених газовими пухирцями іскрового розряду, відбувається електрохімічне розчинення заготовки (відбувається поєднаний процес обробки). При падінні напруги на електродах нижче від напруги горіння дуги розряд переривається і формоутворення заготовки знову відбувається лише за рахунок анодного розчинення.

При суміщеному методі обробки електродні процеси прискорюються внаслідок прискорення обміну електроліту в міжелектродному проміжку і за рахунок примусового прокачування утворюються при розрядах газовими пухирцями.

Густина струму при прошиванні і різанні 3–4 А/мм² і більше. Середня швидкість знімання металу із заготовки є результатом анодного розчинення та електричної ерозії:

$$Q_{\vartheta} = \frac{\eta}{k} j_{e,x} + k_T j_{e,e},$$

де η – анодний вихід за струму; $j_{e,x}$, $j_{e,e}$ – середні густини струмів відповідно електрохімічного та електроерозійного механізмів розчинення; k_T – стала, що залежить від теплофізичних властивостей заготовки, що визначають швидкість електроерозії.

Найбільш ефективною операцією, що виконується електроерозійно-хімічним методом, є прошивання отворів. Процес застосовують також при обробленні складнофасонних поверхонь, розрізуванні труб, утворення каналів і т. ін.

Анодне розчинення зменшує шорсткість обробленої поверхні, величину якої можна визначити за формулою

$$Rz_{max} = K_R W^{1/3},$$

де W – енергія імпульсу; K_R – коефіцієнт, різний для торцевої і бічної частин міжелектродного проміжку (при обробленні торцевої поверхні переважає ефект електричної ерозії, а при обробленні бічної частини – ефект анодного розчинення). Висота мікронерівностей: на бічних сторонах 20–40 мкм, торцевій поверхні при грубих режимах – більше 320 мкм.

Товщина зміненого шару при електроерозійно-хімічному методі обробки менша, ніж при електроерозійному методі, і встановлюється за таким виразом:

$$h_a = K_h W^{1/3},$$

де K_h – коефіцієнт, що залежить від режиму обробки і теплофізичних властивостей заготовки.

Питання для самоперевірки

1. Наведіть класифікацію методів електрохімічної обробки .
2. Які методи належать до електрохімічної обробки в стаціонарному електроліті.
3. Зобразіть та опишіть принципову схему електрохімічної обробки в проточному електроліті.
4. Охарактеризуйте основні переваги та недоліки електрохімічної обробки в проточному електроліті.
5. Охарактеризуйте сутність обробки поверхні анодно-гідралічним способом.
6. Яким чином відбувається прошивання отворів анодно-гідралічним методом?
7. Опишіть сутність електрохімічної обробки отворів рухомим катодом.
8. У чому особливості анодного руйнування матеріалу?
9. Які види анодно-механічної обробки ви знаєте?
10. Охарактеризуйте сутність та особливості електроабразивного шліфування.

5 ТЕХНОЛОГІЯ ШВИДКОГО ПРОТОТИПУВАННЯ

5.1 Сутність швидкого прототипування (RP)

Швидке прототипування (Rapid Prototyping – RP) – це процес пошарової побудови фізичної моделі (прототипу) відповідно до геометрії CAD-моделі. Основна відмінність цієї технології від традиційних методів виготовлення моделей полягає в тому, що модель створюється не відділенням «зайвого» матеріалу від заготовки, а пошаровим нарощуванням матеріалу, що в кінці формує модель. Моделі, виконані за технологіями RP, можуть виготовлятися з різних матеріалів (залежно від технології, що використовується): із пластиків, рідких смол, спеціальних порошків, різних листових матеріалів (паперу, алюмінію та ін.) Процеси побудови значною мірою автоматизовані і дозволяють одержувати якісні і порівняно недорогі моделі, витрачаючи на їх виготовлення години, а не дні й тижні, як це було при використанні традиційних методів. Технології RP дозволили істотно скоротити терміни і вартість дизайнерських та конструкторських робіт, робіт із виготовлення технологічного оснащення, а також підвищити якість продукції. Моделі-прототипи, виконані за цією технологією, відрізняються відмінним поєднанням міцності і точності виготовлення.

Але разом із перевагами, що мають RP-технології, у них є і ряд недоліків. Унаслідок того, що їх принцип полягає у пошаровій побудові моделі, виникає необхідність у створенні спеціальних підтримуючих елементів (підтримок) для виступаючих (або нависаючих) частин моделі. По-перше, це збільшує час, що витрачається на підготовку процесу побудови моделі, адже програмне забезпечення розраховує, де необхідно помістити підтримку. По-друге, після закінчення побудови йде трудомісткий процес ретельного відділення матеріалу підтримки від тіла моделі. Це

супроводжується ризиком (найчастіше незалежно від досвіду працівників, які здійснюють цей процес) пошкодження моделі і, як правило, навіть при позитивному результаті вимагає подальшої обробки поверхні. По-третє, необхідність використання підтримок і труднощі в їх подальшому видаленні можуть накласти деякі обмеження на свободу конструювання виробу.

Аналіз циклу створення продукту (ЦСП) показує, що в усіх його фазах – від виникнення ідеї продукту аж до його впровадження на ринок – необхідний прототип. Для промислових товарів широкого споживання ЦСП може бути поділений на 6 фаз (рис. 5.1).



Рисунок 5.1 – Етапи створення прототипів виробів (традиційні)

У фазі створення функціонального зразка виготовляють від 2 до 5 прототипів для перевірки та оптимізації ідеї

виробу за принципом функціонування. Основне питання на цьому етапі створення полягає в тому, що аналізуються функції окремих компонентів виробу і його складових частин.

У наступній фазі створення виготовляються технічні прототипи у великих кількостях примірників (залежно від конкретних умов – від 3 до 20), які за можливості повинні бути тотожні кінцевій продукції в частині використовуваного матеріалу і встановленої технології.

Впровадження виробу на ринок відбувається у фазі передсерійного виготовлення залежно від галузі в кількості до 500 штук. Дослідна партія необхідна на етапі планування виробу, для інтенсивного тестування його і ринку. У цій фазі відбувається нарощування темпів виробництва, необхідне для визначення параметрів виробництва і проведення оптимізації.

Інтегрований робочий процес прискореного виготовлення деталей або їх прототипів являє собою органічне поєднання можливостей комп'ютерних технологій обробки інформації та трикоординатного моделювання (CAD) і сучасних способів виготовлення. Спосіб дозволяє в часі і просторі поєднати або надзвичайно зблизити конструювання та виготовлення типової або одиничної моделі, або безпосередньо деталі і скоротити час на їх виготовлення залежно від ступеня складності на 30–70 %.

Ідеологія прискореного формоутворення виробу (моделі, прототипу) базується на: можливості комп'ютерного автоматизованого проектування (за кресленням, аналітичними залежностями або результатами вимірювань), комп'ютерної оптимізації його конструкції, виходячи з вимог дизайну, форми, функціональних властивостей (CAD); трансформації трикоординатної моделі в сукупність пошарових двовимірних, двокоординатних моделей; можливості відтворити цю сукупність пошарових моделей, тобто

матеріалізувати всю модель як єдине ціле, як твёрдотільний виріб або його прототип (СAM) (рис. 5.2).

