

Міністерство освіти і науки України
Центральноукраїнський національний технічний університет

Кафедра: «Машинобудування, мехатроніки і робототехніки»

РОБОЧА ПРОФЕСІЯ

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

до виконання практичних робіт

Рівень вищої освіти - перший (бакалаврський)

Освітня програма - «Галузеве машинобудування»

Спеціальність - 133 «Галузеве машинобудування»

Галузь знань - 13 «Механічна інженерія»

Затверджено на засіданні кафедри

«Машинобудування, мехатроніки і робототехніки».

Протокол № 9 від 09 червня 2022 р.

Кропивницький 2022

Робоча професія. Методичні рекомендації до виконання практичних робіт для студентів спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» / Укл.: А.Р. Апаракін, І.А. Валявський – Кропивницький: ЦНТУ, 2022 – 80 с.

Укладачі: к.т.н. Апаракін А.Р.,
к.т.н. Валявський І.А.,

Рецензент: к.т.н, доц., зав. кафедри «Машинобудування, мехатроніки і робототехніки» Гречка А.І.

© Центральноукраїнський національний технічний університет

© Апаракін А.Р., Валявський І.А.

Тема 1. Вступ, мета і задачі курсу

В даному курсі розглядаються початкові питання щодо існуючих методів обробки, різального інструменту, та обладнання сучасного виробництва.

Мета та цілі курсу - одержання студентами першого курсу початкових знань про існуючі види механічної обробки та металорізальних верстатів, та про технологічне призначення кожної групи верстатів. Також курс розглядає адитивні технології, та сучасні тенденції у розвитку верстатів (верстати паралельної кінематики, комбінованої структури).

Курс «Робоча професія» передувє більш глибокому вивченню верстатів при вивченні таких курсів як: «Теорія різання», «Металообробне обладнання», «Технологічне обладнання з паралельною кінематикою», «Різальний інструмент та інструментальне забезпечення автоматизованого виробництва», «Обладнання та процеси 3D-друку», і охоплює питання по одержанню студентами навичок по практичному виконанню елементарних технологічних операцій.

Формат курсу - змішаний (blended) - курс, що має супровід в системі Moodle.

У результаті вивчення навчальної дисципліни студент повинен:

- мати загальне уявлення про функціонування машинобудівного виробництва;
- досконально знати класифікацію верстатів (по конструкції, по формі, по технологічному призначенню);
- вміти застосовувати різальні інструменти в залежності від виконуваних робіт.

1.1. Життєвий цикл продукції

Життєвий цикл продукції (виробу) (англ. product lifecycle) - сукупність взаємопов'язаних процесів послідовної зміни стану продукції від початку дослідження та обґрунтування розробки, до припинення експлуатації виробу, застосування (зберігання) матеріалу, рис. 1.1.

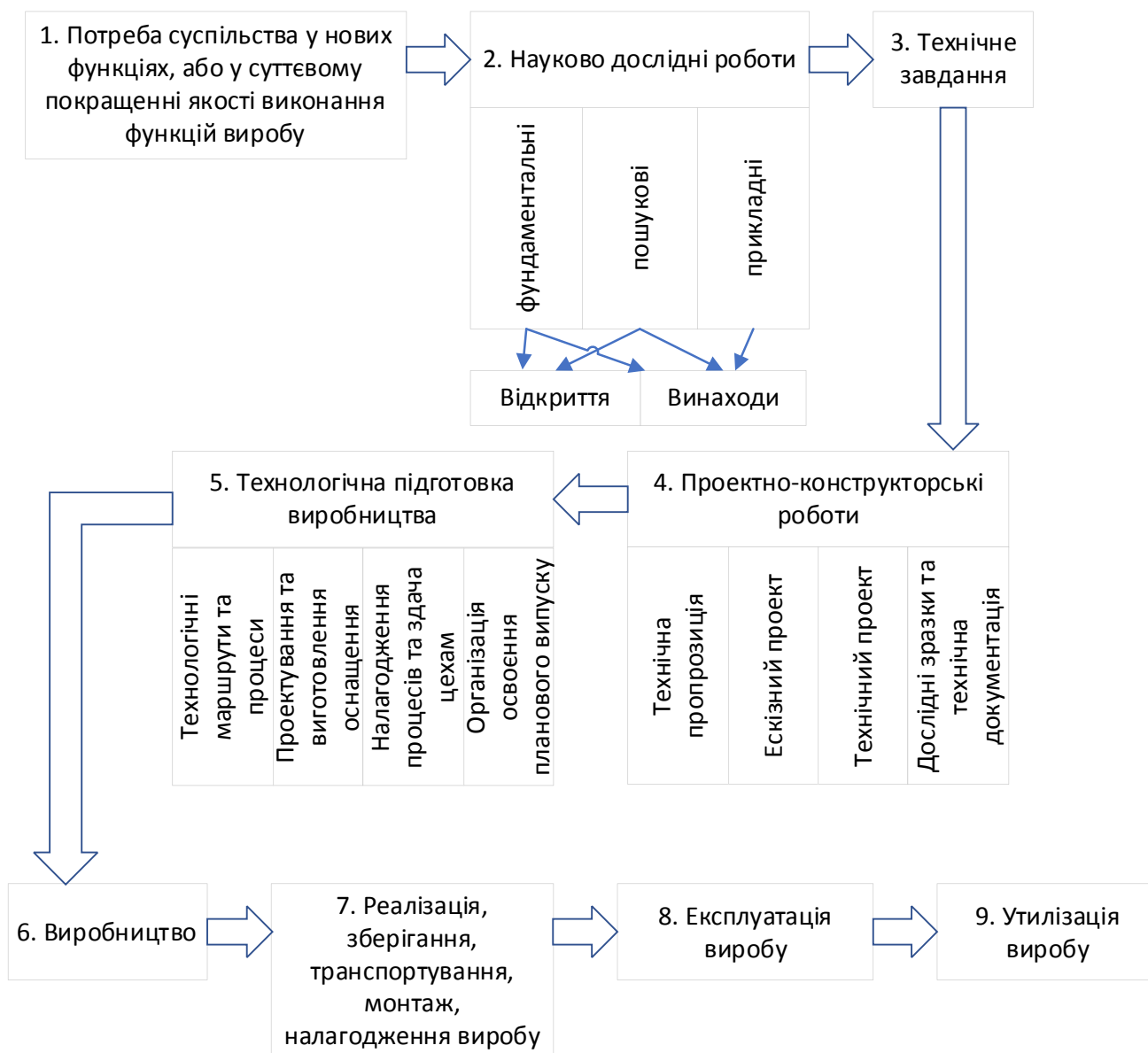


Рис. 1.1 – Блок-схема життєвого циклу продукції

Потреба у продукції - на цьому етапі проводяться маркетингові дослідження, вивчається попит, технічний стан галузі, потреба у нових функціях, необхідність у підвищенні ефективності, покращення ключових вихідних характеристик, підвищення якості.

Наукові дослідження - ця стадія передбачає проведення таких етапів, як наукове дослідження та обґрунтування розробки, від виникнення задуму до обґрунтування можливості й доцільності створення виробів і матеріалів. Процес творчості на цих етапах розглядають як процес створення нових знань, ідей, за якими проводять прикладні науково-дослідні роботи. При цьому прикладні дослідження є ланкою між новими знаннями, отриманими у ході фундаментальних теоретичних досліджень, і прикладними знаннями. У результаті

виконання робіт на цих етапах суспільство отримує інформацію про можливості матеріалізації нових знань, тобто про технічне втілення ідей, відкриттів, створюють нові, досконаліші моделі конструкцій, засобів автоматизації, нові технологічні процеси тощо.

Технічне завдання - важливий етап, який виділяється з безпосередньо конструкторських робіт. Розробка технічного завдання (ТЗ) здійснюється розробником на основі вихідних вимог до продукції, що пред'являються замовником. В технічному завданні визначаються цілі та призначення розробки, основні джерела (НДР, патенти і т.д.), технічні вимоги до конструкції, економічні показники, стадії і етапи розробки із зазначенням орієнтовних строків їх початку і закінчення, порядок контролю і приймання та ін.

Розробка технічного завдання зумовлює можливість початку процесу конструювання - проектно-конструкторських робіт (ПКР).

Проектування продукції - стадія життєвого циклу продукції, яка полягає у зміні стану продукції від формулювання вимог технічного завдання щодо виконання дослідно-конструкторських (ДКР) чи науково-дослідних (НДР) робіт на створення (модернізацію) продукції до втілення їх у нових (модернізованих) дослідних зразках, у нових (модифікованих) матеріалах.

Науково-дослідне розроблення - частина підготовки виробництва, що полягає у проведенні прикладних досліджень, пов'язаних з удосконаленням продукції, техніки, технології, складу застосовуваних матеріалів, організації виробництва, праці та керування, що передбачає проведення:

- дослідно-конструкторських робіт - сукупності робіт над створенням конструкторської та технологічної документації, виготовленням та випробуванням дослідного або головного зразка продукції;
- дослідно-технологічних робіт — сукупність робіт над створенням нових речовин, матеріалів та (або) технологічних процесів.

Розроблення нового виробу проводиться інженерно-технічним персоналом шляхом проектування й конструювання, що є взаємно пов'язаними процесами, які доповнюють одне одного. Конструктивні форма і розміри об'єкта уточнюються застосуванням методів проектування - проведенням розрахунків параметрів,

розрахунків на міцність, оптимізаційних розрахунків тощо. Розроблення продукції завершується отриманням її дослідного зразка (дослідної партії).

Дослідний зразок (партія) - зразок продукції, виготовлений за наново розробленою документацією для перевірки шляхом випробувань відповідності її заданим технічним вимогам з метою прийняття рішення про можливість впровадження у виробництво і (або) використання за призначенням, так і для одночасного опрацювання конструкції та технічної документації з метою поліпшення виробництва та експлуатації решти екземплярів цієї партії чи серії.

Проектування сучасних високотехнологічних виробів здійснюється за допомогою систем автоматизованого проектування (САПР). В САПР машинобудівних галузей промисловості прийнято виділяти системи функціонального, конструкторського і технологічного проектування. Перші з них називають системами розрахунків і інженерного аналізу або системами **CAE** (англ. Computer-aided engineering). Системи конструкторського проектування називають системами **CAD** (computer-aided design). Проектування технологічних процесів становить частину технологічної підготовки виробництва і виконується в системах **CAM** (computer-aided manufacturing).

Підготовка до виробництва продукції - сукупність заходів, що забезпечують готовність підприємства до освоєння виробництва продукції необхідної якості та у визначені терміни та обсяги випуску і включає:

- конструкторську підготовку виробництва - створення комплексу конструкторської документації, необхідної для виготовлення та експлуатації виробу (виробів); в процесі конструкторських робіт велика увага приділяється уніфікації та стандартизації конструкцій, підвищенню їх технологічності, техніко-економічній оптимізації варіантів конструкторських рішень;
- технологічна підготовка виробництва - сукупність заходів, які охоплюють проектування технологічних процесів виробництва, вибір та розміщення устаткування, обладнання, перепланування технологічних схем, визначення технологічного оснащення, розроблення методів технічного контролю,

нормування матеріально-технічних витрат і забезпечує випуск продукції потрібного рівня якості за встановлених термінів та обсягів випуску.

Виготовлення продукції - процес організації та здійснення виготовлення продукції. Стадію виробництва продукції умовно можна розділити на підстадії:

- сертифікація – оцінка якості продукції, відповідність стандартам;
- підготовку промисловості до виробництва нового (вдосконаленого) виробу і його освоєння;
- власне виготовлення виробу як продукту праці.

У серійному (масовому) виробництві виріб проходить ряд послідовних етапів: економічне освоєння (доведення технологічних процесів, конструкторської документації, адаптація всіх служб тощо); стабільне (стале) виготовлення продукції; модернізація і вдосконалення споживчих властивостей продукції; зняття з виробництва.

Реалізація продукції - постачання продукції, яка оплачена покупцем або на яку є згода покупця щодо оплати в майбутньому поставленої йому продукції, що включає підготовку до транспортування, власне транспортування, зберігання; монтаж і підготовку до експлуатації.

Експлуатація виробу - стадія життєвого циклу продукції, на якій реалізують, підтримують та відновляють якість виробу.

Стадія експлуатації виробу складається з низки етапів, серед яких власне експлуатація (застосування), включаючи обслуговування, ремонт, відновлення, тобто використання продукту з метою вияву його корисного ефекту, заради якого продукцію було створено. На етапі експлуатації ставиться мета високоефективного використання продукції у споживача. Її реалізують шляхом розробки експлуатаційної документації і науково обґрунтованих норм витрачання запасних частин, забезпечення необхідного рівня надійності продукції.

Утилізація продукції - комплекс технологічних операцій, спрямованих на використання як вторинної сировини продукції, що втратила свої корисні властивості. Ця стадія, також, передбачає зняття з виробництва; демонтаж та утилізацію ліквідованих знарядь праці (предметів споживання).

1.2. Виробничий процес

Під **виробничим процесом** розуміють сукупність окремих процесів (рис. 1.2), що здійснюються робітником та знаряддям праці для отримання з матеріалів і напівфабрикатів готових машин (виробів).

У виробничий процес входять не тільки основні, тобто безпосередньо пов'язані з виготовленням деталей і складанням з них машини, процеси, але і всі допоміжні процеси, що забезпечують можливість виготовлення продукції (наприклад, транспортування матеріалів і деталей, контроль деталей, виготовлення пристроїв та інструменту, заточка останнього і т. д.).



Рис. 1.2 – Блок-схема виробничих процесів

Технологічним процесом називають послідовну зміну форми, розмірів, властивостей матеріалу або напівфабрикату з метою отримання деталі або виробу відповідно до заданих технічних вимог. Технологічний процес механічної обробки деталей є частиною загального виробничого процесу виготовлення всієї машини.

Виробничий процес поділяється на наступні етапи:

- 1) виготовлення заготовок деталей - лиття, кування, штампування або первинна обробка з прокатного матеріалу;

- 2) обробка заготовок на металорізальних верстатах для отримання деталей з остаточними розмірами і формами;
- 3) складання вузлів і агрегатів (або механізмів), тобто з'єднання окремих деталей в складальні одиниці і агрегати (механізми);
- 4) остаточне складання всієї машини;
- 5) регулювання і випробування машини;
- 6) фарбування і оздоблення машини (виробу).

Технологічний процес механічної обробки деталей повинен проектуватися і виконуватися таким чином, щоб за допомогою найбільш раціональних і економічних способів обробки задовольнялися вимоги до деталей (точність обробки і шорсткість поверхонь, взаємне розташування осей і поверхонь, правильність контурів і т. д.), що забезпечують правильну роботу зібраної машини.

З метою забезпечення найбільш раціонального процесу механічної обробки заготовки, складається план обробки із зазначенням, які поверхні треба обробити, в якому порядку і якими способами.

У зв'язку з цим весь процес механічної обробки розчленовується на окремі складові частини: технологічні операції, установи, позиції, переходи, ходи, прийоми.

Технологічною операцією називається частина технологічного процесу, виконувана на одному робочому місці і яка охоплює всі послідовні дії робітника (або групи робітників) і верстата по обробці заготовки (однієї або декількох одночасно).

Для більш ясного і точного уявлення плану і способу обробки технологічний процес ілюструється графічними зображеннями (ескізами) переходів обробки зі схематичним зазначенням поверхонь обробки, способу кріплення деталі на верстаті (в пристосуванні), положення деталі, пристосування і інструментів. Таким чином, ці ескізи зображують технологічні наладки для обробки поверхонь деталі. Ескіз дається для кожного переходу окремо.

1.2.1. Виробничий склад машинобудівного заводу

Машинобудівні заводи складаються з окремих виробничих одиниць, які називаються цехами, і різних підрозділів.

Склад цехів, підрозділів і споруд заводу визначається обсягом випуску продукції, характером технологічних процесів, вимог до якості виробів і іншими виробничими факторами, а також в значній мірі ступенем спеціалізації виробництва і кооперування заводу з іншими підприємствами і суміжними виробництвами.

Склад машинобудівного заводу можна умовно розділити на наступні групи:

- заготівельні цехи (ливарні, ковальсько-пресові, штампувальні та ін.);
- обробні цехи (механічні, термічні, холодного штампування, деревообробні, металопокриття, складальні, фарбувальні і ін.);
- допоміжні цехи (інструментальні, ремонтно-механічні, електроремонтні, модельні, експериментальні, випробувальні та ін.);
- складські підрозділи (для металу, інструменту, приладдя та різних матеріалів для готових виробів, палива, та ін.);
- енергетичні підрозділи (електростанція, котельні, компресорні і газогенераторні установки);
- транспортні підрозділи;
- санітарно-технічні підрозділи (опалення, вентиляція, водопостачання, каналізація);
- загальнозаводські установи та підрозділи (лабораторії, вимірювальна лабораторія, адміністративний підрозділ, медичний пункт, амбулаторія, підрозділи інформаційної мережі та зв'язку, їдальня та ін.).

1.2.2. Типи виробництва

Залежно від розміру виробничої програми, характеру продукції, а також технічних і економічних умов здійснення виробничого процесу всі різноманітні виробництва умовно діляться на три основних види (або типу): одиничне (індивідуальне), серійне і масове, табл. 1.1.

Табл. 1.1 – Характеристика організаційних типів виробництва

Параметри	Виробництво		
	Одиничне	Серійне	Масове
Спеціалізація робочих місць	За кожним робочим місцем не закріплені певні операції	За кожним робочим місцем закріплено від 3 до 20 періодично повторюваних операцій	За кожним робочим місцем закріплені 1...2 постійні операції
Постійність номенклатури	Неповторювана	Повторюється періодично	Постійний випуск однакової продукції
Номенклатура продукції	Широка, різноманітна, неповторювана	Малостійка, обмежена серіями – періодично повторюється випуск виробів	Вузька, постійна, один або кілька однотипних виробів
Тип устаткування	Універсальне	Спеціалізоване	Спеціальне
Розташування устаткування	Технологічний принцип (за групами)	Предметно замкнений принцип	Предметний принцип
Оснащення	Універсальне	Уніфіковане	Спеціальне
Рівень використання устаткування	Низький	Середній	Високий
Методи організації виробництва	Групові, одиничні	Поточні, партійні, групові	Поточні
Частка ручної праці	Висока	Середня	Низька
Кваліфікація персоналу	Висока	Середня	Низька

Одиничним називається таке виробництво, при якому вироби виготовляються одиничними екземплярами, різноманітними за конструкцією або розмірами, причому повторюваність цих виробів рідкісна або зовсім відсутня.

Серійне виробництво займає проміжне положення між одиничним і масовим виробництвом. При серійному виробництві вироби виготовляють партіями або серіями, що складаються з однойменних, однотипних за конструкцією і однакових за розмірами виробів, що запускаються у виробництво одночасно. Основним принципом цього виду виробництва є виготовлення всієї партії (серії) цілком як в обробці деталей, так і в складанні.

Масовим називається виробництво, в якому при досить великій кількості однакових випусків виробів виготовлення їх ведеться шляхом безперервного виконання на робочих місцях одних і тих же постійно повторюваних операцій.

1.2.3. Технологічність конструкції виробу

При конструюванні окремих деталей необхідно досягти задоволення не тільки експлуатаційних вимог, але також і вимог найбільш раціонального і економічного виготовлення виробу. В цьому і полягає принцип технологічності конструкції. Чим менше трудомісткість і собівартість виготовлення виробу, тим більше він технологічний.

Технологічна конструкція виробу і деталей повинна передбачати:

- максимально широке використання уніфікованих складальних одиниць, стандартизованих і нормалізованих деталей і елементів деталей;
- можливо меншу кількість деталей оригінальної, складної конструкції і різних найменувань і можливо більшу повторність однойменних деталей;
- створення деталей найбільш раціональної форми з легкодоступними для обробки поверхнями і достатньої жорсткості з метою зменшення трудомісткості і собівартості механічної обробки деталей;
- найбільш раціональний спосіб отримання заготовок для деталей (виливків, штамповок, з прокату) з розмірами і формами, можливо більш близькими до готових деталей;
- повне усунення або можливо менше застосування слюсарно-пригоночних робіт при складанні шляхом виготовлення взаємозамінних деталей і механізації складальних робіт;
- спрощення складання і можливість виконання паралельно в часі і просторі складання окремих складальних одиниць і виробу в цілому.

Призначення раціональних з точки зору технології конструктивних форм при конструюванні повинно приділятися багато уваги. Конструктор повинен уявляти, як можна виготовити заготовки, обробляти деталі та складати вузли і виріб в цілому. Тому конструктор повинен знати основи технології машинобудування.

Тема 2. Методи, способи та засоби токарної обробки

2.1. Поняття токарної обробки

Одним з найбільш широко застосовуваних методів обробки металів різанням є точіння (рис. 2.1).

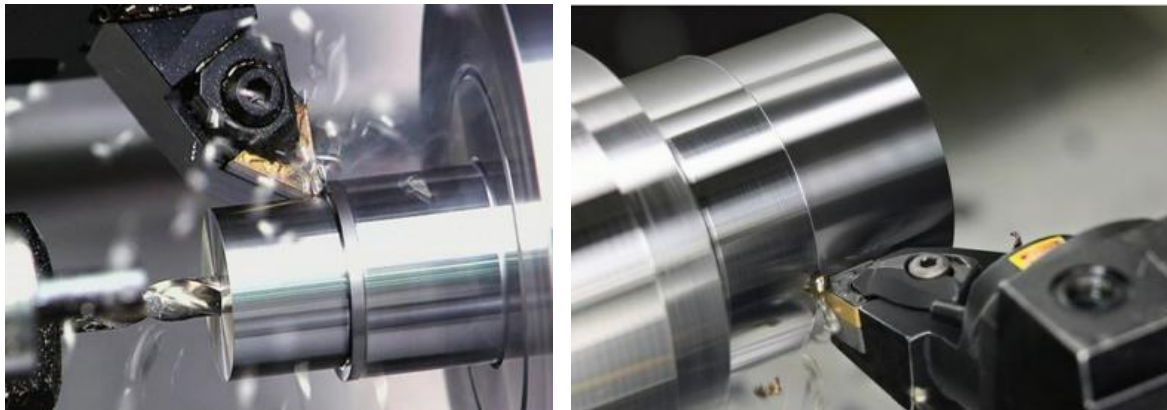


Рис. 2.1 – Токарна обробка.

Точінням називається обробка різцями будь-якої форми зовнішніх або внутрішніх поверхонь обертання. Під час точіння оброблювана поверхня деталі обертається навколо своєї геометричної осі, а різець безперервно переміщується відносно цієї поверхні, знімаючи з неї шар металу потрібної товщини (рис. 2.2).

Головним рухом під час токарної обробки є обертальний рух деталі. Під час цього руху різець зрізає з оброблюваної поверхні стружку. Переміщення різця відносно оброблюваної поверхні, що забезпечує безперервність процесу різання є рухом подачі.

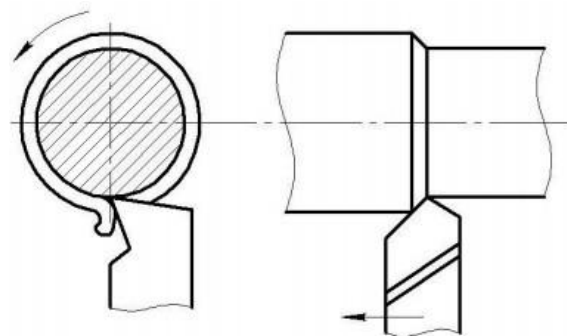


Рис. 2.2 – Схема точіння.

Деталі, що мають поверхні за формою тіл обертання, можна розділити на вали, втулки і диски.

Точіння циліндричних та торцевих поверхонь кожної з цих деталей, для забезпечення необхідної точності, виконують чорнове, чистове і тонке. При чорновому точінні точність обробки досягається 14-го квалітету і шорсткість $Rz = 40$ мкм. Чистове точіння забезпечує точність обробки 7...8-го квалітету і

шорсткість поверхні $Ra = 1,25$ мкм. Тонке точіння забезпечує точність обробки 6...7-го квалітету і шорсткість поверхні $Ra = 0,25$ мкм.

2.2. Різальний інструмент для токарної обробки

Основним різальним інструментом для точіння є різець, будова якого показана на рис. 2.3.

