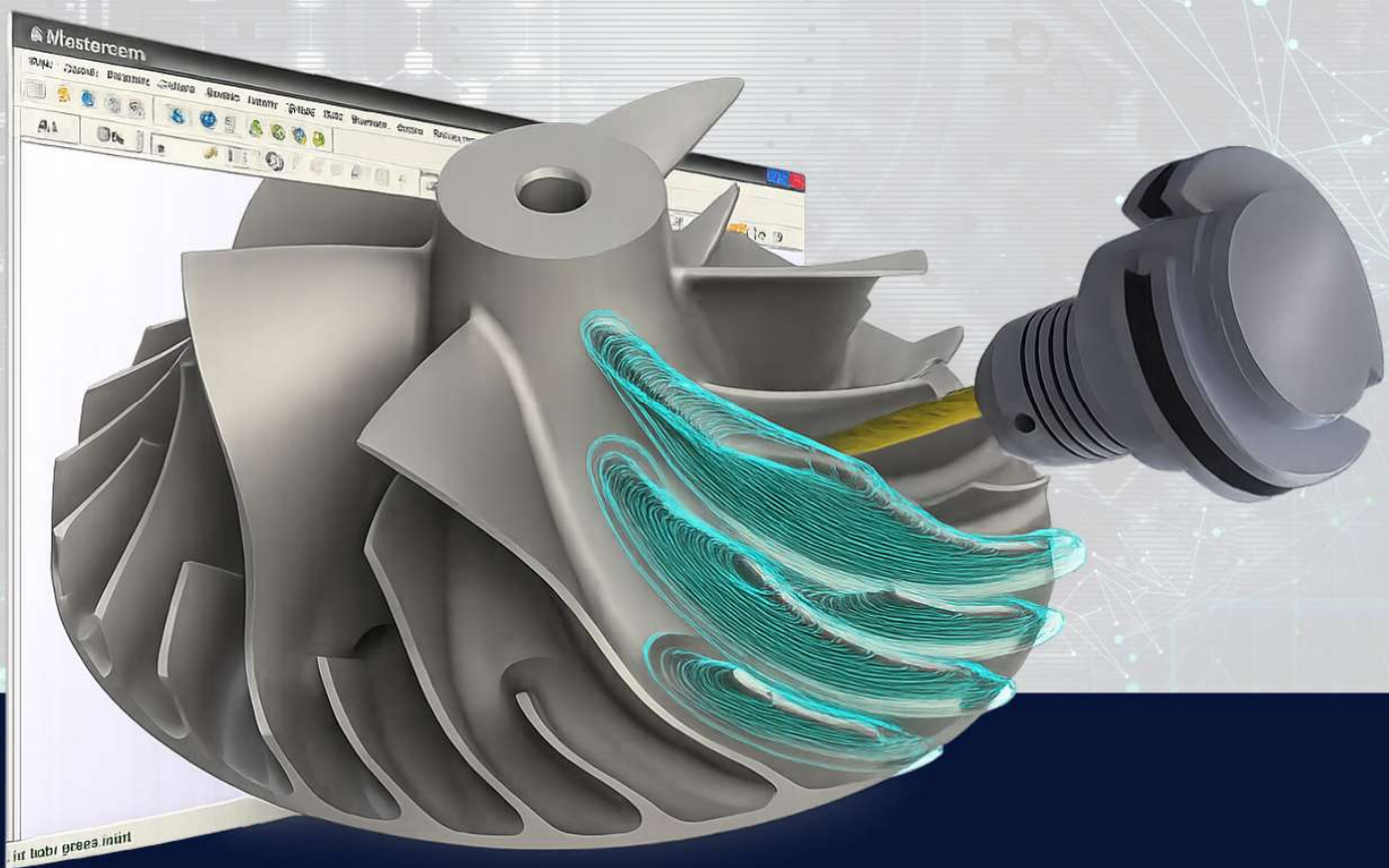


ОЛЕКСАНДР ДАНИЛЕЙКО

**СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ
ТЕХНОЛОГІЧНИМ ОБЛАДНАННЯМ
ПРАКТИКУМ**

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

О. О. ДАНИЛЕЙКО

СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ОБЛАДНАННЯМ ПРАКТИКУМ

Навчальний посібник

Рекомендовано методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра
за освітньою програмою «Інжиніринг зварювання, лазерних та
споріднених технологій»
спеціальності G9 Прикладна механіка



Електронне мережеве навчальне видання

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2026

УДК 621.9

Д 18

Автор *Данилейко Олександр Олександрович*, доктор філософії, асистент кафедри лазерної техніки та фізико-технічних технологій, НН ІМЗ ім. Є. О. Патона, КПІ ім. Ігоря Сікорського

Рецензент *Попіль Ю. С.*, к. т. н., доц., доцент кафедри зварювального виробництва, НН ІМЗ ім. Є. О. Патона, КПІ ім. Ігоря Сікорського

Відповідальний редактор *Головко Л. Ф.*, д. т. н., проф., професор кафедри лазерної техніки та фізико-технічних технологій, НН ІМЗ ім. Є. О. Патона, КПІ ім. Ігоря Сікорського

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол № 7 від 08.05.2026 р.)*

*за поданні вченої ради НН Інституту матеріалознавства та зварювання
ім. Є. О. Патона
(протокол № 03/26 від 08.04.2026 р.)*

Данилейко О. О.

Д 18 Системи керування технологічним обладнанням. Практикум [Електронний ресурс] : навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за освіт. програмою «Інжиніринг зварювання лазерних та споріднених технологій» спец. G9 Прикладна механіка / О. О. Данилейко ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електрон. текст. дані (1 файл). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2026. – 228 с.

Навчальний посібник «Системи керування технологічним обладнанням. Практикум» розроблено для здобувачів вищої освіти галузі знань 13 «Механічна інженерія» (спеціальність G9 «Прикладна механіка», освітня програма «Інжиніринг зварювання, лазерних та споріднених технологій»).

Видання має практикоорієнтований характер і спрямоване на формування професійних компетентностей у сфері керування технологічними процесами та програмування верстатів із числовим програмним керуванням (ЧПК). Навчальний посібник містить вісім практичних робіт, що охоплюють визначення основних параметрів технологічного процесу механічної обробки, базові принципи програмування ЧПК, розрахунок параметрів для фрезерування контурів, обробки дуг, кіл і отворів, розроблення керуючої програми для ступінчастого вала. Окремі розділи охоплюють розрахунок енергії ударної дії інструментів для поверхневого зміцнення та методику забезпечення стабільного температурного режиму при комбінованій лазерній термомеханічній обробці.

Матеріал поєднує теоретичні засади з алгоритмізованими прикладами виконання завдань, що забезпечує системне засвоєння дисципліни та розвиток прикладних навичок, актуальних для сучасного автоматизованого виробництва.