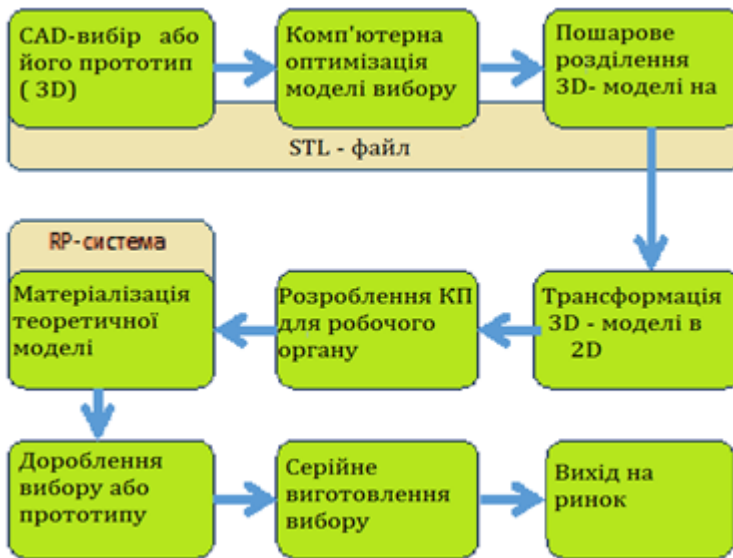


Рисунок 5.2 – Структура інтегрованого робочого процесу прискореного формоутворення – RapidPrototyping

Таким чином, функціональна структура інтегрованого робочого процесу прискореного формоутворення виробу може бути подана в такій послідовності:

1. Одержання тривимірної математичної моделі виробу. Вона створюється за даними креслення, власними аналітичними залежностями (рис. 5.3 а).

2. Комп'ютерна оптимізація конструкції, виходячи з функціонального призначення, дизайну та інших вимог до проєктованого виробу.

3. Попароверозбиття теоретичної моделі сукупністю двовимірних відносно простих моделей (рис. 5.3 б).

4. Створення програм комп'ютерного управління рухом робочого органу, «інструмента», за допомогою якого пошарово відповідно до сукупності 2 D – моделей буде матеріалізуватися теоретична модель виробу.

5. Пошарове (рис. 5.3 в) одержання одним із способів цільної твердотільної моделі або виробу або серії виробів.

6. Кінцевий виріб чи модель одержують подальшим поліпшенням властивостей. Для цього на першій стадії встановлюються відмінності властивостей очікуваного прототипу і необхідного виробу – за геометричною формою, фізичними, механічними, хімічними та ін. властивостями. На другій стадії частина цих відмінностей усувається за рахунок параметрів процесу матеріалізації теоретичної моделі. На третій, остаточній стадії, відбувається максимально можливе наближення його функціональних властивостей до необхідних: зносостійкості, міцності, електропровідності, металізації, доведення і т. ін.

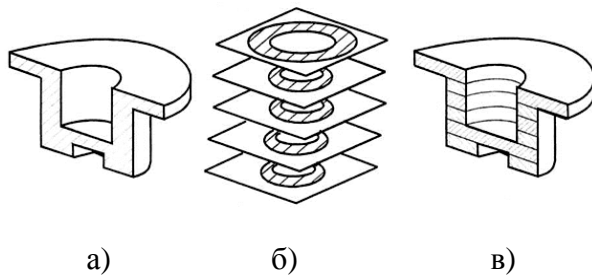


Рисунок 5.3 – Основні переходи способу RP:

а) 3D CAD-модель; б) сукупність 2D CAD-моделей;
в) пошарово побудована твердотільна модель

На рис. 5.4 наочно проілюстровано основні методи прискореного формоутворення.

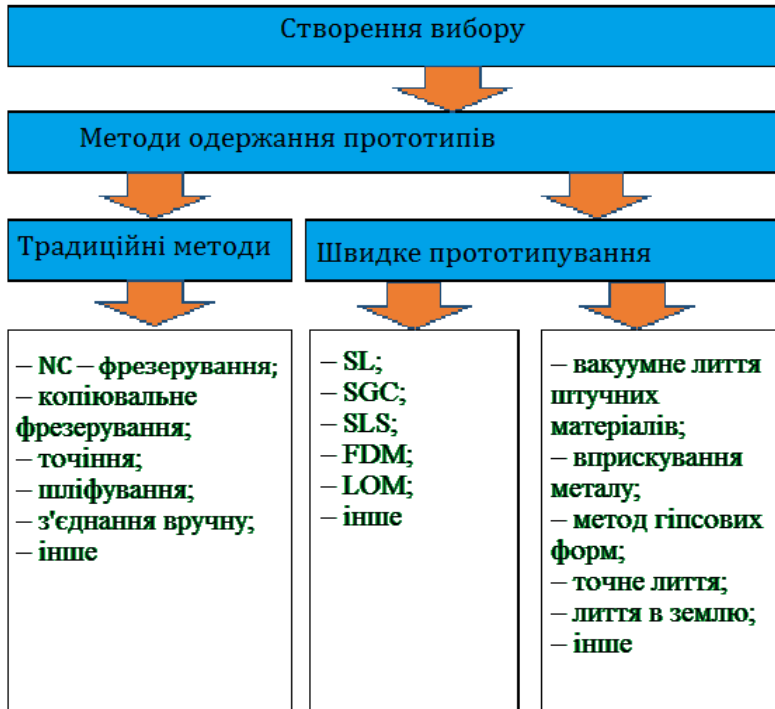


Рисунок 5.4 – Способи виготовлення моделей виробів та прототипів

5.2 Сутність CAD-моделювання

Створення CAD-моделей (3D-моделювання і трансформація теоретичної моделі в систему двовимірних 2D-моделей), а також їх підготовка до подальшого використання вимагають основної частини часу, що витрачається у процесах RP. Цей процес вимагає підвищеної уваги ще й тому, що може використовуватися як діалоговий інструмент для оптимізації конструкції виробу, для швидкого усунення недоліків дослідного зразка шляхом зміни банку даних. Як правило, первісна модель представлена як деяке геометричне тверде тіло.

Відправною точкою для кожного RP-методу є тривимірний опис геометрії прототипу, призначеного для виготовлення, з якого випливає створення фізичної твердотільної моделі. Виходячи з виду RP-обладнання, процес пошарового розділення може сам перетворюватися на зовнішню систему обробки геометрії або в систему управління процесом в обладнанні.

5.3 Способи матеріалізації 3D CAD-моделей

Способи матеріалізації теоретичних 3D-моделей є найважливішою складовою інтегрованого робочого процесу прискореного формоутворення, виготовлення виробів або їх прототипів, оскільки саме вони багато в чому визначають: скорочення часу створення виробу, продукту довільної найскладнішої форми; ступінь підвищення якості виробу; скорочення сумарних виробничих витрат.

Розроблені до цього часу способи матеріалізації теоретичних моделей різні за багатьма ознаками, технологічними можливостями та ін. Проте всі існуючі способи мають багато спільного:

- усі прототипи або вироби виготовляються на основі даних 3D CAD-проекування;
- усі прототипи або вироби виготовляються пошарово;
- виріб або його прототип одержують не шляхом зняття припуску із заготовки, а за допомогою нарощування;
- нарощування матеріалу в процесі формоутворення відбувається в перехідній його фазі від рідкого або порошкоподібного до твердого стану;
- виготовлення конструктивного елемента не вимагає форм або інструменту, а отже, відпадають проблеми, пов'язані зі зношенням інструмента при формоутворенні різанням, штампуванням, куванням та ін.;

– відсутність обмежень, пов’язаних зі складністю форми виробу (внутрішні порожнини, складні внутрішні чи зовнішні поверхні);

– ефективність усіх способів RP істотно підвищується при їх комбінації завершальною технологією виготовлення твердотільних виробів – вакуумне лиття, лиття під тиском та ін. його види.

Основні способи технологій RP залежно від стану вихідних матеріалів наведені на рис. 5.5–5.8.