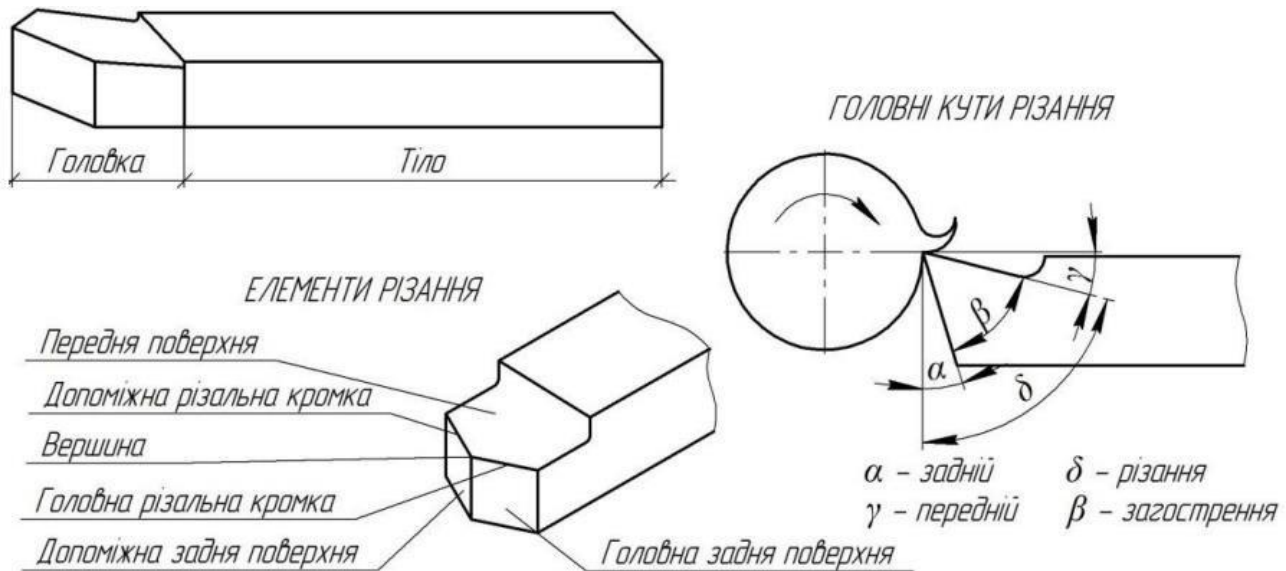


Рис. 2.3 - Будова токарного різця.

Класифікують різці за напрямком подачі, формою головки різця (рис. 2.4), формою перерізу різця, способом кріплення різальної частини різця зі стрижнем, характером обробки і видом виконуваних робіт. За формою головок різці бувають прямі, відігнуті, вигнуті і з відтягнутою головкою.



Рис. 2.4 - Класифікація різців за напрямком подачі та формою головки.

У прямих різців вісь різця пряма, а в відігнутих вона викривлена вправо або вліво. У вигнутих – вісь різця вигнута в боковій поверхні. У різців з відтягнутою

головкою ширина головки менша ширини державки різця, і головка може бути розміщена симетрично відносно осі стрижня чи зміщена вправо або вліво від осі.

За характером обробки розрізняють чорнові (обдирочні) і чистові (для тонкого точіння).

За видом виконуваних робіт токарні різці поділяються (рис. 2.5) на прохідні 1...4, розточні 5, 6, підрізні, прорізні, відрізні 7, різьбові 8, і галтельні 9.

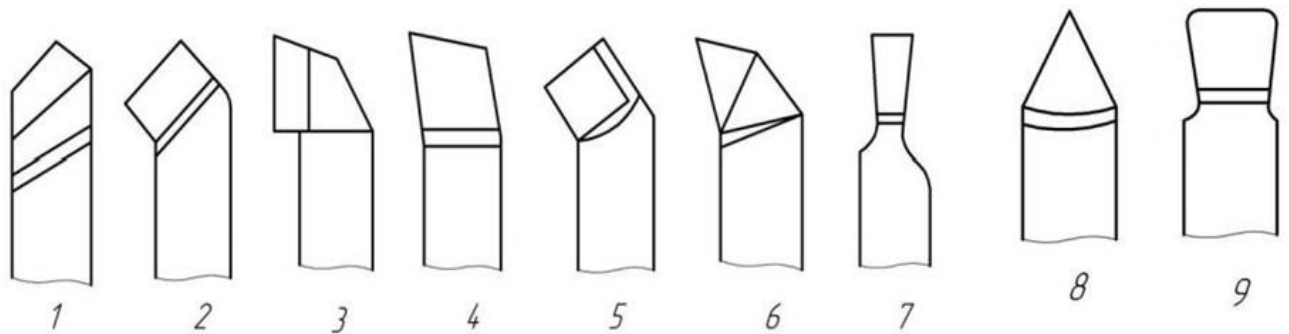


Рис. 2.5 – Суцільні токарні різці.

За способом кріплення різальної частини різця зі стрижнем розрізняють: суцільні різці (рис. 2.5, 1...9), складальні (рис. 2.6) нероз'ємні (а), роз'ємні (б) і пластини до них (в), фасонні різці (рис. 2.7) бувають круглі та призматичні, кожен під спеціальне кріплення.

В залежності від форми перерізу стрижня різці бувають прямокутні, квадратні і круглі.

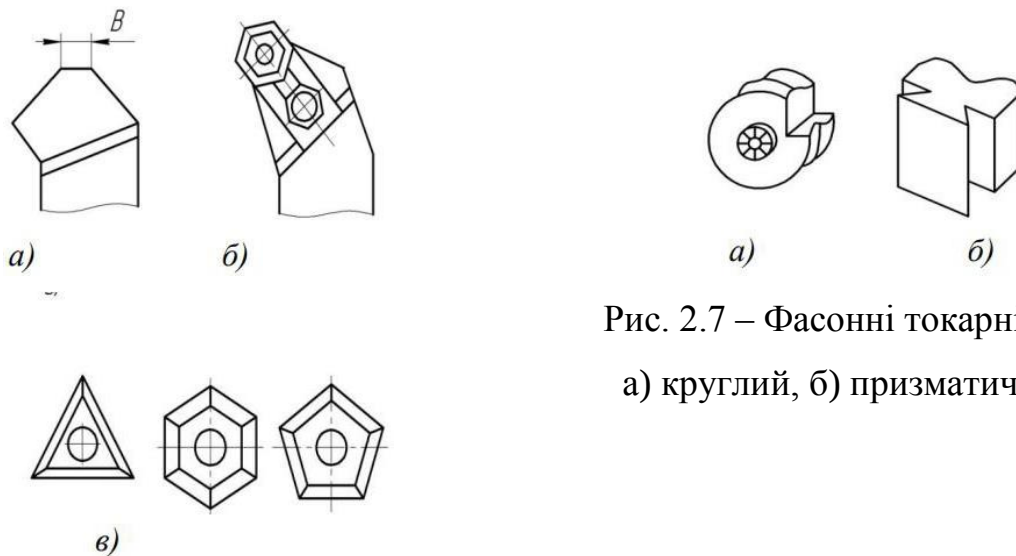


Рис. 2.6 – Токарні збірні різці.

Рис. 2.7 – Фасонні токарні різці
а) круглий, б) призматичний.

Різці закріплюють у різцетримачі супорта верстата. Вони можуть пересуватися вздовж, поперек та під кутом до осі обертання деталі. Поєднання таких рухів деталі та різального інструмента - різця дає змогу отримувати різноманітні поверхні: циліндричні, конічні, фасонні, гвинтові, торцеві площини (рис. 2.8).

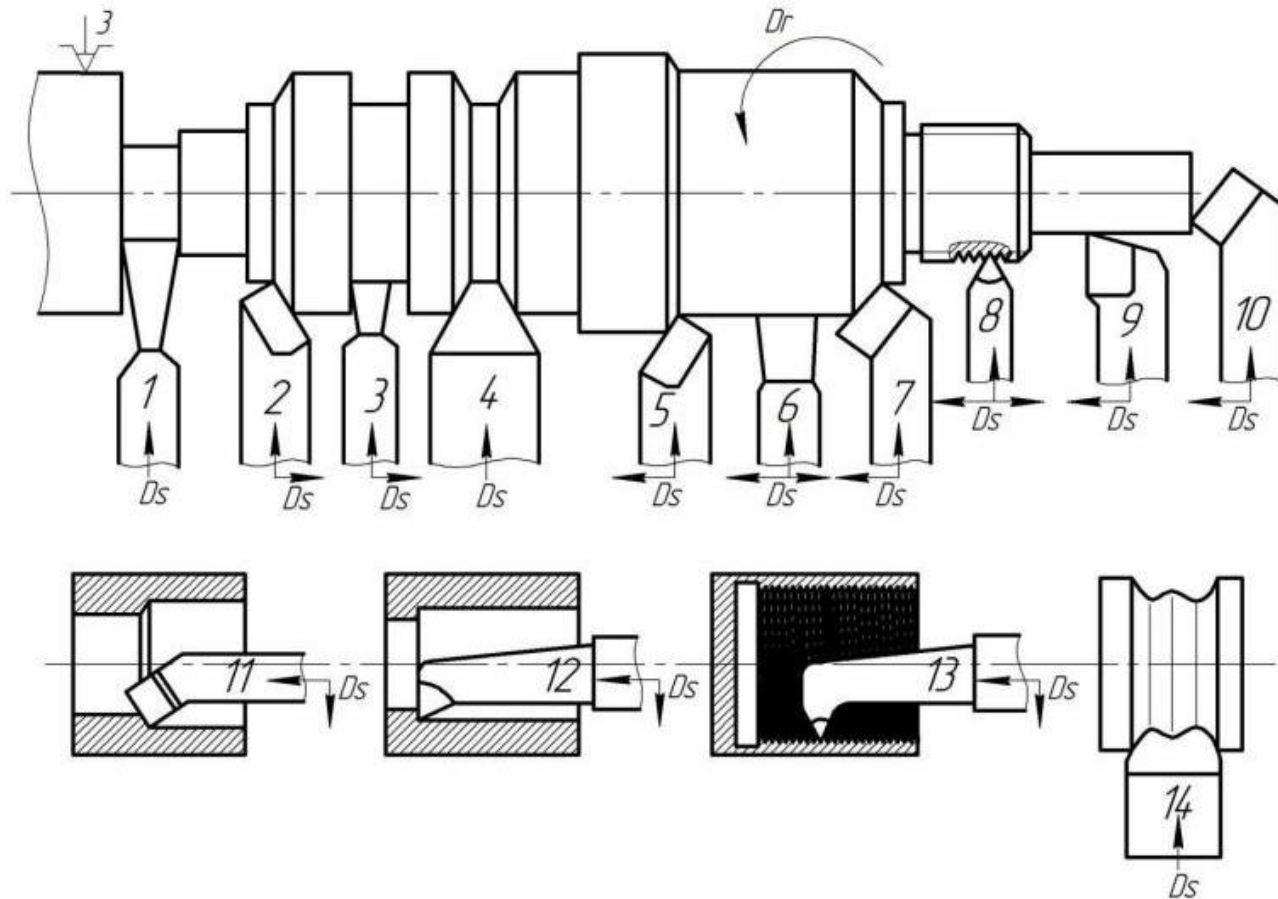


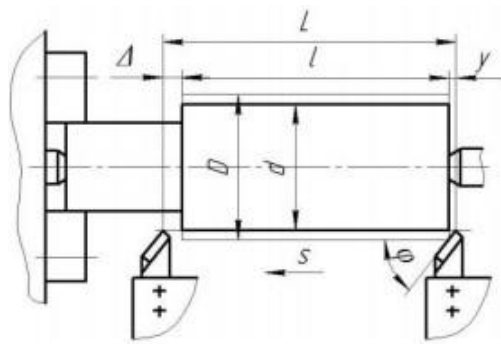
Рис. 2.8 - Схема роботи токарних різців

- 1 - відрізний; 2 - прохідний лівий; 3 - прорізний; 4 - канавочний; 5 - прохідний правий;
 6 - прохідний, що вигладжує; 7 - прохідно-торцевий, в даному випадку прохідний;
 8 - різенарізний для зовнішньої різі; 9 - прохідний з кутом $\phi=90^\circ$ (підрізний упорний);
 10 - прохідно-торцевий, в даному випадку торцевий; 11 - розточний прохідний;
 12 - розточний підрізний; 13 - різенарізний для внутрішньої різі; 14 - фасонний стержневий.

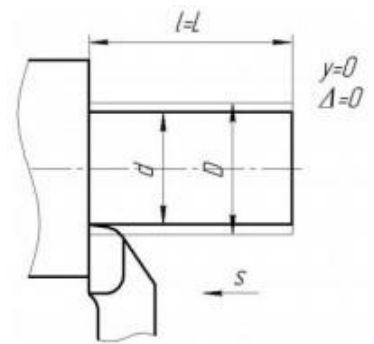
Вирішення задачі вибору різця рекомендується починати з викреслювання схеми різання. Схема різання показує взаємне розміщення заготовки і токарного різця в процесі оброблення.

Приклади схем різання приведені на рис. 2.9...2.12.

Після виконання схеми різання потрібно вибрати характеристики різального інструменту, тобто вибрати тип різця, матеріал різальної частини, геометрію та розміри перерізу державки різця.

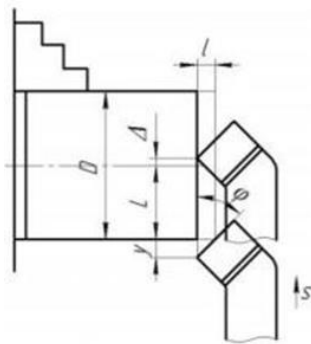


а)

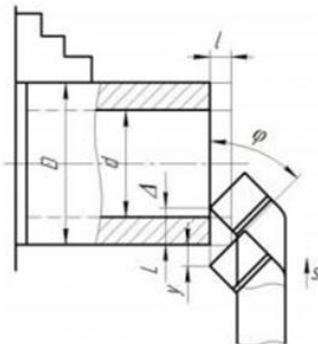


б)

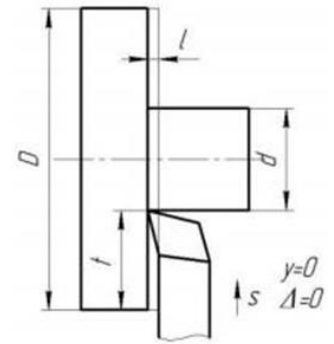
Рис. 2.9 - Обробка зовнішньої поверхні (а) на прохід, до упору (б).



а)

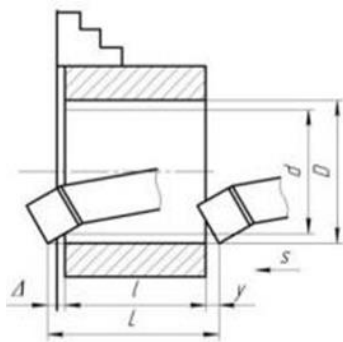


б)

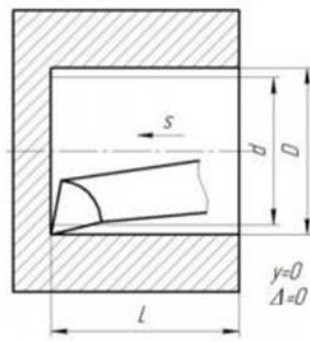


в)

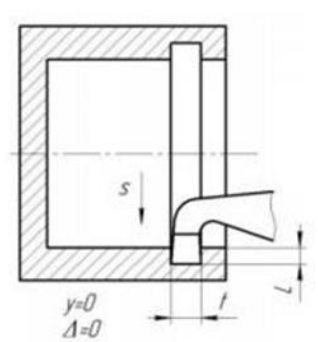
Рис. 2.10 - Обробка торцевої поверхні (а) валу, втулки(б), до упору (в).



а)

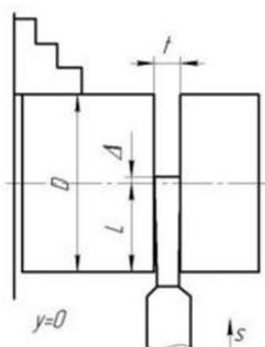


б)

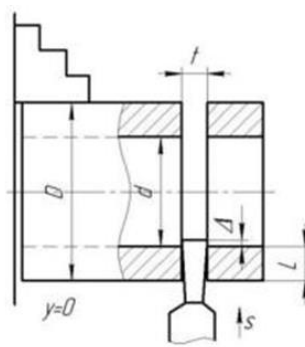


в)

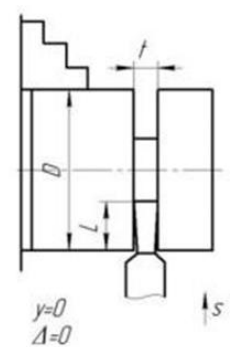
Рис. 2.11 - Обробка наскрізного (а), глухого (б) отворів, обробка канавки (в) у отворі.



а)



б)



в)

Рис. 2.12 – Розрізування заготовки (а); розрізування втулки (б), прорізування кільцевої канавки (в).

2.3. Верстати для токарної обробки

Обробку точінням здійснюється на токарно-гвинторізних, гідрокопіювальних, токарно-револьверних, багато різцевих, токарно- карусельних верстатах, одношпиндельних і багатошпиндельних токарних півавтоматах та автоматах. Лідируючі позиції по випуску верстатів в світі займає фірма HAAS (США). Їх універсальні токарні верстати поєднують функціональність сучасних верстатів з ЧПУ з простотою ручних універсальних верстатів (рис. 2.13, 2.14). Верстати дозволяють виконувати усі токарні операції: зовнішнє точіння циліндричних і фасонних поверхонь, внутрішнє розточування, свердління, нарізування різі та ін.



Рис. 2.13 - Універсальний токарний верстат HAAS TL-2.



Рис. 2.14 - Токарный верстат HAAS TL-1-EDU.

Тема 3. Методи, способи та засоби свердильної обробки

3.1. Поняття свердильної обробки

На верстатах свердильної групи окрім звичних операцій обробки отворів (свердлування, зенкування, зняття фасок та розверчування) підрізають торці, розточують отвори та канавки, нарізають різі.

В процесі утворення отворів на свердильних верстатах свердло одночасно здійснює обертальний і поступальний рухи, рис. 3.1 [13]. При цьому різальні кромки свердла зрізають тонкі шари матеріалу з нерухомо закріпленої заготовки, утворюючи стружку, котра завиваючись по спіральним канавкам свердла виходить з оброблюваного отвору. Чим швидше обертається свердло та глибше переміщується вздовж вісі за один оберт, тим швидше відбувається процес обробки. В процесі різання приймають участь не тільки два головних леза, а й лезо перемички та два допоміжних леза, розміщених на направляючих стрічках свердла, рис. 3.2.

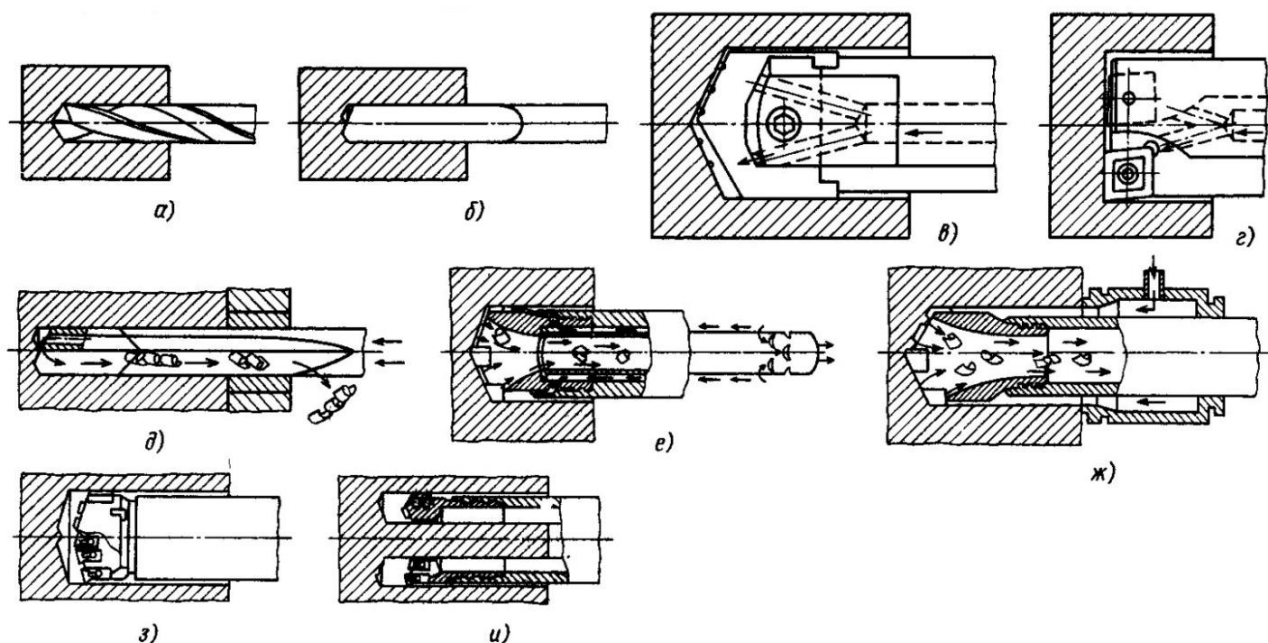


Рис. 3.1. Схеми свердління

- а) спіральне свердло; б) напівкруглі свердла; в) пластинчаті свердла;
г) свердла зі змінними пластинами; д) рушничні свердла;
е) свердла BTA (Boring and Trepanning Association);
ж), з) ежекторні свердла; и) трепануючі свердла.

На початку обробки передня поверхня свердла стискає прилягаючі до неї частки металу. Потім, коли тиск стає більшим за сили зчеплення часток металу, відбувається їх відокремлення від оброблюваної поверхні та утворення стружки.

3.2. Різальний інструмент

Отвори на свердлильних верстатах оброблюються: свердлами, зенкерами, зенківками, розвертками, різцями на борштанзі, мітчиками.

Найбільшу поширеність у промисловості набули **спіральні свердла** рис.3.2. Їх виготовляють із швидкорізальних, легованих та вуглецевих сталей, твердого сплаву (малих діаметрів), а також оснащують пластинками з твердих сплавів [6].

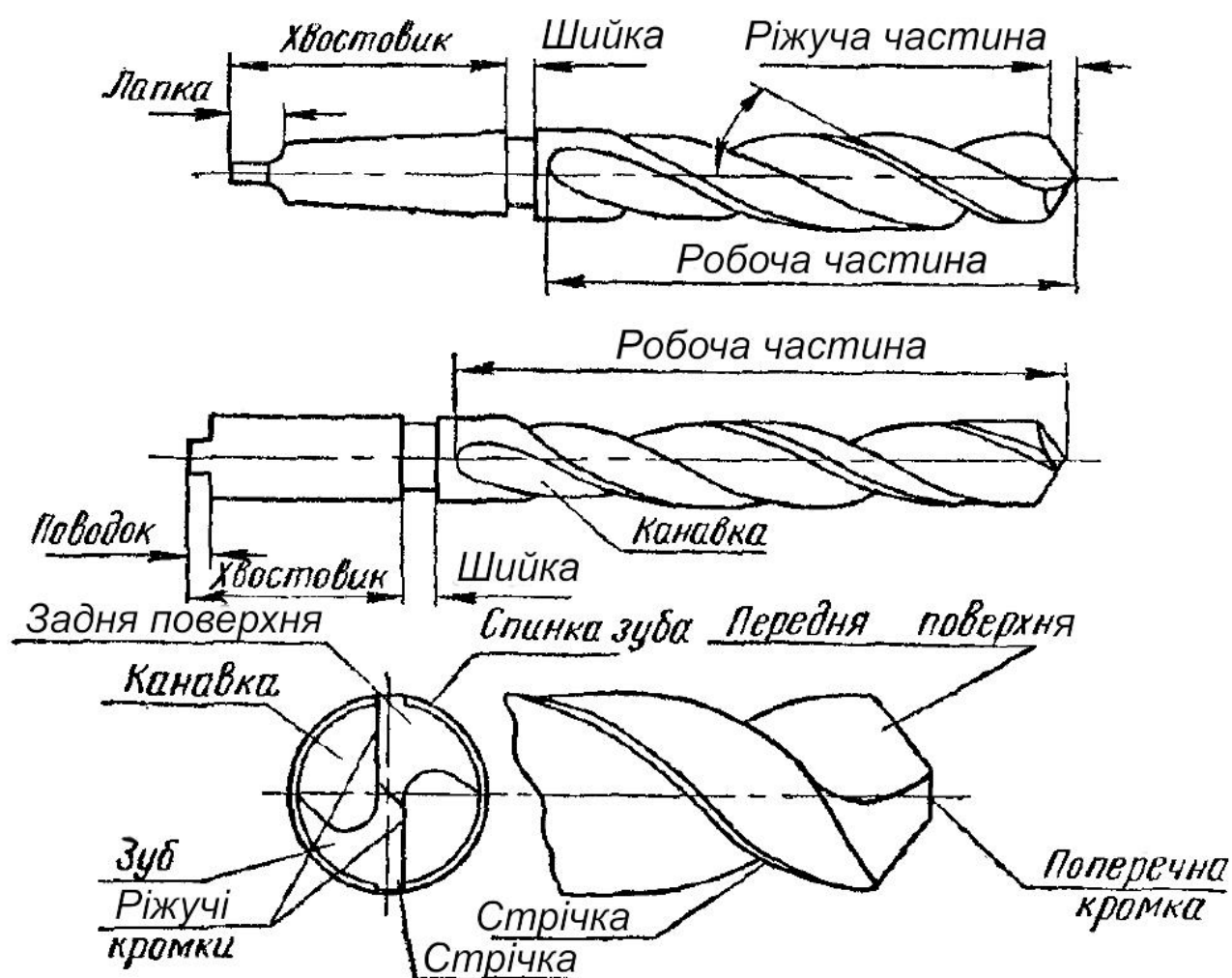


Рис. 3.2. Елементи будови спіральних свердл.