Навчальний посібник буде корисним студентам, викладачам технічних дисциплін і фахівцям виробничої сфери.

УДК 621.9

Реєстр. № 25/26-331. Обсяг 10,36 авт. арк.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
проспект Берестейський, 37, м. Київ, 03056
<https://kpi.ua>

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 5354 від 25.05.2017 р.

© Данилейко О. О., 2026

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2026

Ілюстрація на обкладинці перероблена за мотивами оригіналу Mastercam®

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА	5
ОРГАНІЗАЦІЯ ВИКОНАННЯ ПРАКТИЧНИХ РОБІТ	8
ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ ЗВІТУ З ПРАКТИЧНОЇ РОБОТИ	12
Практична робота № 1	16
Визначення основних елементів технологічного процесу механічної обробки деталей.....	16
Практична робота № 2	33
Основи програмування на верстатах з ЧПК.....	33
Практична робота № 3	60
Визначення параметрів програмування для фрезерування зовнішнього контуру деталі	60
Практична робота № 4	96
Визначення параметрів програмування дуги та кола.....	96
Практична робота № 5	120
Визначення параметрів програмування для обробки отворів	120
Практична робота № 6	149
Розробка керуючої програми для обробки ступінчастого вала.....	149
Практична робота № 7	167
Розрахунок енергії ударної дії інструментів для поверхневого зміцнення	167
Практична робота № 8	193
Методика визначення та підтримання постійної температури при комбінованій лазерній термомеханічній обробці	193
ДОДАТКИ	223
<i>Додаток А. Титульний лист практичної роботи</i>	223
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	224

ПЕРЕДМОВА

Сучасний етап розвитку промисловості характеризується стрімкою інтеграцією цифрових технологій, автоматизованих систем керування та інтелектуалізованого технологічного обладнання у всі сфери машинобудування. Галузь знань 13 Механічна інженерія, зокрема спеціальність G9 Прикладна механіка (освітня програма «Інжиніринг зварювання, лазерних та споріднених технологій»), потребує фахівців нового покоління — інженерів, здатних не лише проєктувати й експлуатувати технологічні процеси, а й розуміти принципи функціонування систем керування складним обладнанням, аналізувати їх ефективність та оптимізувати режими роботи.

Дисципліна «Системи керування технологічним обладнанням» займає особливе місце у професійній підготовці здобувачів вищої освіти третього курсу. Вона виступає логічним продовженням фундаментальної інженерної підготовки та водночас формує прикладну компетентність у сфері керування сучасними технологічними комплексами — зварювальними установками, лазерними системами, автоматизованими виробничими модулями.

Статус дисципліни як вибіркової не зменшує її значення, а, навпаки, підкреслює її професійно-орієнтований характер. Обираючи цей курс, здобувач свідомо спрямовує свою підготовку на поглиблене вивчення принципів побудови, налаштування та аналізу систем керування технологічними процесами, що є критично важливими в умовах сучасного виробництва.

У структурі освітньої програми дисципліна забезпечує формування таких ключових компетентностей:

- здатність аналізувати структуру та функціонування систем автоматичного керування;

- уміння визначати вплив параметрів регулювання на стабільність і якість технологічного процесу;
- здатність обґрунтовувати вибір алгоритмів керування для конкретного виду обладнання;
- навички оцінювання динамічних характеристик технологічних систем;
- готовність до впровадження сучасних інженерних рішень у галузі автоматизації.

Особливу роль у засвоєнні дисципліни відіграють практичні роботи. Саме вони забезпечують перехід від теоретичних моделей до реального інженерного аналізу. У процесі виконання практичних завдань здобувач:

- опановує методики розрахунку параметрів систем керування;
- аналізує динамічні та статичні характеристики технологічних об'єктів;
- вчиться інтерпретувати експериментальні результати;
- формує інженерне мислення, засноване на причинно-наслідкових зв'язках між параметрами системи та якістю технологічного процесу.

Практична складова дисципліни (18 годин у межах 4 кредитів ECTS) побудована таким чином, щоб забезпечити системне та послідовне опанування матеріалу. Кожна робота структурована за єдиною логікою — від теоретичного обґрунтування до розрахунково-аналітичного узагальнення результатів. Такий підхід формує у здобувачів не лише знання, а й ознайомлює з методологією інженерної діяльності.

Посібник розроблено на основі системного аналізу сучасних українських і зарубіжних наукових і навчально-методичних джерел [1-34]. У процесі підготовки матеріалу використано методи узагальнення, адаптації та авторської інтерпретації, що забезпечило його структурованість і відповідність освітнім цілям.

Посібник спрямований на забезпечення чіткої організації практичних занять, уніфікації вимог до виконання робіт та прозорості

оцінювання результатів навчання. Його структура дозволяє здобувачам поетапно засвоювати матеріал, контролювати власний прогрес і формувати професійну відповідальність.

Автор сподівається, що даний навчальний посібник сприятиме підготовці конкурентоспроможних фахівців, здатних ефективно працювати в умовах сучасного високотехнологічного виробництва та впроваджувати інноваційні рішення у галузі механічної інженерії.

ОРГАНІЗАЦІЯ ВИКОНАННЯ ПРАКТИЧНИХ РОБІТ

Загальні положення. Лабораторні та практичні роботи є обов'язковою складовою освітнього процесу підготовки здобувачів технічних спеціальностей. Їх виконання спрямоване на закріплення теоретичних знань, формування інженерного мислення, набуття практичних навичок роботи з обладнанням та розрахунковими методиками, а також розвиток уміння аналізувати результати експериментів і технологічних процесів.

Організація, проведення та оцінювання робіт здійснюється відповідно до чинних нормативних документів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», робочої програми навчальної дисципліни «Системи керування технологічним обладнанням», розміщеної в електронному освітньому середовищі університету [19].

Порядок проведення практичної роботи. Практична робота проводиться у такій послідовності:

1. Вступне пояснення викладача, що передбачає:

- формулювання мети та завдань роботи;
- актуалізацію основних теоретичних положень;
- пояснення алгоритму виконання розрахунків або експериментів;
- визначення ключових параметрів та можливих похибок.

2. Перевірка готовності студентів до виконання практичної роботи (усне опитування або відповіді на контрольні питання);

3. Демонстрація (за потреби):

- зразків деталей, матеріалів, інструменту;
- роботи обладнання, приладів, програмного забезпечення;
- прикладу виконання розрахунків чи фрагмента керуючої програми.

4. Самостійна робота студентів, яка включає:

- аналіз індивідуального варіанту завдання;
- виконання розрахунків або вимірювань;
- фіксацію результатів (заповнення таблиць);

- формулювання висновків;
- обґрунтування вибору параметрів технологічного процесу.

