

## ОСНОВНІ ВИДИ МЕХАНІЧНОГО ОБРОБЛЕННЯ В АВІАПРОМИСЛОВОСТІ

**Воронько І. О.**

### **ВСТУП**

Процес механічного оброблення деталей машин має загальні принципи для всіх областей машинобудування. Та все ж для розробки технологічного процесу оброблення авіаційної деталі є деякі особливості, які мають на меті знизити вагу, суворо регламентувати розміри, мінімізувати виникнення дефектів та інше. Під процесом механооброблення розуміється контрольований процес зрізання частини матеріалу зі шматку сировини чи заготовки й перетворення його в необхідну за формою та розміром деталь. Водночас механічне оброблення металу не впливає на внутрішню структуру сплаву<sup>1</sup>. Суть такої обробки – підігнати зміцнену деталь до заданих розмірів.

Як заготовки для виготовлення подібних деталей використовуються виливки, поковки, штампування, прокат та інші.

Різні матеріали оброблюються по-різному. Кожен зі способів механічного оброблення має як переваги, так і недоліки, тому вибирати найбільш відповідну технологію слід залежно від конкретного випадку.

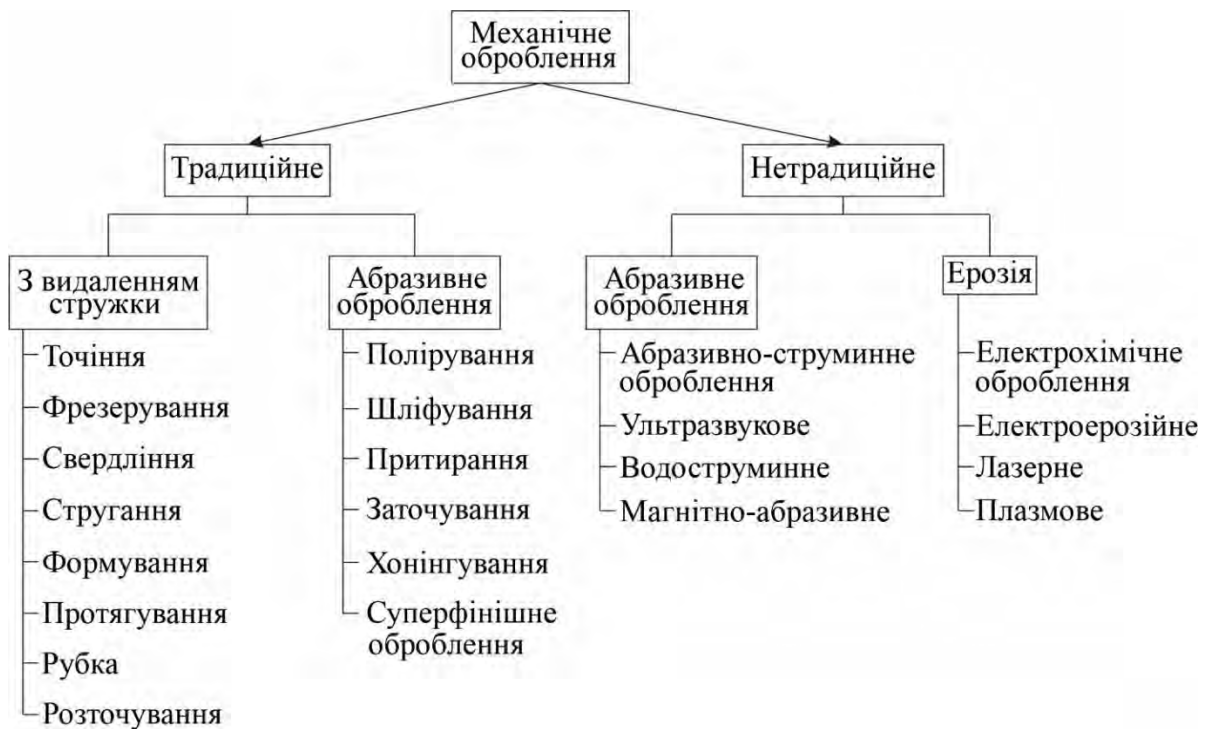
У класичному розумінні виготовлення деталі механообробленням являє собою поступове видалення припусків / надлишку матеріалу у вигляді стружки за допомогою гострого ріжучого інструменту. Для процесу не застосовується нагрівання. А для видалення матеріалу забезпечується рух заготовки щодо різального інструменту або навпаки.

Отримані після такого оброблення деталі мають ідеальну форму, точні розміри й рівну поверхню відповідно до креслення.

Крім цього, існують нетрадиційні види механічного оброблення (рис. 1).

---

<sup>1</sup> Сиккульский, В.Т., Дьяченко Ю.В., Божко В.П., Воронько В.В., Борисевич В.В., Проскурин С. Д., Воронько И.А. Технология производства деталей летательных аппаратов размерной обработкой. Technology of Aircraft Parts Manufacturing by Dimensional Machining. Харьков : НАУ (ХАИ), 2017. 180 с.



**Рис. 1. Види механічного оброблення**

### **1. Традиційні методи механічного оброблення з видаленням стружки**

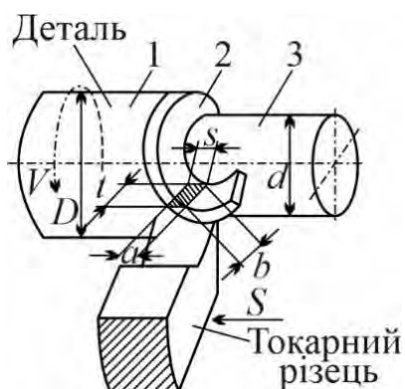
Традиційні методи механічного оброблення мають два напрями: з видаленням стружки й абразивне оброблення. Кожен напрям має свої особливості<sup>2</sup>.

*Точіння* використовується для виготовлення деталей типу тіл обертання (валів, дисків, осей, пальців, цапф, фланців, кілець, втулок, гайок, муфт та інших). Різновидами точіння вважаються обточування, розточування, підрізання торцевих поверхонь, різка (поділ заготовки на частини)<sup>3</sup>.

Точіння проводиться за відносно швидкого обертання оброблюваної деталі зі швидкістю  $V$  і за повільного прямолінійного й безперервного руху  $S$  інструменту / різця (рис. 2). Під час точіння напрям поздовжньої подачі перпендикулярний напрямку швидкості різання.

<sup>2</sup> Корытов М.С., Евстифеев В.В., Калачевский Б.А., Калмин Б.А., Колмаков Б.Г. Технология конструкционных материалов : учебное пособие для среднего профессионального образования / под ред. М.С. Корытова. Москва : Издательство Юрайт, 2018. 234 с.

<sup>3</sup> Покровский Б.С., Евстигнеев Н.А. Общий курс слесарного дела : учебное пособие. Москва : Академия, 2017. 80 с.



**Рис. 2. Процес точіння:**

1 – оброблювана поверхня; 2 – поверхня різання; 3 – оброблена поверхня;  $D$  – діаметр оброблюваної заготовки;  $d$  – діаметр обробленої деталі.

Під час точіння розрізняють два види руху<sup>4</sup>.

Головний рух – обертовий рух  $V$  оброблюваної деталі, за якого відбувається відокремлення стружки.

Допоміжний рух – прямолінійний рух  $S$ , необхідний для врізання різця в нові шари металу для поступового зрізання стружки.

Під час токарного оброблення обидва рухи відбуваються одночасно.

Швидкість різання  $V$  (м/хв) – шлях переміщення ріжучої кромки різця щодо оброблюваної поверхні за одиницю часу.

Глибина різання  $t$  (мм) – відстань між оброблюваною та обробленою поверхнями.

Подача  $S$  (мм/об) – величина переміщення різця за один оберт деталі.

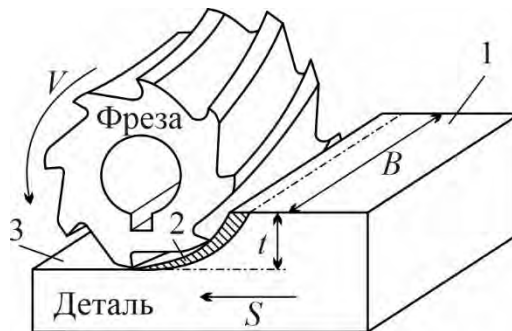
Під час точіння розрізняють: поздовжню подачу (уздовж лінії центрів верстата), поперечну подачу (перпендикулярно лінії центрів) і похилу (під кутом до лінії центрів).

Ширина стружки  $b$  (мм) – відстань між оброблюваною та обробленою поверхнями, виміряна за поверхнею різання. На практиці ширину стружки можна вважати рівною довжині тієї частини ріжучої кромки різця, що бере участь у зніманні (відділенні) стружки.

<sup>4</sup> Мерданов Ш.М., Шефер В.В. Технология машиностроения : учебник. Тюмень : ТюмГНГУ, 2013. 354 с.

Товщина стружки  $a$  (мм) – відстань (виміряна в напрямі, перпендикулярному ширині стружки) між двома послідовними положеннями поверхонь різання за один оберт деталі.

**Фрезерування** – процес механічного оброблення металів із використанням спеціалізованих фрезерних верстатів, завдяки яким можна обробляти заготовки будь-якої складності. Заготовка рухається в різних площинах, а фреза обертається навколо своєї осі. Тому сучасні верстати із числовим програмним керуванням (далі – ЧПК) дозволяють виготовляти деталі, необхідні в різних галузях промисловості, з мінімальним залученням оператора в робочий процес.



**Рис. 3. Процес фрезерування:**

1 – оброблювана поверхня; 2 – поверхня різання; 3 – оброблена поверхня.

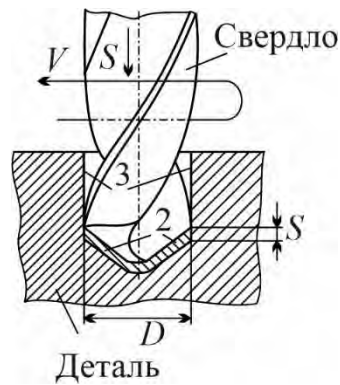
Схема фрезерування циліндричною фрезою показана на рис. 3. Під час фрезерування головним рухом є обертання фрези, рухом подачі  $S$  є поступальне переміщення оброблюваної заготовки в поздовжньому, поперечному або вертикальному напрямках. Швидкість  $V$  головного руху завжди більше швидкості руху подачі<sup>5</sup>.

Швидкість різання дорівнює окружній швидкості найбільш віддалених від осі фрези точок її зубів. Розрізняють три види подачі: хвилинна подача  $S$  (у мм/хв); подача на один оборот фрези  $S_0$  (у мм/об); подача на один зуб фрези  $S_z$  (у мм/зуб) – відносне переміщення фрези й заготовки під час повороту фрези на один кутовий крок ( $e=(360/Z) \cdot S_z$ ) характеризує інтенсивність навантаження зуба в процесі фрезерування (стійкість фрези).

Глибина різання  $t$  (мм) у процесі фрезерування – товщина шару металу, що зрізається, виміряна перпендикулярно до обробленої

<sup>5</sup> Барбашов Ф.А., Сильвестров Б.Н. Фрезерные и зуборезные работы : учебник. Москва : Высшая школа, 1983. 290 с.

поверхні. Ширина фрезерування  $B$  (мм) – ширина оброблюваної поверхні в напрямі, паралельному осі фрези. Існують дві можливі схеми фрезерування: проти подачі (зустрічна), коли в нижній точці контакту фрези з оброблюваною заготовкою вектори швидкості різання та подачі протилежні, і за подачею (попутна), коли ці вектори збігаються.



**Рис. 4. Процес свердління:**

2 – поверхня різання; 3 – оброблена поверхня,  $D$  – діаметр отвору.