Робоча частина свердла являється циліндричним стержнем з двома спіральними або гвинтовими канавками, по яким виходить назовні стружка з оброблюваного отвору.

Різальна частина свердла заточена по двом конічним поверхням, має передню і задню поверхні і дві різальні кромки, з'єднані перемичкою під кутом 55° .

На циліндричній частини по гвинтовій лінії проходять дві вузькі стрічки, які центрують і направляють свердло в отвір. Стрічки значно знижують тертя свердла об стінки отвору. Крім того, для зменшення тертя на робочій частині свердла по напрямку до хвостовика зроблений зворотний конус (діаметр свердла зменшується від 0,03 до 0,1 мм на кожні 100 мм довжини).

Зенкери слугують для подальшої обробки раніше просвердлених отворів або отворів, отриманих при відливанні та штампуванні заготовок.

На відміну від спіральних свердел зенкери мають три або чотири різальних кромки і у них відсутня перемичка, рис. 3.3.

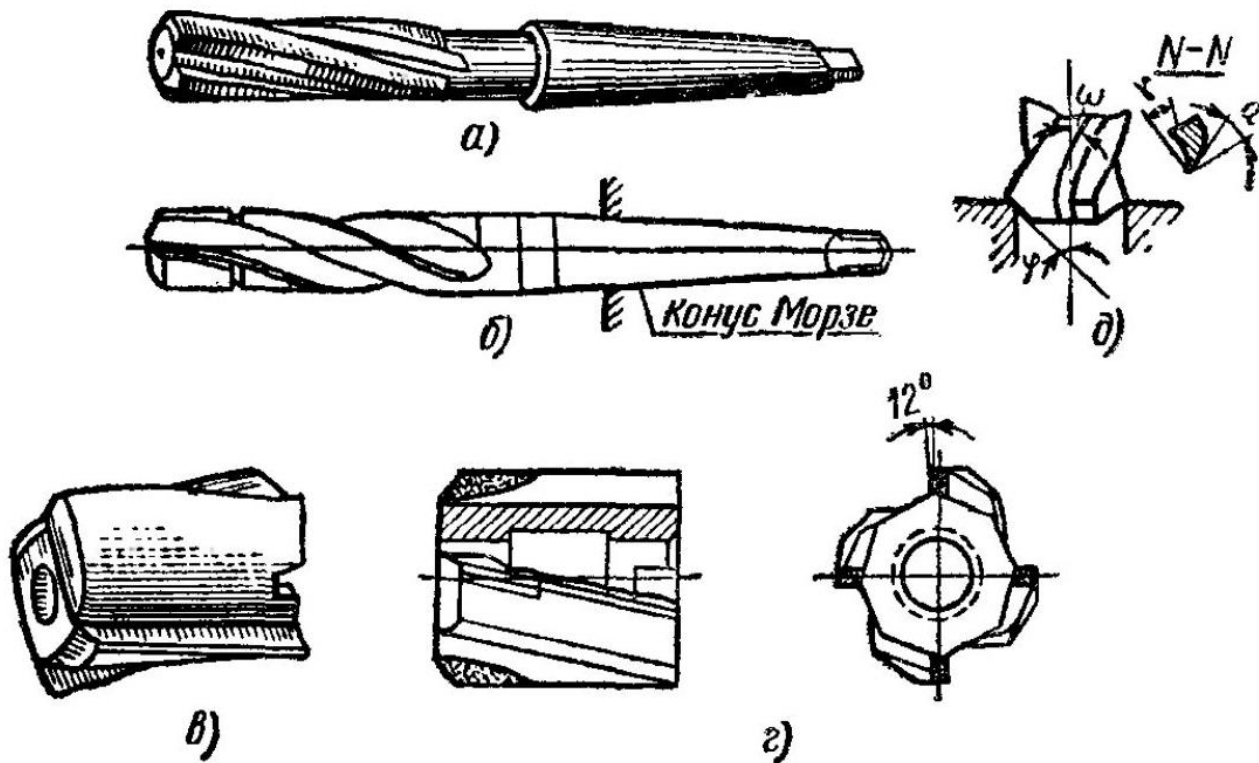


Рис. 3.3. Зенкери

- а) спіральний; б) спіральний, з напайними пластинками; в) насадний;
г) насадний, з напайними пластинками; д) основні кути зенкерів.

Зенкер, як і спіральне свердло, має канавки. Кут нахилу канавки ϕ вибирається залежно від оброблюваного матеріалу. Для більш твердих матеріалів кут приймається більше, для м'яких - менше. Кут нахилу канавки для зенкерів

загального користування становить $10...30^\circ$. При обробці чавуну цей кут зазвичай береться рівним нулю. Для зенкерів, оснащених пластинками твердого сплаву, кут рекомендується $10...20^\circ$.

При точності отворів 11...13 квалітету та шорсткості $Ra\ 5...10\ \mu m$ зенкування може бути кінцевою операцією.

Зенківка - багатолезовий різальний інструмент для обробки отворів в деталях з метою отримання конічних або циліндричних заглиблень, опорних площин навколо отворів або зняття фасок центрових отворів, рис. 3.4. Застосовується для обробки просвердлених отворів під головки болтів, гвинтів та заклепок.

Зенківки для циліндричних заглиблень і опорних площин часто називають **цековками**.

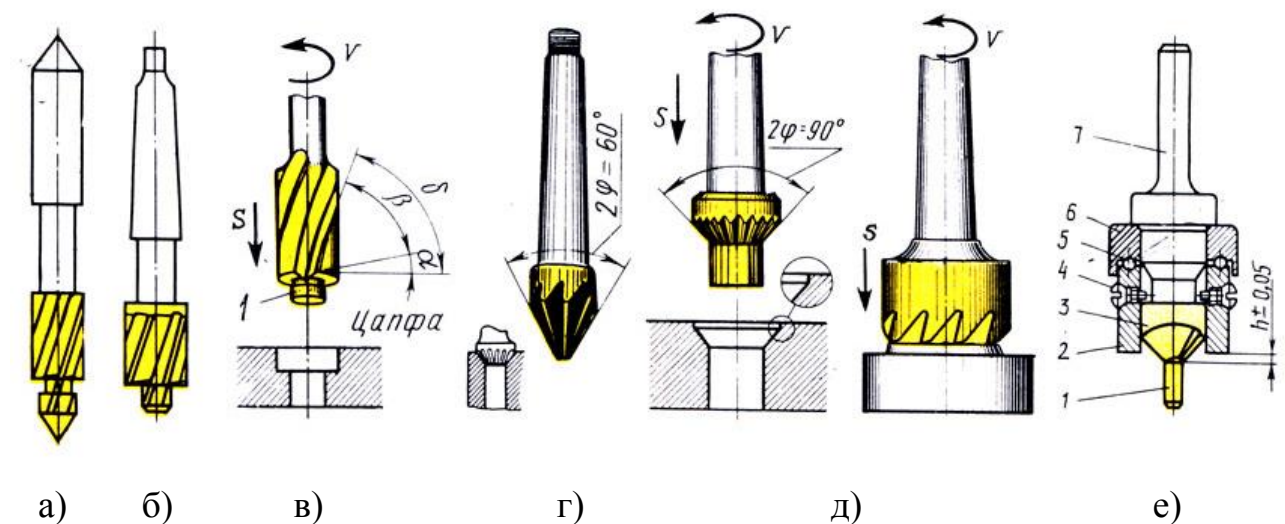


Рис. 3.4 – Зенківки

а) з постійною напрямною та циліндричним хвостовиком, б) зі змінною напрямною та конічним хвостовиком, в) - кути зенківки, та форма отримуваної поверхні, г) конічні зенківки, д) - цековка, е) державка з зенківкою і обмежувачем, що обертається; 1 - напрямна шпилька, 2 - упор, 3 - зенківка, 4 - гвинти, 5 - кульки, 6 - втулка, 7 – хвостовик.

Розвертки застосовують для остаточної обробки отворів з метою отримання високої точності і чистоти поверхні. Різальна частина розвертки розташована до осі під кутом ϕ і виконує основну роботу різання, рис. 3.5. Для обробки в'язких металів $12...15^\circ$, для крихких і твердих матеріалів $3...5^\circ$.

За своєї конструкції і призначенню розгортки діляться на ручні і машинні, циліндричні і конічні, насадні і цільні.

Використовуються для чистової обробки отворів 7...11 квалітетів та з шорсткістю $Ra\ 1,25...5\ \mu\text{м}$.

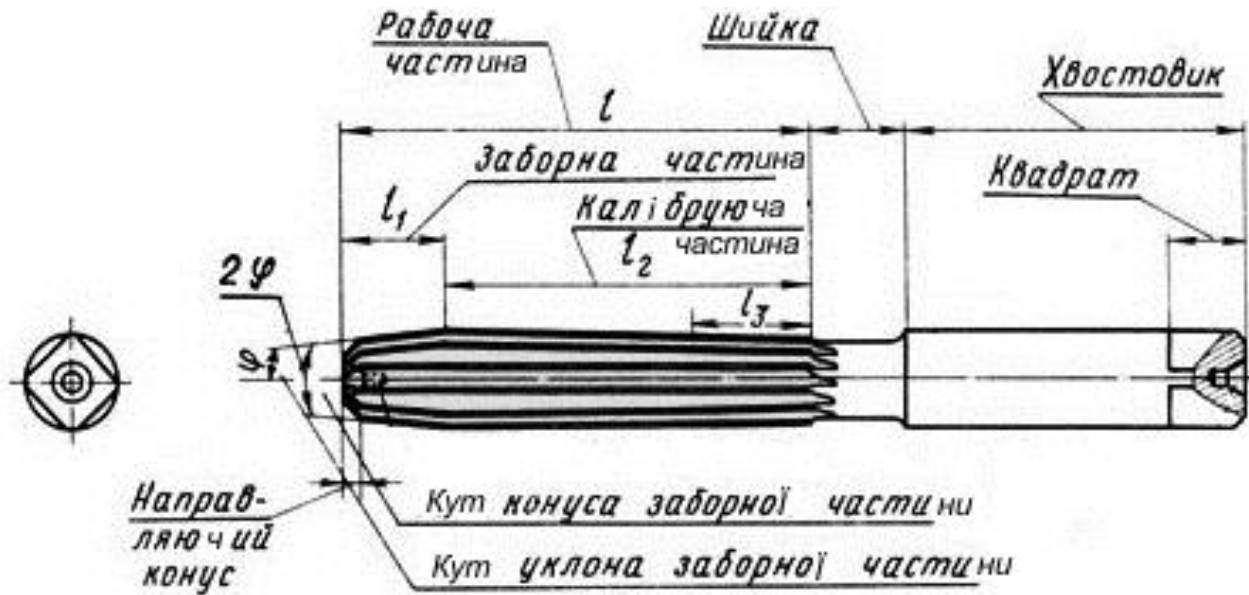


Рис. 3.5. Розвертка.

Мітчики застосовують для нарізування внутрішніх різей. Мітчик являє собою гвинт з поздовжніми прямими або гвинтовими канавками, що утворюють різальні кромки і слугують одночасно для виведення стружки, рис. 3.6.

Мітчики за своєю конструкцією та призначенням поділяються на такі основні види:

- ручні (слюсарні) для нарізування метричних, дюймових і трубних різей вручну; в комплекті міститься два або три мітчика;
- гайкові (довгі і короткі) для нарізування метричних і дюймових різей в гайках і наскрізних отворах різних деталей, переважно на свердлильних верстатах. Для нарізування гайок на верстатах-автоматах використовують гайкові довгі мітчики із зігнутих хвостовиком;
- машинні для нарізування метричних, дюймових і трубних різей в наскрізних або глухих отворах на свердлильних верстатах з механізмом зміни напрямку обертання шпинделя, а також на токарних верстатах.

Мітчик має робочу частину і хвостовик. Робоча різальна частина мітчика має забірну і калібруючу частини. Забірна частина здійснює різання, а калібруюча зачищає (калібрує) нарізану різь. На кінці хвостовика знаходиться квадрат, яким

мітчик закріплюється в патроні або в воротку. Канавки призначені для відводу стружки і утворення передніх і задніх поверхонь різальних зубців.

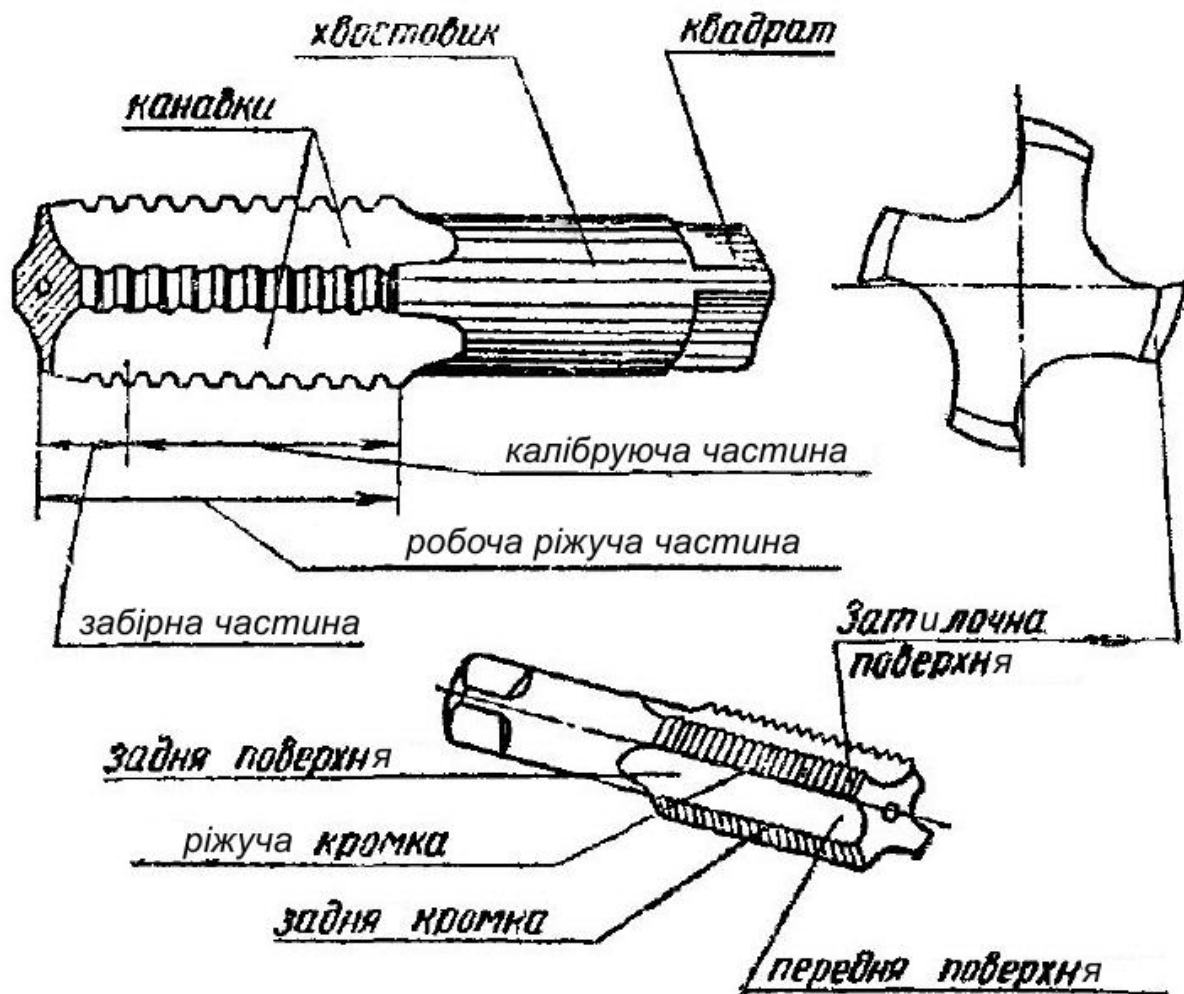


Рис. 3.6. Елементи будови мітчиків.

Мітчики виготовляють з інструментальних вуглецевих, легованих і швидкорізальних сталей.

3.3. Верстати

Свердлильні верстати бувають: вертикальні; радіальні, горизонтальні, багатошпіндельні напівавтомати.

Свердлильні верстати поділяються на три групи: універсальні (загального призначення), спеціалізовані і спеціальні.

Універсальні верстати є найчисленнішою групою з усього парку свердлильного обладнання, рис. 3.7. На них можна виконувати всі технологічні операції, характерні для обробки отворів (свердління, нарізування різей,

зенкування, розгортання і т. д.). До універсальних відносяться вертикально і радіально-свердлильні верстати.



а)



б)

Рис. 3.7. Свердлувальні верстати

а) настільний вертикально свердлильний; б) радіально-свердлильний верстат.

Тема 4. Методи, способи та засоби шліфувальної обробки

4.1. Поняття шліфувальної обробки

Шліфування - один з прогресивних і універсальних методів остаточної обробки різних поверхонь деталей машин, до яких пред'являються високі вимоги по точності розмірів, геометричної форми і якості обробки.

Зняття припуску (шару металу) з оброблюваної поверхні інструменту абразивним кругом являє собою процес високошвидкісного шліфування найдрібнішими різальними кромками абразивних зерен.

Абразивні зерна, які беруть участь в роботі, зазнають періодичний силовий, тепловий і хімічний вплив в момент контакту з оброблюваною поверхнею (рис. 4.1). В результаті такого впливу відбувається стирання різальних кромки зерен і поява площ зносу, сколювання різальних кромки, вибивання цілих зерен із зв'язки круга, налипання частинок металу на вершинах різальних кромки і заповнення пор круга металевою стружкою [7].

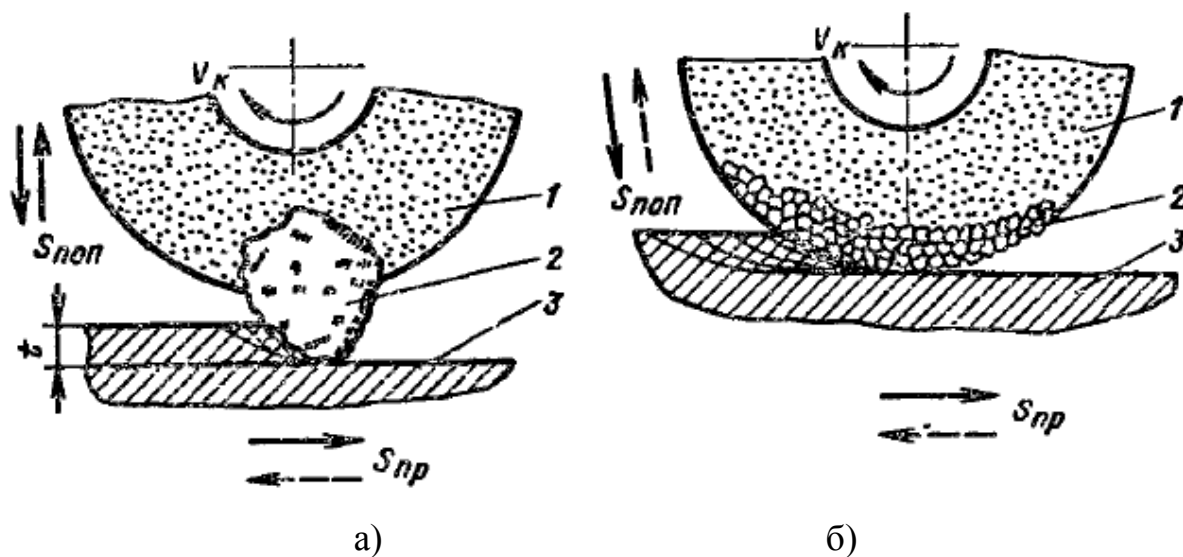


Рис. 4.1. – Схема процесу різання при шліфуванні
а) на рівні абразивного зерна; б) на рівні шліфувального круга.

Обробка на **круглошліфувальних верстатах** ведеться методом багатопрохідного шліфування, коли за кожен оберт оброблюваної деталі знімається певний припуск. Припуск, який знімається за кожен оберт деталі або глибина зрізуваного шару не залишаються постійними, вони змінюються протягом всієї операції і визначають структуру робочого циклу шліфування.

Типова схема **робочого циклу** шліфування складається з чотирьох етапів: врізання, чорнового знімання, чистового знімання і виходжування.

Розрізняють обдирне, попереднє, остаточне і тонке шліфування.

При **обдирному шліфуванні** (без попередньої токарної операції) знімається збільшений припуск від 1 мм і більше на діаметр. Обдирне шліфування доцільно виконувати при швидкості обертання круга $V_k = 50...60$ м/с.

На відміну від токарної обробки, обдирне шліфування забезпечує більш високу точність обробки (8...9-го квалітету) і шорсткість поверхні $R_a = 2,5...5,0$ мкм, не вимагає подальшого попереднього шліфування. Його доцільно застосовувати при наявності точних заготовок або заготовок, які мають погану оброблюваність лезовим інструментом.

Попереднє шліфування виконують після токарної обробки при швидкості $V_k = 40...60$ м/с. Попереднє шліфування часто виконують до термічної обробки в якості проміжної операції для підготовки поверхні до остаточної обробки. На операціях попереднього шліфування досягається точність 6...9-го квалітету і шорсткість поверхні $R_a = 1,2...2,5$ мкм.

Остаточним шліфуванням досягається точність 5...6-го квалітету і шорсткість поверхні $R_a = 0,2...1,2$ мкм. Найбільш часто виконується за швидкості $V_k = 35...40$ м/с.

Тонке шліфування застосовують головним чином для досягнення шорсткості поверхні $R_a = 0,025...0,1$ мкм. Для нього потрібна дуже хороша попередня підготовка, так як припуск що знімається при тонкому шліфуванні не перевищує 0,05...0,1 мм на діаметр. Тонке шліфування можна здійснювати на прецизійних верстатах спеціальними кругами, воно економічно доцільне лише в умовах одиничного і дрібносерійного виробництва.

Схеми шліфування приведені на рис. 4.2.

Методи шліфування. На круглошліфувальних верстатах здійснюють поздовжнє і врізне шліфування, рис. 4.3. Метод поздовжнього шліфування не вимагає спеціальної наладки, одним шліфувальним кругом можна обробити поверхні різної довжини.

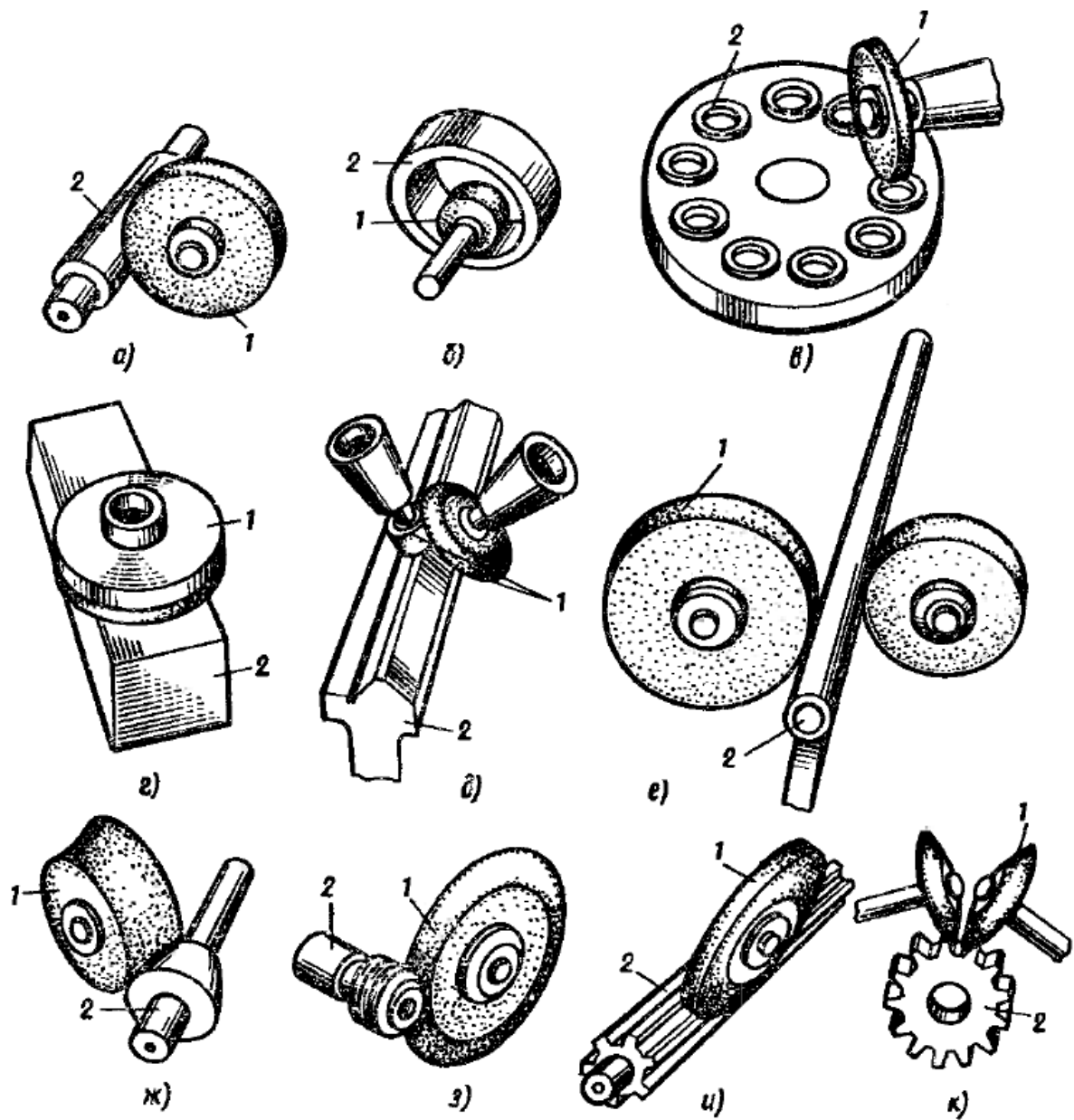


Рис. 4.2. Схеми шліфування

а) кругле зовнішнє; б) кругле внутрішнє; в) плоске периферією круга;
 г), д) торцем круга; е) безцентрове; ж) профільне; з) різьбове; и), к) шліце- та зубошліфування;
 1 - шліфувальний круг; 2 - оброблювана деталь.