Викладач здійснює поточний контроль правильності виконання етапів роботи та надає консультації у разі виникнення труднощів.

Вимоги безпеки під час виконання практичних робіт. Оскільки значна частина практичних робіт виконується в лабораторних умовах, студенти зобов'язані:

- дотримуватися правил внутрішнього розпорядку лабораторії;
- пройти інструктаж з техніки безпеки перед початком роботи;
- працювати лише з дозволеним обладнанням та під контролем викладача;
- не вмикати та не налаштовувати прилади без відповідного дозволу;
- дотримуватися вимог електробезпеки, пожежної безпеки та правил роботи з лазерним, механічним або вимірювальним обладнанням;
- підтримувати порядок на робочому місці.

У разі виявлення несправності обладнання або аварійної ситуації студент зобов'язаний негайно повідомити викладача або відповідального інженера.

Недотримання вимог безпеки є підставою для недопуску до виконання роботи.

Структура практичної роботи. Кожна практична робота у посібнику має уніфіковану структуру:

1. Назва роботи.
2. Мета роботи.
3. Очікувані результати (знання, уміння, навички).
4. Обладнання та матеріали.
5. Короткі теоретичні відомості.
6. Порядок виконання роботи.
7. Контрольні питання.
8. Шаблон звіту.

Така структура забезпечує логічну послідовність засвоєння матеріалу та формування програмних результатів навчання, визначених освітньою програмою.

Порядок подання та захисту практичної роботи. Для виконання практичної роботи студенту необхідно:

- мати навчальний посібник;
- роздрукувати шаблон звіту відповідної практичної роботи;
- заповнювати шаблон безпосередньо під час заняття.

Шаблон звіту розроблений таким чином, щоб студент міг поетапно та самостійно виконати всі необхідні розрахунки й експериментальні дії, не пропустивши жодного структурного етапу. У звіті передбачені таблиці для внесення вихідних даних, результатів вимірювань, розрахунків, а також відведені спеціальні поля для запису проміжних розрахунків та висновків.

Заповнений звіт подається викладачу в термін, визначений календарно-тематичним планом.

Робота вважається зарахованою лише після її захисту. Під час захисту роботи студент повинен продемонструвати розуміння: методики виконання роботи, використаних формул та алгоритмів, одержаних результатів.

У разі виявлення ознак академічної недоброчесності (копіювання, виконання роботи іншою особою, відсутність проміжних обчислень) робота не зараховується.

Система оцінювання. Оцінювання практичних робіт здійснюється в межах поточного контролю знань здобувачів вищої освіти відповідно до робочої програми навчальної дисципліни «Системи керування технологічним обладнанням» [19] та рейтингової системи оцінювання.

Критерії оцінювання практичної роботи. Оцінювання практичної роботи здійснюється комплексно з урахуванням рівня теоретичної підготовки студента, правильності виконання розрахункової або експериментальної частини, обґрунтування отриманих результатів, якості

оформлення звіту та рівня усного захисту та самостійності виконання роботи. При оцінюванні роботи враховується:

1. Теоретична підготовка та розуміння теми:

- правильність відповідей на контрольні питання;
- демонстрація розуміння фізичної суті процесів;
- знання формул, позначень та одиниць вимірювання;
- здатність пояснити методику виконання роботи.

2. Правильність виконання розрахунків або експерименту:

- коректність використання формул;
- відсутність грубих обчислювальних помилок;
- дотримання послідовності виконання етапів;
- правильність фіксації результатів вимірювань.

3. Обробка та аналіз результатів:

- логічність і обґрунтованість висновків;
- аналіз отриманих даних;
- оцінювання похибок (за потреби);
- здатність пояснити відхилення результатів від теоретичних значень

(за потреби).

5. Якість оформлення звіту:

- повнота заповнення шаблону звіту;
- наявність усіх необхідних таблиць і розрахунків;
- правильність використання одиниць SI;
- акуратність та структурованість викладу;
- відсутність виправлень, що спотворюють зміст.

6. Рівень самостійності виконання:

- здатність пояснити кожен етап роботи;
- відсутність механічного копіювання.

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ ЗВІТУ З ПРАКТИЧНОЇ РОБОТИ

Звіт з практичної роботи є офіційним навчальним документом, що підтверджує виконання завдання та досягнення передбачених результатів навчання.

Оформлення звіту повинно відповідати вимогам навчального посібника та забезпечувати чіткість, логічність і технічну коректність подання інформації.

Загальні вимоги до оформлення звіту:

1. Звіт виконується у друкованому шаблоні, передбаченому для відповідної роботи.

2. Записи повинні бути чіткими, розбірливими та структурованими.

3. Усі розрахунки виконуються з поетапним записом формул.

4. Всі фізичні величини повинні супроводжуватись одиницями вимірюванням у системі SI.

5. Забороняється:

- пропускати етапи розрахунків;
- подавати лише кінцевий результат без обґрунтування;
- використовувати неузгоджені позначення.

Вимоги до паперового оформлення звіту. Звіт може виконуватися у паперовій формі з дотриманням таких вимог:

1. **Формат аркушів** — A4 (210×297 мм) або інший формат, максимально наближений до A4.

2. **Записи виконуються:**

- чорнилом або пастою одного кольору;
- чітким і розбірливим почерком;
- лише на одному боці аркуша.

3. **Графічні побудови (схеми, ескізи, графіки):**

- виконуються олівцем та/або в CAD/CAM програмах;
- повинні бути акуратними та пропорційними;

- розміщуються на одному боці аркуша.

4. Не допускається:

- використання різних кольорів пасти в межах одного звіту;
- наявність неохайних виправлень;
- подання аркушів без систематизації.

Заповнені аркуші звіту формуються у збірку та брошуруються в загальній обкладинці (див. Додаток А).

Оформлення звіту в електронному вигляді. Оформлення звіту в електронному вигляді здійснюється з використанням шаблонів, наведених у даному навчальному посібнику.

Параметри форматування (тип шрифту, кегль, міжрядковий інтервал, відступи, поля тощо) визначаються структурою шаблону і повинні зберігатися без змін, за винятком випадків, коли це обумовлено необхідністю внесення розрахункових даних. Не допускається довільна зміна параметрів форматування, що порушує єдність оформлення документа.

Допускається використання текстового редактора (Microsoft Word або сумісного програмного забезпечення) для заповнення шаблонів, введення формул, розрахунків та пояснювального тексту.

Формули повинні бути набрані засобами редактора формул, таблиці та рисунки – оформлені з підписами та нумерацією відповідно до вимог академічного оформлення.