Рисунок 5.5 – Вихідні стани використовуваних матеріалів технологій RP

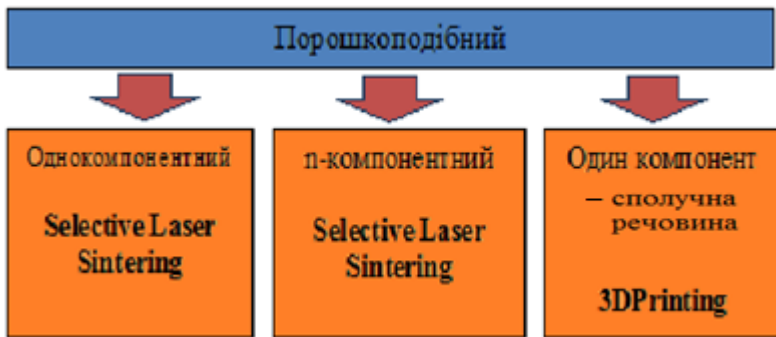


Рисунок 5.6 – Способи RP із використанням порошкоподібних матеріалів

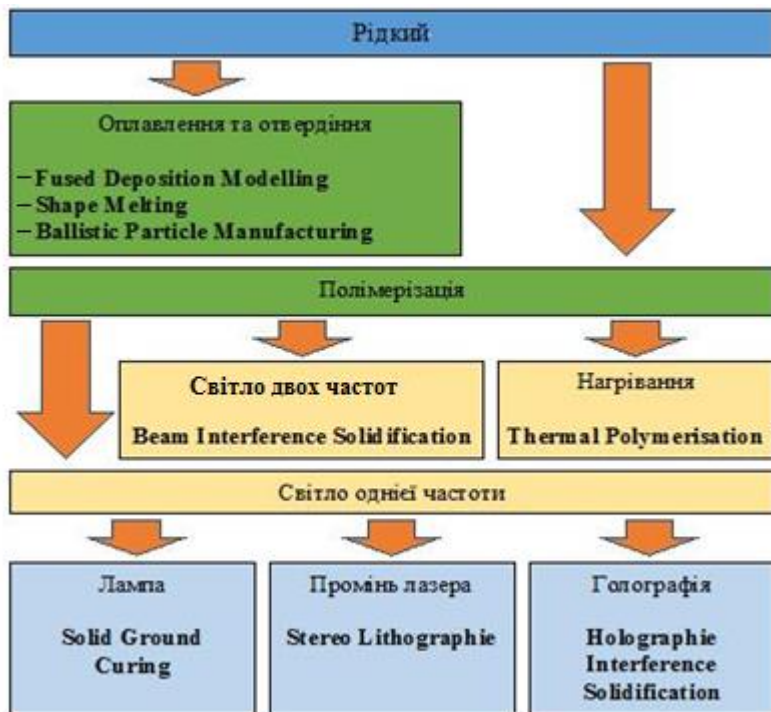


Рисунок 5.7 – Способи RP із використанням рідких матеріалів



Рисунок 5.8 – Способи RP із використанням твердих матеріалів

5.4 Технології швидкого прототипування

5.4.1 Стереолітографія

Стереолітографічна машина складається з резервуара з рідким фотополімером, із рухомої горизонтально розміщеної платформи, яка знаходиться в цьому резервуарі, а також із лазера, який переносить інформацію про шари безпосередньо на поверхню фотополімеру. Лазер є основним робочим елементом стереолітографії, який послідовно «викреслює» перетини об'єкта на поверхні зі світлочутливою смолою. Рідкий фотополімер твердне лише там, де його торкається лазерний промінь. Рухома платформа, на якій «вироснується» деталь, встановлюється нижче від поверхні фотополімеру на відстані, рівному товщині першого прошарку. На поверхні фотополімеру формується зображення, відповідне першому перерізу об'єкта. В опроміненій області утворюється плівка твердого полімеру. Після формування першого шару платформа з плівкою опускається на відстань, що дорівнює товщині наступного шару. Новий шар матеріалу наноситься на отверділу поверхню, і на поверхні фотополімеру відтворюється зображення, що відповідає другому перерізу деталі. Далі платформа переміщується на відстань, що дорівнює товщині наступного шару, і процес повторюється автоматично до повної побудови деталі. Після завершення формування останнього (верхнього) шару платформа піднімає на поверхню фотополімерну композицію (ФПК), пошарово вирошена деталь знімається з платформи, з поверхні деталі видаляються залишки рідкого фотополімеру, і деталь сушиться.

Готові моделі витримують нагрівання до 100 °С без змін форми і розмірів. Шорсткість поверхні без будь-якої обробки не перевищує 100 мкм. Затверділий фотополімер легко полірується. Міцність готових деталей порівнянна з міцністю виробів з епоксидних смол. Оскільки пошарово

вироснуваний об'єкт знаходиться в рідині, то його необхідно жорстко зафіксувати на платформі, щоб уникнути зміщень і навіть відриву від платформи в результаті дії гідродинамічних сил, що виникають під час руху платформи з вироснуваною деталлю в рідині або зсуву центра мас вироснуваного об'єкта. Механічні характеристики (міцність, пружність) тонкої полімерної плівки обмежують допустиму в процесі пошарового виготовлення деталі величину виступів. Виступи, незв'язані області вимагають для своєї фіксації допоміжних елементів – підпірок (своєрідних будівельних рештувань), що підтримують деталь у процесі її виготовлення. Необхідно також зазначити, що більша площа контакту деталі з платформою ускладнює її відділення від платформи. Підпірки, як правило, являють собою тонкі (0,1–0,5 мм) стінки, що, перетинаючись одна з одною, утворюють жорстку конструкцію. Підпірки можна створювати і засобами САПР, але трудомісткість цієї процедури, залежність структури підпірок від типу ФПК і типу установки роблять актуальною автоматизацію цієї операції. Основним недоліком традиційної стереолітографії є порівняно низька продуктивність процесу, для прискорення якого розроблений варіант його реалізації за допомогою так званих масок. За результатами комп'ютерного проектування, геометрію прошарків виробу наносять спочатку на прозорі пластини, виготовляючи відповідні маски. Замість лазерного променя на рідкий фотополімер через маску спрямовується світло від спеціальної лампи відразу на всю поверхню розтину. Після затвердіння шару перетину залишковий рідкий фотополімер віддаляється і порожнечі заповнюються розплавленим воском. Після пресування і затвердіння воску його надлишки зчищають урівень із затверділим шаром виробу. Конструкція опускається в рідкий полімер на глибину наступного шару і висвітлюється через маску чергового шару виробу. Така технологія не

вимагає додаткового часу на затвердіння матеріалу виробу, необхідного в класичному варіанті стереолітографії. Структурна схема роботи технології показана на рис. 5.9.

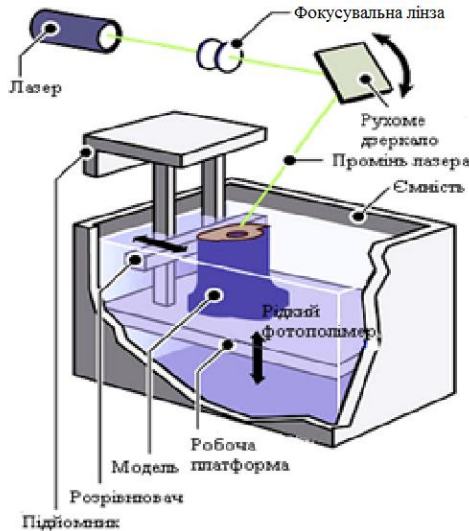


Рисунок 5.9 – Схематичне подання технології стереолітографії

Лазерний промінь переміщається по поверхні рідкого фотополімеру, щоб «окреслити» геометрію перерізу об'єкта. Смола застигає лише там, де її торкався лазерний промінь, який переміщається в площині XY під керуванням сканувальної системи. Сканувальна система вміщує дефлектори, що керують дзеркалами, причому інформація про переміщення надходить із CAD-даних. Таким чином, лазерний промінь переміщається дуже швидко і по заданому контуру. Модель опускається вниз (приблизно на 0,5–1,3 мм) на деякий час, упродовж якого її поверхню заповнюють рідиною, далі розрівнювач видаляє надлишки рідкого полімеру з поверхні. Модель опускається вниз, у

той час як сфокусований лазерний промінь залишається на поверхні полімеру. Під час затвердіння відбувається усадка полімеру. Ця усадка може призвести до зміни об'єму рідини у ванні, тому повинна весь час перевірятися. У разі відхилення рівень відновлюється. Товщини прошарків становлять від 50 до 500 мкм. Це контролюється для визначення, на яку величину опускати платформу. Чим тонші затверділі прошарки, тим точніша поверхня моделі, але, з іншого боку, процес відбувається довше. Розглянуті кроки повторюються, поки об'єкт повністю не буде виготовлений. Деякі конфігурації об'єктів можуть мати навислі конструкції, які повинні підтримуватися упродовж усього процесу виготовлення. Підтримки створюються на стадії комп'ютерної обробки тривимірного виду моделі за допомогою різних програм (напр., Solid Concepts, Los Angeles, California). Вони дозволяють: стабілізувати виступи, консолі на краях моделі; запобігти розшаруванню в складних ділянках моделі; коригувати можливе викривлення прошарків на платформі; дозволяють легко відокремлювати синтезовану модель від основи – платформи; полегшують синтез складних моделей, створюючи їх із декількох частин. Після того як процес виготовлення об'єкта закінчено, готова модель піднімається над рівнем рідини, і її надлишки стікають. Після вилучення моделі з ванни вона поміщається в піч для додаткового затвердіння полімеру. Лазерна стереолітографія дозволяє одержати дуже складні суцільновирощені моделі. Практично ж обмеження за формою пов'язані лише з неможливістю виростити деталі з повністю ізольованими внутрішніми порожнинами.