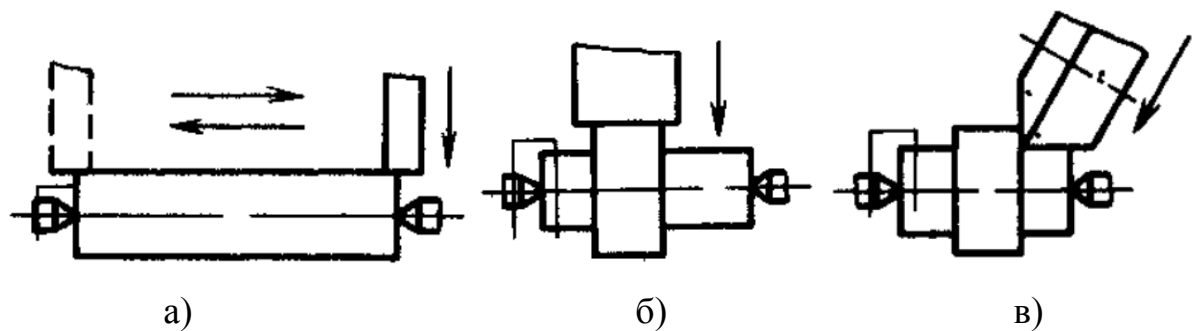


Рис. 4.3. - Методи шліфування

а) повздовжнє шліфування; б) врізне шліфування;
 в) поєднане шліфування циліндричних і торцевих поверхонь.

При поздовжньому шліфуванні круг зношується більш рівномірно і помітно не впливає на відхилення від циліндричності поверхні, що шліфується, в цьому випадку застосовують більш м'які круги, що працюють в режимі самозаточування, які не вимагають частої правки і мають підвищену продуктивність різання.

При поздовжньому шліфуванні досягаються найменші параметри шорсткості, мінімальне тепловиділення і кращу якість поверхні, що шліфується. Застосовують цей метод при обробці циліндричних поверхонь значної довжини (понад 50 мм).

При врізному шліфуванні одночасно обробляється вся шліфувана поверхня. Цей метод більш продуктивний, для його здійснення застосовують більш широкі круги і верстати підвищеної потужності і жорсткості. Знос круга впливає на точність шліфуваної поверхні. Тому при врізному шліфуванні обирають круг більшої твердості. Врізне шліфування використовують при обробці коротких шийок, фасонних поверхонь, ступінчатих, а також при необхідності одночасного шліфування шийки і торця.

Установку оброблюваної деталі здійснюють: в центрах, в патроні з опорою, в цанзі, на оправці.

Отвори в деталях на внутрішньошліфувальних верстатах обробляють напрохід і врізанням. Спосіб врізання використовують при обробці коротких, фасонних і глухих отворів, які не мають канавок для виходу кола. У всіх інших випадках застосовують шліфування напрохід, що забезпечує більш високу точність і менший параметр шорсткості поверхні.

Основні схеми внутрішнього шліфування наведені на рис. 4.4. При шліфуванні напрохід обробка, як правило, ведеться в одну операцію. У серійному і масовому виробництві на внутрішньошліфувальних верстатах забезпечується обробка з точністю 5...6-го квалітету і параметром шорсткості поверхні $R_a = 0,63 \dots 2,5$ мкм. При тривалому виходжуванні досягається параметр шорсткості поверхні $R_a = 0,4$ мкм. З огляду на малу жорсткість шпинделя шліфувальної головки і діаметр абразивного кола, необхідно на операціях внутрішнього шліфування знімати мінімальні припуски. Діаметр абразивного круга вибирають найбільший, допустимий діаметром оброблюваного отвору.

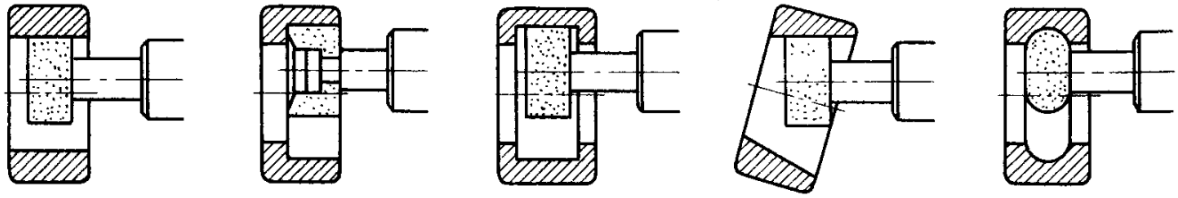


Рис. 4.4. - Основні схеми внутрішнього шліфування

4.2. Різальний інструмент

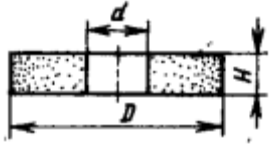
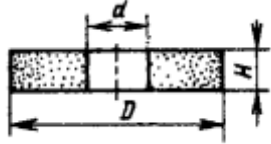
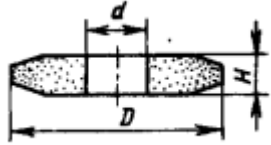
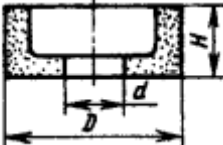
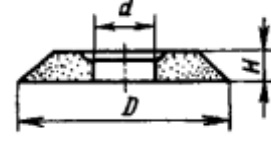
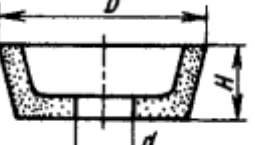
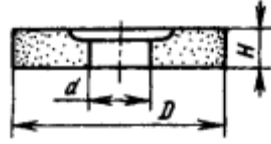
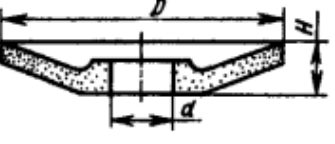
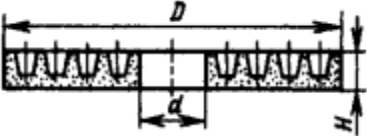
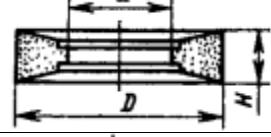
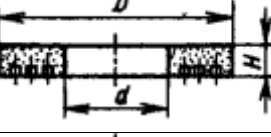
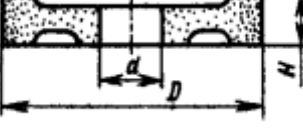
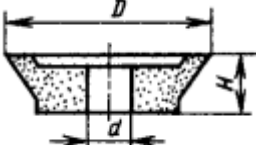
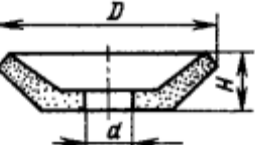
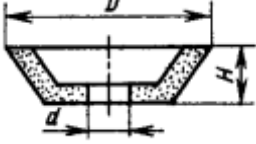
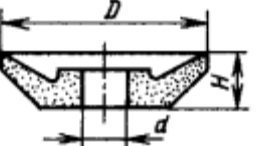
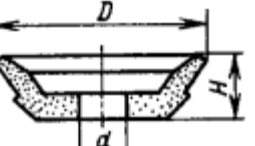
Різальний інструмент, робоча частина якого містить класифіковані частки абразивного матеріалу, називають абразивним. Подрібнений, збагачений і класифікований абразивний матеріал, твердість якого перевищує твердість оброблюваного матеріалу і який здатний в подрібненому стані здійснювати обробку різанням, називають шліфувальним. Залежно від виду використовуваного шліфувального матеріалу розрізняють алмазні (А8, А5, АС20, АС50), ельборові (ЛО, ЛП), електрокорундові (13А, 23А, 24А, 33А, 38А), карбідкремнієві (53С, 54С, 63С, 64С,) і інші абразивні інструменти.

Шліфувальні матеріали з штучних і природних абразивних матеріалів ділять на групи в залежності від **розміру зерен**. Існує чотири групи шліфувальних матеріалів: шліфзерно (2000-160 мкм); шліфпорошки (125-40 мкм); мікрошліфпорошки (63-14 мкм) і тонкі мікрошліфпорошки (10-3 мкм).

Речовина або сукупність речовин, що застосовуються для закріплення зерен шліфувального матеріалу і наповнювача в абразивному інструменті, називають **зв'язкою**. Наповнювач в зв'язці призначений для додання інструменту необхідних фізико-механічних, технологічних і експлуатаційних властивостей. Зв'язка впливає на геометрію рельєфу робочої поверхні інструменту, знос абразивного інструменту та параметри шорсткості обробленої поверхні. Зв'язки бувають: керамічні (К1...К6, К8, К10), бакелітові (Б, Б1...Б4, БУ, Б156, БП2), вулканітові (В, В1...В3, В5, Гф, Пф, Э5, Э6), металеві.

Типи шліфувальних кругів приведено у табл. 4.1 [13].

Таблиця 4.1.

Тип круга	Форма круга	Тип круга	Форма круга
ПП - прямого профілю	 $H > D$	К - кільцевий	 $H < D$
2П - двосторонній конічний профіль		ЧЦ - чашечні циліндричні	
3П - конічний профіль		ЧК - чашечні конічні	
ПВ - з виточкою		1Т - тарільчасті	
ПВК - з конічною виточкою		ПР - спеціальні	
ПВДК - з двосторонньою конічною виточкою		ПН - з запресованими кріпильними елементами	
ПВД - з двосторонньою виточкою		ПВДС - з двосторонньою виточкою і ступицею	
1ТП - тарільчасті		5ТП	
2ТП		6ТП	
4ТП		7ТП	

Твердістю абразивного інструменту називають величину, що характеризує властивість абразивного інструменту чинити опір порушенню зчеплення між зернами і зв'язкою при збереження характеристик інструментів в межах встановлених норм.

Твердість оцінюють певними показниками в залежності від методу вимірювання. Встановлено наступну шкалу ступенів твердості абразивного інструменту:

- ВМ1 і ВМ2 - вельми м'який;
- М1, М2 і М3 - м'який;
- СМ1 і СМ2 - середньом'який;
- С1 і С2 - середній;
- СТ1, СТ2 і СТ3 - середньотвердий;
- Т1 і Т2 - твердий;
- ВТ - вельми твердий;
- ЧТ - надзвичайно твердий.

Цифри 1, 2 і 3 характеризують зростання твердості абразивного інструменту всередині ступеня.

Параметри працездатності абразивного інструменту зазвичай змінюються в часі. Відновлення заданої геометричної форми та різальних властивостей робочої поверхні інструменту називають **правкою**.

4.3. Верстати

Шліфувальні верстати, рис. 4.5, поділяються за видом оброблюваної поверхні, масою, точністю, рівнем спеціалізації.



а)



б)



в)

Рис. 4.5 - Шліфувальні верстати

а) круглошліфувальний; б) плоскошліфувальний; в) круглошліфувальний з ЧПУ.

Тема 5. Методи, способи та засоби електрофізичної та електрохімічної обробки

5.1. Поняття електрофізичної та електрохімічної обробки

Безперервний ріст робочих параметрів сучасних машин вимагає використання для їх виготовлення особливо міцних та жаростійких матеріалів. Оскільки традиційними методами механічної обробки надміцні матеріали оброблювати вкрай важко і малопродуктивно, а в деяких випадках і зовсім не можливо, то створені нові методи обробки цих матеріалів.

Характеристики методів:

- незалежність швидкості, якості, продуктивності обробки від механічних властивостей оброблюваного матеріалу, тому що знімання відбувається не за рахунок механічного впливу; вплив чинять фізико-хімічні властивості, такі як теплопровідність, валентність і т.д.;
- відсутня необхідність у спеціальних інструментах, або абразивах більш твердіших, ніж оброблюваний матеріал; тиск інструменту оброблювану деталь відсутній або незначний;
- новим методам властивий високий ступінь зосередження енергії у часі і просторі, тобто створення великої потужності в робочій зоні;
- значне скорочення витрат оброблюваного матеріалу. Особливо актуально при обробці кремнію, рубіну, кварцу, алмазів та інших монокристалів;
- відносно високоточна обробка деталей навіть в тих випадках, коли механічна обробка неможлива або ускладнена (плунжерні пари, форсунки, розпилювачі паливної апаратури, магніти прецизійних двигунів, прецизійні цанги);
- придатність для виконання ряду операцій, які неможливо виконати традиційними методами (отвори або порожнини у важкодоступних місцях);
- можливість повної механізації і автоматизації;
- висока продуктивність і економічний ефект, зменшення браку, зниження трудомісткості і інтенсифікація процесів обробки.

Класифікація методів зведена у табл. 5.1.

Табл. 5.1

№ п/п	Метод обробки	Квалітет точності	Шорсткість поверхні, мкм
1	Електроіскрова	10 - 6	25 - 0,1
2	Електроімпульсна	12 - 5	5 - 1,6
3	Електроконтактна	11 - 10	5 - 0,4
4	Анодно-механічна	10 - 6	1,6 - 0,025
5	Полірування	9 - 6	0,4 - 0,02
6	Анодно-гідравлічна	10 - 8	5 - 0,8
7	Електроерозійна	10 - 7	3,2 - 0,4
8	Абразивно-електрохімічна	10 - 6	1,6 - 0,02

В якості **електролітів** (токопровідних розчинів) для електрохімічних методів обробки найбільш поширений розчин NaCl, однак нікель та титан оброблюють у розчині H₂SO₄. Ці розчини забезпечують високу точність поверхні і не викликають корозії.

Принцип електрофізичної обробки металів полягає в наступному. При іскровому розряді сфокусований потік електронів, прямує з великою швидкістю від одного електрода до іншого, створює на поверхнях електродів ударні хвилі стиснення, тиск яких у багато разів перевищує межу міцності електродів. Утворення ударної хвилі стиснення супроводжується місцевим підвищенням температури і деякою деформацією поверхні.

Виникає в металі механічне напруження з певною швидкістю поширюється в усіх напрямках, включаючи і те, звідки прийшла ударна хвиля. Досягнувши первісної поверхні і відбившись від неї, ударна хвиля змінює знак на зворотний, тобто на поверхні виникають напруження розтягу, які у багато разів перевищують межу міцності при розтягуванні. В результаті цього відбувається викид частинок металу в напрямку, зустрічному ударної хвилі стиснення. Розрізняють чотири різновиди верстатів для електроерозійної обробки металів. Найбільша ефективність цих верстатів обмежується відповідними областями застосування.

5.2. Методи обробки

5.2.1. Електроіскрова обробка

Оснoву електроіскрового методу обробки металів становить процес електроерозії металів. Сутність його полягає в тому, що під впливом коротких іскрових розрядів, що посилаються джерелом електричного струму, метал руйнується. При обробці на електроіскровому верстаті для прошивки отворів (рис. 5.1, а) заготовку 2 занурюють в бак з рідиною і з'єднують з позитивним полюсом, який виконує функції анода. Електрод (інструмент) 4, що є катодом, з'єднують з негативним полюсом і зміцнюють на повзуні 5, що має вертикальне переміщення по напрямних 6 [15]. Заготовка 2, стіл 1, на якому її закріплюють, корпус бака і станина верстата електрично з'єднані між собою і заземлені, так що їх електричний потенціал завжди дорівнює нулю. Це необхідно для безпеки при роботі на верстаті.

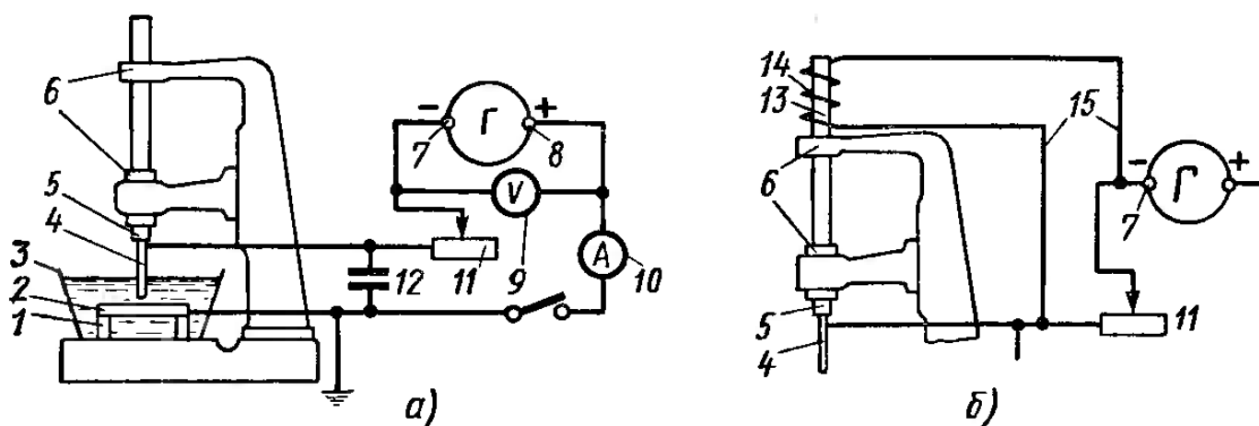


Рис 5.1 - Верстат для електроіскрової прошивки (а), та соленоїдний редуктор (б).

Якщо, опустивши повзун 5, доторкнутися електродом 4 до заготовки 2, то в електричному ланцюзі піде електричний струм від негативної клеми 7 генератора Г до позитивної клеми 8. В електричне коло включений резистор 11 - котушка з довгого тонкого дроту. Змінюючи опір резистора, можна регулювати силу струму, контролюючи її по амперметру 10.

Для того щоб отримати імпульсні розряди, які безперервно йдуть один за одним, між електродом 4 і заготовкою 2 в електричну схему верстата включається конденсаторна батарея 12. Її включають паралельно заготовці 2 і електроду 4. Якщо замкнути вимикач електричного кола при розведених електродах верстата,

то в перший момент стрілка амперметра 10 різко відхилиться і поступово повернеться на «0». стрілка вольтметра 9 навпаки, плавно відхилиться від того значення напруги, яке створюється генератором. Це означає, що сталася зарядка конденсаторів. Тепер можна наблизити електрод до заготовки. Як тільки відстань між ними стане невеликою, відбудеться електричний розряд. При цьому вся енергія, накопичена в конденсаторах, розрядиться в проміжку між електродом і заготовкою у вигляді дугового розряду, який створює на поверхні високу температуру $4000...5000^{\circ}\text{C}$, і чим більше запас енергії, тим більше буде електрична ерозія анода (заготовки).

Після розряду електричний струм між електродом і деталлю зникне, так як вся енергія, накопичена в конденсаторах, витрачена і знову починається зарядка конденсаторної батареї. Наступний розряд відбудеться як тільки конденсатори зарядяться. Цей процес відбувається безперервно, імпульсні розряди слідують один за одним до тих пір, поки не закінчиться обробка.

Під час обробки електрод 4 не повинен доторкатися до заготовки, інакше відбудеться коротке замикання. Між електродом 4 і заготовкою завжди повинен підтримуватися невеликий, так називаємий іскровий проміжок. Це досягається за допомогою різних пристроїв. Найбільш простий пристрій - соленоїдний регулятор (рис. 5.1, б). До верхнього кінця повзуна 5 приєднаний сталений стрижень-сердечник 13, який входить всередину котушки (соленоїда) 14, приєднаної до основного ланцюга. Приєднання зроблено по різних сторонах резистора 11 так, щоб кінці проводів 15 знаходилися під різними потенціалами.

Коли електрод 4 доторкнеться до заготовки, електричний ланцюг верстата замкнеться і в ній потече електричний струм. Тоді на кінцях котушки 14 створюється різниця потенціалів, і в ній також потече електричний струм. Сердечник 13 намагнітиться та підніметься в котушку 14, піднімаючи разом з собою повзун 5 та електрод 4. Іскровий проміжок 3, між електродом 4 та заготовкою 2 відновиться, і основний електричний ланцюг виявиться розірваним - струм в ній зникне. Одночасно зникне ток у котушці соленоїда. Сердечник 13 розмагнітиться, перестане втягуватися в котушку і під дією власної ваги опуститься. Разом з ним опустяться повзун 5 і електрод 4. Між електродом і

заготовкою знову відбудеться електричний розряд. По мірі поглиблення отвору електрод буде опускатися під дією сили тяжіння.

Так буде тривати, поки йде процес прошивки отвору. Соленоїдний регулятор автоматично поступово опускає електрод по мірі збільшення глибини отвору. Якщо електрод можна порівняти з інструментом, то соленоїдний регулятор може бути уподібнений механізму подачі.

Електроди, що використовуються при електроіскровий прошивці, роблять з м'якої латуні. Електрод повинен мати профіль, подібний профілю отвору, який прошивається. Якщо діаметр отвору більше 6 мм, то електрод краще робити пустотілим. Продуктивність верстатів невелика - порядку 20 м³/хв.

Електроіскровою прошивкою вдається виготовляти отвори з криволінійною віссю (рис. 5.2). Електрод 2 з латунної проволочки зігнутий по дузі кола, радіус якого рівний радіусі закріплення осі отвору. Електрод закріплено в тримачі 3, який може повертатися навколо осі 1 [14]. Тримач 3 навколо осі 1 повертається за допомогою шнура 4, верхній кінець якого прикріплений до соленоїдного регулятора. В іншому процес відбувається так само, як і при прошивці отворів з прямолінійною віссю.

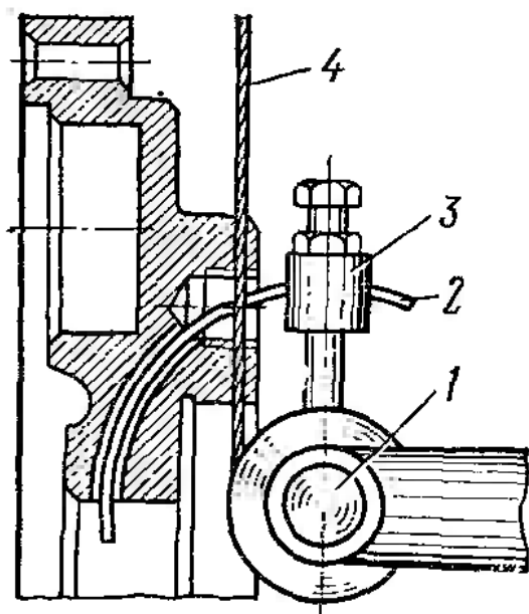


Рис. 5.2 - Прошивка отворів з криволінійною віссю.

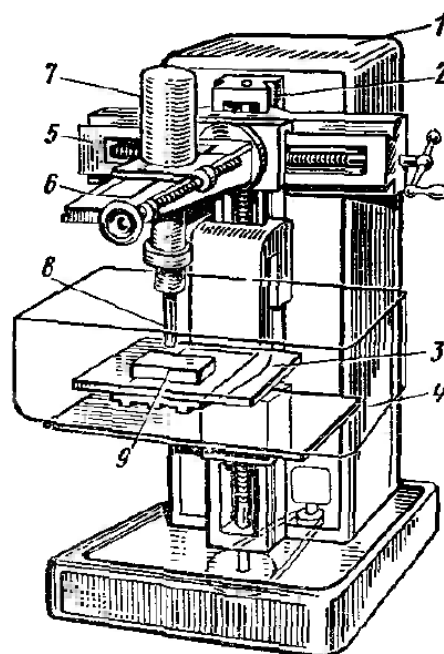


Рис. 5.3 - Універсальний електроіскровий верстат.

Універсальні електроіскрові верстати зазвичай мають вертикальну компоновку (рис. 5.3). Автоматичний регулятор подач 7 повідомляє вертикальні переміщення електроду-інструменту 8. Ванну 4 із заготовкою 9, встановленою на столі 3, можна переміщати у вертикальному напрямку за допомогою електродвигуна. Супорт 5 при обробці отворів з криволінійною віссю повертається навколо горизонтальної осі. Поперечний супорт 6 переміщається по напрямних поздовжнього супорта. Поздовжній супорт 5 встановлений на напрямних 2 станини. Механізми верстата знаходяться всередині корпусу 1.