Свердління проводиться обертним інструментом (свердлом) зі швидкістю  $V$ , який одночасно отримує повільне безперервне переміщення (подачу  $S$ ) уздовж своєї осі. Деталь під час свердління зазвичай нерухома (рис. 4).

Свердління застосовують для обробки глухих і наскрізних отворів циліндричних, конічних і багатограних внутрішніх поверхонь. Вони не мають високої точності, тому здебільшого є основою для подальшого механічного оброблення, наприклад, для нанесення різьби.

Застосовують два різновиди свердління (рис. 5, а, б):

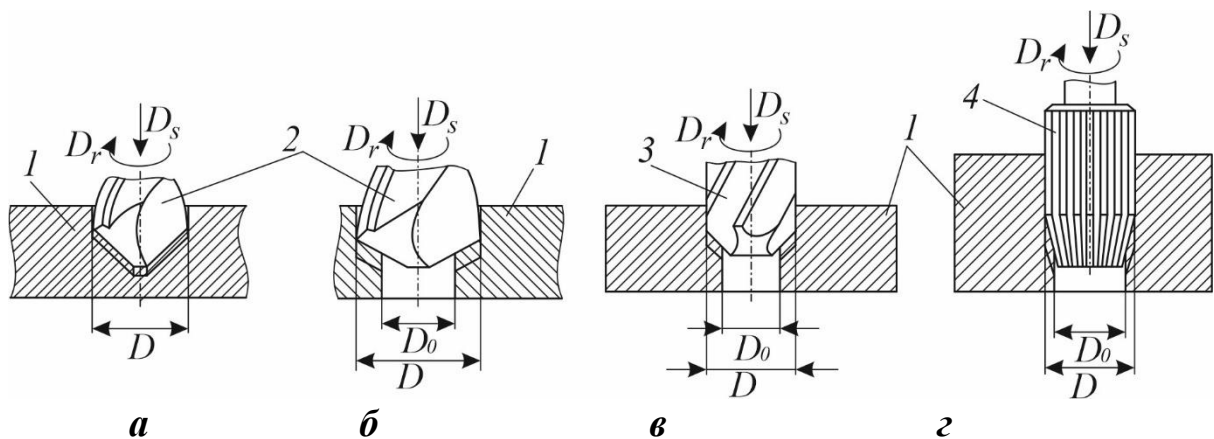
- свердління (отримання отворів у суцільному матеріалі);
- розсвердлювання (збільшення діаметра раніше просвердленого, відлитого, пробитого під час штампування, прошитого, отриманого методами електрофізичного або електрохімічного оброблення отвору).

Свердління та розсвердлювання забезпечують точність оброблення отворів по 10–11-му квалітетам та якість поверхні  $Rz$  80...20 мкм (під час оброблення отворів малого діаметра

в кольорових металах і сплавах до Ra 2,5 мкм). Для отримання більш точних отворів застосовують зенкування та розгортання<sup>6 7</sup>.

*Зенкування*, як і розсвердлювання, застосовують для збільшення діаметра раніше отриманого циліндричного отвору, а також для отримання конічних (конічними зенкерами) і плоских (торцями зенкерів під час оброблення ступінчатих отворів) поверхонь (рис. 5, в). У процесі зенкування після свердління отримують точність по 9–10-му квалітетам, якість поверхні до Ra 2,5 мкм.

*Розгортання* застосовують для остаточного (чистового) оброблення в основному циліндричних отворів, рідше – для чистового оброблення конічних і торцевих поверхонь (рис. 5, г). Точність по 6–8-му квалітетам, якість поверхні Ra 2,50...0,32 мкм.



**Рис. 5. Схеми різання заготовок на свердильних верстатах<sup>8</sup>:**

*a* – свердління; *б* – розсвердлювання; *в* – зенкування; *г* – розгортання; 1 – заготовка; 2 – свердло; 3 – зенкер; 4 – розгортка;  $D$ ,  $D_0$  – діаметри обробленої та оброблюваної поверхонь;  $D_r$  – головний рух;  $D_s$  – рух подачі.

Свердління та розсвердлювання – це грубе оброблення. Залежно від необхідної точності й величини партії оброблюваних заготовок отвори свердлять в кондукторі або за розміткою.

<sup>6</sup> Корытов М.С., Евстифеев В.В., Калачевский Б.А., Калмин Б.А., Колмаков Б.Г. Технология конструкционных материалов : учебное пособие для среднего профессионального образования / под ред. М.С. Корытова. Москва : Издательство Юрайт, 2018. 234 с.

<sup>7</sup> Покровский Б.С., Евстигнеев Н.А. Общий курс слесарного дела : учебное пособие. Москва : Академия, 2017. 80 с.

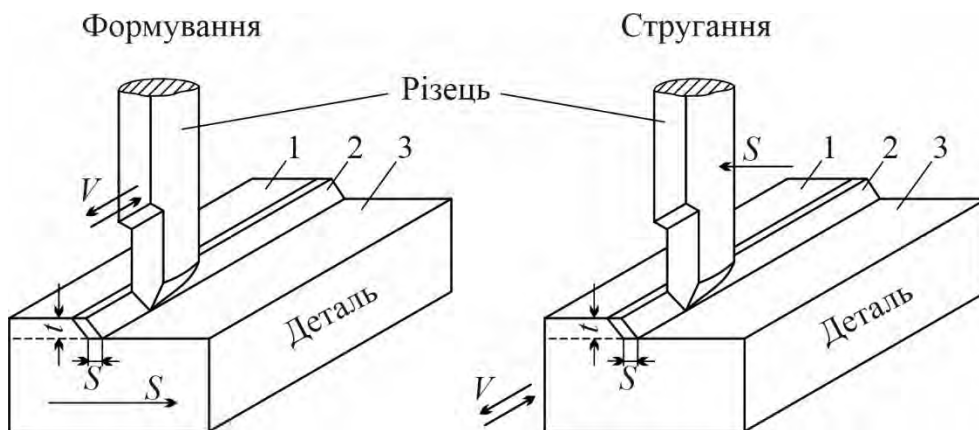
<sup>8</sup> Ящерицын П.И., Ефремов В.Д. Основы резания материалов : учебное пособие. Минск : БГАТУ, 2008. 644 с.

Діаметр отвору під розсвердлювання вибирають так, щоб поперечна ріжуча кромка в роботі участі не брала. У такому випадку осьова сила зменшується.

Зенкування належить до напівчистового виду оброблення поверхонь отворів, водночас методі знімають невеликі припуски 0,5...3 мм. Зенкер – більш жорсткий інструмент, ніж свердло, і тому він виправляє викривлення осі оброблюваного отвору після відведення свердла, підвищує точність оброблення та якість поверхні циліндричного отвору.

Розгортання – чистовий метод оброблення отворів. Під розгортання залишають невеликий припуск на сторону 0,05...0,5 мм, і тому розгортка не може виправити викривлення осі отвору, але збільшує точність діаметрального розміру та якість обробленої поверхні.

Застосовують одноразове, дворазове й триразове розгортання. Одноразове розгортання здійснюють чорною розгорткою, воно забезпечує точність по 8–9-му квалітетам; дворазове розгортання здійснюють чорним і напівчистовим розгорненнями, точність – по 7-му квалітету; триразове розгортання здійснюють чорним, напівчистовим і чистовим розгорненнями, точність – до 6-го квалітету.

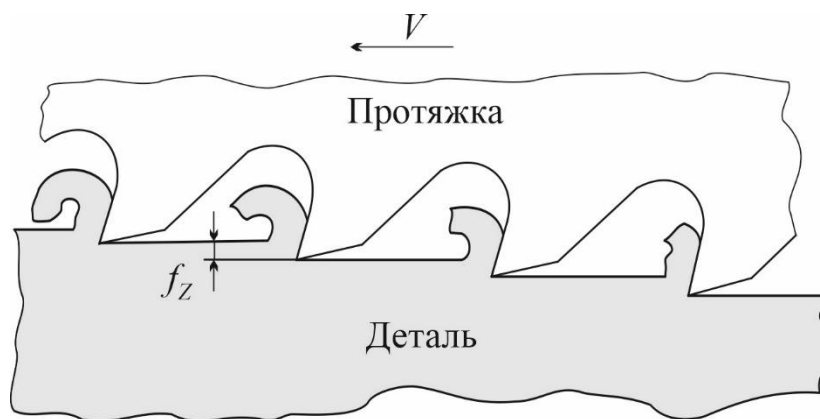


**Рис. 6. Процес стругання:**

1 – оброблювана поверхня; 2 – поверхня різання; 3 – оброблена поверхня.

Стругання та формування (шейпінг) – це два процеси оброблення, які можуть створювати плоскі поверхні в різних площинах або орієнтаціях (рис. 6)<sup>9 10</sup>.

Для передачі швидкості різання  $V$  як у процесі формування, так і в процесі стругання потрібно, щоб або ріжучий інструмент, або заготовка здійснювали зворотно-поступальний рух. Для різання матеріалу використовується прямий хід, для зворотного ходу – холостий. Таким чином, інструмент входить у контакт із заготовкою тільки за прямого ходу. Оскільки зворотний хід не впливає на різання, час ходу скорочують, даючи більше часу для прямого ходу. Для такої мети зазвичай використовується механізм швидкого повернення. Такий механізм застосовується під час формування та під час стругання, основна відмінність полягає в забезпеченні швидкості різання. У процесі формування швидкість різання забезпечується зворотно-поступальним рухом різального інструмента; під час стругання задану швидкість різання забезпечує зворотно-поступальний рух робочого столу (заготовки). Відповідно, механізм швидкого повернення з'єднаний з інструментом для операції формовки, а в процесі операції стругання – з робочим столом.



**Рис. 7. Процес протягування:**

$V$  – швидкість оброблення;  $f_z$  – глибина різання на зуб.

*Протягування* – одна з ефективних операцій оброблення матеріалів різанням (рис. 7), виконується ріжучим інструментом

<sup>9</sup> Planing vs Shaping in Manufacturing: What's the Difference? *Monroe* :web-site. 2020. URL: <https://monroeengineering.com/blog/planing-vs-shaping-in-manufacturing-whats-the-difference/>.

<sup>10</sup> Difference Between Shaping and Planing. *Machining* : web-site. 2019. URL: <http://www.difference.minaprem.com/machining/difference-between-shaping-and-planing/>.

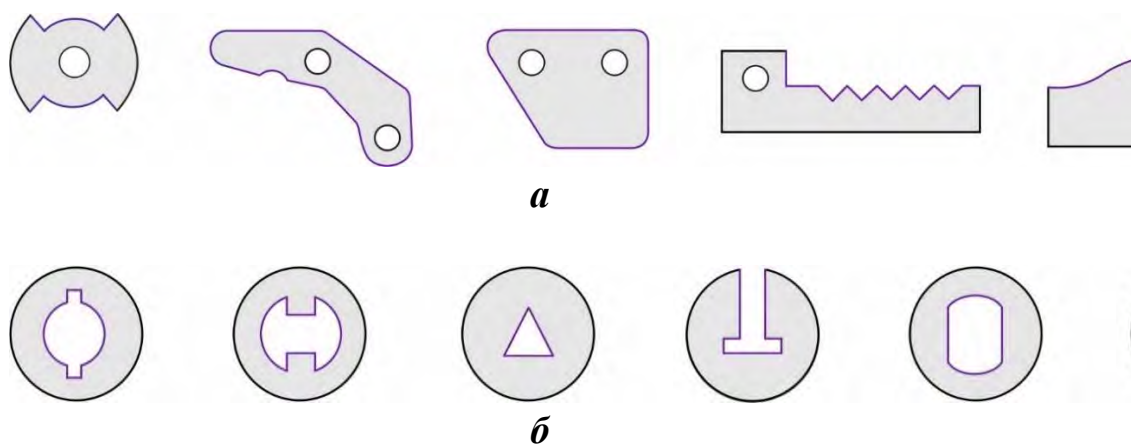


(протяжкою), який забезпечує отримання виробів високої точності (до 6 квалітету) і шорсткість обробленої поверхні до  $Ra = 0,32$  мкм.