Переваги: установка повністю автоматизована і працює без втручання оператора; висока точність відтворення моделі; гострі краї моделей заповнюються полімером, що зменшує здатність до розшарування; велика популярність цього процесу.

Недоліки: тривалий час на після обробку (16 і більше годин); усадка полімеру при затвердінні призводить до деформацій форми поверхні, а отже, зменшує точність відтворення; хімічна токсичність полімеру і засобів для очищення ванни; обмежена кількість придатних для використання типів полімерів (висока ціна – 100–200 \$ за 1 літр); необхідність високої технічної підготовки персоналу і витрат на обслуговування обладнання.

Максимальні розміри побудови деталей SLA-5000 становлять 508x508x584 мм, що дозволяють виготовляти великогабаритні конструкції або одночасно кілька деталей. Робоча камера має двоє дверей, що істотно полегшує операцію вилучення готових деталей. SLA-5000 оснащена твердотілим ультрафіолетовим лазером підвищеної потужності. Одна з найбільш нових стереолітографічних систем – SLA-7000, у середньому на 400 % швидша, ніж попередня система швидкого моделювання від 3D Systems. Крім того, товщина шару 0,0254 мм створює гладку поверхню, що позначається на зменшенні часу наступної обробки.

Точність при виготовленні прототипів є одним із найважливіших чинників. Аналіз раніше виконаних досліджень та експериментів за участі авторів дозволив установити три найважливіших фактори, що впливають на точність виготовлення прототипів: параметри установки, шарова побудова виробу, матеріал виробу. У таблиці 5.1 наведено порівняння параметрів стереолітографічних установок та залежність товщини шару від матеріалу при виготовленні виробів.

Проаналізувавши дані, наведені в таблиці, можна зробити висновок, що найбільш точні моделі (прототипи) можна одержати, використовуючи матеріали на основі епоксидних композицій (наприклад, SL7540 та ін.).

Таблиця 5.1 – Порівняльна характеристика установок стереолітографії

		SLA-250	SLA-3500	SLA-5000	SLA-7000
Лазер	Тип	Гелій-кадмієвий HeCd	Твердотільний Nd:YVO4	Твердотільний Nd: YVO4	Твердотільний Nd:YVO4
	Довжина хвилі	325 нм	354,7 нм	354,7 нм	354,7 нм
	Потужність	25 мВт	160 мВт	216 мВт	800 мВт
Система нанесення шарів	Спосіб	Пристрій Zephyr	Пристрій Zephyr	Пристрій Zephyr	Пристрій Zephyr
	Мінімальна товщина шару	0,1 мм	0,05 мм	0,05 мм	0,025 мм
	Діаметр променя	0,20–0,29 мм	0,23–0,28 мм	0,23–0,28 мм	
	Менша пляма				0,23–0,28 мм
	Більша пляма				0,685–0,838 мм
	Найбільша швидкість побудови	792 мм/с	2,54 м/с	5,0 м/с	
	Менша пляма				2,54 м/с
	Більша пляма				9,52 м/с
Рухомі платформи	Вертикальне розширення	0,0025 мм	0,0018 мм	0,00177 мм	0,00125 мм
	Максимальна вага деталі	9,1 кг	56,8 кг	68,4 кг	68,04 кг
Ванна	Об'єм	32,21 л	99,3 л	253,6 л	253,6 л
	Максимальні розміри деталі, мм	250x250x250	350x350x400	508x508x600	508x508x600
	Змінна ванна	Так	Так	Так	Так

Це пов'язано з тим, що епоксидні полімери мають меншу усадку на відміну від акрилатних полімерів. Усадка для матеріалів на основі епоксидних композицій становить $(0,06 \pm 0,06)$ %, а на основі акрилатних – $(0,6 \pm 0,1)$ %.

5.4.2 Технології із використанням теплових процесів

Обладнання від DTM Corp., EOS, Helisys і Stratasys ґрунтується на теплових реакціях і таких основних технологіях: Selective Laser Sintering (SLS – лазерне спікання порошкових матеріалів, DTM Corp. та EOS); Laminated

Object Manufacturing (LOM – виготовлення об'єктів із використанням ламінування, Helisys); Fused Deposition Modeling (FDM – пошарове накладення розплавленої полімерної нитки, Stratasys).

Технологія лазерного спікання порошкових матеріалів (SLS)

При SLS-технології (Selective Laser Sintering – лазерне спікання порошкових матеріалів) 3D-об'єкт створюється з порошкоподібних матеріалів. Частинки порошку, діаметром 50–100мкм, що містяться в ємності, розплавляються під впливом лазерного випромінювання. Лазерний промінь, потрапляючи на тонкий прошарок порошку, спікає порошкові частинки, що тверднуть при охолодженні, формуючи твердий шар. Рухома платформа опускається. Зверху за допомогою ролика наноситься прошарок порошку, і процес повторюється до повного виготовлення прототипу. На рисунку 5.10 наведена схема виготовлення моделей методом лазерного спікання порошкових матеріалів.

У цій технології модель, що будується, не потребує підпор (як, наприклад, при стереолітографії), оскільки нерозплавлений порошковий матеріал залишається лежати в камері, тим самим забезпечуючи необхідну підтримку.

Після побудови модель повністю оточена невикористаним матеріалом. Порошок дуже обережно віддаляється лише після повного застигання моделі, яке залежно від матеріалу може тривати кілька годин.

Після очищення модель може піддаватися подальшій обробці. Перевага цього методу полягає в тому, що поряд із пластмасами можна виготовляти прототипи з усіх матеріалів, які під впливом тепла розплавляються, а потім при охолодженні знову тверднуть. Основними виробниками установок для методу лазерного спікання порошкових матеріалів є компанії DTM Corp. (США) і EOS (Німеччина).

Обидві компанії створюють установки для виготовлення прототипів із пластмас, металу і піску.

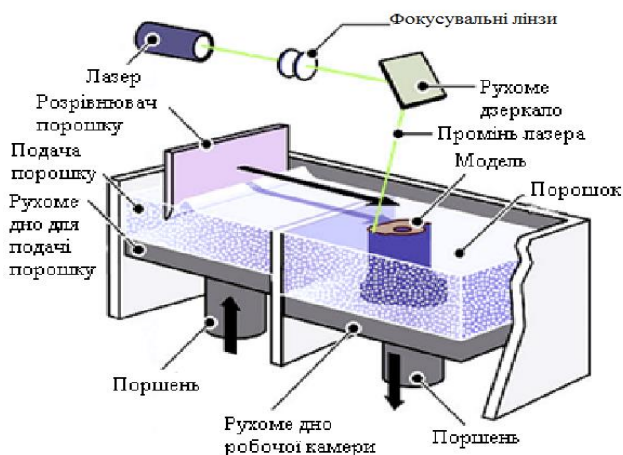


Рисунок 5.10 – Схематичне подання технології SLS

У таблиці 5.2 наведені дані з точності виготовлення виробів і товщини шару залежності від типу установки. На рисунку 5.11 наведені приклади виробів, що демонструють можливості технології SLS.