5.2.2. Електроімпульсна обробка

Електроіскровий метод обробки металів витіснений електроімпульсною обробкою. Це пояснюється тим, що електроіскрова обробка має ряд серйозних недоліків: продуктивність порівняно низька; знос електрода-інструменту відносно великий (наприклад, знос латунних електродів становить 25-30% обсягу металу, знятого з заготовки), що значно здорожує цей вид обробки і ускладнює отримання необхідної точності. Крім того, електроіскрова обробка вимагає великої витрати електроенергії. Електроімпульсний спосіб обробки металів не позбавлений повністю недоліків електроіскрового методу, однак є більш продуктивним.

В принциповій схемі (рис. 5.4) електроімпульсного верстата відсутні конденсатори, які були потрібні в електроіскровому верстаті для отримання імпульсних розрядів. У електроімпульсному верстаті імпульсні розряди, необхідні для електричної ерозії створюються в спеціальному генераторі імпульсів. Роль такого генератора імпульсів грають перетворювач 1 і селеновий випрямляч 2. Перетворювач 1 змінює (перетворює) напругу і частоту змінного струму; його підключають до заводської мережі (напруга 380 В, частота 50 Гц). На вихідних затискачах

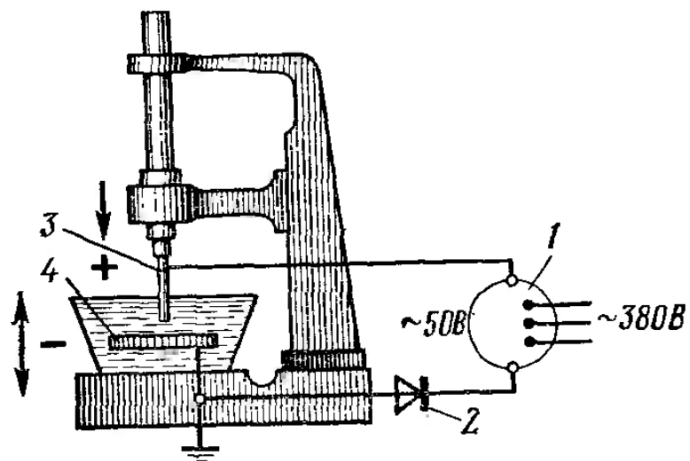


Рис. 5.4 - Принципова схема верстата для електроімпульсної обробки.

перетворювача отримують струм з більш низькою напругою (50 В) і підвищеною частотою (490 Гц). Селеновий випрямляч 2 пропускає струм тільки в одному напрямку. Таким чином, протягом 1 секунди отримують 490 імпульсів. При цьому між електродом 3 і заготовкою 4 відбуваються електричні розряди. Заготівлі повідомляється коливальний рух в напрямку подачі, що оберігає електроди від короткого замикання.

На відміну від електроіскрового методу обробки при електроімпульсному процесі заготовка з'єднана з катодом електричного ланцюга, а інструмент - з анодом. Обробку ведуть в рідкому середовищі (в маслах низької в'язкості: індустриальне 12, трансформаторне, а також в гасі і ін.). Електроди виготовляють з міді, алюмінію, чавуну, графіту тощо. Процес електроімпульсної обробки заснований на розплавленні малих обсягів металу електродів в тих місцях, де між ними проскакують електричні розряди. Кожен розряд знімає дуже невелику кількість металу, але так як розряди відбуваються дуже часто, один за одним, то загальний обсяг металу досить великий. У міру знімання металу електроду-інструменту повідомляється подача.

Електроімпульсний метод дозволяє проводити обробку на невеликих площах (до 180 см²) з високою продуктивністю (4000 мм³/хв).

5.2.3. Анодно-механічна обробка

При анодно-механічному різанні (рис. 5.5) електрод-інструмент роблять зазвичай у вигляді диска, що швидко обертається навколо своєї осі. У простір між оброблюваною заготовкою 1 і обертовим електродом-диском 2 подається по трубці 3 електроліт. Електрод-диск, виготовлений з м'якої сталі, і заготовка приєднані, як при електроіскровій обробці, до генератора постійного струму 4 (диск - до негативної, а деталь - до позитивної клем). На відміну від електроіскрової обробки рідина, яка знаходиться між електродом-диском

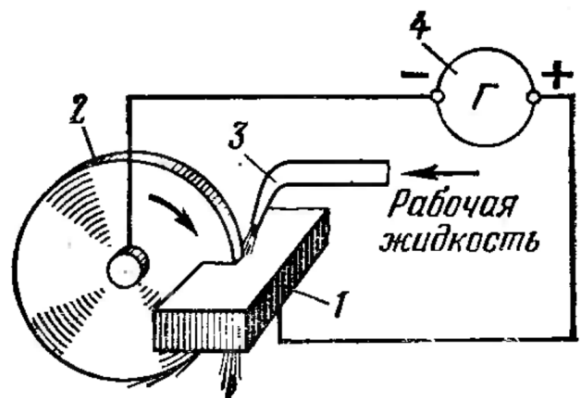


Рис. 5.5 - Схема анодно-механічного різання.

та заготовкою проводить електричний струм. Через контакт диска з заготовкою та наявності електроліту - між заготовкою і диском неперервно проходить електричний струм. При анодно-механічному різанні диск має повільну поперечну подачу.

Сутність процесу полягає в наступному. Рідина-електроліт, яка подається в простір між диском 1 і заготовкою 2 розчиняє під дією струму метал, утворюючи на поверхні заготовки тонку плівку 3 (рис. 5.6, а). Плівка, що має низьку міцність, легко зіскоблюється диском. На її місці знову утворюється плівка, яка знову зчищається диском при подальшому його обертанні. Таким чином, безперервно відбувається роз'їдання поверхні деталі.

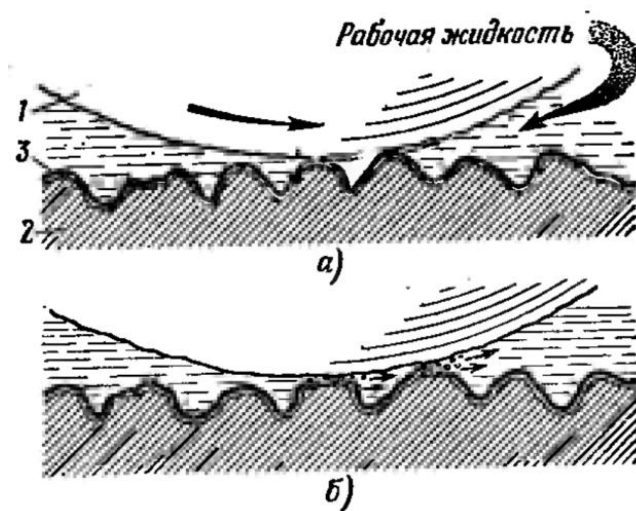


Рис. 5.6 - Процеси, які мають місце при анодно-механічному різанні

- а) електрохімічний розчин;
- б) електрична ерозія.

Вершини нерівностей на поверхні заготовки (рис. 5.6, б) відокремлені від диска дуже невеликим проміжком, через який легко проскакує розряд, і піддаються електричній ерозії: вони розплавляються і частинки виносяться обертним диском з місця розрізу в вигляді снопа іскор. Таким чином, при анодно-механічній обробці відбуваються одночасно два процеси: електромеханічне роз'їдання поверхні і електрична ерозія. В якості робочої рідини-електроліту застосовують водний розчин силікату натрію.

Анодно-механічна обробка набула найбільшого поширення при різанні металевих заготовок і заточування різальних інструментів; цю обробку можна використовувати і для чистового доведення поверхонь [4]. Для анодно-механічного різання застосовують верстати різних конструкцій (рис. 5.7). Розрізуваний пруток 10 затискають в лещатах 9. Диск 3 з листової сталі закріплено на вісі, розташованій в маятнику 4, який може повертатися навколо вісі 6. Поворотом маятника забезпечується необхідна подача. Подача регулюється гідравлічним регулятором 5. Диск обертається від електродвигуна 7 за допомогою

ремінної передачі. Робоча рідина подається насосом 11 до сопла 2. Робоча рідина збирається в коробці 1. Швидкість обертання диска зазвичай рівна 15-25 м/с, напруга 20-30 В. Силу струму обирають в залежності від діаметра розрізуваного прутка.

Площина різання отримується доволі чистою і не потребує ніякої додаткової обробки.

При анодно-механічній заточці (рис. 5.8) інструмент 3 закріплюють в лещатах 4, які приєднують до позитивного зажиму генератора постійного струму. Заточка відбувається диском 1, що обертається (виготовляється з міді, чавуну або низьковуглецевої сталі). В зоні контакту заточуваного інструменту з диском подається через сопло 2 робоча рідина.

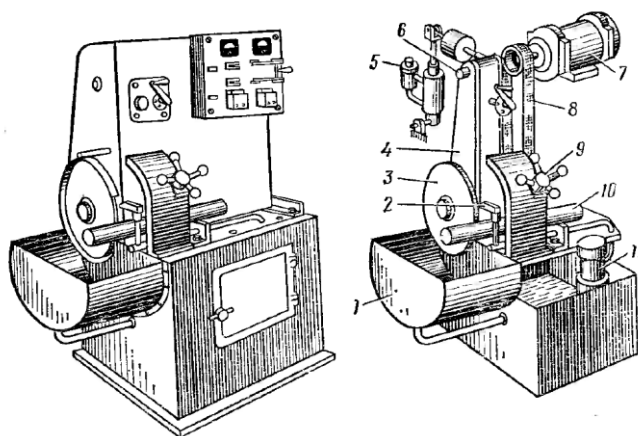


Рис. 5.7 - Верстат для анодно-механічної обробки.

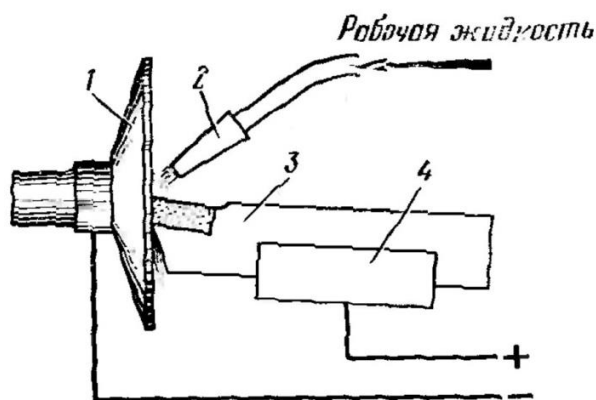


Рис. 5.8 - Схема анодно-механічної заточки інструменту.

Анодно-механічну заточку і доведення виконують за три переходи: обдирку, шліфування і доведення. Всі ці переходи виконують на одному і тому ж верстаті за одну установку заточуємого інструмента, змінюють тільки електричні режими обробки. Обдирання ведуть при напрузі 20 В, шліфування - при напрузі 15 В; при доведенні напругу знижують до 10 В. В результаті зміни напруги змінюється і характер обробки. При обдирці знімається великий шар металу (1,0...1,5 мм). Це необхідно для того, щоб придати інструменту необхідну форму. При шліфуванні глибина знімаємого шару не перевищує 0,1 мм. Доводкою знімається незначний шар - 0,01...0,03 мм.

5.2.4. Електрохімікогідравлічна обробка

Спосіб заснований на анодному розчиненні металу зі швидкістю потоку електроліту в міжелектродному зазорі в межах 5...50 м/с, при тиску (5...10) 10^5 н/м² і робочій напрузі 5...24 В. Зазор між електродами підтримується близько 0,01...0,5 мм. Як електрод-інструмент застосовують нержавіючу сталь і латунь. Чистота обробки досягає 6...9-го класу. Копіювально-прошивальні операції здійснюються при поступальному русі катода-інструменту. Його форма копіюється на деталі по всій поверхні.

На підприємстві АТ «Гідросила» використовується даний метод для скруглення гострих кромek по зубчастому профілю шестерень. Виконується така операція на спеціальній установці, після зубообробних і шліфувальних операцій. Схема електрохімічної установки представлена на рис. 5.9, а загальний вигляд - на рис. 5.10.

Працює установка в такій послідовності: після встановлення десяти деталей на оправці 1, закривають кришку установки і вмикають цикл. При включенні приводиться в обертання електрод-інструмент 2, який знаходиться в зачепленні з оброблюваними шестернями, що встановлені в оправці 1. При цьому одночасно включається прокачування електроліту і через пази головки подається в зону обробки. В процесі взаємної обкатки електрод-інструменту і деталей під дією електричного струму і електроліту здійснюється електрохімічне розчинення гострих кромek і задирок на профілях зубців.

Установка має бак об'ємом 200 літрів для електроліту. На даний об'єм склад електроліту наступний:

- нітрат натрію NaNO_3 ГОСТ 828-77 – 15...30% (50...60 кг);
- нітрит натрію NaNO_2 ГОСТ 19906-74 – 0,3...0,4% (0,6...0,8 кг);
- гліцерин ГОСТ 6824-76 – 1...2% (3...4 л);
- все інше - вода.

Заміна електроліту здійснюється один раз на місяць, а контроль його якості проводиться універсальним індикаторним папером зі шкалою РН-10 один раз на тиждень.

Для показаної на рис. 5.10 технологічної операції встановлені наступні режими обробки: напруга 17 В, струм 60 А, цикл 2,6 хв.

Характерною ознакою установки є робота її в аверсно-реверсному режимі (тобто, спочатку деталі обертаються в одну сторону, а потім у зворотному напрямку).

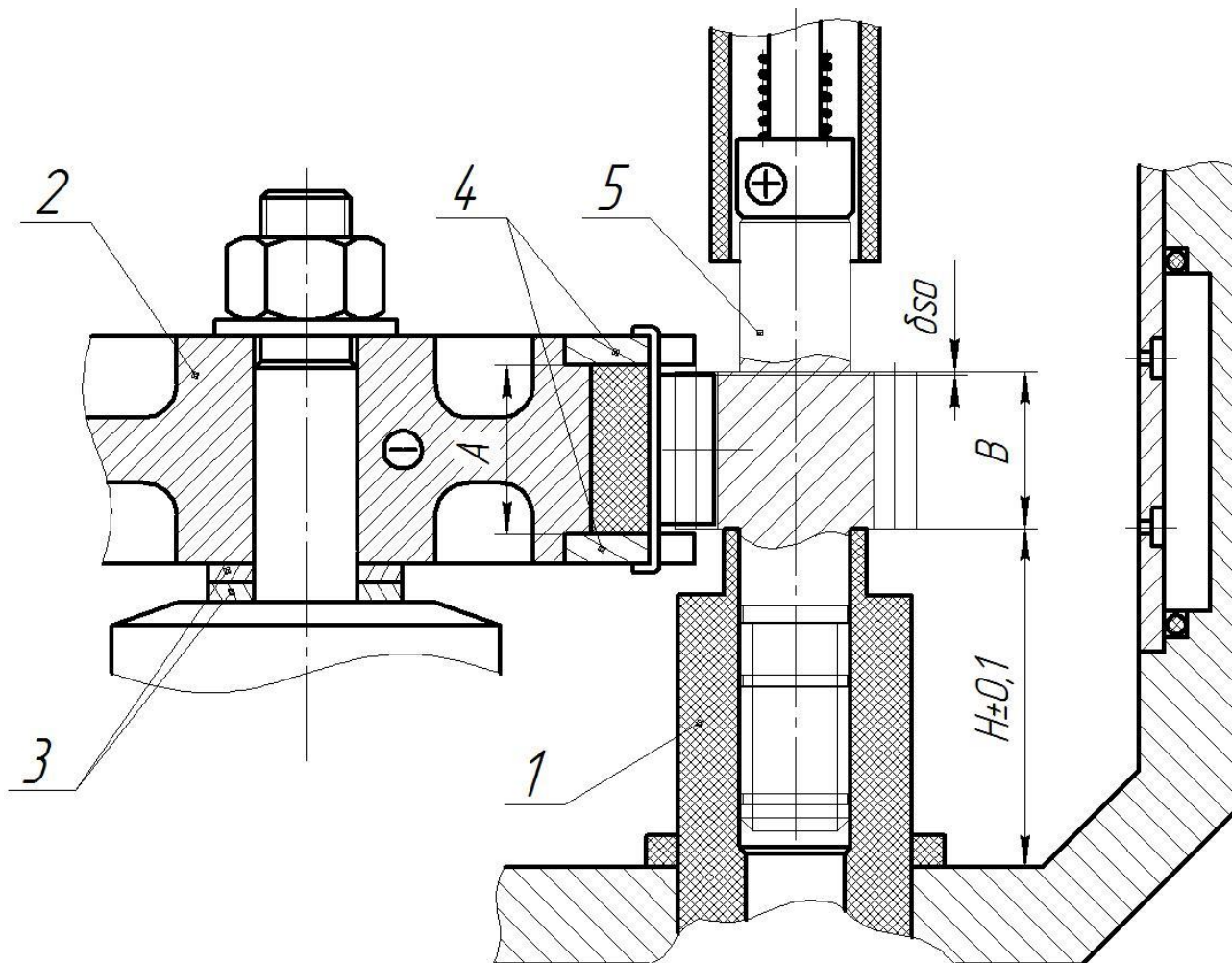


Рис. 5.9 - Схема електрохімічної установки для обробки шестерні ведучої

1 – оправка; 2 – электрод-інструмент; 3 – шайби для регулювання;
4 – диски-електроди; 5 – шестерні; δ_{so} – осьовий міжелектродний зазор;
B – ширина шестерні; H – установочна висота.

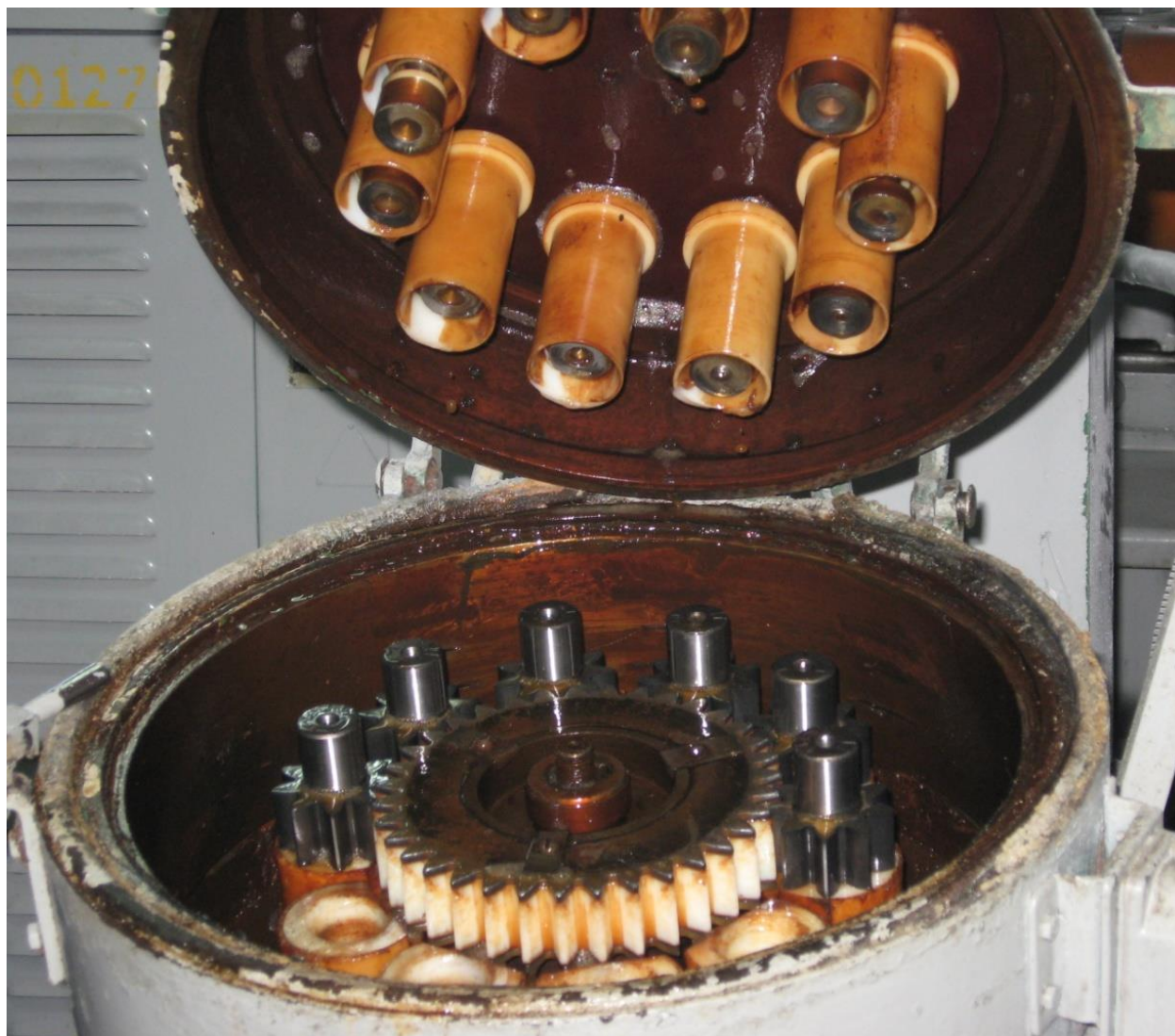


Рис. 5.10 – Загальний вигляд електрохімічної установки для обробки шестерні ведучої НШ-100-3-03.

6.1. Поняття фрезерної обробки

Фрезерування являється одним із самих розповсюджених видів механічної обробки. Цим способом виконують чорнову, напівчистову та чистову обробку елементарних та фасонних поверхонь заготовок із чавуна, сталі, кольорових металів та пластмас.

Фрезерування реалізовується двома способами [5]. Розрізняють **зустрічне фрезерування** (рис. 6.1, а), при якому напрямок подачі протилежний напрямку обертання фрези, та **попутне** - напрямок подачі і обертання інструменту співпадають (рис. 6.1, б).

На фрезерних верстатах відрізають заготовки, фрезерують площини, пази, уступи, криволінійні та гвинтові поверхні, тіла обертання, різі (рис. 6.2) [13].

Фрезерування характеризується високою продуктивністю, дозволяє отримувати поверхні правильної геометричної форми.

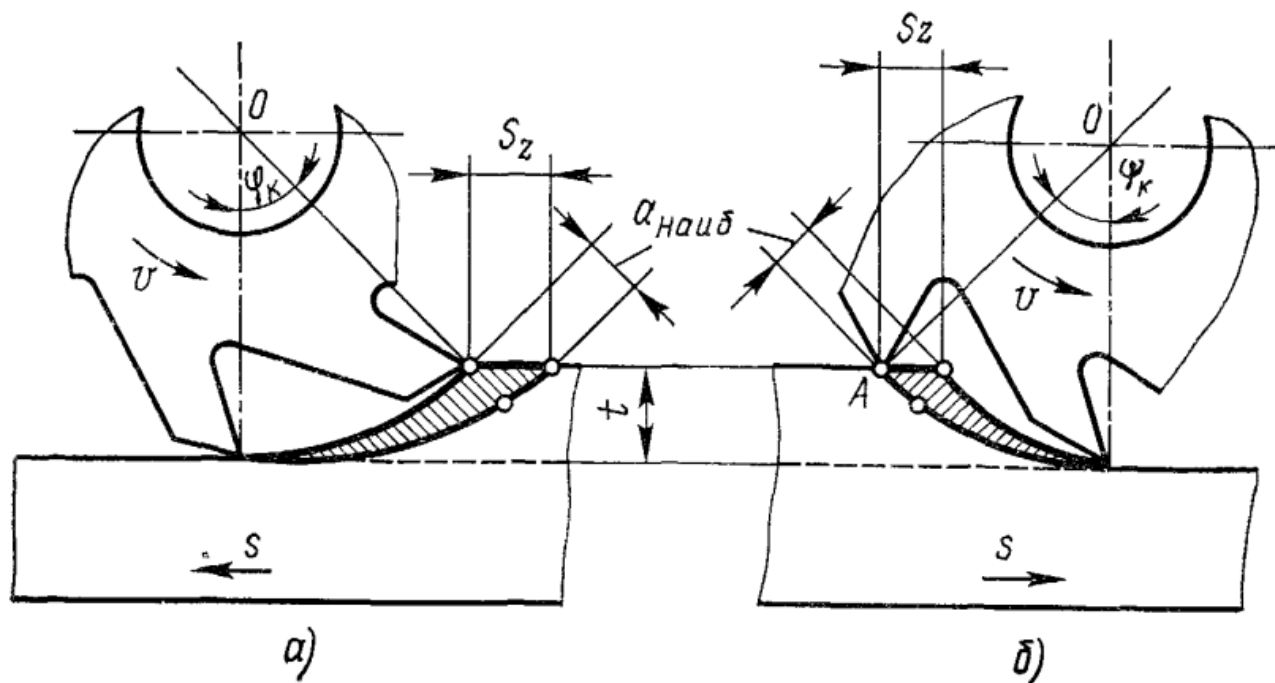


Рис. 6.1 - Способи фрезерування

а) зустрічне; б) попутне; φ_k - кут контакту фрези; $a_{\text{наиб}}$ - максимальна товщина зрізаного шару.