Використовуючи протягувальні верстати й протяжку, можна обробляти внутрішні поверхні таких типів: шпонкові пази, канавки гвинтового типу, отвори круглої форми, отвори з різною кількістю граней, отвори шліцьові<sup>11</sup>.

Протягування є одним із найскладніших видів оброблення металів і сплавів. Без нього неможливо великомасштабне виробництво деталей. Здебільшого такі деталі застосовуються в авіабудуванні.

Існує два основних типи протягування: зовнішня (протяжка поверхні) і внутрішня.



**Рис. 8. Форми поверхонь, утворені протягуванням:**

*a* – зовнішня протяжка;

*б* – внутрішня протяжка; — — оброблена поверхня.

Зовнішнє протягування виконується на зовнішній поверхні заготовки для створення на поверхні певної форми поперечного перерізу (рис. 7, *a*).

Внутрішнє протягування виконується на внутрішній поверхні отвору в деталі. У деталі повинний бути початковий отвір, щоб протяжка проходила на початку ходу протягання. На рис. 8, *б* показані деякі з можливих форм, які можна отримати за внутрішнього протягування.

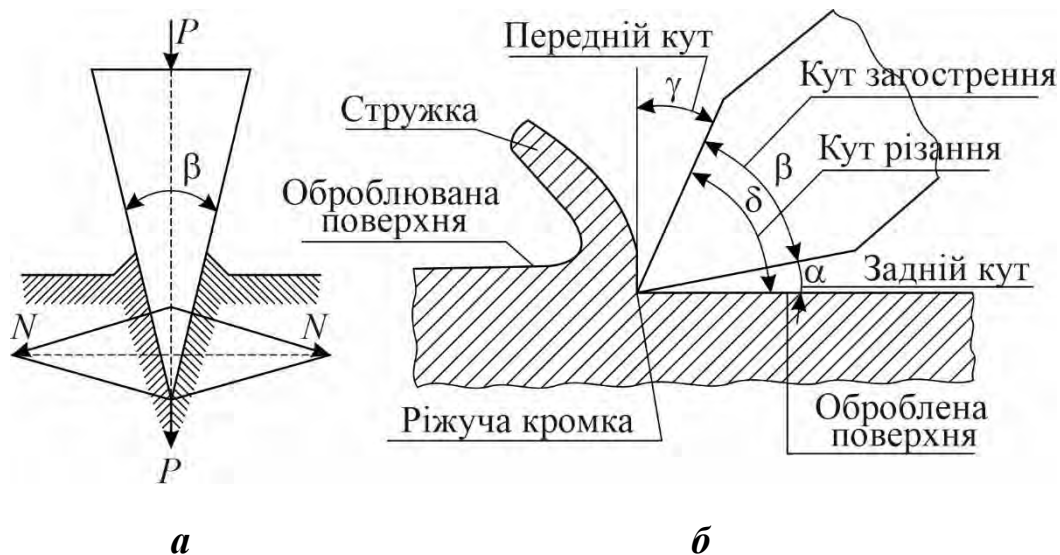
<sup>11</sup> Мерданов Ш.М., Шефер В.В. Технология машиностроения : учебник. Тюмень : ТюмГНГУ, 2013. 354 с.

*Рубка* – слюсарна операція, в результаті якої за допомогою ріжучого інструменту (зубила, крейцмейселя або канавочника), а також ударного інструменту (слюсарних молотків) із поверхні заготовки знімається зайвий шар металу або заготовка розрубється на частини (рис. 8).

Рубка металу – це економічний і гранично точний вид механічного оброблення. На виробі не залишаються ні зазубрин, ні сколів. Сучасні технології дозволяють виконати ідеально гладкий і рівний зріз навіть за великої товщини металопрокату.

Розглянемо роботу клина. Під дією сили  $P$  (рис. 9, а) на його бічних поверхнях виникають нормальні сили  $N$ , які роблять поділ металу.

Дія клиноподібного інструменту на оброблюваний метал змінюється залежно від положення осі клина й напрямку сили  $P$ . Розрізняють два основних види роботи клина<sup>12</sup>:



**Рис. 9. Процес рубки**

1) вісь клина й сила  $P$  перпендикулярні до поверхні заготовки; у такому випадку заготовка розрубється (рис. 9, а);

2) вісь клина й напрям дії сили  $P$  утворюють із поверхнею заготовки кут менше ніж  $90^\circ$ ; у такому випадку із заготовки знімається стружка (рис. 9, б).

<sup>12</sup> Покровский Б.С., Евстигнеев Н.А. Общий курс слесарного дела : учебное пособие. Москва : Академия, 2017. 80 с.

У процесі роботи клина, якщо кут менше за  $90^\circ$ , його передня поверхня стискає шар металу, що знаходиться перед нею, окремі частинки якого зміщуються стосовно один одного; коли напруга в металі перевищить міцність металу, відбувається зрушення та сколювання його частинок, унаслідок чого утворюється стружка.

У результаті тиску інструменту поверхневий шар зміцнюється – утворюється наклеп.

Рубка металу застосовується у випадках, коли за умовами виробництва верстатне оброблення складне або нераціональне. Залежно від якості деталей, які потрапили на слюсарне оброблення, і призначення операцій рубка проводиться для видалення задирок і кромек на литих і штампованих деталях, прорубування мастильних канавок, вирубки раковин, неметалічних включень та інших дефектів виливків. Операцію рубки слюсарю доводиться виконувати під час відрубання металевих заготовок від прутків, смуг, листів, у процесі виготовлення прокладок, зачистці зварювальних швів, видаленні із заготовки великих нерівностей, вирубці отворів у тонкому листовому матеріалі.

## **2. Традиційні методи механічного оброблення із застосуванням абразивів**

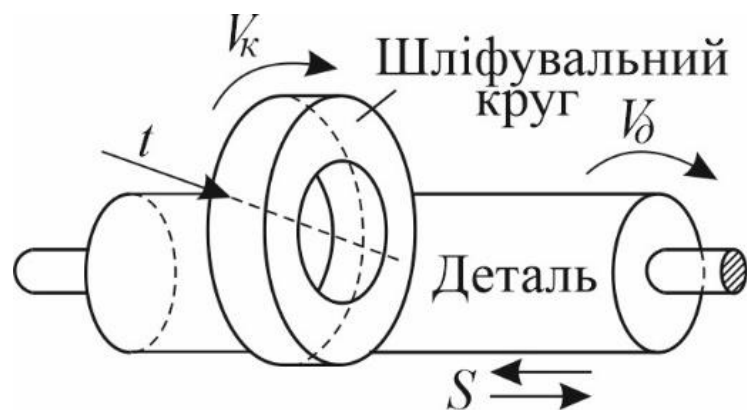
У механообробленні для остаточного оброблення різних металів і сплавів застосовують абразивні матеріали<sup>13</sup>, які використовуються в процесах шліфування, полірування, хонінгування, суперфінішування та інших.

Процес *шліфування* використовується для поліпшення обробленої поверхні й збільшення допуску шляхом видалення з поверхні залишків небажаних матеріалів<sup>14</sup>. Мається на увазі швидкісне абразивне металооброблення, в ході якого із заготовки знімається поверхневий шар металу. Воно належить до точного чистового механічного оброблення деталей. До головних особливостей шліфувальних робіт належить добра продуктивність, висока геометрична точність і клас чистоти, а також відмінна якість поверхні виробу й розмірна точність сполучення.

---

<sup>13</sup> Корьтов М.С., Евстифеев В.В., Калачевский Б.А., Калмин Б.А., Колмаков Б.Г. Технология конструкционных материалов : учебное пособие для среднего профессионального образования / под ред. М.С. Корьтова. Москва : Издательство Юрайт, 2018. 234 с.

<sup>14</sup> Ящерицын П.И., Ефремов В.Д. Основы резания материалов : учебное пособие. Минск : БГАТУ, 2008. 644 с.



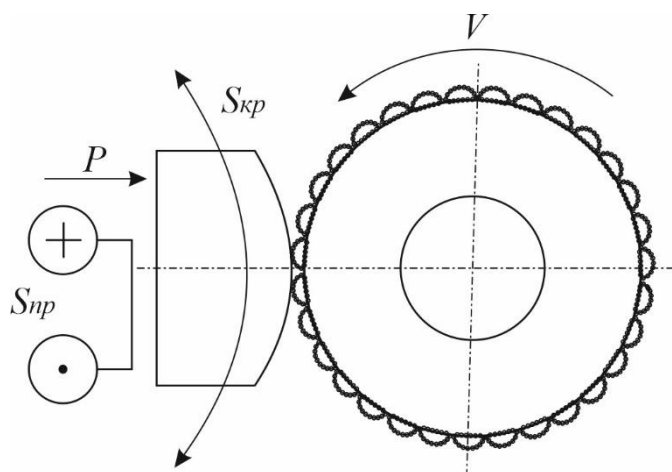
**Рис. 10. Процес шліфування**

Шліфування (рис. 10) проводиться за дуже швидкого обертання інструменту (шліфувального круга) зі швидкістю  $V_k$  і порівняно повільного обертання оброблюваної деталі зі швидкістю  $V_d$  (подачі). Прямолінійний зворотно-поступальний рух деталі уздовж своєї осі дає подовжню подачу  $S$ , а незначне, що вимірюється сотими частками міліметра, напрямлене перпендикулярно осі деталі пересування кола дає поперечну подачу й у такому випадку дорівнює глибині різання  $t$  (товщині шару, що знімається).

До деяких поверхонь виробів пред'являються високі вимоги щодо гладкості й чистоти, тому вдаються до *полірування*.

Характерною ознакою добре відполірованої поверхні служить її дзеркальний вигляд і відсутність помітних рисок. Відполірована поверхня володіє більшою стійкістю за умови механічного зносу й хімічного впливу різних компонентів пресованих матеріалів. Процес полірування може здійснюватися або на верстатах, або вручну із застосуванням електро- або пневмоінструментів. Використовують полірувальні пасти або абразивні зерна, змішані з мастильним матеріалом. Такі матеріали наносять на еластичні кола (фетрові), що швидко обертаються, або на хиткі щітки. Добрі результати дає полірування швидкорухомими абразивними стрічками (шкірками). Перед поліруванням поверхню шліфують пружними колами й стрічками, на які наклеюються тверді, абразивнодоводочні матеріали.

Під час полірування одночасно протікають такі процеси: тонке різання; пластичне деформування поверхневого шару; хімічні реакції (вплив на метал хімічно активних речовин).



**Рис. 11. Процес полірування**

Для процесу характерні високі швидкості  $V$ , до 50 м/сек. Заготовка підтискається до кола силою  $P$  і робить рухи подачі  $S_{кр}$  і  $S_{пр}$  відповідно до профілю оброблюваної поверхні (рис. 11).

Ефективно довести поверхню деталей із металу до ідеального стану можна за допомогою технологічної операції *притирання*. До деталей, що утворюють герметичні або щільно рухомі з'єднання, особливі вимоги шорсткості, тому поверхня піддається такій процедурі<sup>15</sup>.