Таблиця 5.2 – Параметри точності установок SLS

		Точність X- Y, мм	Точність Z, мм	Товщина шару, мм
Sinterstation 2000	Компанія DTM	0,01	0,01	0,05–0,3
Sinterstation 2500		0,01	0,01	0,05–0,4
Sinterstation 2500plus		0,01	0,01	0,05–0,5
EOSINT P360	Компанія EOS	0,05	0,05	0,1–0,2
EOSINT P700		0,05	0,05	0,15
EOSINT S700		0,05	0,05	0,2
EOSINT M250		0,05	0,05	0,05–0,1

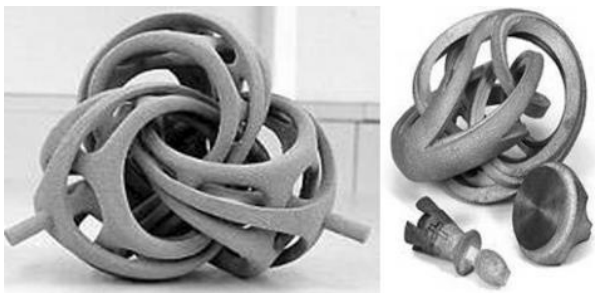


Рисунок 5.11 – Приклади виробів на установках SLS

Технологія Laminated Object Manufacturing (LOM)

Laminated Object Manufacturing (виготовлення шаруватих моделей). LOM – це технологія створення тривимірних моделей методом пошарового склеювання елементів, вирізаних із листового матеріалу (рис. 5.12). Виготовлені за LOM-технологією моделі ідеально підходять для вирішення завдань, що вимагають оцінювання форми та естетичних властивостей виробів. Міцність LOM-об'єктів здебільшого дозволяє використовувати їх для перевірки функціональності спроектованого виробу. Для виготовлення моделей використовується папір або листовий пластик із нанесеною сухою сполучною речовиною. Виготовлені LOM-моделі за складом подібні до деревини і легко обробляються.

За допомогою спеціального програмного забезпечення розраховується необхідна кількість поперечних перерізів деталі. Далі CAD-дані, що містять інформацію про виготовлену модель, транслюються в систему керування процесом LOM-машини. Матеріал із рулона подається на робочу поверхню і променем лазера вирізається контур поперечного перерізу. Ділянки зайвого матеріалу розрізаються на дрібні елементи для подальшого видалення.

На робочу поверхню подається матеріал для нового шару і склеюється із попереднім за рахунок прокатування термороліком. Після цього створюється і вирізається новий поперечний переріз. Після завершення виготовлення всіх шарів зайвий матеріал видаляється вручну. За необхідності виконується чистова обробка моделі (шліфування, покриття фарбою або лаком).

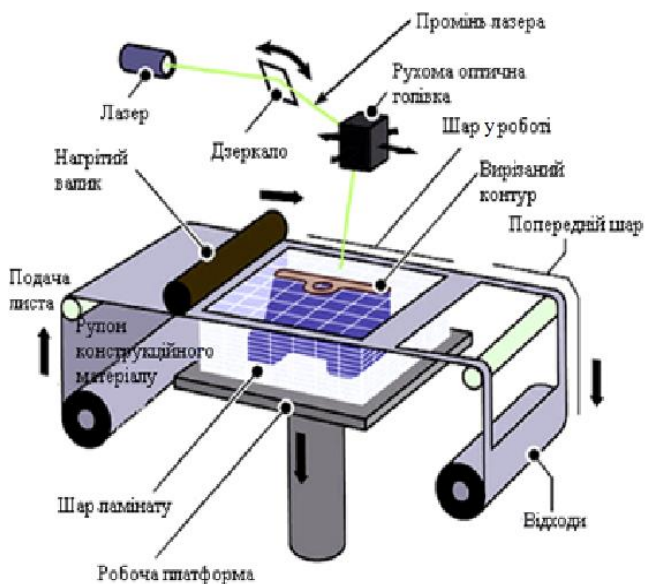


Рисунок 5.12 – Схематичне подання технології LOM

Завдяки використанню недорогих твердих листових матеріалів перевагою LOM-моделей є надійність, стійкість до деформацій і гранично ефективна вартість, що не залежить від геометричної складності. Власником технології LOM і виробником обладнання є американська компанія Helisys Inc., що виробляє серії установок LOM Paper, LOM

Plastic, LOM Composite для різних типів витратного матеріалу. Установки LOM-1015plus та LOM-2030H – це високопродуктивні системи для виготовлення шаруватих моделей, які, завдяки спрощеним процедурам налаштування і поліпшеному механізму подачі матеріалу легкі в керуванні ефективні в роботі.

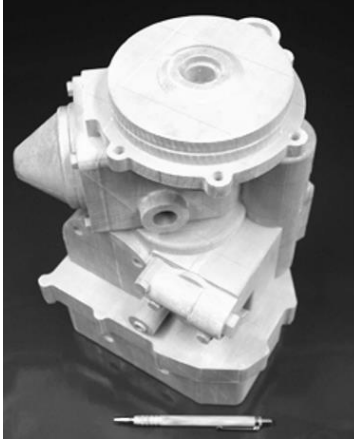
Дані щодо точності виготовлення деталей, виготовлених за технологією LOM, наведені в табл. 5.3.

Таблиця 5.3 – Характеристики установок LOM

Модель установки	Точність X-Y, мм	Точність Z, мм	Товщина шару, мм
LOM-1015	0,025	0,05-0,2	0,05-0,2
LOM-1015plus	0,025	0,05-0,2	0,05-0,2
LOM-2300	0,025	0,05-0,2	0,05-0,2
LOM-2300plus	0,025	0,05-0,2	0,05-0,2
ZIPPY I	0,01	0,01	0,15
ZIPPY II	0,01	0,01	0,15
ZIPPY III	0,01	0,01	0,15

Основні напрямки застосування технології LOM: лиття в землю для малих і середніх обсягів виробництва, лиття по випалюваних моделях, оснащення для вакуумного формування, точне лиття по випалюваних моделях, лиття в гіпсові форми для імітації лиття в постійні форми, вакуумне лиття в піщані форми, майстер-моделі для виготовлення форм із силіконової гуми, за якими потім відливаються пластмасові або металеві деталі, гальванопокриття LOM-деталей для тестування у середовищах із випалюваними великими навантаженнями, виготовлення оснащення з використанням епоксидних смол і поліуретанів; наплення металу для прямого лиття під тиском.

На рис. 5.13 наведений приклад виробів, що демонструють можливості технології SLS.



Деталь: гідромотор
Розміри (X-Y-Z): 310 x 215 x 225 мм
Система LOM: 1015
Побудова: 37 год

Застосування: конструкторський прототип

Рисунок 5.13 – Гідромотор, виготовлений за технологією LOM

Моделювання методом пошарового наплавлення: FDM-технологія

FDM – Fused Deposition Modeling – процес пошарового накладання розплавленої полімерної нитки. FDM-система дозволяє перетворити концепцію виробу в реальний прототип, перевірити прототип на відповідність формі і розмірам і змоделювати працездатний виріб, не вдаючись до зайвих часових і матеріальних затрат.

За допомогою FDM-технології можна створювати тривимірні об'єкти із твердотільних або поверхневих електронних моделей, одержаних у CAD-системі. Термопластичний моделювальний матеріал у формі тонкої нитки діаметром 0,07 дюйма (1,78 мм) подається в екструзійну головку із системою регулювання температури, де він розігрівається до напіврідкого стану. Головка укладає матеріал дуже тонкими прошарками на нерухому підставку, формуючи за один прохід закінчений шар деталі. Наступні шари наносяться на попередні, тверднуть, з'єднуються один з одним (рис. 5.14).