У разі відсутності можливості використання шаблону допускається оформлення звіту з дотриманням таких параметрів:

- шрифт – відповідно до шаблону (Ехо 2) або Times New Roman у разі самостійного оформлення;
- кегль – 14 pt;
- міжрядковий інтервал – 1,15-1,5;
- вирівнювання тексту – по ширині;

- поля сторінки: верхнє – 1,5 см; нижнє – 1,5 см; лїве – 2,5 см; праве – 1,0 см;
- абзацний відступ – 1 см.

Електронна версія звіту подається у форматі .docx або .pdf (за вимогою викладача).

Вимоги до оформлення титульного аркушу практичних робіт. Звіти практичних робіт обов'язково повинні містити титульний аркуш (див. Додаток А), на якому зазначаються:

- назва закладу вищої освіти;
- назва кафедри;
- назва дисципліни;
- номер і назва практичної роботи;
- прізвище, ім'я студента(-ки);
- група;
- прізвище та ініціали викладача;
- рік виконання роботи.

Оформлення розрахункової частини. Усі розрахунки повинні містити: запис вихідної формули у загальному вигляді, підстановку числових значень, зазначення одиниці вимірювання, отриманий результат із правильним округленням, аналіз отриманого значення (за вимогою). Приклад логіки оформлення: запис формули, підстановка числового значення, обчислення, запис кінцевого результату. Недопустимим є пропуск проміжних етапів.

Оформлення експериментальної частини. У разі виконання вимірювань у звіті мають бути: таблиця вихідних даних, результати вимірювань, обробка експериментальних даних, оцінювання похибок (якщо передбачено), побудовані графіки / ескізи тощо (за необхідності).

Оформлення висновків. Кожна практична робота повинна містити висновок, у якому мають бути представлені узагальнення одержаних результатів, аналіз результатів похибок (за необхідності), узагальнення, що

демонструють розуміння студентом фізичної чи технологічної сутності процесу. Структура висновку має повторювати зміст мети роботи. Недопустимими є формальні висновки типу: «Мета роботи досягнута».

Типові помилки в оформленні. До найбільш поширених помилок належать:

- відсутність одиниці вимірювання;
- неправильне округлення;
- невідповідність позначень у формулі та підстановці;
- відсутність аналізу результатів;
- переписування без розуміння.

Наслідки порушення вимог до оформлення. У разі недотримання встановлених вимог:

- робота може бути повернута на доопрацювання;
- оцінка може бути знижена.

Практична робота № 1

Визначення основних елементів технологічного процесу механічної обробки деталей

Мета роботи: сформувати у студентів практичні навички складання технологічної операції механічної обробки деталей та її покрокового опису за переходами; закріпити розуміння основних елементів технологічного процесу механічної обробки; навчити аналізувати операційні ескізи та вихідні дані для обробки заготовки.

Очікуваний результат: після виконання роботи студент повинен **знати:** принципи визначення основних елементів технологічного процесу, логіку поділу операцій на переходи; **вміти:** обґрунтовано переходити від креслення деталі до структурованої моделі технологічної операції, складати покроковий опис операції, придатний для подальшого програмування на верстаті з ЧПК, визначати необхідні параметри для кожного переходу (глибина різання, інструмент, напрямок руху).

Обладнання та матеріально-технічне забезпечення: токарний верстат з числовим програмним керуванням ORAC MBC 84; комплект токарних різців (прохідні, підрізні, фасонні, розточувальні тощо); свердлильний інструмент; пристрої для закріплення заготовок; операційні ескізи деталей (відповідно до варіанту); нормативно-довідкові матеріали.

Короткі теоретичні відомості

Виробничий процес – це сукупність усіх дій людей, засобів праці та організаційних заходів на підприємстві, спрямованих на виготовлення або ремонт виробів. Він охоплює не лише безпосередню обробку матеріалу, а повний цикл проходження виробу через виробництво – від підготовки до отримання готової деталі. До складу виробничого процесу входять:

- технологічна підготовка виробництва;

- отримання, зберігання і переміщення матеріалів та заготовок;
- усі види обробок;
- складання виробів;
- контроль якості.

Отже, виробничий процес є загальною організаційною оболонкою виготовлення виробу. Однак зміна форми та властивостей матеріалу відбувається лише в окремій його частині – технологічному процесі.

Технологічний процес – це частина виробничого процесу, що безпосередньо забезпечує зміну форми, розмірів, стану поверхні або фізико-механічних властивостей заготовки. Таким чином, технологічний процес можна розглядати як керований процес перетворення матеріалу у деталь заданої точності та якості.

Технологічний процес не є неподільним – він має ієрархічну структуру. Його поділяють на операції, а операції – на дрібніші складові елементи.

Технологічна операція – це закінчена частина технологічного процесу, яка виконується на одному робочому місці без зміни обладнання та характеризується певним результатом обробки. Саме операція є основною одиницею виробництва, оскільки за нею визначають:

- виробниче планування;
- нормування часу;
- завантаження обладнання;
- структуру керуючої програми для верстатів з числовим програмним керуванням (далі – ЧПК).

За характером впливу на заготовку операції поділяють на: **технологічні** – змінюють форму, розміри або властивості заготовки; **допоміжні** – не змінюють деталь, але забезпечують можливість обробки (установлення і зняття заготовки/деталі, контроль, транспортування, зміна інструменту).

Будь-яка операція також має внутрішню структуру. Вона складається з технологічних і допоміжних переходів – окремих завершених дій, що формують послідовність обробки деталі.

Технологічний перехід – завершена частина операції, що виконується одним інструментом при незмінних режимах обробки та спрямована на обробку конкретної поверхні. Інакше кажучи, перехід відповідає на питання: *яку саме поверхню ми отримуємо в результаті дії інструмента.*

Одна і та сама поверхня може формуватися кількома переходами – наприклад, чорновим та чистовим. У цьому випадку геометрія поверхні залишається тією самою, але змінюється її точність і шорсткість.

Допоміжний перехід – це частина операції, що не змінює геометрію деталі, але створює умови для виконання технологічного переходу (установлення і закріплення заготовки, зміна інструмента, вимірювання, використання мастильно-охолоджувальної рідини тощо). Таким чином, допоміжні переходи не формують деталь, але забезпечують можливість її формування.

Однак і перехід є складною дією. Він складається з окремих рухів інструмента відносно заготовки – ходів.

Робочий хід – це одноразове переміщення інструмента відносно заготовки по заданій траєкторії зі зняттям матеріалу. Саме під час робочого ходу формується поверхня деталі. Траєкторія робочого ходу включає:

- підведення інструменту;
- різання;
- відведення інструмента.

Допоміжний хід – це переміщення без різання (наприклад, повернення у вихідну точку або перехід до нової позиції). Він не створює поверхню, а готує виконання наступного робочого ходу.

Отже, при традиційній обробці технолог описує переходи, а оператор виконує необхідні переміщення інструмента.