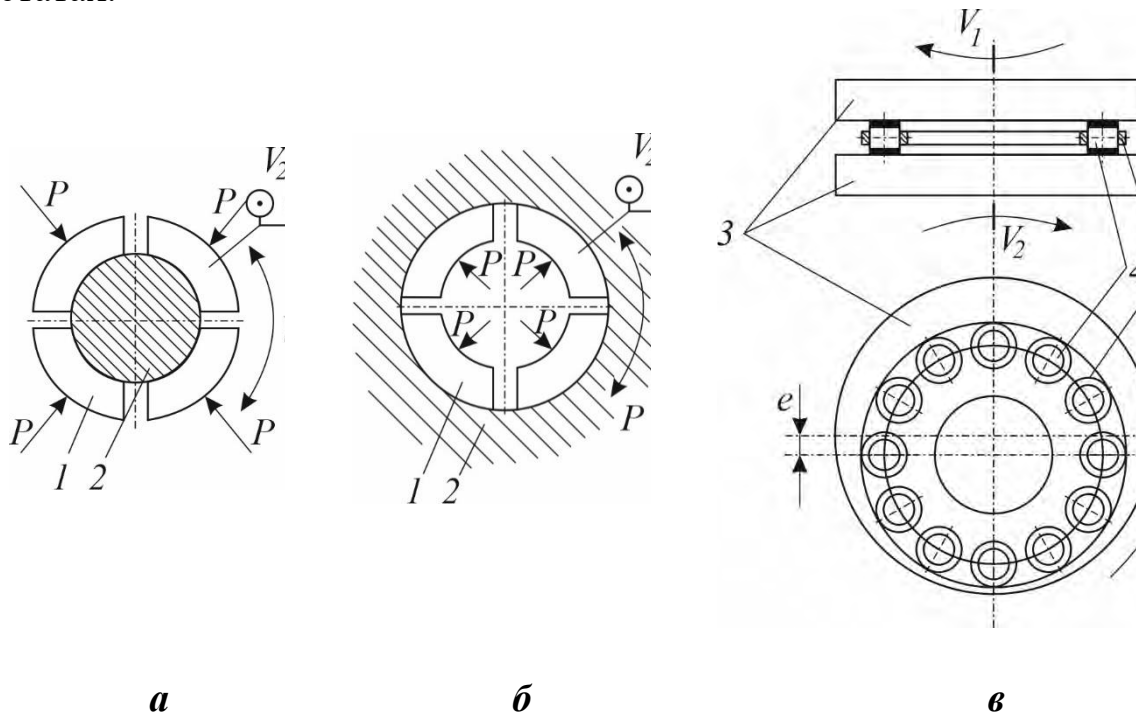
Притирання передбачає зняття з оброблюваної деталі тонкого шару металу, для чого використовуються не тільки інструменти, але й дрібнодисперсні абразивні порошки або пасти. Абразивний матеріал, за допомогою якого виконується таке оброблення, може наноситися як на поверхню деталі, так і на спеціальне пристосування, яке називається притир.

Притирання, виконане з повільною швидкістю та за допомогою постійно змінних напрямів руху, дозволяє не тільки зменшити шорсткість поверхні до необхідної величини, але й значно поліпшити її фізико-механічні характеристики.

Схема притирання зовнішньої циліндричної поверхні приведена на рис. 12, а. Притир 1 являє собою втулку з прорізами, необхідними для повного його прилягання під дією сил  $P$  до оброблюваної заготовки 2 за мірою її оброблення. Притиру придають зворотно-поступальний рух  $V_2$  і одночасно зворотно-обертальний рух  $V_1$ . Аналогічні рухи здійснюються в процесі притирання отворів

<sup>15</sup> Корытов М.С., Евстифеев В.В., Калачевский Б.А., Калмин Б.А., Колмаков Б.Г. Технология конструкционных материалов : учебное пособие для среднего профессионального образования / под ред. М.С. Корытова. Москва : Издательство Юрайт, 2018. 234 с.

(рис. 12, б), однак притир повинен рівномірно розтискатися дією сил  $P$ . Наведені схеми здійснюються вручну й на металорізальних верстатах.



**Рис. 12. Процес притирання**

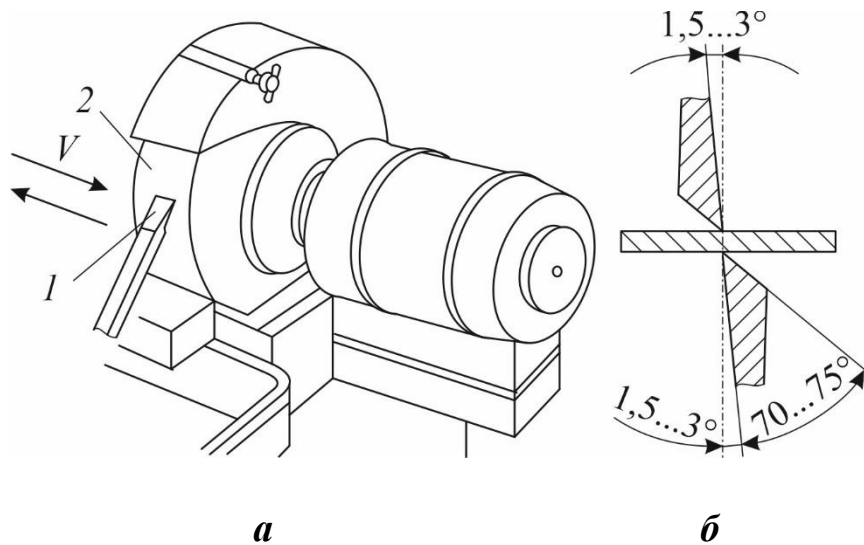
Плоскі поверхні притирають також вручну або на спеціальних доводочних верстатах (рис. 12, в). Заготовки 4 розташовуються між двома чавунними дисками 3 у вікнах сепаратора 5. Диски-притири мають плоскі торцеві поверхні й обертаються в протилежних напрямках із різними частотами обертання. Сепаратор щодо дисків розташований ексцентрично на величину  $e$ . Тому під час обертання дисків деталі роблять складні рухи з ковзанням, і метал знімається одночасно з їх паралельних торців.

Для ефективної роботи необхідно мати інструменти з гострою ріжучою кромкою. Кут скоса гострої кромки інструменту завершується рівною вершиною. Після відповідного періоду використання вершина стає округлою, і кромка втрачає гостроту. Тому періодично ріжучий інструмент (пилки, стамески, сокири, долота, свердла, мітчики й інші) вимагає *заточування*. Спосіб заточування залежить від призначення інструменту, способу й режиму різання, виду оброблюваного матеріалу й необхідної чистоти оброблення<sup>16</sup>.

<sup>16</sup> Покровский Б.С., Евстигнеев Н.А. Общий курс слесарного дела : учебное пособие. Москва : Академия, 2017. 80 с.

Зазвичай заточка ріжучого інструменту виконується у два прийоми: заточка (первинна точка), коли ріжучій кромці (лезу) інструменту надається потрібна форма й забезпечується необхідний кут заточування (загострення); правка (доведення, шліфування), у процесі якої з ріжучої кромки усувають утворені в процесі заточуванні задирки.

Заточка може здійснюватися вручну (напилком, на нерухомих брусках, шкіркою) або механічно на жорні (обертювими наждаковими або точильними й шліфувальними кругами).



**Рис. 13. Процес заточування:**

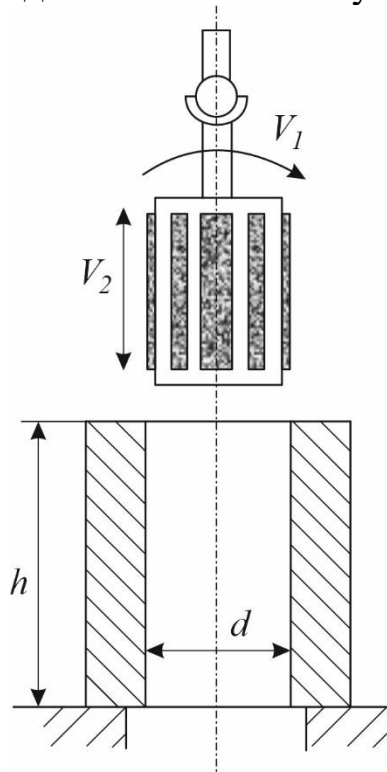
*a* – схема заточування; *б* – кути заточування.

Основна умова в процесі заточення інструмента – це збереження необхідного кута. Приклад заточування ножиць на заточному верстаті ИЭ-9703В показано на рис. 13. Деталь 1 ведуть по шліфувальному кругу 2 повільно, рівномірно й з однаковим зусиллям проводять зліва направо. Щоб заточувана деталь не перегрівалася, її періодично опускають у воду.

*Хонінгуванням* називається шліфування внутрішніх циліндричних поверхонь. Якісно виконане хонінгування дозволяє отримувати практично дзеркальні поверхні.

Полірування хонінгуванням здійснюється за допомогою спеціальних шліфувальних головок (хонів). Це пристрій, що складається з металевої підставки, на якій закріплені абразивні камені у формі брусків. У хонах зазвичай використовуються алмазні абразиви, які забезпечують високу якість полірування.

У процесі полірування хон обертається та паралельно здійснює зворотно-поступальні рухи з невеликою амплітудою. Таким чином можна домогтися не тільки дзеркального блиску оброблюваної поверхні, але й точної циліндричності (відхилення не більше 5 мкм). Для забезпечення високого ступеня чистоти поверхні в зону шліфування постійно подається масляна емульсія<sup>1718</sup>.



**Рис. 14. Процес хонінгування**

Бруски здійснюють обертальний  $V_1$  та одночасно зворотно-поступальний  $V_2$  рухи вздовж осі оброблюваного циліндричного отвору заввишки  $h$  (рис. 14). Оброблення ведеться на спеціальних хонінгувальних верстатах із механічним або гідравлічним приводом.

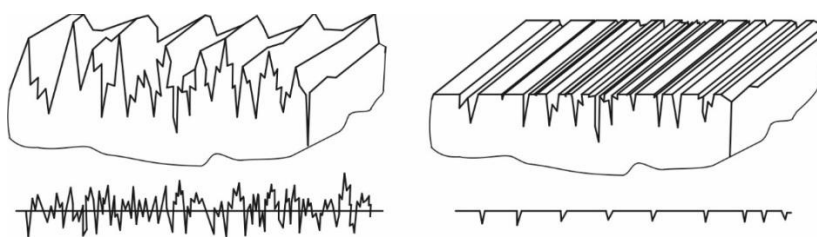
*Суперфініш* – тонке оброблення шліфованих поверхонь металевих виробів дрібнозернистими абразивними брусками або стрічками<sup>19</sup>. Сутність процесу полягає в мікрорізанні поверхні металу одночасно великою кількістю дрібних абразивних зерен за допомогою абразивних брусків або стрічок (рис. 15).

<sup>17</sup> Мерданов Ш.М., Шефер В.В. Технология машиностроения : учебник. Тюмень : ТюмГНГУ, 2013. 354 с.

<sup>18</sup> Ящерицын П.И., Ефремов В.Д. Основы резания материалов : учебное пособие. Минск : БГАТУ, 2008. 644 с.

<sup>19</sup> What Is Superfinishing in Metalworking? *Monroe* : web-site. 2020. URL: <https://monroengineering.com/blog/what-is-superfinishing-in-metalworking/>.





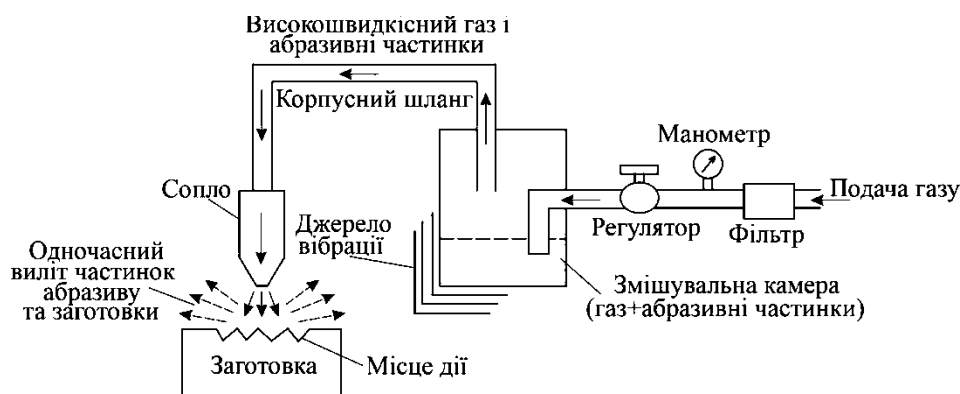
**Рис. 15. Поверхня до й після суперфінішування**

Суперфініш може застосовуватися в аерокосмічних деталях, таких як деталі турбін і шасі, де потрібно точно видалити невелику кількість матеріалу порядку 0,002–0,005 мм від діаметра.