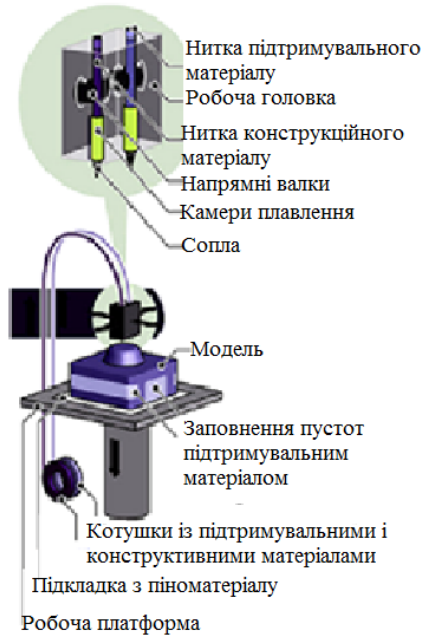


Рисунок 5.14 – Схематичне подання технології FDM

При створенні моделі використовуються два види матеріалу: перший (основний) – для формування самої моделі, а інший – як опорний (матеріал підтримки). Підтримка легко видаляється, залишаючи чисту і гладку поверхню поділу між підтримкою і моделлю, що в результаті дає чудову якість закінченої моделі. Траєкторію переміщення інструмента задає оператор простим натисканням відповідної клавіші, і ці дані в цифровій формі вводяться потім у FDM-установку. Установка забезпечує переміщення по осях X, Y і Z, при цьому за один прохід створюється один прошарок моделі. Одержані таким способом прототипи потім можна маркувати, шліфувати, фарбувати, свердли-ти. Перевага цього способу полягає в тому, що існує вели-

ческа палітра матеріалів, що дозволяє користувачеві підбирати саме той матеріал, який найкраще відповідає його вимогам до моделі, що виготовляється. Крім того, важливим є той факт, що в процесі побудови моделі можна змінювати матеріал. Систему можна використовувати в будь-якому офісному приміщенні, оскільки не потрібно ніяких спеціальних умов роботи (вентиляція, додаткова інфраструктура або спеціальні дозволи). Усе поставляється у вигляді закінченого рішення, яке дозволяє конструкторському колективу швидше проектувати, перевіряти та виготовляти свої вироби. Системи FDM мають модульну конструкцію, що дозволяє користувачам нарощувати можливості системи у міру зростання складності виготовлення прототипів. Базова система будь-якої моделі передбачає всі необхідні компоненти для виготовлення моделей і прототипів із матеріалу одного типу (як правило, з ABS – пластика). Існують додаткові модулі, що дозволяють розширювати функціональні можливості системи завдяки використанню інших типів моделювальних матеріалів – литтьовий віск, спеціальний медичний ABS – пластик, поліестер (поліефірний компаунд). Розробником технології FDM і виробником обладнання є компанія Stratasys. Фірма Stratasys була заснована в 1988 році і є одним із перших виробників прототипів.

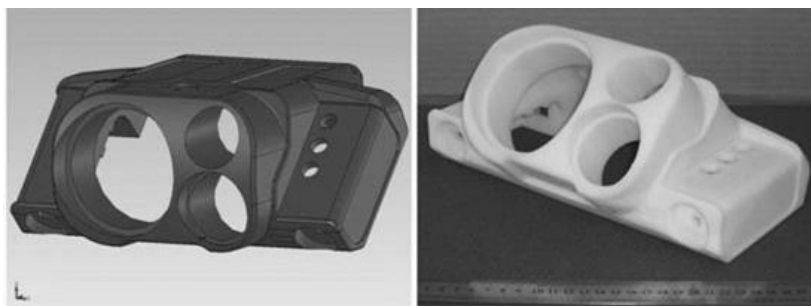
Моделі зберігають свої геометричні параметри необмежений час незалежно від вологості, наявності або відсутності ультрафіолетового або магнітного випромінювання і витримують нагрівання до 150 °С. Точність виготовлення прототипів становить $\pm 0,127$ мм. Застосування екологічно чистих технологій і матеріалів для виготовлення моделей-прототипів дозволяє уникнути часових і грошових затрат на створення спеціальних умов для експлуатації FDM-установок і розміщувати їх у безпосередній близькості від

робочих місць конструкторів. У таблиці 5.4 наведені основні характеристики обладнання від Stratasys.

Таблиця 5.4 – Характеристики установок FDM

	FDM 2000	FDM 3000	FDM 8000	FMD Quantum
Розмір формованої деталі	254x254x x254 мм	254x254x x406 мм	457x457x x609 мм	600x500x600 мм
Товщина шару	0,254– 2,54 мм/0,005 –0,762мм	0,254– 2,54 мм/0,005– 0,762мм	0,254– 2,54 мм/0,005– 0,762мм	0,38 – 0,51мм/0,18 – 0,25мм
Точність	0,1 мм	0,1мм	0,1мм	0,1мм
Матеріал	ABS ABSi Литтєвий віск E20- еластомір	ABS ABSi	ABS ABSi E20-еластомір	ABS

На рисунку 5.15 наведені приклади виробів, створених за допомогою технології FDM.



а)

б)

Рисунок 5.15 – Приклади виробів, зроблених за технологією FDM: а) 3D-модель; б) прототип

5.4.3 Сутність тривимірного друку (3D-Printers)

Здебільшого системи швидкого прототипування є громіздкими і дорогими установками. Для багатьох фахівців, які займаються концептуальним проектуванням і яким потрібно лише подивитися на деталь і потім продовжити розроблення, це є дуже важливим фактором швидкого, недорогого і простого одержання прототипів спроектованих виробів. Для сегмента ринку RP, якому необхідні прототипи для візуального оцінювання, почали виробляти так звані «принтери твердотільних об'єктів» Three Dimensional Printer – 3D-Printer системи, що будують фізичні моделі рухом матеріалу з однієї або декількох струменевих головок, подібно до звичайного принтера (рис. 5.16).

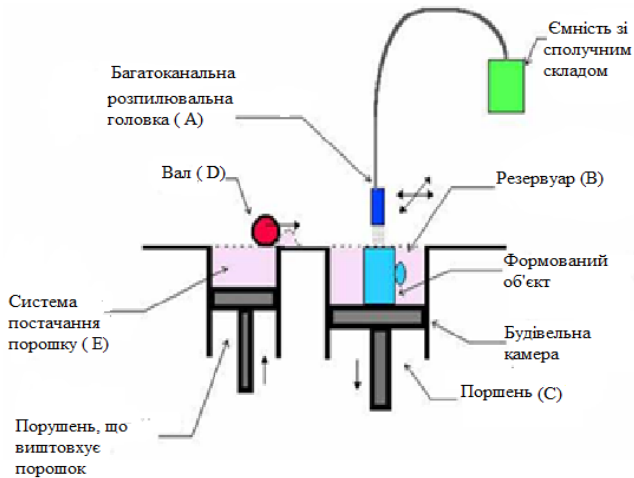


Рисунок 5.16 – Схематичне подання технології 3D-Printer

Як і традиційні RP-машини, 3D-принтери виготовляють фізичні моделі, що базуються на САD-моделі, використовуючи, в основному технології струминного моделю-

вання і технології використання для формування деталі порошку, який твердне за допомогою зв'язувальної речовини на водній основі

Як правило, 3D-принтери не дають високої точності і міцності готового прототипу, проте механічних властивостей таких прототипів достатньо для візуалізації проектного виробу. Принтер має 2 камери: камеру подачі порошку і камеру, в якій формується модель. Перед роботою принтера оператор засипає порошок у камеру подачі, поршень якої опущений повністю вниз. Поршень другої камери піднято в цей час до упору вгору. Під час чергового циклу друку формується один переріз моделі (розбиття моделі на перерізі відбувається автоматично за допомогою керуючого програмного забезпечення ZPrint). Переріз друкується так само, як і у звичайному струменевому принтері з тією лише різницею, що замість паперу – тонкий прошарок порошку, а замість чорнила – сполучна речовина (клей). Після того як переріз моделі надруковано, каретка переміщається в зону подання порошку, поршень із моделлю опускається на товщину одного прошарку, а поршень, що подає порошок, піднімається на товщину одного прошарку. Після цього ролик каретки, переміщуючись назад, задає черговий прошарку порошок у зону друку, і цикл повтворюється.