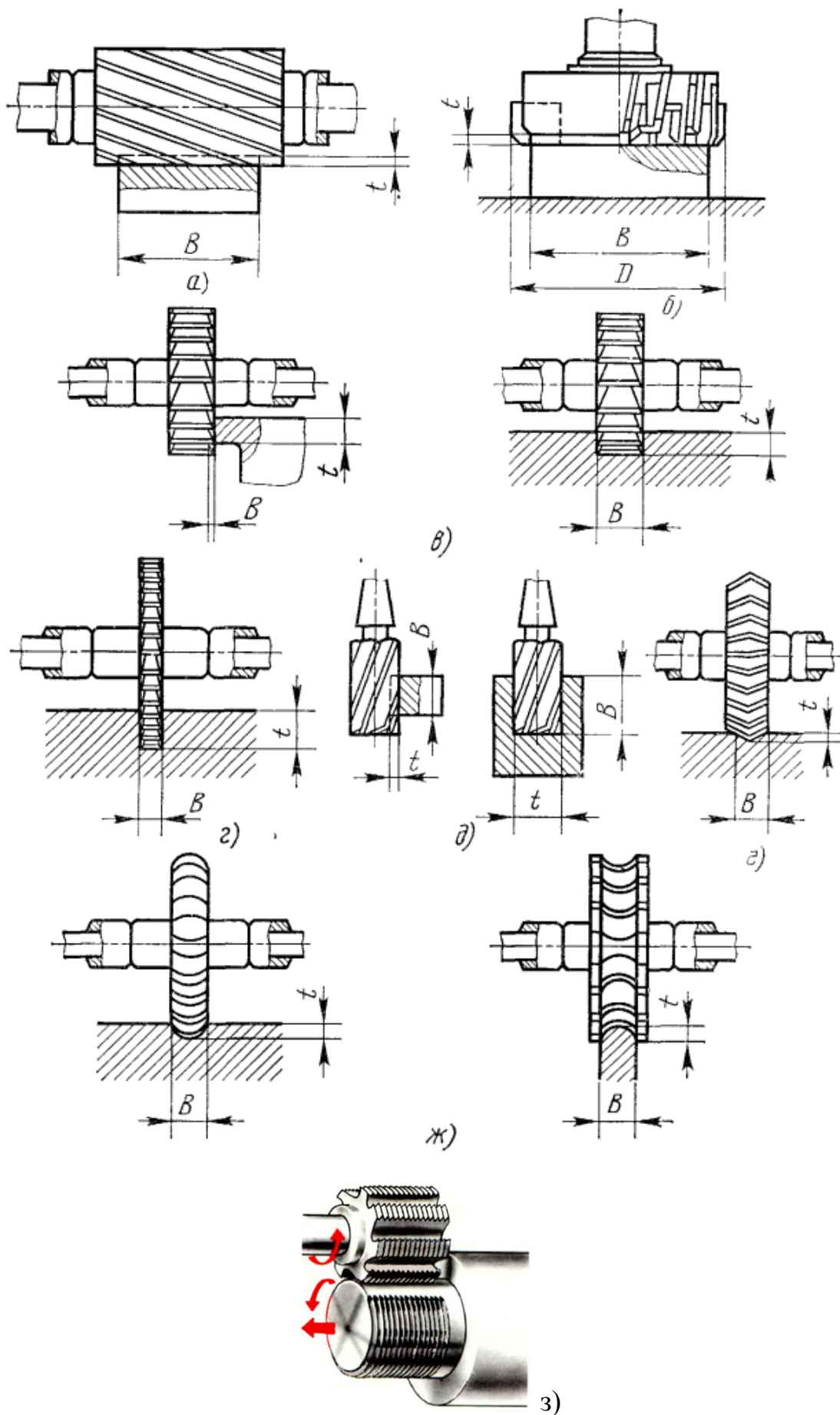


Рис. 6.2 - Основні методи обробки фрезеруванням

а) обробка циліндричною фрезою; б) торцевою фрезою; в) дисковою;
г) прорізною; д) кінцевою; е) кутовою ж) фасонною; з) різбовою.

6.2. Різальний інструмент

На рис. 6.3 показані основні елементи фрез: циліндричної (рис. 6.3, а) та торцевої (рис. 6.3, б) [9].

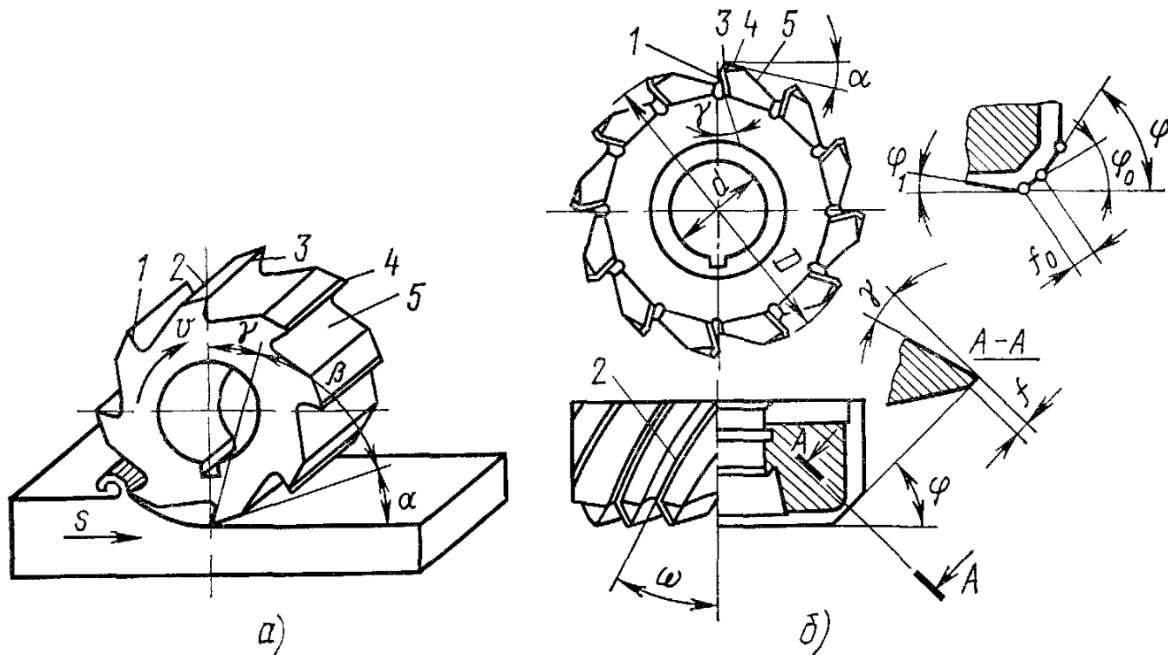


Рис. 6.3 - Елементи і геометричні параметри фрези

а) циліндрична фреза; б) торцева фреза;

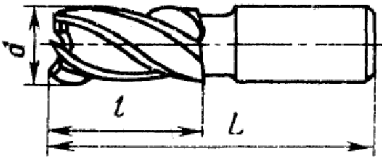
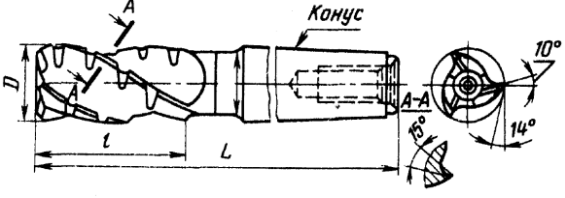
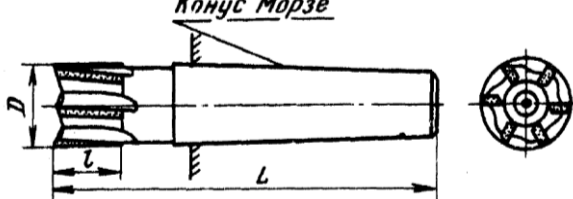
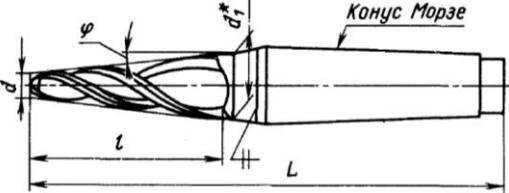
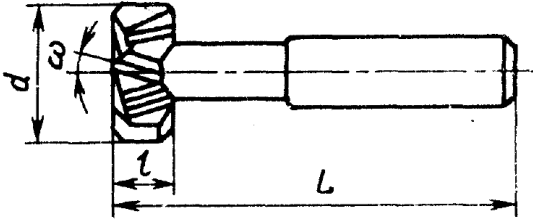
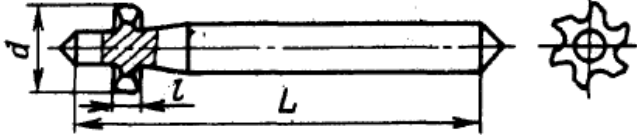
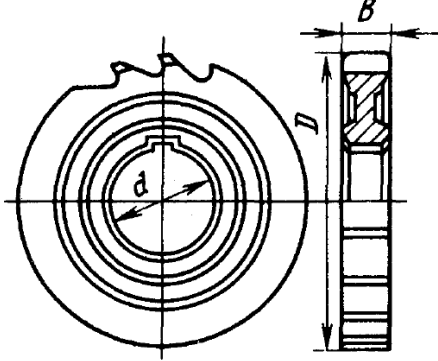
1 - передня поверхня; 2 - задня поверхня; 3 - різальна кромка;

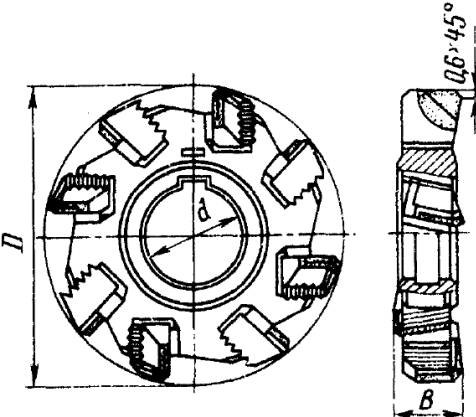
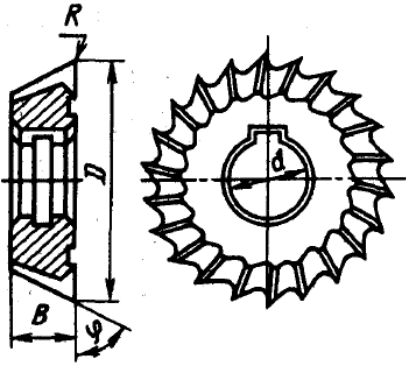
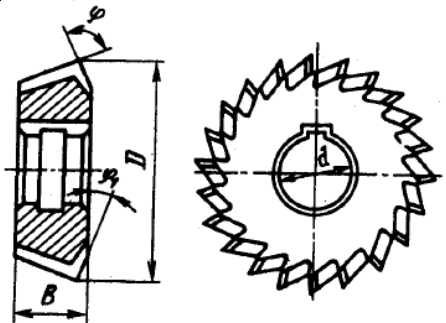
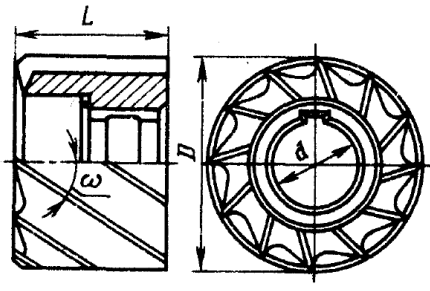
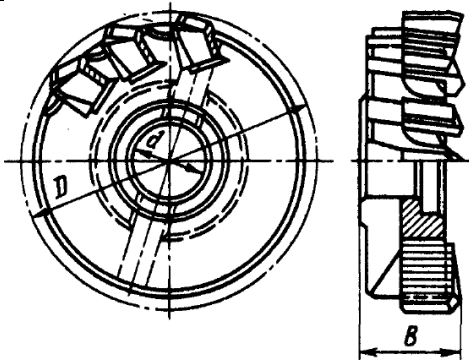
4 - стрічка; 5 - міжзубова впадина.

Всі сучасні фрези, незважаючи на своє різноманіття, можна поділити на фрези суцільні та фрези з механічним кріпленням різальних елементів.

Види фрез приведено у табл. 6.1.

Табл. 6.1.

Зображення	Тип
Кінцеві фрези	
	Кінцева фреза з циліндричним хвостовиком
	Кінцева фреза обдирна з конічним хвостовиком
	Кінцева фреза з конічним хвостовиком, оснащена прямими пластинками з твердого сплаву
	Кінцева конічна фреза з конічним хвостовиком
	Фреза для обробки Т-подібних пазів
	Фрези для пазів сегментних шпонок
Дискові фрези	
	Дискова пазова фреза

	Дискова трьохстороння фреза зі вставними ножами
	Однокутова фреза
	Двохкутова несиметрична фреза
Торцеві фрези	
	Торцева насадна фреза
	Торцева насадна фреза зі вставними ножами

6.3. Верстати

Фрезерні верстати традиційної конструкції (рис. 6.4, а, б) все більше витісняються сучасними фрезерними верстатами типу обробний центр (рис. 6.4, в). Характерними особливостями останніх є використання числового програмного керування та інструментальних магазинів з автоматизованою системою зміни інструменту.



а)



б)



в)

Рис. 6.4 - Фрезерні верстати

а) універсальний горизонтально-фрезерний; б) універсальний вертикально-фрезерний;
в) фрезерний обробний центр.

Тема 7. Верстати паралельної структури

На сьогоднішній день багато провідних країн світу займається розробкою і впровадженням у виробництво багатокоординатного обладнання паралельної структури з ланками змінної довжини. Серед країн виробників лідируючі позиції займають Німеччина, США, Японія. Інтенсивний розвиток виробництва даного обладнання спостерігається також в Італії, Франції, Швеції, Австрії.

Компанія Mikrolar (США) [24] розробляє і випускає обладнання паралельної структури, зокрема ряд моделей з ланками змінної довжини: верстат-гексапод Р3000 (рис. 7.1), який може здійснювати п'ятикоординатну гідроабразивну обробку, гексапод Р2100 (рис. 7.2), що може застосовуватися в якості поворотного столу або обробного модуля. Компанія Motoman Robotics планує використовувати модулі Р2100 для розширення технологічних можливостей роботизованих складальних ліній, що дозволить проводити механічну обробку.



Рис. 7.1 – Верстат гексапод Р3000
фірми Mikrolar (США)



Рис. 7.2 – Обробний модуль Р2100
фірми Mikrolar (США)

Японська фірма OKUMA займає провідне місце в світі по об'ємам виготовлення верстатів з ЧПУ. Одним з рішучих кроків фірми в розробці вертикальних обробних центрів є створення верстата РМ600 (рис. 7.3) на основі паралельної структури з шістьма штангами змінної довжини [26]. Дана конструкція дозволяє забезпечити повний доступ до деталі, що обробляється при

використанні більш ніж 20 типів інструментів. За допомогою цього верстата стає можливим обробка складних поверхонь і отворів під різними кутами.

СМЗ АОА (Савелівський машинобудівний завод) виготовив високошвидкісний п'ятикоординатний обробний центр ГЕКСАМЕХ-1 (рис. 7.4) [11]. Його основне призначення полягає в багатокоординатній обробці виробів складної просторової форми із конструкційних сталей, титанових і легких сплавів. Верстат може застосовуватися як в основному, так і в допоміжному виробництві на авіакосмічних, автомобільних, суднобудівних і інших машинобудівних підприємствах.



Рис. 7.3 – Верстат PM600 фірми
OKUMA (Японія)



Рис. 7.4 – Обробний центр
ГЕКСАМЕХ-1 СМЗ

Універсальні шестикоординатно-вимірювальні машини KBM-1400 СА (рис. 7.5) і KBM-1400/3000 (рис. 7.6), які розробила фірма «Лапик» [10], призначені для вимірювання геометрії різних деталей в режимах ручного або автоматичного керування. Якщо провести аналогію з звичайними портальними вимірювальними машинами, то KBM має додаткову функцію шестивимірного «ощупування», що дозволяє здійснювати: вимірювання внутрішніх поверхонь; отворів, які розміщені під кутом; сканування складної форми із заданим кутом контакту; контроль невеликих виробів, зубчатих коліс, підшипників і різьб. Максимальні кути повороту каретки навколо осей X-Y-Z складають відповідно 45°-45°-60°. Похибка вимірювання форми знаходиться в межах від 0,5 до 14 мкм.

Також КВМ може бути оснащена шпинделем для фінішної обробки деталі (технологічний модуль серії ТМ). За рахунок якого стає можливим поєднання обробки і вимірювання деталі на одному робочому місці. Наявність двох рам розділяє дванадцятиосьову конструкцію машини на систему подачі інструменту (6 силових осей) і відлікову інтерферометричну (6 вимірювальних осей). Такі властивості підвищують продуктивність при моделюванні, експериментальних роботах, а також при необхідності усунення неточностей виробу в процесі обробки.



Рис. 7.5 – Координатно- вимірювальна машина KBM-1400 СА фірми Лапик



Рис. 7.6 – Координатно-вимірювальна машина KBM-1400/3000 фірми Лапик

Німецька фірма Metrom займається розробкою багатокординатних верстатів на основі механізму пентапод [23]. Вони забезпечують п'ять ступенів вільності робочого органу, а шоста співпадає з віссю обертання шпинделя. В порівнянні з гексаподами відсутня проблема зайвої ступені вільності робочого органу, що потребує окремого приводу і системи управління. Наприклад, п'ятикоординатний фрезерний верстат P1000 (рис. 7.7) на якому можна здійснювати точіння, фрезерування, обробку фрезеруванням поверхонь обертання, некругле точіння, обробку фрезеруванням некруглих поверхонь обертання.

Одною з перспективних розробок компанії Metrom є мобільний фрезерний верстат PM 1400 (рис. 7.8), відзначений Саксонською премією в області інновацій 2009 року. За допомогою даного обладнання вирішується проблема обробки

великогабаритних деталей, оскільки закріплення рами верстата, яка має модульну конструкцію у формі ікосаедра, можливе безпосередньо до деталі. Модульна конструкція верстата дозволяє розширити його технологічні можливості: наприклад, замість шпинделя можна використовувати пристрої для лазерної обробки, зварювання тертям і розвальцовки.



Рис. 7.7 - Верстат P1000 фірми Metrom (Німеччина)



Рис. 7.8 - Верстат PM1400 фірми Metrom (Німеччина)

Основні технічні характеристики згаданого багатокоординатного обладнання з ланками змінної довжини наведені у табл. 7.1.

Таблиця 7.1

Параметри	Модель				
	P3000 Mikrolar	P2100 Mikrolar	PM600 OKUMA	ГЕКСAMEX-1 CM3	P1000 Metrom
Переміщення, мм/°					
X	1219/±15°	1420/∞	800/5°	3000/±0°	1000/>90°
Y	1219/±15°	14250/±25°	600/±15°	800/±25°	1000/
Z	203/±5°	415/±25°	380/±15°	700/±30°	600/
Точність, мм	±0,05	±0,05	±0,05	±0,05	0,01
Частота обертання шпинделя, хв ⁻¹	-	-	50-12000	24000	15000-24000
Потужність шпинделя, кВт	-	-	12	30/95	14-25
Габарити верстата, мм	1524x 1524x1000	1067x 1219x1000	3430x 2405x2830	9600x 3800x4100	2405x 2830x3430
Маса верстата, кг	450	450	10700	9700	10000

В Україні останнім часом активізувався напрямок проектування і дослідження верстатів паралельної структури, що в свою чергу спроможне підняти машинобудування на новий рівень розвитку. Зокрема, в НТУУ «КПІ» і ЦНТУ був розроблений дослідний зразок багатокоординатного верстату типу гексапод (рис. 7.9) [12]. Верстат призначений для обробки криволінійних поверхонь деталей з дерева, легких сплавів з точністю $0,1 \dots 0,2$ мм. Також на базі ЦНТУ був створений дослідний зразок багатокоординатного верстату типу пентапод (рис. 7.10) [8].

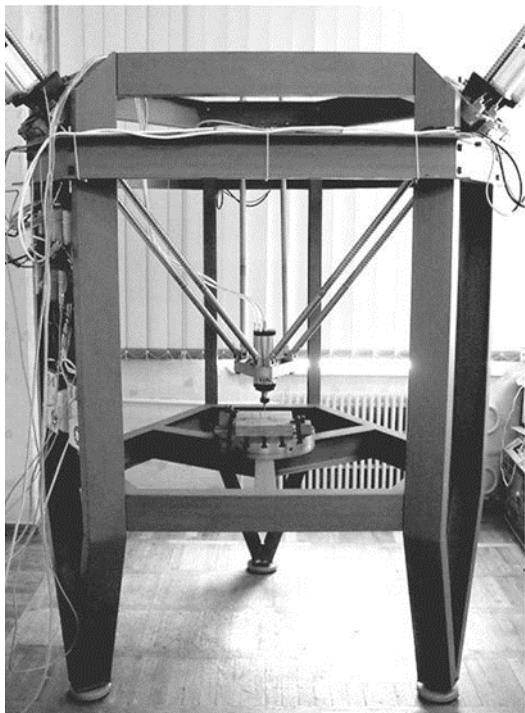


Рис. 7.9 – Дослідний зразок багатокоординатного верстата-гексапода (НТУУ «КПІ», ЦНТУ)

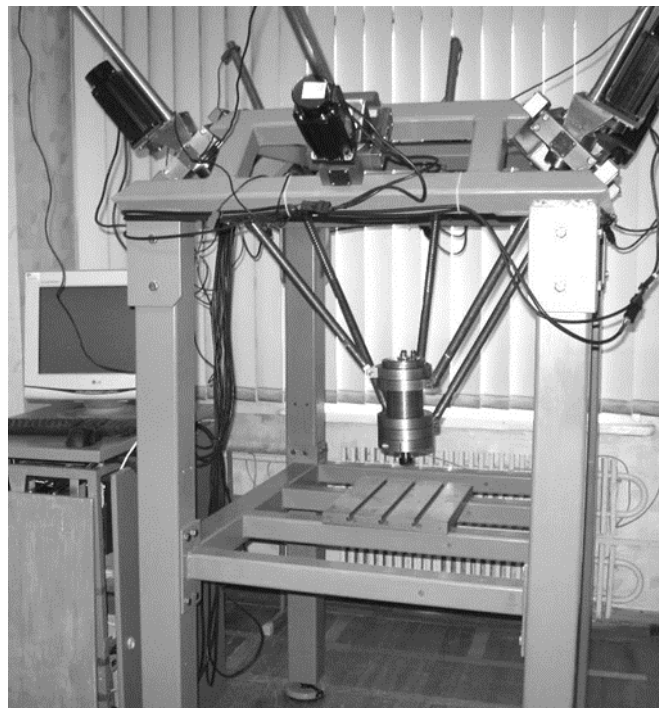


Рис. 7.10 – Дослідний зразок багатокоординатного верстата-пентапод (ЦНТУ, Україна)

Тема 8. Конструкції та принцип дії 3-D принтера

8.1. Поняття 3-D друку

Технологія 3D-друку була запатентована в 80-х роках минулого століття, але популярність та розповсюдженість набула відносно недавно. Були розроблені нові, перспективні методики завдяки яким можливості технологій 3D-друку вийшли на абсолютно новий рівень [1].

Якщо коротко, 3D-друк – це методика виготовлення об'ємних виробів на основі цифрових моделей. Незалежно від конкретної технології, суть процесу полягає не у видаленні матеріалу, як при традиційних технологіях механічної обробки, а на пошаровому відтворенні виробу за тривимірною моделлю, що створена в спеціальній комп'ютерній програмі, за рахунок додавання матеріалу у вигляді пластикових, керамічних, металевих порошків та їх зв'язування термічним, дифузійним або клейовим методом.

У цьому процесі використовується спеціальний пристрій – 3D-принтер, який друкує певними видами матеріалів. Інші назви технології – швидке прототипування чи адитивне виробництво. Часто словосполучення «адитивні технології» використовується у значенні «3D-друк».

Процес 3D-друку можна умовно розділити на етапи:

- 3D-моделювання необхідного об'єкта за певними правилами;
- файл із цифровою моделлю завантажується в програму-**слайсер**, в якій встановлюються необхідні параметри 3D-друку та генерується код керування для 3D-принтера;
- згенерований код записується на знімний носій пам'яті, який підключається до 3D-принтера;
- комп'ютерна 3D-модель відтворюється з матеріалу.

Відтворення об'єктів відбувається поступово. За необхідною формою шар за шаром наноситься обраний матеріал, формуючи готовий виріб.