З появою верстатів з ЧПК структура технологічної операції набуває ще більш детального характеру. Технологічні та допоміжні ходи розкладаються на елементарні переміщення – кроки, а також на технологічні команди, які задають режими роботи обладнання (частоту обертання шпинделя, подачу, увімкнення/вимкнення мастильно-охолоджувальної рідини, зміну інструмента тощо).

Отже, технологічна операція на верстаті з ЧПК перетворюється на впорядкований алгоритм дій, який реалізується системою керування. Технолог задає не окремі рухи, а програмну послідовність координатних переміщень і режимів різання.

Для реалізації технологічних переходів на верстатах з ЧПК система керування перетворює програмні команди у координатні переміщення робочих органів верстата та відповідні режими різання (рис. 1.1). Саме тому правильне структурування операції на рівні переходів і ходів є необхідною передумовою створення коректної керуючої програми.

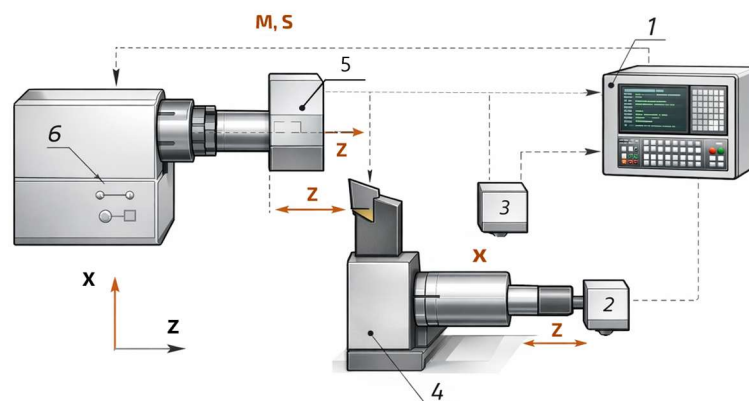


Рис. 1.1. Позначення елементів та руху команд на верстаті з ЧПК: 1 – блок керування ЧПК; 2 – кроковий привід з подобою по осі Z; 3 – кроковий привід з подобою по осі X; 4 – різцетримач; 5 – заготовка; 6 – коробка швидкостей та подач; M, S – допоміжна функція та команда головного руху, що передається від блоку керування до приводу; T – команда на зміну інструменту, що проходить від контролера до різцетримача; лінії X та Z ілюструють переміщення приводу та заготовки по координатах

Після деталізації структури операції на рівні переходів і ходів необхідно врахувати ще один принципово важливий фактор – просторове положення заготовки під час обробки. Саме воно визначає можливість формування поверхонь без втрати точності. Така складова технологічної операції називається установом.

Установ – це частина операції, що виконується при одному закріпленні заготовки. Зміна положення деталі або її переустановлення означає початок нового установу. Кількість установів безпосередньо впливає на результати обробки:

- на точність взаємного розташування поверхонь – кожне переустановлення накопичує похибки базування;
- на складність керуючої програми – змінюються системи координат і технологічні бази;
- на продуктивність – зростає допоміжний час.

Тому під час проектування операції завжди прагнуть зменшити кількість установів, але без порушення вимог точності. Наприклад, під час токарної обробки валів, як правило, необхідні два установи, оскільки всі поверхні складно обробити з одного закріплення: після обробки одного торця деталь потрібно перевернути для обробки протилежного.

Отже, розроблення технологічної операції фактично є послідовним переходом від геометрії деталі до алгоритму обробки. Для цього необхідно:

- проаналізувати операційні ескізи та вихідні дані;
- визначити кількість установів;
- встановити склад операції (переходи і ходи);
- обґрунтувати раціональну послідовність обробки;
- описати операцію у вигляді таблиці переходів;

У даній практичній роботі приймаються такі вихідні умови:

- деталь виготовляється з гарячекатаного прокату;
- тип виробництва – дрібносерійне;

- обробка виконується токарною операцією за два установи.

Порядок розв'язання

Роботу необхідно виконувати послідовно. Переходити до наступного кроку дозволяється лише після завершення попереднього.

Завдання студента полягає у перетворенні операційного ескізу деталі у формалізований опис обробки – послідовність установів, переходів і ходів, придатну для подальшого програмування верстата з ЧПК.

Крок 1. Аналіз операційного ескізу:

1. Уважно розгляньте ескіз деталі.
2. Знайдіть усі поверхні, що підлягають обробці.
3. Пронумеруйте їх на ескізі.
4. Визначте тип кожної поверхні (циліндрична, торцева, фаска, отвір).
5. Порахуйте загальну кількість поверхонь.

Крок 2. Визначення заготовки:

1. Встановіть форму заготовки (пруток, поковка, відрізок прокату).
2. Визначте базовий діаметр і довжину заготовки.
3. Встановіть припуски на обробку.
4. Накресліть ескіз заготовки у шаблоні звіту.

Крок 3. Вибір обладнання:

1. Проаналізуйте форму поверхонь.
2. Визначте принцип формоутворення.
3. Оберіть тип верстата.
4. Запишіть найменування операції.

Крок 4. Вибір базування:

1. Визначте, за які поверхні деталь можна закріпити.
2. Оберіть технологічну базу.
3. Позначте базу на ескізі.
4. Встановіть кількість установів¹.

¹ Для даної деталі: два установи (А і Б).

Крок 5. Розподіл поверхонь за установами:

1. Визначте, які поверхні можна обробити без переустановлення.
2. Запишіть перелік поверхонь для установу А.
3. Запишіть перелік поверхонь для установу Б.

Крок 6. Встановлення послідовності переходів для кожного установу (приклад див. у табл. 1.1):

1. Почніть обробку з базових поверхонь.
2. Далі – основні діаметри.
3. Потім – фаски.
4. В останню чергу – отвори та дрібні елементи.

Таблиця 1.1. Опис послідовності операцій для обробки деталей

Установ А	Установ Б
підрізати торець 4	підрізати торець 9
точити поверхню 2 → утворити торець 1	точити поверхню 7
точити фаску 3	точити фаску 8
свердлити отвір 6	
розточити фаску 5	

Крок 7. Формування переходів:

1. Кожну оброблювану поверхню запишіть як технологічний перехід (ПТ).
2. Установлення, контроль і переустановлення – як допоміжний перехід (ПД).
3. Складіть повний перелік переходів.

Крок 8. Оформлення таблиці операцій. Заповніть таблицю переходів:

1. Номер переходу.
2. Вид (ПТ або ПД).
3. Зміст переходу.

Таблиця повинна містити повну послідовність виготовлення деталі – від встановлення до зняття. Зміст операції в технологічній документації записується по технологічним (ПТ) та допоміжним (ПД) переходам (табл.1.2).