5.5 Практичне застосування RP-технологій

Технології швидкого прототипування надали нових можливостей розвитку виробництва. Сучасні RP-технології можуть бути застосовані у промисловому виробництві для точного лиття за випалюваними моделями, швидкого виготовлення функціональних металевих зразків і як ключовий крок у швидкому виготовленні оснащення. Вже на ранній стадії розвитку стереолітографії стало зрозуміло, що ця революційна технологія може знайти різні

застосування у виробничих процесах. На стадії концептуального проектування наявність фізичного тривимірного об'єкта значно полегшує оцінювання правильності конструкції, а також спрощує сам процес спілкування між членами колективу, які працюють над проектом. Раніше об'єкти, що створювалися з фотополімерних матеріалів, за своїми фізичними і механічними характеристиками не відповідали промисловим матеріалам. Отже, хоча ці моделі і дозволяли проводити контроль розмірів та геометрії, перевірку й оптимізацію конструкції, але можливості функціональної перевірки прототипів були обмежені. У зв'язку з цим кілька років тому багато користувачів технології стереолітографії почали шукати шляхи, що дозволяють усунути ці обмеження.

5.5.1 Лиття за випалюваними стереолітографічними моделями (QuickCast)

Quick Cast – це новий стиль побудови моделей металевих деталей, розроблений фірмою 3D-Systems, що ґрунтується на литті за випалюваними стереолітографічними моделями, що виключає необхідність використання коштовного і трудомісткого (щодо виготовлення) оснащення. Стиль побудови Quick Cast полягає у створенні внутрішньої відкритої сітчастої структури, що складається з безлічі зов'язаних перегородок. Внутрішня структура покрита тонкою оболонкою, для того щоб не проникала рідка кераміка, дозволяючи структурі валитися без руйнування оболонкової форми під час випалювання моделі. Стереолітографічна модель використовується разом зі стандартною литтєвою системою, виготовленою з ливарного воску (рис. 5.17, 5.18).

Після виготовлення оболонкової форми воскова литтєва система виплавляється на початковому етапі випалювання оболонкової форми, при якій ще не відбувається руйнування стереолітографічної моделі.

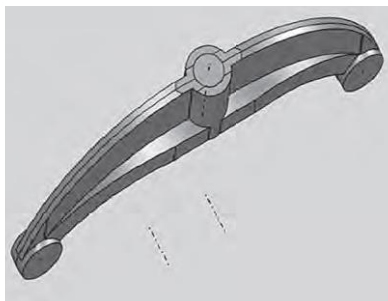


Рисунок 5.17 – 3D-
модель виливка

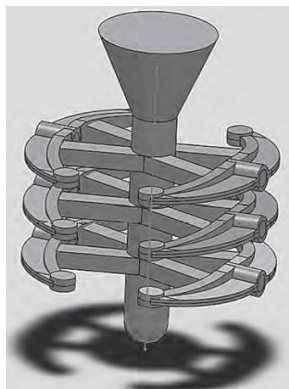


Рисунок 5.18 – Форма
з елементами литтєвої
системи

Випалювання оболонкової форми проводиться за температури приблизно 900°C . Під час цієї операції стереолітографічна деталь спочатку розм'якшується, а потім випалюється, залишаючи приблизно 0,003 % залишкової золи. Потім зола видаляється стисненим повітрям, і керамічна оболонкова форма готова до заливання металу. У процесі випалювання пустотіла структура моделі руйнується всередині, що зменшує ймовірність розриву керамічної оболонки. Метал заливається в керамічну оболонкову форму й охолоджується. Потім оболонка руйнується, видаляються ливники, і процес завершується зачищенням, піскоструминною обробкою, фрезеруванням і т. ін.

Кінцевий результат – це точний металевий виплавок, створений із моделі, виготовленої за технологією стереолітографії, без використання традиційного дорогого технологічного оснащення.

Основні переваги цього процесу: можливість точного лиття металу за випалюваними моделями, одержаними без будь-якого оснащення; значна економія часу (відсутній

етап виготовлення оснащення); значна економія коштів (виключені витрати на виготовлення оснащення); можливість проведення функціональних випробувань на виливках із необхідного металу; можливість виготовлення невеликих серій металевих деталей, підвищення гнучкості виробництва.

5.5.2 Лиття в еластичні силіконові форми у вакуумі

Лиття у вакуумі в еластичні форми – це процес одержання дослідних зразків і невеликих партій пластмасових та воскових деталей будь-якої складності й габаритів без виготовлення стандартного оснащення. Завдяки використанню широкої гами матеріалів, що відливаються, копії можуть бути еластичними, жорсткими, термостійкими, прозорими або різних кольорів. Принцип виготовлення деталей за технологією лиття в еластичні форми полягає в абсолютно точному копіюванні моделі. Форма виготовляється заливанням полімеризуючого силікону навколо моделі. Модель видаляється із силіконової форми після надрізу форми по роздільній площині. Далі в силіконову форму можна залити будь-яку з наявних у широкій номенклатурі двокомпонентних поліуретанових смол. Ливарні смоли змішуються у вакуумній камері установки, керованої комп'ютером, і автоматично заливаються в силіконову форму. Можливість відтворення складних форм, найдрібніших деталей, будь-якої текстури поверхні і кольору забезпечують смоли для лиття у вакуумі, що мають різну твердість і термостійкість, що дозволяє імітувати більшість пластмас, гум і скла, що використовуються в сучасному виробництві.

Технологія лиття в силіконові форми у вакуумі дозволяє: перевірити можливість складання і працездатність конструкцій; відпрацювати дизайн виробу; виготовити партію дослідних зразків упродовж декількох годин після

виготовлення силіконової форми; провести маркетингові дослідження.

Основні переваги при застосуванні: складні поверхні, найдрібніші деталі і будь-які текстури повністю відтворюються еластичною силіконовою формою; дослідні зразки можуть бути готові вже через кілька днів; можна використовувати різні матеріали для одержання копій та оцінити їх конструкцію і споживчі властивості до виготовлення серійного оснащення; висока точність виготовлення зразків дозволяє реально оцінити рівень збирання і працездатність складних виробів і за необхідності швидко здійснити відповідні доробки.

Незважаючи на описані вище переваги технології, лиття у вакуумі має й недоліки, серед яких можна виділити такі: за допомогою силіконових форм можна виготовити лише обмежене число деталей. В одній формі можна відлити до 20 прототипів деталей, які не мають тонкостінних елементів. Однак для деталей, що мають більш складну геометрію з гострими елементами, в одній формі можна відлити максимум 10 копій. Силіконова форма виготовляється за дуже короткий час – приблизно за шість годин після одержання стереолітографічної моделі. Однак для одержання поліуретанової копії потрібно набагато більше часу. Як правило, за день можна виготовити 4–8 деталей. Тобто якщо необхідно виготовити 50–100 прототипів для проведення випробувань із руйнуванням зразків або для вивчення ринку збуту, то на одержання копій потрібно буде кілька тижнів.

5.5.3 RP-технології із використанням листових матеріалів

У великосерійному і масовому виробництві пластмасових виробів стійкість прес-форм повинна забезпечувати виготовлення декількох тисяч виробів, що зумовлює необхідність використання металевих прес-форм із якісних ста-

лей. Проблема ускладнюється тим, що для одержання високоякісних виробів необхідно забезпечити суворий і рівномірний режим охолоджувальні пластмаси в прес-формі. Практично це означає, що охолоджувальні канали повинні максимально повторювати форму виробів, що виготовляються, що неможливо зробити за допомогою традиційних технологій. Як відомо, RP-технології за рахунок пошарового нарощування виробів дозволяють одержувати будь-яку форму і розміри поверхонь, включаючи закриті порожнини. Для вищезазначеної мети найбільше підходить ідея RP-технології із використанням листових матеріалів. Незважаючи на те, що промислові установки не передбачають використання металевих листів або смуг, сама ідея реалізована у промисловості у вигляді окремих, безпосередньо не зв'язаних між собою блоків. Суть цієї технології полягає в такому: виріб, в даному випадку прес-форма, проектується на комп'ютері, при цьому форма і розміри охолоджувальних каналів відповідають суворим теоретичним розрахункам, що гарантує високу якість виготовлення виробу. За результатами комп'ютерного проектування кожен прошарок виготовляється за допомогою лазерної установки з листового матеріалу необхідної марки. В окремому випадку ця операція може виконуватися за допомогою традиційних технологій (наприклад, фрезеруванням).