Суперфініш забезпечує високу чистоту поверхні, видалення дефектного поверхневого шару металу, що утворився під час попередніх операцій оброблення, підвищує зносостійкості, але цей метод не усуває повністю похибки форми (хвилястість, конусність, овальність).

### **3. Нетрадиційні методи механічного оброблення із застосуванням абразивів**

*Абразивноструминне оброблення* – це процес потрапляння високошвидкісного потоку абразивних частинок за допомогою газу або повітря під високим тиском на робочу поверхню через сопло<sup>20</sup>. Видалення металу відбувається через ерозію, викликану високошвидкісними абразивними частинками. Повторювані удари відшаровують невеликі шматочки матеріалу, які видаляються струменем, відкриваючи поверхню для абразивних частинок (рис. 16).



**Рис. 16. Схема абразивноструминного оброблення<sup>21</sup>**

<sup>20</sup> Nottath Ramachandran. A review of abrasive jet machining. *Journal of Materials Processing Technology*. 1993. V. 39. P. 21–31. URL: [https://doi.org/10.1016/0924-0136\(93\)90005-Q](https://doi.org/10.1016/0924-0136(93)90005-Q).

<sup>21</sup> Ruslan Melentiev, Fengzhou Fang. Recent advances and challenges of abrasive jet machining. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2018. V. 22. P. 1–20. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2018.06.001>.

Відфільтрований газ під тиском від 2 до 8 кгс/см<sup>2</sup> подається в змішувальну камеру, яка містить абразивний порошок. Камера вібрує з частотою 50 Гц і змішує його з абразивними частинками, потім суміш потрапляє в з'єднувальний шланг. Абразив із газом виходить із сопла з високою швидкістю в діапазоні від 150 до 300 м/хв і вдаряється об робочу поверхню, викликаючи абразивну дію під час повторюваних ударів. Шляхом ерозії видаляється матеріал.

Швидкість знімання матеріалу залежить від діаметра сопла, тиску струменя, складу сумішей, твердості абразивних частинок і заготовки, розміру часток, швидкості струменя та відстані між заготовкою та соплом.

Вид оброблення містить різновиди: піскоструминне, дробоструминне й рідинно-абразивне. Таке механічне оброблення досить широко використовуване, оскільки є одним із найефективніших способів підготовки поверхні для всіх видів покриттів, які не вимагають полірування поверхні.

Крім швидкості та якості очищення деталі струминне оброблення створює поверхневий зміцнюючий наклеп, який позитивно впливає на механічні властивості деталі. Після оброблення з поверхні зникають дефекти, які негативно впливають на корозійну стійкість деталі з покриттям, на якість осаджуваних покриттів і на їх декоративний вигляд.

Також відоме *водоструминне оброблення* – промисловий інструмент, який створює струмінь води, здатний різати матеріали з використанням струменів надзвичайно високого тиску води<sup>22</sup>.

Різниця між абразивноструминним і водоструминним обробленням в тому, що абразивноструминне використовує суміш води й абразивних речовин для різання твердих матеріалів, таких як метал або граніт, а водоструминне використовує тільки чисту воду. І застосовується для більш м'яких матеріалів, таких як гума<sup>23</sup>.

Тонкі струмені води високого тиску (200–400 МПа) отримуються за допомогою насоса-підсилювача, а вода надвисокого тиску пропускається через маленький отвір (0,15–0,4 мм). На виході із сопла струмінь води досягає великої кінетичної енергії та високої швидкості (900–1000 м/с), вдаряючи по заготовці, кінетична енергія перетворюється в енергію тиску, оброблюючи матеріал.

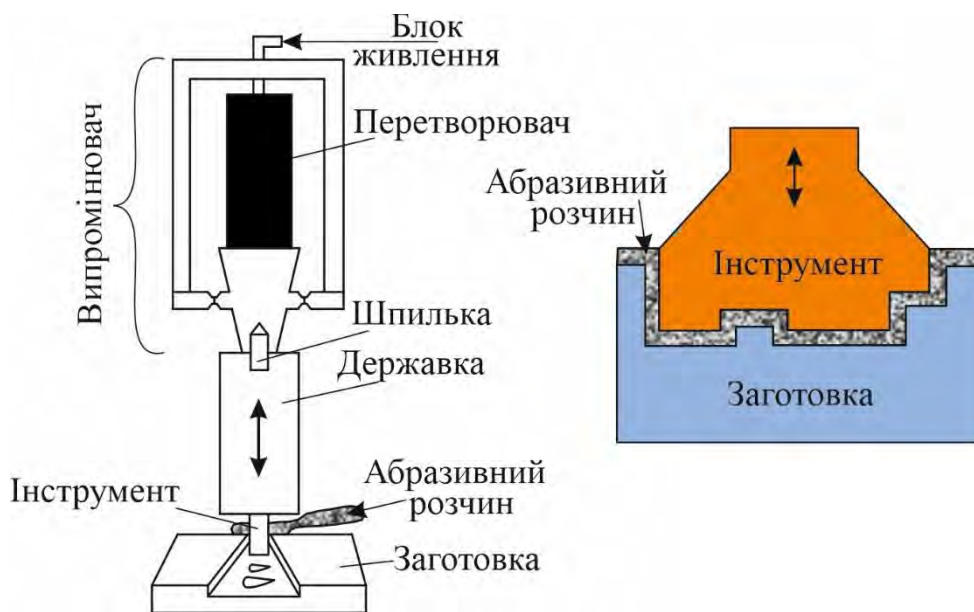
---

<sup>22</sup> Water Jet Machining – Working Principle, Advantages and Disadvantages with Application. *Mechanical Booster* : web-site. 2017. URL: <https://www.mechanicalbooster.com/2017/05/water-jet-machining.html>.

<sup>23</sup> Difference Between AJM and WJM – Abrasive Jet & Water Jet Machining. *Minaprem* : web-site. 2019. URL: <http://www.difference.minaprem.com/ntm/difference-between-ajm-and-wjm-abrasive-jet-and-water-jet-machining/>.

Ультразвукове оброблення (ударне шліфування) – це абразивний процес, за якого матеріал видаляється з поверхні деталі шляхом високочастотних коливань інструменту з низькою амплітудою щодо поверхні матеріалу за умови наявності дрібних абразивних частинок<sup>24</sup>. Цей процес має низьку швидкість знімання матеріалу. Процес містить наявність абразивної суспензії, яка проходить між інструментом і заготовкою. Завдяки цьому інструмент і заготовка ніколи не взаємодіють один з одним.

Інструмент виготовлений із більш м'якого матеріалу в порівнянні із заготовкою. Зазвичай із таких матеріалів, як м'яка сталь і нікель. Коли інструмент починає вібрувати (рис. 17), додається абразивна суспензія (рідина), яка містить абразивні зерна й частинки. Абразивна суспензія додається до тих пір, поки деталь не почне взаємодіяти із зерном. Стирання поверхні заготовки відбувається через додавання робочих частинок у рідину, в процесі оброблення інструмент поступово деформується.



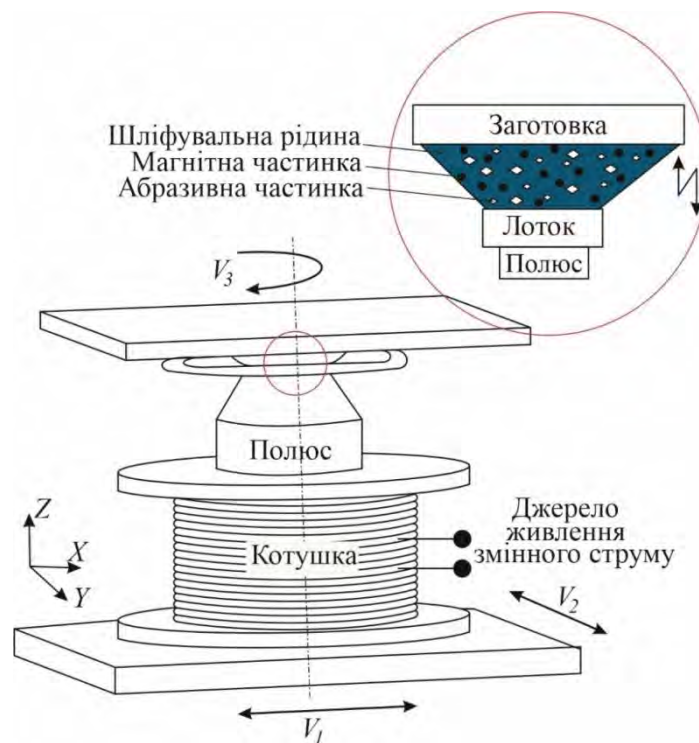
**Рис. 17. Схема ультразвукового оброблення**

Таким методом можна обробляти всі види твердих матеріалів, отримувати гарні результати, виробляти менше тепла, а також застосувати для різних форм вирізів отворів через вібраційний рух інструменту. Однак із недоліків метод вимагає високого рівня навичок і кваліфікації, а надмірно великий розмір зерна викликає дефекти.

<sup>24</sup> Ultrasonic Machining Process, Working Principles & Advantages. *Engineering Articles* : web-site. 2015. URL: <https://www.engineeringarticles.org/ultrasonic-machining-process-working-principles-advantages/>.

Магнітно-абразивне оброблення – це процес, в якому суміш неферомагнітних абразивних і феромагнітних частинок заліза збуджується за допомогою магнітного поля (рис. 18). Заготовка утримується між двома полюсами магніту<sup>25</sup>. Робочий зазор між заготовкою та магнітом заповнений магнітно-абразивними частинками. Вони можуть бути як склеєні, так і не пов’язані. Магнітні абразивні частинки з’єднуються один з одним уздовж ліній магнітної сили й утворюють гнучку магнітно-абразивну щітку. Через дії магнітного поля в робочому зазорі ця щітка поводить себе як багатоточковий ріжучий інструмент для чистової операції.

Процес магнітно-абразивного оброблення використовується для оздоблення, а також для удосконалення зовнішнього шару твердих поверхонь матеріалів, таких як латунь, нержавіюча сталь. Оброблення успішно використовується для обробки внутрішніх, а також зовнішніх поверхонь складної конструкції.



**Рис. 18. Схема магнітно-абразивного оброблення**

Під час оброблення магнітним абразивом на процес впливають матеріал, форма й розмір заготовки, відстань між робочими полюсами й склад магнітних абразивів. Магнітно-абразивне оброблення

<sup>25</sup> Jayswal S.C., Jain V.K., Dixit P.M. Magnetic Abrasive Finishing Process – a Parametric Analysis. *Journal of Advanced Manufacturing Systems*. 2005. V. 04. No. 02. P. 131–150. URL: <https://doi.org/10.1142/S0219686705000655>.

покращує трибологічні властивості, зменшує тертя на поверхні інструменту й приводить до збільшення його терміну служби. Крім того, процес проходить із мінімальним видаленням матеріалу й незначними змінами в геометрії деталі.