Таблиця 1.2. Зміст операції за переходами

№ переходу	Вид переходу	Зміст операції
1	ПД	Встановити і закріпити заготовку
2	ПТ	Підрізати торець 1
3	ПТ	Точити поверхню 2 з утворенням торця 3 (при точінні поверхні 2 здійснюють 2 робочих хода)
4	ПТ	Точити фаску 4
5	ПТ	Свердлити отвір 5
6	ПТ	Розточити фаску 6
7	ПД	Переустановити заготовку
8	ПТ	Підрізати торець 7
9	ПТ	Точити поверхню 8
10	ПТ	Точити фаску 9
11	ПД	Контроль розмірів деталі
12	ПД	Зняти деталь і покласти в тару

Порядок проведення роботи

1. Вибір інструменту та верстата:

- проаналізуйте, які операції (точіння, свердління, розточування, фаска) необхідно виконати на заготовці;
- підберіть оптимальний інструмент: різець, свердло, різцетримач, фрезу;
- визначте тип верстата: класичний токарний, багатошпиндельний, агрегатний або ЧПК.

Порада для студента: подумайте, чому саме обраний верстат найбільш продуктивний для вашої деталі.

2. Визначення конфігурації та розмірів заготовки:

- відкрийте свій індивідуальний варіант завдання та ескіз деталі;
- виміряйте всі ключові розміри та позначте їх на ескізі;

- визначте вихідну заготовку (циліндрична, прямокутна, квадратна) і матеріал.

Порада для студента: спробуйте передбачити, які розміри будуть найкритичнішими для точності обробки.

3. Встановлення схеми базування:

- позначте, яка поверхня буде базовою (опорна) при установці заготовки;
- продумайте, як закріплення вплине на точність обробки всіх поверхонь.

Порада для студента: уявіть, що станеться, якщо базу вибрати неправильно. Які наслідки для точності та послідовності переходів?

4. Проставлення оброблюваних поверхонь на ескізі:

- позначте всі поверхні, які підлягають точінню, свердлінню, розточуванню та зняттю фаски;
- позначте, які переходи (чорновий чи чистовий) потрібні для кожної поверхні.

Порада для студента: спробуйте визначити оптимальну послідовність обробки для економії часу та збереження точності.

5. Створення 3D ескізу деталі відповідно до варіанту:

- відповідно до варіанту накресліть 3D модель деталі (див. рис. 1.2, б);
- накреслену деталь додайте до звіту.

6. Запис у таблицю змісту операції:

- визначте, які переходи будуть технологічними (ПТ), а які допоміжними (ПД);
- розбийте кожен перехід на робочі та допоміжні ходи;
- заповніть табл. 1.3: включіть номер переходу, установ, вид переходу, дії та примітки.

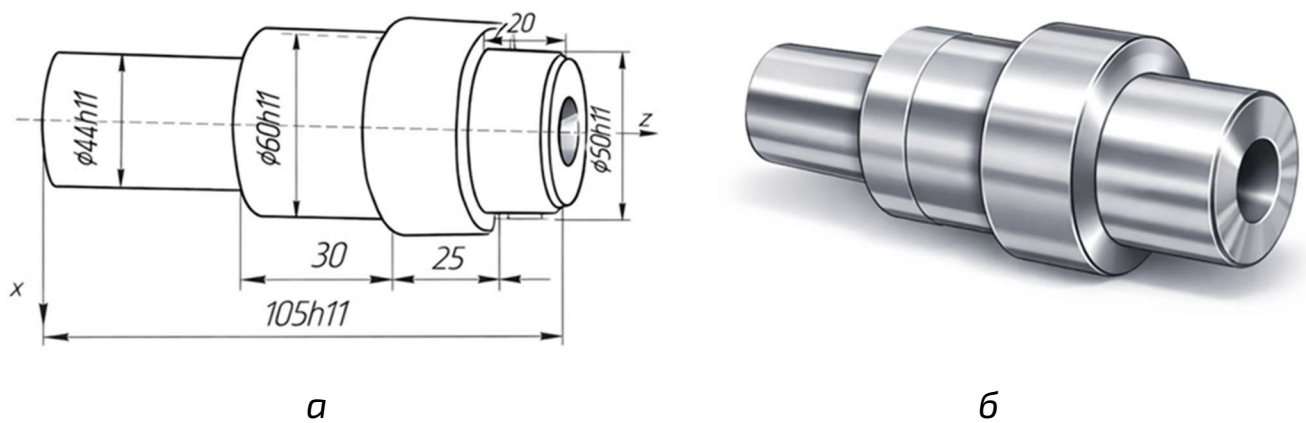


Рис. 1.2. Ескіз та 3D модель ступінчастого вала для проектування: а – ескіз деталі; б – 3D модель деталі

Таблиця 1.3. Зміст операції за переходами (шаблон)

№ переходу	Установ	Вид переходу	Поверхня та дія	Робочий або допоміжний хід	Примітка
1	А	ПД	Встановити і закріпити заготовку	Допоміжний	–
2	А	ПТ	Підрізати торець 1	Робочий	Чорновий хід
3	А	ПТ	Точити поверхню 2	Робочий	Чистовий хід
4	А	ПТ	Точити фаску 3	Робочий	–
5	А	ПТ	Свердлити отвір 5	Робочий	–
6	А	ПТ	Розточити фаску 6	Робочий	–
7	Б	ПД	Переустановити і заготовку	Допоміжний	–
8	Б	ПТ	Підрізати торець 7	Робочий	–
9	Б	ПТ	Точити поверхню 8	Робочий	–
10	Б	ПТ	Точити фаску 9	Робочий	–
11	Б	ПД	Контроль розмірів деталі	Допоміжний	–
12	Б	ПД	Зняти деталь і покласти в тару	Допоміжний	–

Порада для студента: подумайте, як зміна послідовності переходів вплине на продуктивність і точність.

Контрольні питання

1. Що таке технологічний процес, операція, технологічний перехід та робочий хід?
2. Чому робочий хід – це основна одиниця формування поверхні, а не вся операція?
3. У чому полягає деталізація складових технологічної операції на верстатах з ЧПК?
4. Які переваги дає розбивка на кроки та технологічні команди для автоматизації обробки?
5. **Міні-кейс:** уявіть, що верстат виконує перехід без деталізації на кроки. Що може статися з якістю поверхні та точністю?
6. Який порядок визначення складових операції (кількість установів, переходів, ходів)?
7. Як би ви змінили послідовність переходів, якщо б заготовка мала дефекти на одній із поверхонь?
8. **Міні-кейс:** що станеться з точністю деталі, якщо обрати неправильний порядок установів?
9. Як обрана база та порядок переходів впливають на точність, витрати часу та безпеку обробки?
10. Чи можна заощадити час без шкоди якості? Які компроміси можливі?