Варто зазначити, що можливості 3D-друку дуже широкі, тобто можна виготовити деталі різноманітних конфігурацій. Також, різноманітні галузі застосування 3D-друку. Друга назва технології – швидке прототипування –

говорить сама за себе. При виготовленні прототипів і макетів моделей 3D-друк може бути просто незамінним. Також він є дуже вигідним рішенням для дрібносерійного виробництва. В аерокосмічній та автомобільній промисловості 3D-технології вже на повну силу застосовуються через високу рентабельність і швидкість виготовлення компонентів. Кулінари працюють над розвитком харчових 3D-принтерів, а в медицині 3D-друк став чимось на зразок технології майбутнього. За допомогою 3D-біодруку планується виробництво кісток, органів та живих тканин, а поки що на 3D-принтерах друкують імплантати та повноцінні лікарські засоби. Настільні 3D-принтери можуть використовуватися з побутовою метою: для ремонту, виготовлення різних домашніх дрібниць і так далі. А дизайнери, модельєри, скульптори та художники високо цінують можливості 3D-друку та 3D-моделювання як незвичайний спосіб реалізації свого таланту.

8.2. Технології 3D-друку

Для відтворення різноманітних об'єктів використовуються різні технології 3D-друку. Вони відрізняються як застосовуваними витратними матеріалами, так і швидкістю та точністю друку.

Загалом, адитивні технології можна розрізняти за [3]:

- методом фіксації шару: фотополімеризація, сплавлення, склеювання;
- типом конструктивних матеріалів: рідкі, сипучі, ниткоподібні чи пруткові, листові або плівкові;
- ключовою технологією: лазерні, нелазерні.

Перерахуємо основні технології 3D-друку:

- Моделювання методом наплавлення (Fused deposition modeling, **FDM**). Одна з найпоширеніших технологій 3D-друку, застосовується в більшості настільних 3D-принтерів і є ідеальним співвідношенням ціна/якість. Друк відбувається за допомогою пошарової подачі нитки розплавленого пластику (рис. 8.1) [18]. Робочий матеріал подається в екструзійну головку, яка видавлює на платформу тонку нитку розплавленого матеріалу, формуючи таким чином поточний шар об'єкта, що розробляється. Далі платформа опускається на товщину одного шару, щоб можна було нанести наступний шар.

– Лазерна стереолітографія (Laser stereolithography, **SLA**). Формування об'єкта відбувається за рахунок пошарового засвічування лазером рідкої фотополімерної смоли, яка твердне під впливом випромінювання, рис. 8.2 [18]. Одна з варіацій цієї технології – DLP 3D-друк. У ній замість лазера використовується спеціальний проектор. Обидва методи 3D-друку застосовуються для створення об'єктів з високим ступенем деталізації. У випадку друку DLP додатковою перевагою є також швидкість.

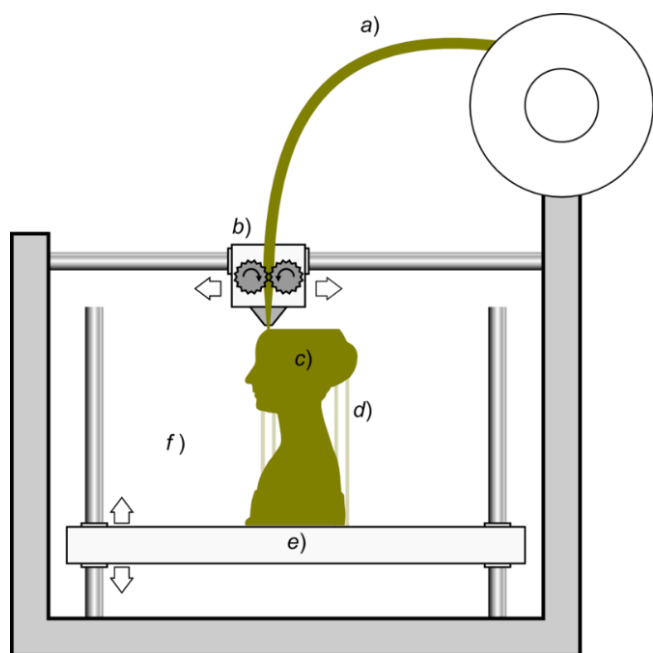


Рис. 8.1 - Схематичне зображення технології FDM

Нитка (a) з пластичного матеріалу подається через нагріту рухому головку (b), яка плавить та екструдує її, наносючи шар за шаром у бажану форму (c). Рухома платформа (e) опускається після нанесення кожного шару. Для такої технології необхідні додаткові вертикальні опорні конструкції (d) для підтримки нависаючих частин.

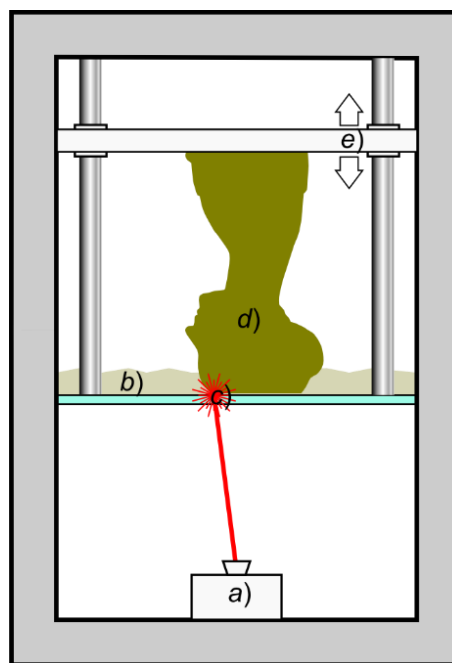


Рис. 8.2 - Схематичне зображення технології SLA

Світловипромінюючий пристрій (a) (лазер або DLP) вибірково освітлює прозоре дно (c) резервуара (b), який заповнений рідкою фотополімерною смолою; затверділа смола (d) поступово тягнеться вгору підйомною платформою (e).

- Селективне лазерне спікання (Selective laser sintering, **SLS**, а також direct metal laser sintering, **DMLS**). Відтворення виконується з допомогою пошарового плавлення спеціального порошку під впливом лазерного випромінювання (рис. 8.3) [27]. Цей метод 3D-друку широко застосовується в промисловості для виготовлення міцних металевих елементів. Порошкоподібний матеріал наноситься на платформу тонким рівномірним шаром (зазвичай спеціальним

валиком, що вирівнює), після чого лазерне випромінювання формує на поверхні поточний шар розроблюваного об'єкта. Потім платформа опускається на товщину одного шару і знову наноситься порошкоподібний матеріал. Дана технологія не потребує підтримуючих структур «елементів, що висять у повітрі», що розробляється за рахунок заповнення порожнеч порошком.

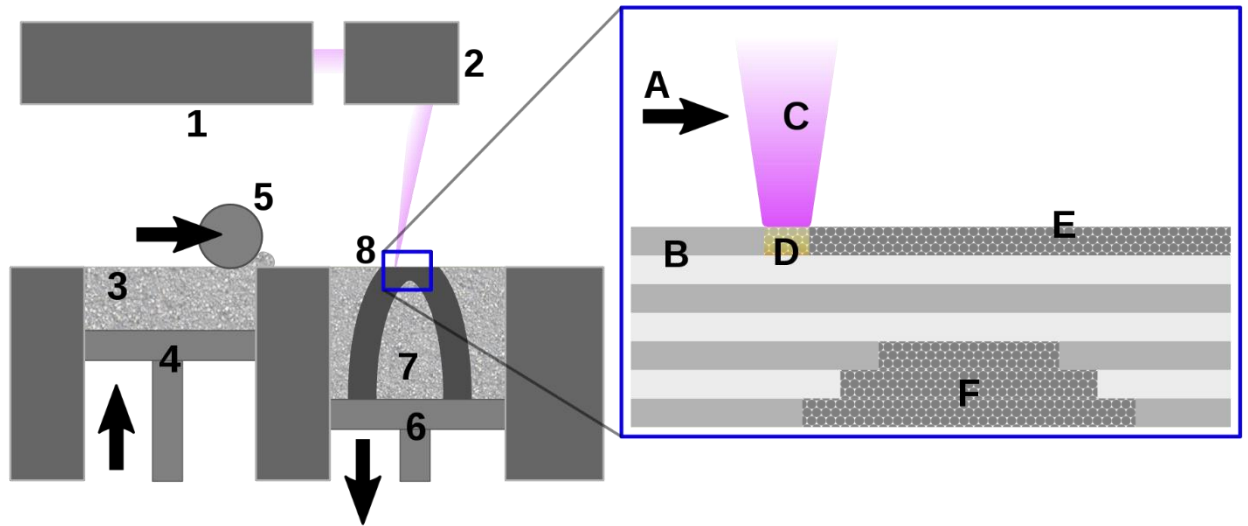


Рис. 8.3 - Схематичне зображення технології SLS

1 – лазер; 2 - система сканування; 3 - система доставки порошку; 4 - поршень подачі порошку; 5 – ролик; 6 - поршень для робочого простору; 7 - порошковий шар робочого простору; 8 - Об'єкт, що виготовляється; А - напрямок спікання лазером; В - спечені частинки порошку; С - лазерний промінь; D - лазерне спікання; E - попередньо-поміщений шар порошку; F - неспечений матеріал у попередніх шарах.

– Електронно-променева плавка (electron beam melting, **EBM**) - технологія, схожа на SLS/DMLS, тільки тут об'єкт формується шляхом плавлення металевого порошку електронним променем у вакуумі, рис. 8.4 [22].

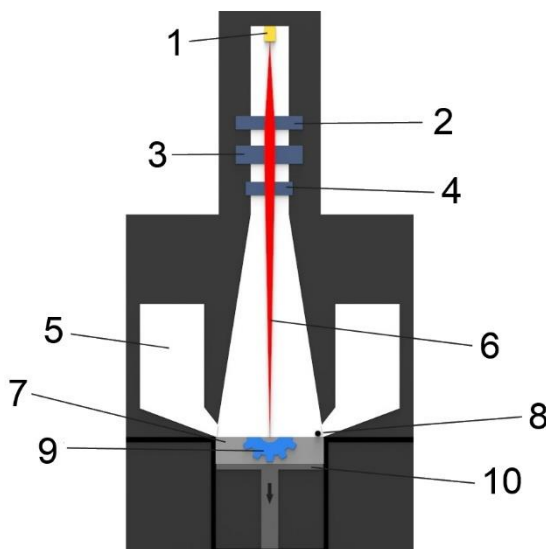


Рис. 8.4 – Схематичне зображення технології EBM

1 – джерело електронів; 2 - астигматична лінза; 3 - фокусна лінза; 4 - відбивна лінза; 5 - дозатор порошку; 6 - електронний промінь; 7 - порошок; 8 – валик; 9 - друкований об'єкт; 10 – робоча платформа.

Перелічені технології 3D-друку на сьогоднішній день успішно використовуються для [2]:

- швидкого прототипування, тобто швидкого виготовлення прототипів моделей і об'єктів для подальшого доведення. Вже на етапі проектування можна кардинальним чином змінити конструкцію вузла або об'єкта в цілому. У інженерії такий підхід здатний істотно знизити витрати у виробництві і освоєнні нової продукції.
- Створення наочних 3D-моделей. Конструкція з прозорого матеріалу дозволяє побачити роботу механізму «зсередини», що зокрема було використано інженерами Porsche при вивченні руху мастила в трансмісії автомобіля ще при розробці.
- Виготовлення деталей в технічних видах спорту, наприклад 3D-друк у авіамодельному спорті.
- Аматорського виготовлення дрібних деталей та конструкцій у домашніх умовах.
- Швидкого виробництва - виготовлення готових деталей з матеріалів, які підтримуються 3D-принтерами. Це відмінне рішення для малосерійного виробництва.
- Виробництво складних, масивних, міцних і головне недорогих систем. Прикладом є безпілотний літак Polecat компанії Lockheed, велика частина деталей якого була виготовлена методом швидкісного тривимірного друку.
- Зубного протезування та вирощування повноцінних органів. Прикладом є розробки Університету Міссурі, які дозволяють наносити на спеціальний біо-гель згустки клітин заданого типу.
- Виготовлення ракетних двигунів та космічних ракет. Прикладом є розробки американської компанії Rocket Lab.
- Виготовлення моделей і форм для ливарного виробництва.

8.3. Матеріали для 3-D друку

Технології 3D-друку дозволяють відтворювати деталі з різних матеріалів: пластмаси, металу, кераміки або скла.

Метод 3D-друку **FDM** (рис. 8.1) використовує широку номенклатуру полімерів та пластиків, різних властивостей, попередньо сформованих у дріт, який називають **філамент**, рис. 8.5.



Рис. 8.5 – Котушка з філаментом для друку за технологією FDM

Найпоширенішими видами пластику для друку є ABS, PLA та coPET, у кожного є свої переваги та особливості.

ABS (Акрилонітрилбутадієнстирол) – пластик, який синтезується з нафтопродуктів, має вищу температуру друку, ніж PLA. ABS пластик має підвищену ударну в'язкість і тому він часто використовується для прототипування [20]. Надруковані вироби з ABS можуть бути оброблені механічно та піддаватись фарбуванню, а також оброблюватися хімічно ацетоном, що забезпечить отримання глянцевої поверхні виробу. Пластик можна застосовувати для 3D-друку ювелірних виробів, таких як обручки і браслети, іграшок, сувенірів.

PLA (Полілактид) - виготовляється з органічних щорічно оновлюваних ресурсів (кукурудза, цукрова тростина). Вироби з PLA мають гляцевий зовнішній вигляд, як і з coPET. Вироби, надруковані з PLA не можуть бути використані для технічних цілей в робочих механізмах, тому що вони крихкі та не удароміцні, також температура експлуатації таких виробів не перевищує 60°C. При 3D-друці з PLA вдається одержувати вироби з високим рівнем деталізації та меншою ймовірністю появи браку.

coPET (сополімер поліетилентерефталату), як і ABS виготовляється з нафтопродуктів, має таку ж температуру друку, як і ABS. Він міцніший за ABS і PLA, тому може використовуватися для 3D-друку технічних деталей - шестерні,

втулки, елементи корпусів, тощо. coPET володіє досить високою прозорістю, що дозволяє використовувати його для 3д друку ваз, плафонів, елементів декору. Наявність додаткової гами напівпрозорих флюорисцентних кольорів збільшує список застосування coPET. Ще одна важлива особливість coPET – його висока хімічна стійкість до дії органічних розчинників, нафтопродуктів, дизельного та авіапалива, кислот, лугів, що дозволяє застосовувати елементи з цього пластику в різних галузях промисловості.

Рідка фотополімерна смола використовується у 3D-принтерах, які працюють за технологіями **SLA** та **DLP**. Головна характеристика такої смоли – твердіти під дією ультрафіолетового опромінювання.

Комерційно доступні матеріали, що використовуються для **SLS** друку, випускаються у формі порошку і включають, але не обмежуються, полімери, такі як поліаміди (PA), полістироли (PS), термопластичні еластomers (TPE) і поліарилетеркетони (PAEK). Поліаміди є найбільш часто використовуваними матеріалами SLS через їх ідеальну поведінку при спіканні як напівкристалічний термопласт, що призводить до отримання деталей із бажаними механічними властивостями. Полікарбонат (ПК) є матеріалом, що представляє великий інтерес для SLS завдяки його високій міцності, термічній стабільності та вогнестійкості; однак, такі аморфні полімери, оброблені за допомогою SLS, як правило, призводять до отримання деталей зі зниженими механічними властивостями, точністю розмірів і, таким чином, обмежуються застосуванням, де вони мають низьку важливість. Металеві матеріали також використовуються в SLS.

При друку за технологією **EBM** використовуються тільки металеві порошки, або металевий дріт. До використовуваних матеріалів входять, але не обмежуються ними, нержавіюча сталь, сплави кобальту, нікелеві сплави, сплави міді і нікелю, тантал, титанові сплави, а також багато інших високоцінних матеріалів.

8.4. Конструкція 3-D принтерів

3D-принтер – верстат з числовим програмним управлінням, що реалізує лише адитивні операції, тобто додає порції матеріалу до заготовки. Зазвичай використовує метод пошарового друку деталі.

У технології 3D-друку **FDM** можна виділити два типи систем друку і конструкцій принтерів (рис. 8.6): **декартову** і **дельта**. Найбільша відмінність між цими двома системами полягає в способі переміщення. Оскільки кожна система має свій спосіб переміщення, результати друку будуть різні [17].

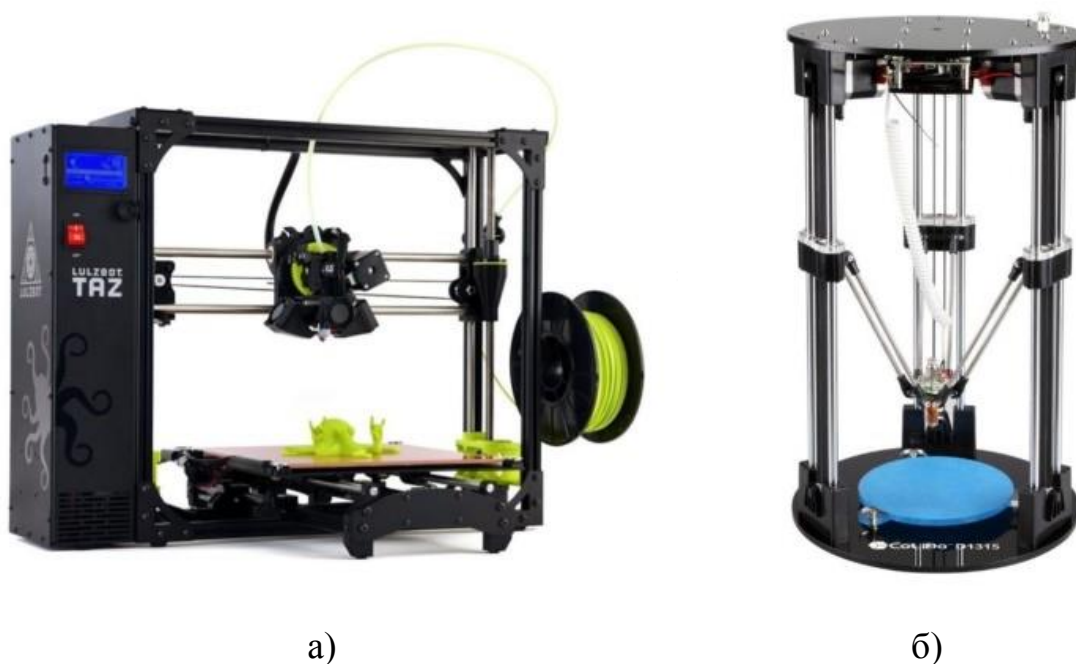


Рис. 8.6 - 3D-принтер з декартовою (а) системою друку та дельта (б).

Декартові принтери отримали свою назву завдяки використаній ними декартовій системі координат, яку винайшов Рене Декарт. Вони не лише функціонують на основі систем координат X і Y , але й керують друкувальною голівкою механізму, яка рухається лінійно по осі X і Y .

Декартові принтери рухаються зліва направо, спереду назад і вгору-вниз. Простіше кажучи, він дістається від A до B , переміщаючи лише одну вісь за раз. Більшість декартових принтерів складаються з квадратної рухомої платформи для друку. Замість того, щоб сопло рухалося до друкарського столу, у деяких випадках стіл рухається до сопла.

Недоліки декартового 3D-принтера:

- вага, зокрема вага рухомих частин виконавчого органу;
- важко модифікувати через просторові обмеження;
- немає миттєвої зміни напрямку;
- не підходить для друку високих предметів, так як втрачає точність на висоті;
- невеликий робочий об'єм.

Переваги декартового 3D-принтера:

- чудово підходить для друку широких (горизонтально) деталей;
- простіший для опанування завдяки зрозумілій кінематиці;
- дружній до споживачів;
- завдяки кубічній рамі легко друкує більшість деталей;
- дешевше.

Приклади популярних моделей декартових 3D-принтерів: Creality Ender 5, Prusa i3, Ender 3, Voxelab Aquila.

3D-принтери **дельта** також використовують декартову систему координат, але не використовують відстежуваний рух лінійного руху для осадження нитки [19]. Замість цього вони використовують три плечі, кожна з яких складається з паралелограма. Вони також переміщуються від однієї точки X або Y до іншої, але роблять це шляхом зміни кутів цих паралелограмів. Кронштейни 3D-принтера дельта звисають з нерухомої платформи. На цій платформі розміщені всі механізми, які керують рухом рук. В результаті друкуюча головка 3D-принтера дельта набагато легша, ніж якби в ній також були б двигуни для руху. Така зменшена вага призводить до зниження інерції. Зменшуючи інерцію, особливо в кінці руху, виробнича головка здатна швидко реагувати, зберігаючи при цьому свою точність.

3D-принтер дельта зазвичай має круглу платформу для друку, яка є нерухомою. Завдяки круглому друкарському ложу природна форма принтера дельта – це коло. Тому прямокутні об'єкти, як правило, досить малі в порівнянні з декартовим 3D-принтером. Чим 3D-принтер дельта краще порівняно з 3D-декартівським принтером, так це здатністю створювати високі об'єкти. Особливо найвищу точку відбитка можна зробити надзвичайно точною. Також їх досить легко зробити більше, особливо по висоті, завдяки їхньому дизайну. Завдяки менш складній конструкції та меншій кількості деталей, які потрібно використовувати, це зменшує технічне обслуговування та витрати. Якщо у вас немає багато горизонтального простору, але замість цього ви хочете побудувати багато шарів один на одного (вертикальні), тоді вам обов'язково варто розглянути 3D-принтер дельта.

Недоліки 3D-принтера дельта:

- вимагає більше місця (по висоті);
- складніше визначити помилки;
- складніше друкувати об'єкти з великими поверхнями (горизонтальні).

Переваги 3D-принтера дельта:

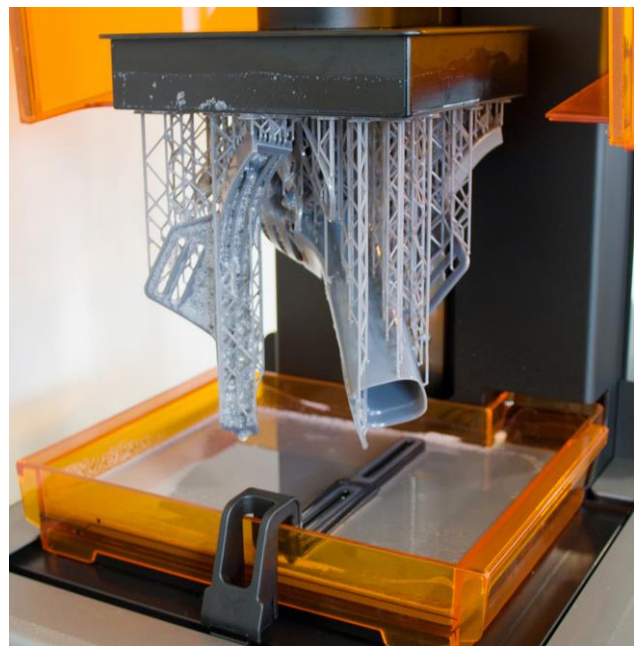
- прекрасний друк у висоту;
- легкий, тому легко пересувати;
- можлива миттєва зміна напрямку;
- точніше в центрі, ніж на зовнішніх межах;
- легко обслуговувати та модифікувати;
- висока швидкість і точність друку.

Приклади популярних моделей 3D-принтерів дельта: Monoprice Delta Pro, Flsun Q5, TEVO Little Monster.

Щодо **3D-принтерів для стереолітографії (SLA)**, то конструкція (рис. 8.7) їх повністю впливає із виробничого процесу 3D-друку цим методом (рис. 8.2): принтер використовує ємність з рідиною, яка здатна тверднути під дією ультрафіолетового лазера, утворюючи деталі із шарів.



а)



б)

Рис. 8.7 – Зовнішній вигляд 3D-принтера SLA (а) та його робоча зона (б).

Конструкція таких принтерів відносно одноманітна, незалежно від фірми-виробника. Принтер складається з платформи, на якій буде розміщена надрукована деталь, ємності із фотополімерною смолою, направляючою по вісі Z, станини та електронних компонентів.

Стосовно **3D-принтерів** для селективного лазерного спікання **SLS** (рис. 8.8) та електронно-променевої плавки **EBM** (рис. 8.9), то вони являють собою закриту конструкцію з ізолюваною робочою зоною, з огляду на специфіку роботи (рис. 8.3, рис. 8.4): SLS – робота з мілкодисперсним порошком, а для EBM – ще й робота у вакуумі.



Рис. 8.8 – Принтер SLS
Sinterit Lisa.



Рис. 8.9 – Принтер EBM
Arcam Q10plus.

Тема 9. Верстати комбінованої структури

Протягом довгих років не вщухає суперечка про те, що краще: володіти декількома спеціальностями чи майстерно виконувати одну роботу? Відповідь це питання отримати так і не вдається. Якщо розглядати комбіновані верстати, то вони поєднують у собі вміння свердлити, стругати, точити і фрезерувати. Розглянемо, як виробникам верстатів вдається комбінувати ці компоненти.