#### **4. Нетрадиційні методи механічного оброблення шляхом ерозії металу**

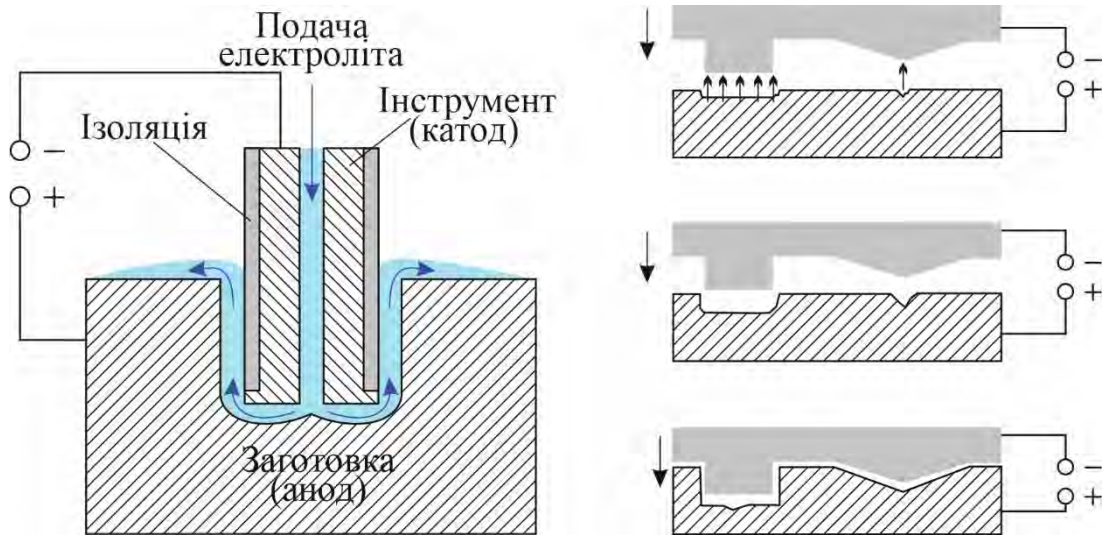
Ерозія – це руйнування верхнього шару металу, яке в основному характеризується як регресивний процес, тому попереджається багатьма методами захисту. Однак властивість поверхонь матеріалів до руйнування технологи зуміли повернути собі на користь і широко застосовувати в промисловості.

*Електрохімічне оброблення* – фізико-хімічний процес, заснований на високошвидкісному анодному розчиненні металів і сплавів під дією струму електролізу високої щільності в середовищі проточного електроліту на малих міжелектродних зазорах. Маса вилученого із заготовки матеріалу пропорційна силі струму й часу оброблення<sup>26</sup>.

Для здійснення процесу електрохімічного оброблення два металеві електроди (інструмент і заготовка), в просторі між якими знаходиться електроліт, підключають до протилежних полюсів джерела технологічного струму (рис. 19). Негативний полюс джерела, приєднаний до електрода-інструмента (катода), зміщує його потенціал в негативну сторону внаслідок збільшення концентрації електронів. Позитивний полюс відбирає електрони від підключеного до нього електрода-заготовки (анода), що зміщує його потенціал у позитивну сторону. Таке відхилення потенціалів електродів від рівноважних значень викликає протікання електродних процесів: на катоді починається відновлення катіонів, на аноді – окислення металу.

---

<sup>26</sup> Полянчиков Ю.Н., Схиртладзе А.Г., Воронцова А.Н., Полянчикова М.Ю., Крайнев Д.В., Сидякин Ю.И., Егоров Н.И. Электрохимические и электрофизические методы обработки в современном машиностроении : учебное пособие (гриф). Старый Оскол : ТНТ, 2018. 226 с.



**Рис. 19. Схема електрохімічного оброблення**

Параметри процесу й термін служби інструмента не залежать від твердості заготовки, тому електрохімічне оброблення часто використовується для обробки твердих матеріалів (наприклад, лопатки турбін).

Також метод застосовують для створення складних отворів і порожнин, які неможливо отримати традиційним обробленням.

Електрохімічне оброблення не викликає поверхневих напружень у заготовці, тому його можна застосувати навіть для дуже крихких і легко деформованих матеріалів із тонкими стінками.

*Електроерозійне оброблення* – це технологія, яка дозволяє руйнувати поверхню металевих виробів за допомогою електричних розрядів. Явище електричної ерозії засноване на руйнуванні електродів під дією електричного струму, що пропускається через електроди. До заготовки й електроду підключається джерело постійного струму, яке генерує короткочасні імпульси, що проходять через електроди. Електрика в активній зоні створює електричну дугу, яка легко пропалює металеву поверхню. Дуга живе невеликий період, тому вона не деформує метал, не залишає слідів, зберігає цілісність електрода<sup>27</sup>.

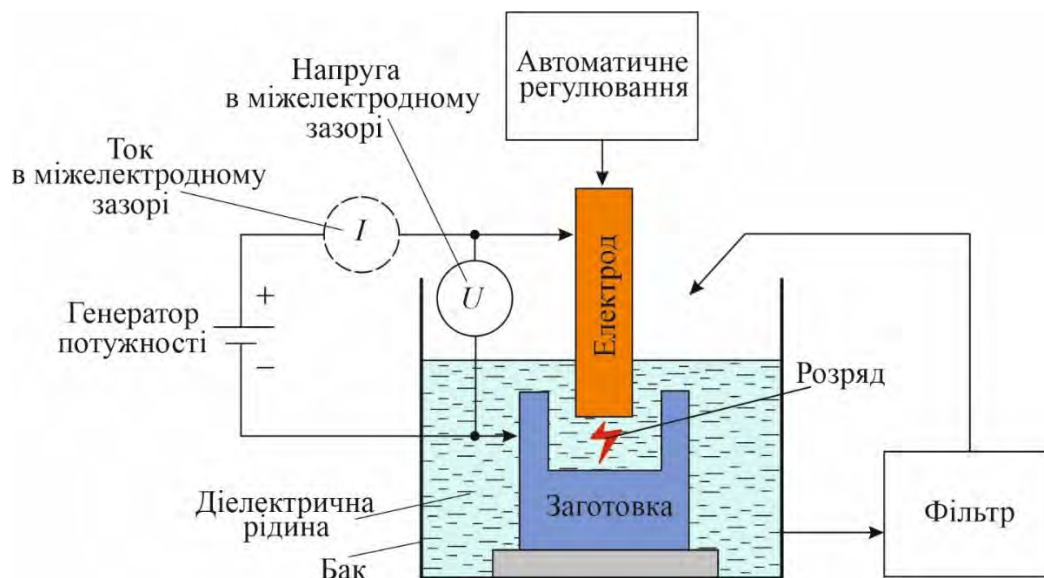
Під впливом високих температур у зоні розряду відбуваються нагрів, розплавлення та часткове випаровування металу. Процес електроерозійного оброблення відбувається в робочій рідині, яка є

<sup>27</sup> Andromeda Trias, Yahya Azli, Khamis Nor, Khalil Kamal, Erawan Ade. Predicting Material Removal Rate of Electrical Discharge Machining (EDM) using Artificial Neural Network for High Igap current. *International Conference on Electrical, Control and Computer Engineering*. 2011. URL: <https://doi.org/10.1109/INECCE.2011.5953887>.

діелектриком, оброблюваний матеріал та електрод повинні бути електропровідниками. Рідина заповнює простір між електродами (електрод-заготовка й електрод-інструмент). Під дією сил, що виникають у каналі розряду, рідкий і пароподібний матеріал викидається із зони розряду в робочу рідину, що оточує його, і застигає в ній з утворенням окремих частинок.

Процес електроерозії можна використовувати у двох основних напрямках<sup>28</sup>:

1. Електрод (інструмент) із заздалегідь підготовленою формою, зазвичай зроблений із графіту або міді, має форму отвору, який він повинен відтворити. Підготовлений електрод подають вертикально вниз, і електрод зворотної форми еродує (пропалюється) у вигляді отвору у твердій заготовці (рис. 20).

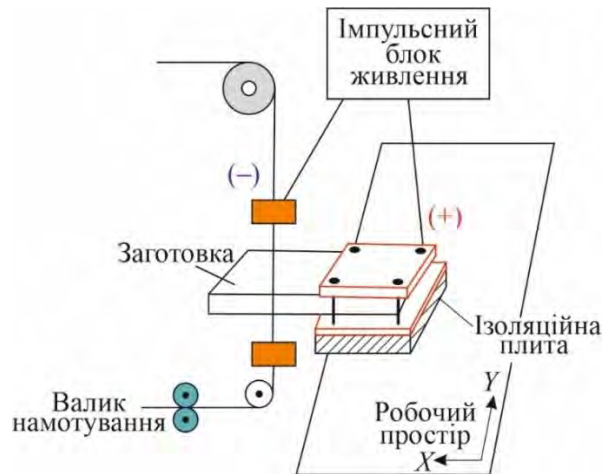


**Рис. 20. Схема електроерозійного оброблення<sup>29</sup>**

2. Електрод, що безперервно переміщається, має вигляд вертикального дроту з невеликим діаметром. Керування здійснюється комп'ютером, щоб слідувати запрограмованій траєкторії для розмивання або прорізання вузької щілини в заготовці для отримання заданої форми (рис. 21).

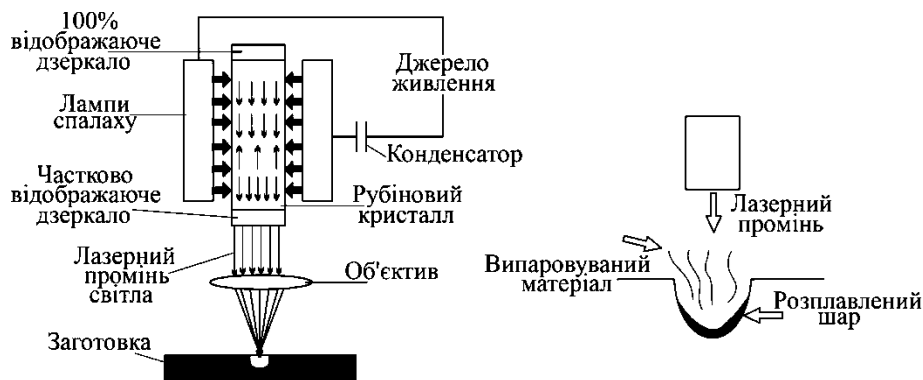
<sup>28</sup> Ставицкий Б.И. Из истории электроискровой обработки материалов. *Оборудование и инструмент для профессионалов*. Металлообработка, 2006. URL: <https://martensit.ru/rezka-i-shlifovanie/elektroerozionnaya-obrabotka/>.

<sup>29</sup> Ade Erawan Minhat, Khamis N., Yahya A., Andromeda T., Kartiko Nugroho less. Pulses Model of Electrical Discharge Machining (EDM). *Engineering*. 2014. URL: <https://doi.org/10.11591/EECSI.1.414>.



**Рис. 21. Схема вирізання дротом у процесі електроерозійного оброблення<sup>30</sup>**

Лазерне оброблення або оброблення лазерним променем – це метод оброблення металевих і неметалевих матеріалів, за якого операція виконується за допомогою лазерного випромінювання. У процесі використовується тепла енергія для видалення матеріалу з металевої поверхні. Лазерний промінь має максимальну температуру на поверхні заготовки, змушуючи її плавитися (рис. 22). Тепло, що генерується на поверхні, нагріває, плавить і випаровує матеріал шляхом посилення світла. Стимульоване випромінювання зветься лазером<sup>31</sup>.



**Рис. 22. Схема лазерного оброблення**

<sup>30</sup> Harsimran Singh, Harmesh Kumar. Review on Wire Electrical Discharge Machining (WEDM) of Aluminum Matrix Composites. 2015. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/REVIEW-ON-WIRE-ELECTRICAL-DISCHARGE-MACHINING-OF-Singh-Kumar/68d268c7952acaf03870fe035b1dda1b76b64ca7>.