Зміст звіту

Звіт по роботі повинен містити наступні розділи:

1. **Загальні дані:** номер, назву та мету роботи.
2. **Ескіз заготовки** (додати малюнок деталі (індивідуальний варіант) з зазначенням оброблюваних поверхонь і баз).
3. **Аналіз операційних ескізів та вихідних даних:**
 - визначити кількість установів і баз для обробки;
 - позначити технологічні та допоміжні переходи;

- обґрунтувати послідовність обробки поверхонь.

4. Склад операції та її найменування:

- вказати тип операції (токарна, фрезерна тощо);
- описати загальний склад операції: кількість установів, переходів і робочих/допоміжних ходів.

5. Створення 3D ескізу деталі відповідно до варіанту.

6. Опис операції по переходам:

- використати табл. 1.2. *Зміст операції по переходам* (шаблон наведений вище);
- вказати: номер переходу, вид переходу (ПТ/ПД), короткий зміст дії, примітки.

7. Висновки – узагальнити проведену роботу, зроблені висновки щодо послідовності обробки, ефективності розподілу переходів і установів. До прикладу:

- проведено аналіз операційного ескізу і вихідних даних;
- визначено два установи для токарної обробки;
- розподілено операцію на 12 переходів (технологічних і допоміжних);
- заповнено таблицю змісту операції, що дозволяє скласти керуючу програму для верстата з ЧПК та оцінити трудові й технічні ресурси.

Якщо за таблицею можна написати керуючу програму – робота виконана правильно.

Протокол практичної роботи № 1

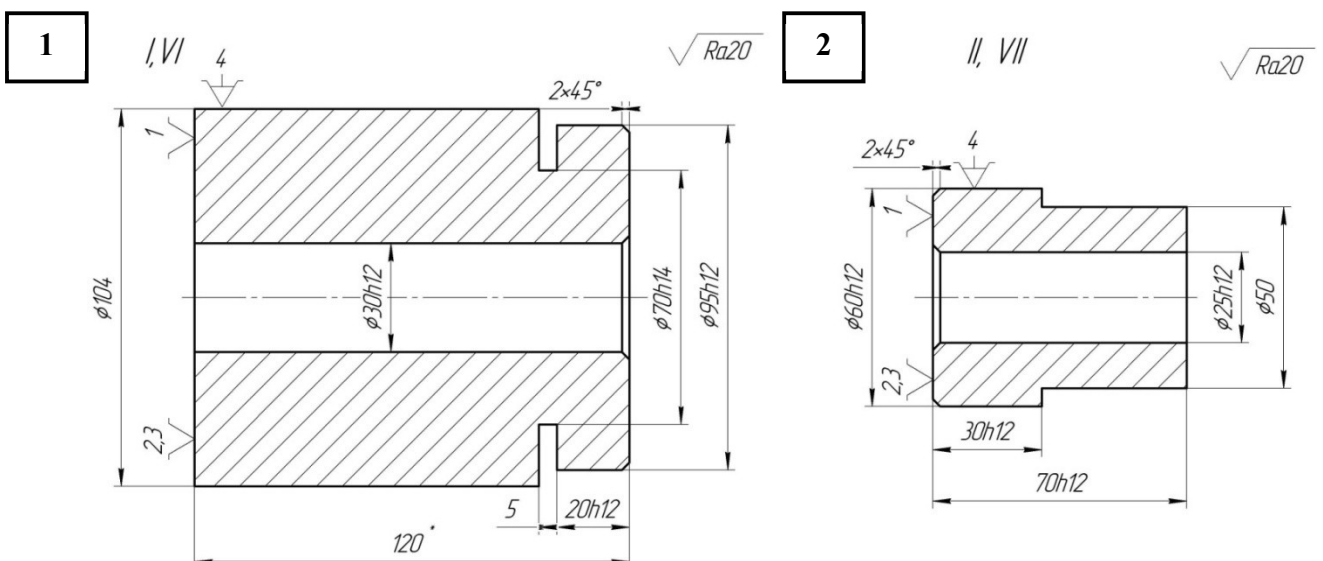
Визначення основних елементів технологічного процесу обробки деталей

Виконав/-ла студент/-ка _____ курсу
Група: _____
Прізвище та ініціали: _____
Дата виконання: « _____ » _____ 20 ____ р.
Оцінка: _____

Мета роботи – сформувати у студентів практичні навички складання технологічної операції механічної обробки деталей та її покрокового опису за переходами; закріпити розуміння основних елементів технологічного процесу механічної обробки; навчити аналізувати операційні ескізи та вихідні дані для обробки заготовки.

Ескіз заготовки

Оберіть ескіз заготовки відповідно до варіанту: _____. Зазначте оброблювані поверхні та бази на ескізі.



Опис операції за переходами

Опишіть операцію виготовлення деталі за переходами (табл. 1.4).

Таблиця 1.4. Зміст операції за переходами

№ переходу	Установ	Вид переходу	Поверхня та дія	Робочий або допоміжний хід	Примітка
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
11					
12					

Висновки

Проведено: _____

Визначено: _____

Розподілено операцію на _____ переходів.

Мета роботи: сформувати у студентів практичні вміння складання та аналізу керуючих програм обробки поверхонь деталей для верстатів з числовим програмним керуванням; навчити принципів побудови керуючих програм; закріпити розуміння структури кадру програми, систем координат та основних технологічних команд.

Очікуваний результат: після виконання роботи студент повинен **знати:** структуру керуючої програми та призначення її елементів, форми запису кадру (N, G, X, Z, F, S, T, M), призначення підготовчих (G) та допоміжних (M) функцій, принципи задання координат і систем відліку, особливості програмування переміщень інструмента; **вміти:** читати та аналізувати керуючу програму, визначати траєкторію руху інструмента за текстом програми, складати прості керуючі програми для токарної та фрезерної обробки, знаходити помилки в програмі та пояснювати їх наслідки; **набути практичних навичок:** запису кадрів керуючої програми, вибору режимів різання в програмі, підготовки програми до виконання на верстаті з ЧПК.

Обладнання та матеріально-технічне забезпечення: фрезерний верстат з числовим програмним керуванням DYNAMYTE 2800; токарний верстат з числовим програмним керуванням ORAC MBC 84; персональний комп'ютер із програмним середовищем введення та перевірки керуючих програм; комплект стандартного ріжучого інструменту для токарної та фрезерної обробки; навчальні заготовки; методичні вказівки та індивідуальні варіанти завдань.

Короткі теоретичні відомості

Сучасне машинобудування все менше залежить від ручних дій оператора і все більше – від правильно сформульованих алгоритмів обробки. Саме тому центральне місце у виробництві займають верстати з числовим програмним керуванням.