Виготовлені з листового металу прошарки прес-форми збираються разом і стискаються за допомогою спеціальних пристроїв, наприклад, скоб. Стиснений пакет листових прошарків зварюється за допомогою дифузійного зварювання, набуваючи монолітного характеру, тобто такого, що відповідає за міцність суцільного виробу. При використанні технологій, що не вимагають розігріву пластмас до високих температур, замість зварювання можна використовувати склеювання. В окремих випадках цілком

допустимим може виявитися просте механічне кріплення листів у єдине ціле за допомогою, наприклад, болтових з'єднань. У разі необхідності окремі поверхні виробу можна піддавати традиційній механічній додатковій обробці. Процес створення прес-форми від виникнення ідеї до запуску у виробництво схематично зображено на рис. 5.19.

Як відомо, традиційні методи створення металевих прес-форм залежно від складності конструкції вимагають значних як часових, так і фінансових затрат, що відсуває терміни виходу виробу на ринок від моменту виникнення ідеї в середньому на один рік і більше.

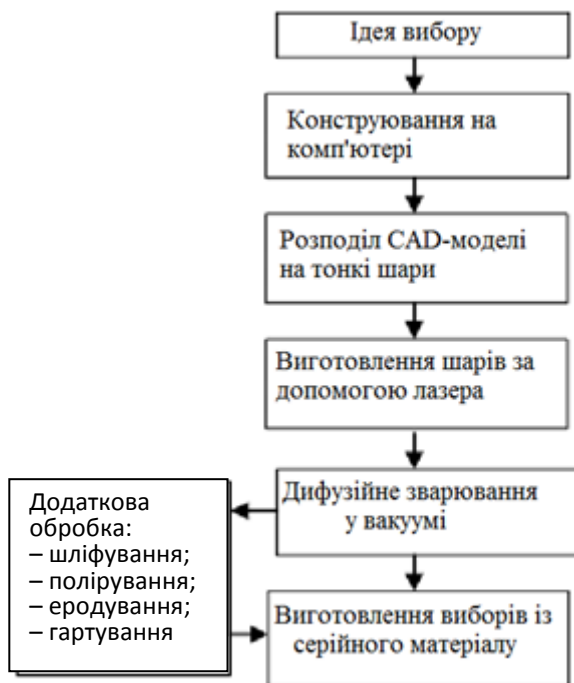


Рисунок 5.19 – Схема процесу створення прес-форми за допомогою RP-технології

Використання RP- технологій не лише істотно скорочує терміни проектування виробів, а й забезпечує їх більш високу якість. Завдяки можливості виготовлення охолоджувальних каналів будь-якої форми і траєкторії, процес виготовлення виробів у таких прес-формах можна повністю автоматизувати, а це забезпечує надійність одержання високоякісних виробів. Наведені вище приклади показують, як можуть бути використані технології швидкого прототипування.

5.5.5 Майбутнє 3D- принтерів

Сьогодні придбати 3D-принтер можна недорого на відміну від того періоду, коли їх почали випускати. Подібні «друкарські машини» стають усе більш популярними і затребуваними як серед приватних осіб, так і в організаціях. Цьому є пояснення: вони дають чимало переваг компаніям, що займаються виробництвом різних промислових продуктів, а саме: оперативність – виготовлення об'ємних фігур будь-якої складності відбувається в кілька разів швидше, ніж це можливо при будь-якому іншому методі; друк тексту, логотипів, ярликів на самому предметі без додаткових витрат часу; низькі експлуатаційні витрати – вартість витратних матеріалів неухильно знижується; міцність, природний колір та екологічність кінцевого продукту; практично нульові відходи від виробництва – рідкі відходи відсутні зовсім.

Сьогодні тривимірні технології широко використовуються в таких сферах виробництва: у медицині – для виготовлення зубних протезів, а в найближчому майбутньому передбачається створення за допомогою таких принтерів контурів необхідних органів; в автомобільній і авіаційній промисловості – для створення деталей машини; в архітектурі – для створення точних і міцних макетів; для виготовлення іграшок та сувенірної продукції, в побуті і на виробництві.

Питання для самоперевірки

1. Які основні переваги та недоліки технологій RP ви знаєте?
2. З яких основних етапів складається процес виготовлення прототипів виробів?
3. В якій послідовності можна подати функціональну структуру інтегрованого робочого процесу прискореного формоутворення виробу.
4. Які основні способи технологій RP залежно від стану вихідних матеріалів ви знаєте?
5. Охарактеризуйте основні властивості моделей, одержаних методом стереолітографії.
6. Охарактеризуйте сутність та призначення технології лазерного спікання порошкових матеріалів.
7. Які об'єкти можна створювати за допомогою технології моделювання методом пошарового наплавлення?
8. Охарактеризуйте практичне застосування RP-технологій.
9. Охарактеризуйте сутність та особливості лиття за випалюваними стереолітографічними моделями.
10. Охарактеризуйте сутність та призначення RP-технології із використанням листових матеріалів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Амитан Г. Л. Справочник по электрохимическим и электрофизическим методам обработки / [Г. Л. Амитан, И. Е. Байеупов, Ю. М. Барон и др.] ; под ред. В. А. Валосатого. – Ленинград : Машиностроение, 1988. – 719 с.

2. Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок : монография / [В. Я. Панченко и др.] ; под ред. В. Я. Панченко. – Москва : Физматлит, 2009. – 664 с.

3. Немилов Е. Ф. Электроэрозионная обработка материалов / Е. Ф. Немилов. – Ленинград : Машиностроение, 1983. – 160 с.

4. Житников В. П. Импульсная электрохимическая размерная обработка / В. П. Житников, А. Н. Зайцев. – Москва : Машиностроение, 2008 – 413 с.

5. Якухин В. Г. Высокотехнологичные методы обработки: учебник / под ред. д-ра техн. наук, проф. О. В. Таратынова. – Москва : МГИУ, 2011. – 362 с.

6. Ярушин С. Г. Технологические процессы в машиностроении : учебник для бакалавров / С. Г. Ярушин. – Москва : Юрайт, 2014. – 564 с.

7. Чучман Ю. І. Технологія машинобудування для електромеханіків / Ю. І. Чучман. – Львів : Вид-во Національного університету «Львівська політехніка», 2001. – 348 с.

8. Ковшов А. Н. Нетрадиционные методы обработки материалов: учебное пособие / А. Н. Ковшов, Ю. Ф. Назаров, В. М. Ярославцев. – Москва : МГОУ, 2007. – 211 с.

9. Петрушин С. И. Технология послойного синтеза изделий-прототипов : учебное пособие / С. И. Петрушин, А. А. Сарыкин, Н. А. Сапрыкина. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 101 с.

Навчальне видання

**Ступін Борис Анатолійович,
Івченко Олександр Володимирович,
Динник Оксана Дмитрівна,
Зінченко Руслан Миколайович**

НЕТРАДИЦІЙНІ МЕТОДИ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ МАТЕРІАЛІВ

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

для студентів спеціальностей:

8.05050201 «Технології машинобудування»,
8.05050302 «Інструментальне виробництво»,
8.05050301 «Металорізальні верстати та системи»
усіх форм навчання

Відповідальний за випуск В. О. Залога
Редактори: Н. А. Гавриленко, Н. В. Лисогуб
Комп'ютерне верстання О. В. Івченка, О. Д. Динник

Підписано до друку 29.09.2016, поз. 114.
Формат 60×84/16. Ум. друк. арк. 8,84. Обл.-вид. арк. 7,98. Тираж 30 пр. Зам. №
Собівартість вид. грн к.

Видавець і виготовлювач
Сумський державний університет,
вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3062 від 17.12.2007.