<sup>31</sup> Bijoy Bhattacharyya, Biswanath Doloi. Hybrid machining technology. *Modern Machining Technology*. Advanced, Hybrid, Micro Machining and Super Finishing Technology. 2020. P. 461–591. URL: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812894-7.00006-2>.



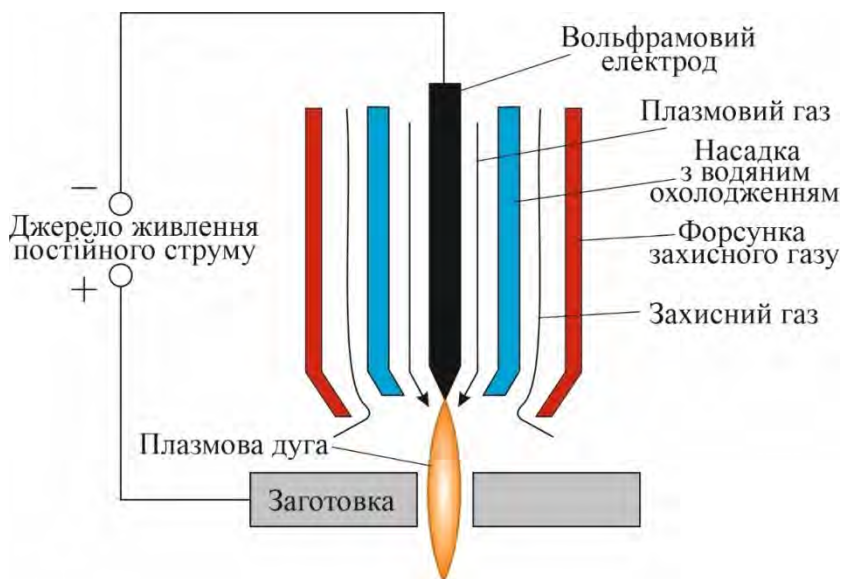
Знос під час процесу низький, оскільки відсутній фізичний контакт між обладнанням і заготовкою.

Оброблення лазерним променем дозволяє різати або гравірувати практично всі типи матеріалів, але частіше застосовується для матеріалів із низькою провідністю. Може бути орієнтований на дуже маленькі діаметри, водночас робить дуже точно розміщені отвори, що дозволяє створювати виріб високої точності.

*Плазмове оброблення* використовується для видалення матеріалу із заготовки. У процесі використовується високошвидкісний струмінь високотемпературного газу для плавлення та видалення матеріалу з деталі. Цей потік гарячого високошвидкісного газу також відомий як плазмовий струмінь<sup>32</sup>.

Газ або повітря нагріваються за допомогою дуги, а плазма, що утворюється під час нагрівання газу, використовується для оброблення. Таким чином, процес ще називається плазмово-дуговим обробленням.

Газ вибирається залежно від металу, який використовується як заготовка. Плазмово-дугове оброблення застосовується для різання легированих сталей, нержавіючої сталі, алюмінію, нікелю, міді й чавуну.



**Рис. 23. Схема плазмового оброблення**

На рис. 23 показано принцип дії плазмового різачка. Між катодом (електродами) і анодом (соплом), що підключені до джерела живлення

<sup>32</sup> Rashid. Plasma Arc Machining – Working Principle, Construction, Working, Advantages and Disadvantages. *Mechanical Walkins*. 2020. URL: <http://www.mechanicalwalkins.com/plasma-arc-machining-working-principle-construction-working-advantages-and-disadvantages/>.

постійного струму, виникає потужна дуга. Після цього в камери подається газ. Він може бути сумішшю водню, азоту, аргону або газів, обраних залежно від оброблюваного металу.

Використовуваний у процесі газ нагрівається за допомогою дуги, що виникає між катодом та анодом. Цей газ нагрівається до температур від 11 000 °С до 28 000 °С. У процесі з'єднання дуги з газом відбувається зіткнення між електронами дуги й молекулами газу, що приводить до поділу молекул газу на різні атоми.

Через високі температури електрони деяких атомів будуть витіснені, атоми іонізуються (заряджаються), газ перетворюється в плазму. Коли газ іонізується, виділяється велика кількість теплової енергії. Високотемпературний іонізований газ із великою швидкістю спрямовується до заготовки й виконує процес «різання». Струмінь плазми наближається до заготовки, плазма плавить її, а високошвидкісний газ видуває розплавлений метал.

## 5. Застосування верстатів із ЧПК

Верстати із ЧПК (числовим програмним керуванням) – це автоматизовані верстати-роботи, які можуть проводити операції за заданою програмою без безпосередньої участі людини. Такі верстати є важливою частиною сучасної автоматизації, застосування якої необхідне для збереження рентабельності й отримання прибутку підприємствами, тому що є важливою умовою забезпечення якості й швидкості виробництва.

Верстати із ЧПК зазвичай поділяються за способами оброблення матеріалу<sup>33</sup>:

- свердлильні пристрої: працюють шляхом обертання та переміщення свердла навколо й у контакті з блоком вихідного матеріалу;
- токарні верстати: на противагу свердлильним пристроям, токарні верстати обертають блок сировинного матеріалу проти головки бура;
- фрезерні верстати: передбачають використання обертових ріжучих інструментів для видалення матеріалу із заготовки;
- електричне й хімічне оброблення. Існує ряд нових технологій, в яких використовуються спеціальні методи різання матеріалу. Прикладами є електронно-променево оброблення, електрохімічне

---

<sup>33</sup> Basicmech. Functions of CNC Milling Machine Parts and Components Explained. *Mechanical Engineering*. 2020. URL: <https://basicmechanicalengineering.com/cnc-milling-machines-parts-and-components-explained/>.

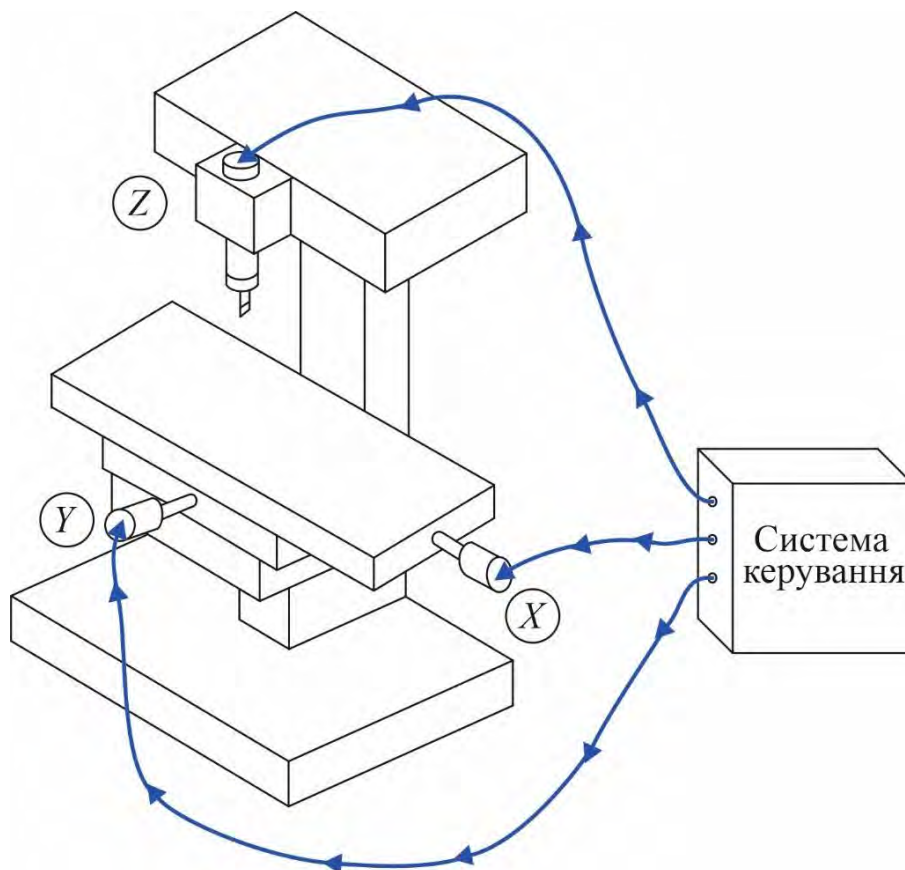
оброблення, електроерозійне оброблення, фотохімічне оброблення та ультразвукове оброблення;

– інші ріжучі інструменти. Існує ряд сучасних технологій, в яких для оброблення заготовки використовуються різні матеріали. Приклади містять верстати для лазерного різання, машини для кисневого різання, верстати для плазмового різання та машини водоструминного різання.

Верстати із числовим програмним керуванням можуть працювати практично з будь-якою сировиною: алюміній, латунь, мідь, сталь, титан, дерево, скловолокно, пластмаси, поліпропілен.

ЧПК-верстати можна класифікувати за системою керування:

1. З розімкненою системою. Запрограмовані інструкції подаються в блок керування через пристрій введення даних. Потім блок керування перетворює ці інструкції в електричні імпульси (сигнали) і відправляє їх у сервопідсилювач для пуску сервомоторів (рис. 24).

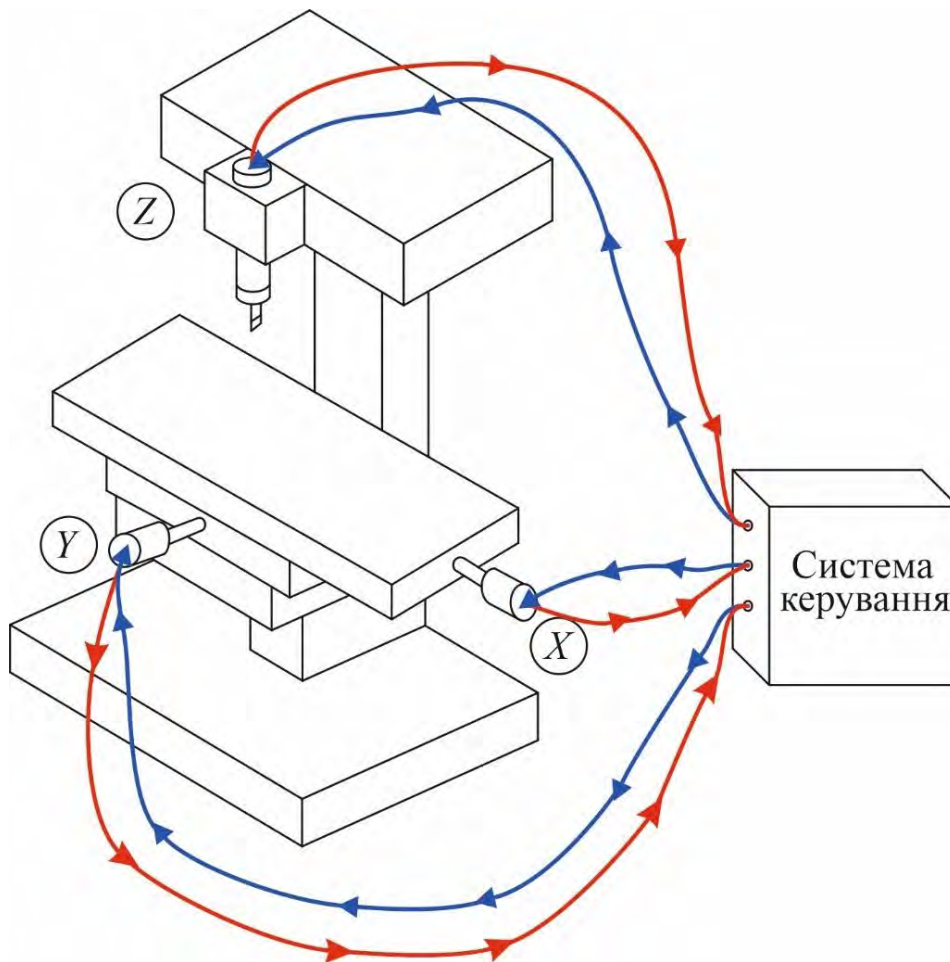


**Рис. 24. Схема розімкненої системи керування**

Основним недоліком ЧПК-верстатів із розімкненою системою керування є відсутність системи зворотного зв'язку, яка б перевіряла точність і швидкість ріжучого інструменту. Якщо продуктивність

системи залежить від навантаження, температури, вологості або мастила, то фактична потужність може відрізнятись від необхідної. Із цих причин розімкнена система керування зазвичай використовується в точкових ЧПК-верстатах, де вимоги до точності не критичні.