9.1. Комбіновані верстати на базі токарно-фрезерної обробки

Взагалі, токарно-фрезерні обробні центри дозволяють виконувати обробку на одному верстаті просто величезної кількості функціональних поверхонь деталей, які мають місце в сучасному машинобудуванні, а саме: тіла обертання, пази, площини, отвори, шліци, зубчасті зачеплення, фасонні полігональні поверхні.

Поєднання в одному верстаті токарної та фрезерної обробки на теперішній час отримало найбільшого розповсюдження. Окрім очевидного оснащення токарного верстату вертикальним шпінделем для можливості здійснення фрезерної обробки, рис. 9.1, різні виробники по різному втілюють свої бачення комбінованого токарно-фрезерного обробного центру.

Австрійська фірма WFL реалізує модельний ряд верстатів MILLTURN [25]. Приведені обробні центри дозволяють виконувати 5-ти вісєву обробку деталі, забезпечуючи 4-х вісєве точіння, рис. 9.2. Також,

виробник заявляє можливість оснащення фрезерного шпінделя додатковими опціями: кутовою головкою, фрезерною головкою для черв'ячного



Рис. 9.1 – Токарно-фрезерний верстат.

зубофрезерування, головкою для дискового довбача, приводом для накатки шліців, та інше.

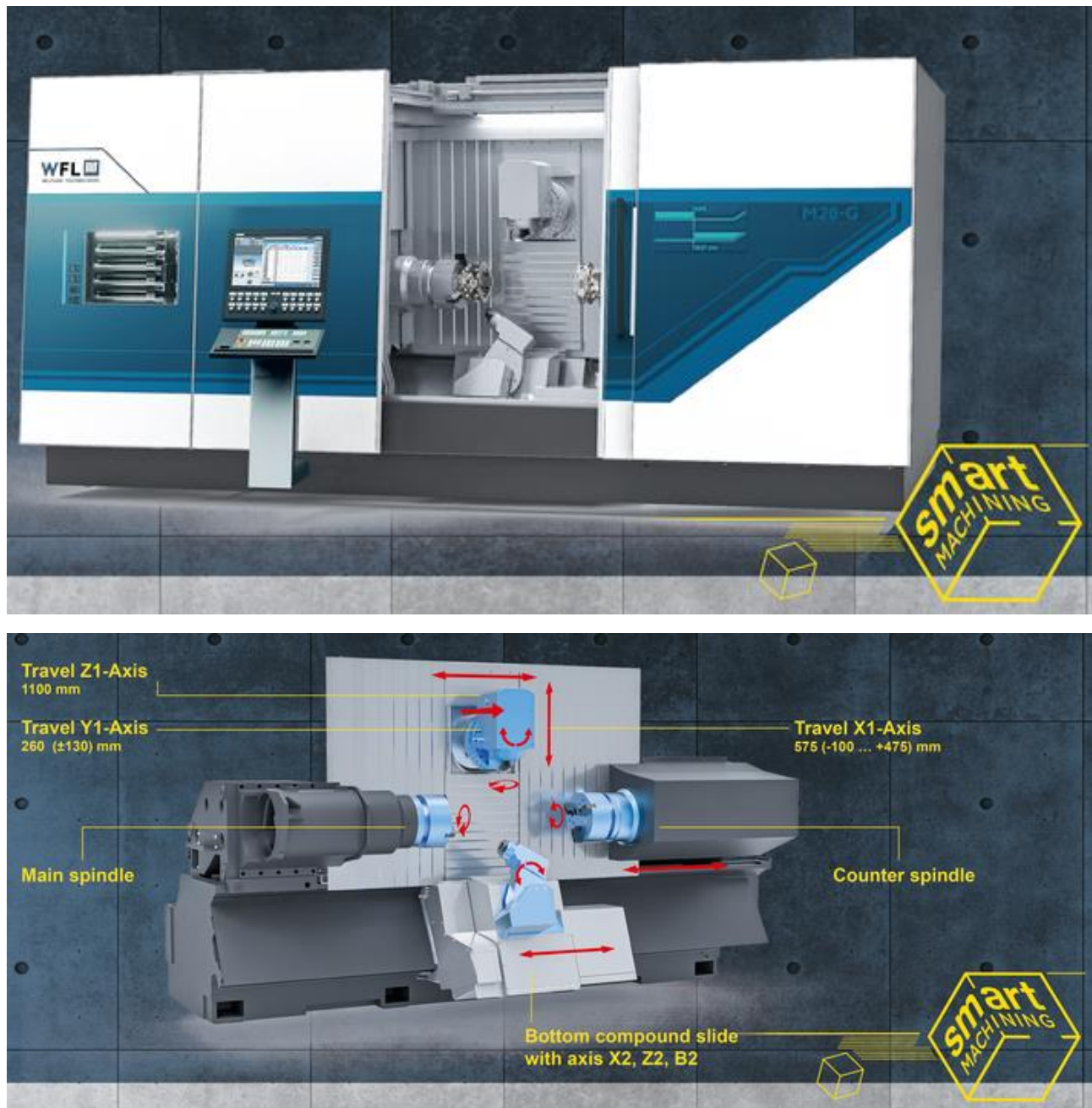


Рис. 9.2 – Токарно-фрезерний обробний центр MILLTURN WFL.

У виробництві зубчастих коліс здійснюються спроби створення комплексної технології механічної обробки зубчастих коліс, поєднуючи точіння, зубофрезерування, свердління, обробку фасок та зняття задирок за один установ деталі. Це стало можливим завдяки розширенню рухових можливостей верстатів та введенню додаткових виконавчих органів.

Приклад такого комбінування – верстат Agilus 180TH (рис. 9.3) фірми Gleason (США) [21], особливістю якого є оснащення його револьверною головкою для встановлення нерухомого або приводного інструменту.



Рис. 9.3 – Зубообробний центр Agilus 180TH фірми Gleason (США).

Дещо іншим шляхом пішов німецький виробник HÖFLER у складі швейцарського концерну KlingelInberg у своїх верстатах моделі TM 65 [28]. Даний верстат (рис. 9.4) може виготовляти зубчасті колеса будь-якої складності у повному процесі обробки, починаючи зі заготовки-прутка – будь то конічні шестерні, циліндричні шестерні чи внутрішні зачеплення з евольвентним або неевольвентним профілем зубців.

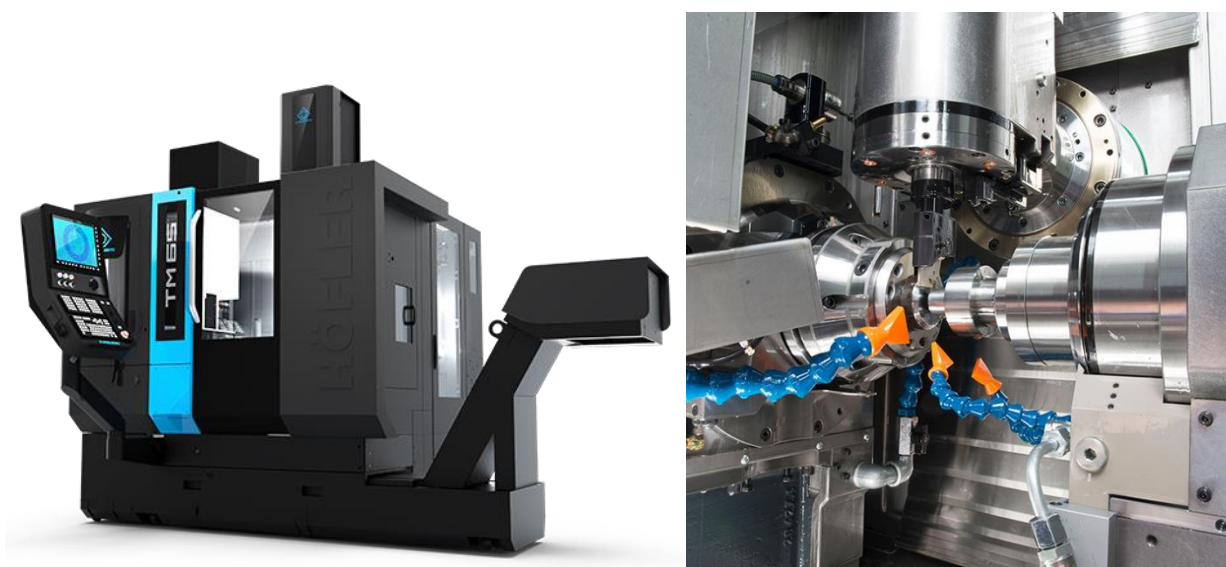


Рис. 9.4 – Зубообробний центр TM 65 фірми HÖFLER (Німеччина).

Наявність основного шпинделя і контршпинделя (який має можливість повертатися на 90°) дозволяє повністю обробляти навіть складні компоненти на одному верстаті.

9.2. Комбіновані верстати з елементами послідовної і паралельної кінематики

Верстати з паралельною кінематикою, які розглядалися у Темі 7, мають робочий орган, який рухається за допомогою механізмів типу гексапод, з ланками змінної довжини. Але виробниками верстатного обладнання також реалізуються верстати, які мають і послідовну, і паралельну структуру. Наприклад, фрезерний верстат, у якого стіл – з паралельною кінематикою (рис. 9.5).

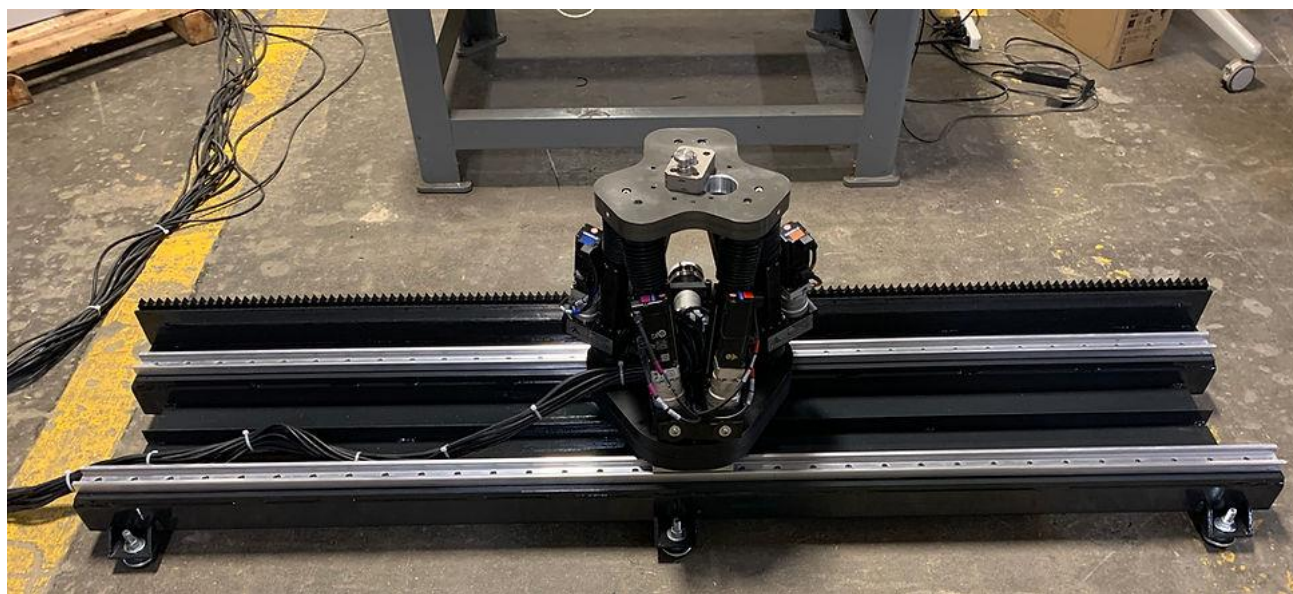


Рис. 9.4 – Обробний центр зі столом з елементами паралельної кінематики.

Провідними спеціалістами з фірми MIKROLAR розроблено декілька рішень для реалізації такої ідеї [24]. Наприклад, у розроблених ними механізмах - ротоподах (рис. 9.5), які створені для оснащення обробних центрів традиційної конструкції у якості столу, використовується система з зубчастою рейкою, яка забезпечує обертання на 720 градусів, зі збереженням при цьому жорсткості і точності, які властиві паралельному механізму.



Рис. 9.5 – Механізм ротопод MIKROLAR R3000.

9.3. Комбіновані деревообробні верстати

Якщо розглядати комбіновані деревообробні верстати (рис. 9.6), то вони поєднують у собі вміння свердлити, стругати, пиляти і в деяких випадках навіть фрезерувати.

Як показує практика, однією з найпоширеніших операцій, що виробляється на деревообробних верстатах комбінованого типу, є **розпилювання** [16]. Ефективність цієї процедури обумовлена стійкістю конструкції, а також



Рис. 9.6 – Комбінований деревообробний верстат.

потужністю двигуна, висотою столу, величиною діаметра диска. На цьому устаткуванні виробляють такі види робіт, як розпил дошок, бруса (рис. 9.7), розпилювання під нахилом (в одних моделях диск повертається разом із пиляльною частиною, в інших нахиляється стіл). Якщо необхідний інструмент для

створення сполучних шипів та пазів, то замість стандартного столу можна встановити вкорочений.

Ще один елемент конструкції – каретка (рис. 9.8, а). Вона використовується в тих випадках, коли необхідно досягти точного різання. Залежно від класу верстата механізм спрямування каретки може відрізнятися. Це можуть бути напрямні у вигляді довгого прутка, втулки та ін. Ідеальними варіантами вважаються ролики та рейки. Майже на всіх моделях кареток є регульований упор з нанесеною транспортною шкалою (рис. 9.8, б).



Рис. 9.7 – Розпилювання бруса вздовж упору.



а)



б)

Рис. 9.8 – Каретка для розпилювання під кутом (а) та транспортна шкала (б).

У деяких випадках майстру потрібно виконати пиляння на глибину. Як найпоширеніший приклад можна навести створення паза в будь-якому місці заготівлі (рис. 9.9). Якщо обробляється ламінована панель, то попередньо виконується підрізка, тобто на лицьовій стороні робиться невеликий пропил. Це дозволяє мінімізувати



Рис. 9.9 – Вирізання пазу вздовж бокового упору.

можливість утворення сколів при основному різі. При обробці масивних заготовок стіл необхідно встановити таким чином, щоб зубці ріжучого диска злегка виступали над поверхнею. Такий підхід також знижує кількість сколів. Крім цього, цей режим є найбільш «щадним» для диска. Найчастіше спеціалізовані деревообробні верстати оснащені рухомим диском, рідше – рухомим столом.

Операція **стругання** також є дуже поширеною. Часто універсальні верстати можуть виконувати лише фугування, рис. 9.10, а. Іншими словами, вони здатні вирівняти лише одну площину. Спеціалізовані верстати оснащені відразу двома столами, що дозволяє використовувати їх як рейсмуси.

При наявності паралельного упору, що нахиляється, можна досить легко робити похилі площини і знімати фаски, рис. 9.10, б. Починати роботу краще з того боку, що ближче до диска. Так, ріжуча частина ножового валу буде максимально закритою. Це продиктовано вимогою безпеки.

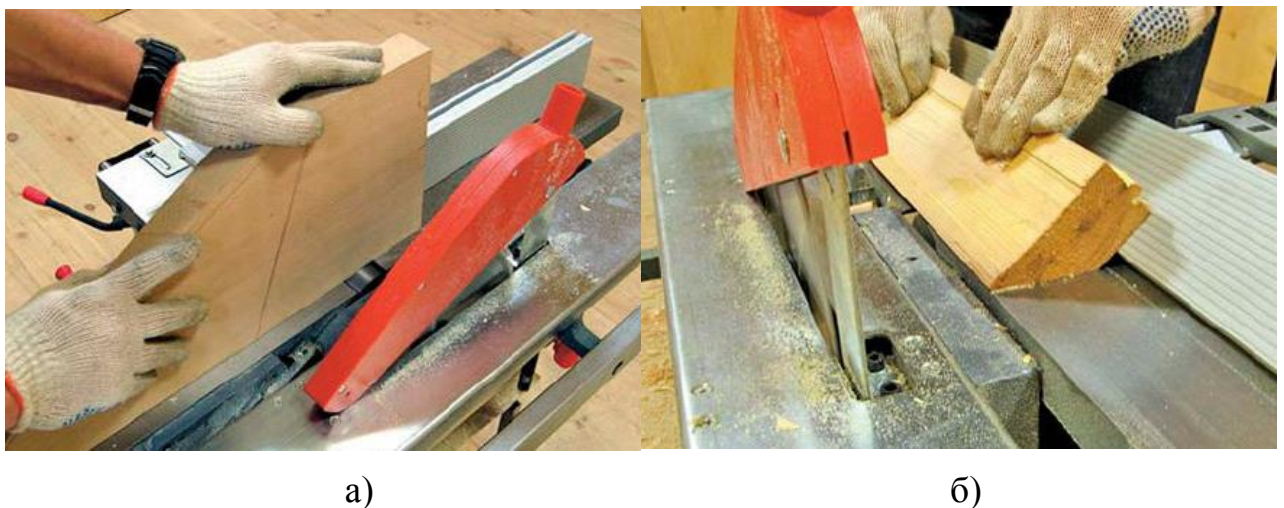


Рис. 9.10 – Стругання площини вздовж бокового упору (а), та стругання нахиленої площини.

Більшість моделей комбінованих верстатів мають функцію **свердління**. Заготовка закріплюється на столі примітивної конструкції (рис. 9.11), часто він навіть не має упорів. Але є можливість оснастити його додатковим обладнанням. Такий столик забезпечує більш високу точність горизонтальної та вертикальної подачі. Також, на зображенні видно, що конструкцією передбачено спеціальний затискач для заготовки.

Незалежно від моделі верстата столик може переміщатися у вертикальній площині, що дозволяє виконувати свердління на потрібній відстані від краю заготовки. Найчастіше ця функція використовується під час створення отворів під меблеві шканти. Існує два варіанти установки столика: грубий та точний.

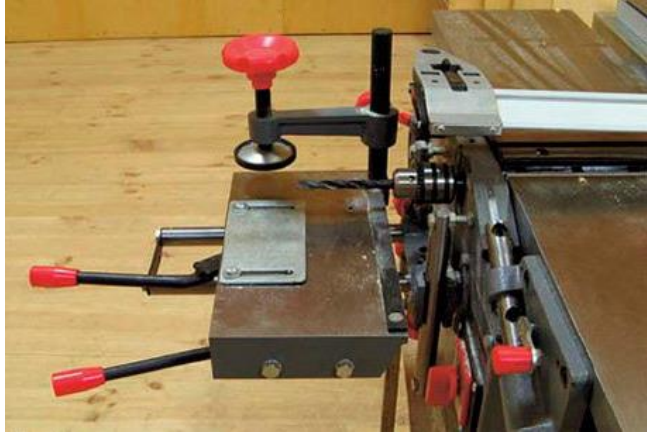


Рис. 9.11 – Загальний вигляд
свердлильного стола

Наявні упори для переміщення заготівлі в горизонтальній площині та виконання свердління отворів потрібної глибини. Горизонтальних упорів два, вони є деякі обмежувачі і зовні нагадують штангу, затягнуту болтом. Глибина свердління обмежується одним упором.

Крім розглянутих функцій, деякі універсальні верстати здатні виконувати **фрезерування**. Дана можливість має бути заявлена виробником.

Література

1. 3D печать – что это такое и как ее можно использовать [Електронний ресурс] // Офіційний сайт дилера – Режим доступу до ресурсу: <https://3ddevice.com.ua/faq-voprosy-i-otvety-o-3d-printerakh/chto-takoe-3d-pechat/>.
2. 3D-принтер [Електронний ресурс] // Вікіпедія – Режим доступу до ресурсу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/3D-принтер>.
3. Адитивні технології [Електронний ресурс] // Вікіпедія – Режим доступу до ресурсу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Адитивні_технології.
4. Ачеркан Н. С. Металлорежущие станки / Н. С. Ачеркан. – Москва: Машиностроение, 1965. – 764 с.
5. Барбашов Ф. А. Фрезерное дело. Учебное пособие / Ф. А. Барбашов. – Москва: Высшая школа, 1973. – 280 с.
6. Винников И. З. Свердловщик / И. З. Винников, М. И. Френкель. – Москва: Высшая школа, 1971. – 288 с.
7. Кашук В. А. Справочник шлифовщика / В. А. Кашук, А. Б. Верещагин. – Москва: Машиностроение, 1988. – 480 с.
8. Кириченко А. М. Експериментальне дослідження жорсткості шарнірів робочого органа багатокоординатного верстата паралельної структури «пентапод» / А. М. Кириченко, О. В. Шелепко // Вісник Херсонського національного технічного університету. – Херсон: ХНТУ, 2015. – № 4.
9. Косовский В. Л. Справочник молодого фрезеровщика / В. Л. Косовский. – Москва: Высшая школа, 1992. – 400 с.
10. Лапик [Електронний ресурс] // Офіційний сайт виробника. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.lapic.ru>.
11. НИАТ [Електронний ресурс] // Офіційний сайт виробника. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.niat.ru>.
12. Новіков М. Розроблення верстата-гексапода з шестикоординатною системою ЧПК і результати його дослідницького застосування / М. Новіков, В. Струтинський, А. Кириченко // машинознавство. – Львів : ТЗОВ «КІНПАТРІ ЛТД», 2011. – № 5-6 (167-168). – С. 3-10.

13. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. /Под ред. А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова.- 4-е изд., перераб. и доп.— М.: Машиностроение, 1986. 656 с.
14. Тепинкичиев В. К. Металлорежущие станки / В. К. Тепинкичиев. – Москва: Машиностроение, 1973. – 472 с.
15. Чернов Н. Н. Металлорежущие станки: Учебник для техникумов / Н. Н. Чернов. – Москва: Машиностроение, 1988. – 416 с.
16. Эксплуатация комбинированного деревообрабатывающего станка Performax PKM300 [Электронный ресурс] // Режим доступа до ресурсу: <https://www.vdr.com.ua/articles/kombinirovannye-stanki.html>.
17. 3D Printers: Delta vs Cartesian! [Электронный ресурс] // Режим доступа до ресурсу: <https://3dsolved.com/3d-printers-delta-vs-cartesian/>.
18. 3D printing [Электронный ресурс] // Wikipedia – Режим доступа до ресурсу: https://en.wikipedia.org/wiki/3D_printing.
19. 3D printing technology – Delta versus Cartesian [Электронный ресурс] // Офіційний сайт виробника. – Режим доступа до ресурсу: <https://tractus3d.com/knowledge/learn-3d-printing/3d-printing-technology-delta-versus-cartesian/>.
20. ABS, PLA чи coPET. Що обрати? • 3D пластик • MonoFilament [Электронный ресурс] // Офіційний сайт виробника. – Режим доступа до ресурсу: <https://monofilament.com.ua/ua/publikatsiji/abs-pla-chi-copet-scho-obrati-3d-plastik-monofilament>.
21. Agilus 180TH - Обработка зубчатых колёс "под ключ" [Электронный ресурс] // Офіційний сайт виробника. – Режим доступа до ресурсу: <https://www.gleason.com/ru/products/machines/cylindrical/hobbing-up-to-300-mm/agilus-180th-complete-machining-of-gears>.
22. Electron-beam additive manufacturing [Электронный ресурс] // Wikipedia – Режим доступа до ресурсу: https://en.wikipedia.org/wiki/Electron-beam_additive_manufacturing.
23. Metrom mechatronische maschinen [Электронный ресурс] // Офіційний сайт виробника. – Режим доступа до ресурсу: www.metrom.com.
24. Mikrolar [Электронный ресурс] // Офіційний сайт виробника. Режим доступа до ресурсу: <http://mikrolar.com>.

25. MILLTURN - All machining technologies together in one machine [Електронний ресурс] // Офіційний сайт виробника. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.wfl.at/en/machines/millturn>.
26. Okuma [Електронний ресурс] // Офіційний сайт виробника. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.okuma.com>.
27. Selective laser sintering [Електронний ресурс] // Wikipedia – Режим доступу до ресурсу: https://en.wikipedia.org/wiki/Selective_laser_sintering.
28. ТМ 65 - HÖFLER Complete Machining Center [Електронний ресурс] // Офіційний сайт виробника. – Режим доступу до ресурсу: <https://klingsberg.com/en/business-divisions/cylindrical-gear-technology/complete-machining/detail-page?product=22&cHash=d381f5e3f9ec68a5f0b1dc96ca373cc9>.

Зміст

Тема 1. Вступ, мета і задачі курсу	3
Тема 2. Методи, способи та засоби токарної обробки	13
Тема 3. Методи, способи та засоби свердлильної обробки	20
Тема 4. Методи, способи та засоби шліфувальної обробки	27
Тема 5. Методи, способи та засоби електрофізичної та електрохімічної обробки	35
Тема 6. Методи, способи та засоби фрезерної обробки	47
Тема 7. Верстати паралельної структури	53
Тема 8. Конструкції та принцип дії 3-D принтера	58
Тема 9. Верстати комбінованої структури	69
Література	77