2. Із замкнутою системою. ЧПК-верстати із замкнутим контуром оснащені системою зворотного зв'язку для контролю фактичної продуктивності й виправлення розбіжностей із запрограмованими даними (рис. 25). Система зворотного зв'язку може бути або аналоговою, або цифровою.



**Рис. 25. Схема замкнутої системи керування**

Аналогові системи вимірюють зміни фізичних змінних, таких як положення та швидкість, із боку рівнів напруги.

Цифрові системи контролюють зміни продуктивної потужності за допомогою електричних імпульсів. Різні датчики контролю положення використовуються для керування динамічними характеристиками й координатним становищем шпинделя верстата. Біль-

шість систем ЧПК працюють від сервомеханізму, тобто за принципом замкнутого контуру. Якщо буде виявлено невідповідність між тим, де повинен бути інструмент машини згідно із заданою інструкцією, і тим, де він насправді знаходиться, датчик-вимірник подає сигнал приводного блоку для виправлення, переводячи пересувний компонент верстата в потрібне місце.

Верстати із замкнутим контуром – дуже потужні й точні, тому що вони здатні контролювати робочі параметри за допомогою систем зворотного зв'язку й автоматично вносити необхідні виправлення в процес оброблення в режимі реального часу.

Верстати з комп'ютерним числовим програмним керуванням роблять складні деталі для будь-якого застосування, швидко й із дуже високим рівнем точності. На зміну традиційним 3-осьовим машинам із ЧПК, які призначаються для роботи в тривимірному просторі площин X, Y і Z, прийшли 4 і 5-вісні верстати. Додавання поворотного руху до двох основних осей дозволяє створювати складніші компоненти з неймовірною точністю та достовірністю поряд із додатковими перевагами, що полягають у скороченні часу налагодження верстата, підвищенні ефективності процесу й поліпшенні кінцевого оброблення поверхні готового виробу.

Впровадження механічного оброблення із ЧПК здатне поліпшити кожен аспект виробничого процесу. У деяких галузях промисловості використання ЧПК-верстатів є найбільш доцільним і вигідним.

Оброблення із ЧПК широко використовується в аерокосмічній промисловості, в якій часто необхідні високоточні деталі зі складною геометрією з рідкісних або важкооброблюваних матеріалів. У такому секторі оброблювані із ЧПК аерокосмічні деталі часто мають критично важливе значення та тому повинні виготовлятися з найвищим рівнем точності й акуратності.

Компоненти для аерокосмічного обладнання повинні відповідати суворим вимогам за площинністю, заокругленістю, циліндричністю, у той час, як допустимі відхилення не повинні перевищувати 1 мкм. Усі ці вимоги до компонентів можуть бути виконані тільки за допомогою комп'ютерного оброблення. Іноді геометрія деталі настільки складна, що її можна досягти тільки за допомогою 5-осьової системи оброблення із ЧПК.

## **ВИСНОВКИ**

Механічне оброблення металу – це важливий процес у «житті» деталей і конструкцій. Усю форму майбутнього виробу визначає конфігурація застосовуваного металорізального обладнання. Під час механічного впливу досягається необхідна чистота для оброблюваної поверхні.

Механооброблення натеper являє собою головну технологію авіа-й машинобудування. Його засоби й методи постійно удосконалюються, з'являються нові верстати, обладнання та інструменти, унаслідок чого розширюються можливості виготовлення, значно скорочується час оброблення, а також підвищується загальний рівень якості виготовлених виробів.

Для можливості застосування новітніх можливостей обладнання в більшості випадків необхідно використовувати систему програмування на верстатах із ЧПК, що володіє відповідним інтелектуальним потенціалом. У процесі використання найсучасніших програмних продуктів у програму закладається математична модель, яка відповідає оброблюваній деталі.

Крім того, актуальним завданням є впровадження промислових роботів в усі процеси механічного оброблення заготовок, що сприятиме промисловій автоматизації та поліпшенню якості виробу.

## **АНОТАЦІЯ**

Механічний метод оброблення металу на відміну від інших способів не змінює структуру сировини, дозволяючи обмежитися лише зміною фізичних розмірів заготовки. У процесі роботи деталь підганяється під задані кресленням параметри. Із цією метою використовують різні ріжучі інструменти й спеціальні верстати. Як правило, спочатку проводиться чорнове оброблення металу, а потім подальше доопрацювання. Для отримання оптимального результату заготовка може піддаватися не одному, а кільком видам впливу з метою оброблення. Результатом механічного оброблення є деталі високої точності, що повністю відповідають заданим параметрам, мають рівну фактуру й точну форму. Умовно процеси видалення матеріалу можна поділити на дві групи: звичайне оброблення (традиційне) і нетрадиційне. Звичайне оброблення – метал видаляється у вигляді стружки з докладанням зусиль до оброблюваного матеріалу ріжучим інструментом, твердішим за

оброблюваний матеріал. Нетрадиційне – немає прямого контакту між інструментом і заготовкою. Використовують нетрадиційне оброблення для надзвичайно твердих і крихких матеріалів; коли заготовка занадто гнучка або тонка, щоб витримувати сили різання або шліфування; коли форма деталі занадто складна.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Сикульский В.Т., Дьяченко Ю.В., Божко В.П., Воронько В.В., Борисевич В.В., Проскурин С.Д., Воронько И.А. Технология производства деталей летательных аппаратов размерной обработкой. *Technology of Aircraft Parts Manufacturing by Dimensional Machining*. Харьков : НАУ (ХАИ), 2017. 180 с.

2. Корытов М.С., Евстифеев В.В., Калачевский Б.А., Калмин Б.А., Колмаков Б.Г. Технология конструкционных материалов: учебное пособие для среднего профессионального образования / под ред. М.С. Корытова. Москва : Издательство Юрайт, 2018. 234 с.

3. Покровский Б.С., Евстигнеев Н.А. Общий курс слесарного дела : учебное пособие. Москва : Академия, 2017. 80 с.

4. Мерданов Ш.М., Шефер В.В. Технология машиностроения : учебник. Тюмень : ТюмГНГУ, 2013. 354 с.

5. Барбашов Ф.А., Сильвестров Б.Н. Фрезерные и зуборезные работы : учебник. Москва : Высшая школа, 1983. 290 с.

6. Ящерицын П.И., Ефремов В.Д. Основы резания материалов : учебное пособие. Минск : БГАТУ, 2008. 644 с.

7. Planing vs Shaping in Manufacturing: What's the Difference? 2020. *Monroe* : web-site. URL: <https://monroeengineering.com/blog/planing-vs-shaping-in-manufacturing-whats-the-difference/>.

8. Difference Between Shaping and Planing. 2019. *Machining* : web-site. URL: <http://www.difference.minaprem.com/machining/difference-between-shaping-and-planing/>.

9. What Is Superfinishing in Metalworking? 2020. *Monroe* : web-site. URL: <https://monroeengineering.com/blog/what-is-superfinishing-in-metalworking/>.

10. Nottath Ramachandran. A review of abrasive jet machining. *Journal of Materials Processing Technology*. 1993. V. 39. P. 21–31. URL: [https://doi.org/10.1016/0924-0136\(93\)90005-Q](https://doi.org/10.1016/0924-0136(93)90005-Q).

11. Ruslan Melentiev, Fengzhou Fang. Recent advances and challenges of abrasive jet machining. *CIRP Journal of Manufac-*

*turing Science and Technology*. 2018. V. 22. P. 1–20. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2018.06.001>.

12. Water Jet Machining – Working Principle, Advantages and Disadvantages with Application, 2017. *Mechanical Booster* : web-site. URL: <https://www.mechanicalbooster.com/2017/05/water-jet-machining.html>.

13. Difference Between AJM and WJM – Abrasive Jet & Water Jet Machining. 2019. *Minaprem* : web-site. URL: <http://www.difference.minaprem.com/ntm/difference-between-ajm-and-wjm-abrasive-jet-and-water-jet-machining/>.

14. Ultrasonic Machining Process, Working Principles & Advantages. 2015. *Engineering Articles* : web-site. URL: <https://www.engineeringarticles.org/ultrasonic-machining-process-working-principles-advantages/>.

15. Jayswal S.C., Jain V.K., Dixit P.M. Magnetic Abrasive Finishing Process – a Parametric Analysis. *Journal of Advanced Manufacturing Systems*. 2005. V. 04. No. 02. P. 131–150. URL: <https://doi.org/10.1142/S0219686705000655>.

16. Полянчиков Ю.Н., Схиртладзе А.Г., Воронцова А.Н., Полянчикова М.Ю., Крайнев Д.В., Сидякин Ю.И., Егоров Н.И. Электрохимические и электрофизические методы обработки в современном машиностроении : учебное пособие (гриф). Старый Оскол : ТНТ, 2018. 226 с.

17. Andromeda Trias, Yahya Azli, Khamis Nor, Khalil Kamal, Erawan Ade. Predicting Material Removal Rate of Electrical Discharge Machining (EDM) using Artificial Neural Network for High Igap current. *International Conference on Electrical, Control and Computer Engineering*. 2011. URL: <https://doi.org/10.1109/INECCE.2011.5953887>.

18. Ставицкий Б.И. Из истории электроискровой обработки материалов. *Оборудование и инструмент для профессионалов*. Metalloobrabotka, 2006. URL: <https://martensit.ru/rezka-i-shlifovanie/elektroerozionnaya-obrabotka/>.

19. Ade Erawan Minhat, Khamis N., Yahya A., Andromeda T., Kartiko Nugroho less. Pulses Model of Electrical Discharge Machining (EDM). *Engineering*. 2014. URL: <https://doi.org/10.11591/EECSI.1.414>.

20. Harsimran Singh, Harmesh Kumar. Review on Wire Electrical Discharge Machining (WEDM) of Aluminum Matrix Composites. 2015. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/REVIEW-ON-WIRE->



ELECTRICAL-DISCHARGE-MACHINING-OF-Singh-Kumar/68d268c7952acaf03870fe035b1dda1b76b64ca7.

21. Bijoy Bhattacharyya, Biswanath Doloi. Hybrid machining technology. *Modern Machining Technology*. Advanced, Hybrid, Micro Machining and Super Finishing Technology. 2020. P. 461–591. URL: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812894-7.00006-2>.

22. Rashid. Plasma Arc Machining – Working Principle, Construction, Working, Advantages and Disadvantages. *Mechanical Walkins*. 2020. URL: <http://www.mechanicalwalkins.com/plasma-arc-machining-working-principle-construction-working-advantages-and-disadvantages/>.

23. Basicmech. Functions of CNC Milling Machine Parts and Components Explained. *Mechanical Engineering*. 2020. URL: <https://basicmechanicalengineering.com/cnc-milling-machines-parts-and-components-explained/>.

**Information about the author:**

**Voronko Iryna Oleksiyivna,**

Candidate of Technical Sciences,

Associate Professor at the Technology of Aircraft Manufacturing

Department

National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute"

17, Chkalov str., Kharkiv, 61070, Ukraine