Система числового програмного керування – це комплекс технічних і програмних засобів, який забезпечує автоматичне виконання переміщень робочих органів верстата відповідно до заздалегідь складеної програми. Інакше кажучи, верстат працює не тому, що оператор рухає важелі керування, а тому, що він виконує послідовність команд, описаних мовою керування. Таким чином, роль людини змінюється: оператор перестає бути виконавцем рухів і стає розробником алгоритму обробки. Типова схема роботи системи ЧПК подана на рисунку 2.1.

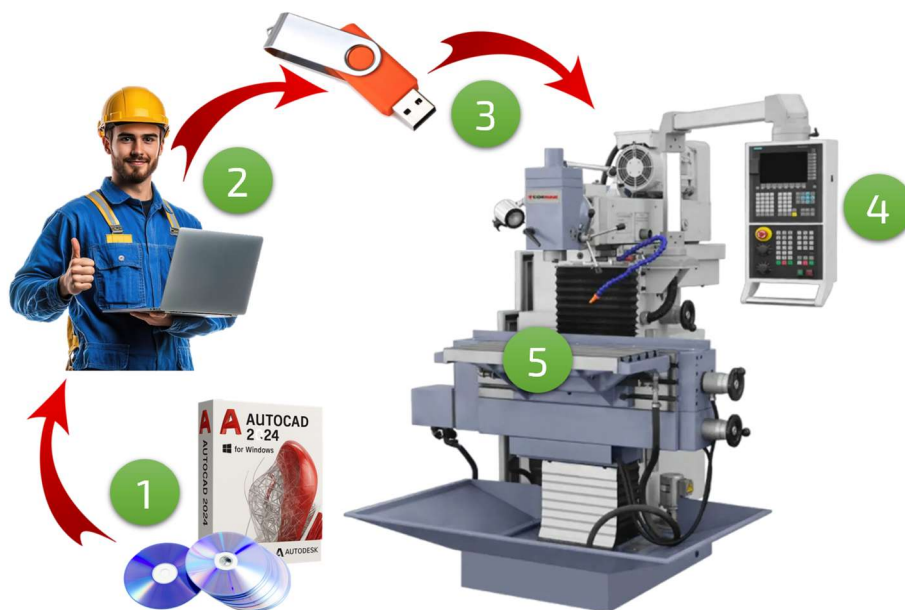


Рис. 2.1. Типова структура системи керування верстатом з числовим програмним керуванням: 1 – CAD/CAM система підготовки керуючої програми; 2 – інженер-технолог з програмування ЧПК-верстата з персональним комп'ютером; 3 – портативний носій даних для передачі керуючої програми; 4 – пульт керування системи ЧПК; 5 – верстат з ЧПК

Спочатку у CAD/CAM-системі створюється геометрична модель деталі та траєкторія руху інструмента. На основі цієї інформації формується керуюча програма у вигляді G-коду. Далі програма передається до контролера верстата, який інтерпретує її у сигнали керування приводами подач і шпинделя. Приводи переміщують інструмент, а верстат відтворює задану траєкторію з необхідною точністю. Отже, обробка деталі на верстаті з ЧПК фактично є процесом виконання алгоритму: **геометрія** → **програма** → **команди** → **рух** → **отримана поверхня**.

Саме тому для правильного програмування необхідно розуміти не лише форму деталі, а й логіку роботи системи керування. Без цього неможливо усвідомлено скласти керуючу програму, навіть знаючи окремі команди.

Керуюча програма (далі – КП) містить повну інформацію, необхідну верстату з ЧПК для виконання обробки деталі. У ній задаються координати точок траєкторії руху інструменту, режими різання – швидкість різання V або частота обертання шпинделя S , подача F , а також технологічні та допоміжні команди (зміна інструменту, вмикання/вимикання шпинделя, подача охолоджувальної рідини тощо). Таким чином, керуюча програма визначає не лише геометрію переміщень інструменту, а і повну послідовність технологічних дій верстата.

При записі керуючої програми використовується поняття **слова програми**. **Слово** – це впорядкована послідовність символів, яка сприймається системою керування як єдине ціле. Воно складається з: адреси (літери), що визначає тип даних; числового значення, яке задає величину переміщення, режим роботи або код функції.

Адреса визначає призначення інформації, що міститься у слові. Наприклад, **Y+013345** означає переміщення супорта у додатному напрямку осі Y на 13345 імпульсів. Якщо дискретність переміщення становить 0,01 мм/імпл, то фактичне переміщення дорівнює: $13345 \times 0,01 = 133,45$ мм.

Кілька слів, об'єднаних за змістом і призначених для опису певної дії, утворюють **фразу**. Фраза містить інформацію про: геометричні параметри руху інструмента; технологічні режими обробки; виконання допоміжних операцій (підвід інструмента, початок програми тощо).

Послідовність фраз визначає послідовність обробки окремих ділянок заготовки. Програма може записуватися двома способами: фразами змінної довжини; фразами постійної довжини.

Фрази постійної довжини називаються кадрами. **Кадр** – це впорядкована послідовність слів, розміщених у визначеному порядку, що містить повну інформацію про одну технологічну дію верстата. При записі програми кадрами кожному слову відводиться строго визначене місце у рядку, що забезпечує однозначне зчитування інформації системою ЧПК та підвищує надійність виконання програми.

Запис керуючої програми фразами змінної довжини може виконуватися трьома способами: **адресним, табуляційним та універсальним.**

Адресний спосіб	Кожне слово починається з літери-адреси, яка визначає призначення наступного числового значення (координата, подача, швидкість, функція тощо). Довжина фрази при цьому не є сталою – вона залежить від кількості використаних слів. Одна фраза відокремлюється від іншої символом Н (ознака закінчення фрази).
Табуляційний спосіб	Слова розташовуються у строго визначеній послідовності і йдуть одне за одним. Їх розділяє знак табуляції – літера Я (умовне позначення TAB). У цьому випадку зміст слова визначається не адресою, а його позицією у фразі.
Універсальний спосіб	Поєднує елементи адресного та табуляційного запису: частина інформації задається за допомогою адрес, а частина – фіксованим положенням у рядку. Такий підхід дозволяє спростити програму і водночас зберегти її наочність.

Етапи підготовки керуючої програми. Підготовка керуючої програми є послідовним технологічним процесом і складається з трьох основних етапів:

1. Розробка технологічної операції. Визначаються схема встановлення і закріплення деталі, спосіб обробки, підбирається інструмент і призначаються режими різання (приблизно від 20 % до 30 % трудомісткості).

2. Розрахунок керуючої інформації. Обчислюються геометричні параметри траєкторії руху інструменту та технологічні режими обробки (від 40 % до 45 % трудомісткості).

3. Кодування, контроль і налагодження програми. Запис програми мовою ЧПК, перевірка та відпрацювання на верстаті або в режимі імітації (від 20 % до 25 % трудомісткості).

Для програмування руху інструменту необхідно розрахувати координати характерних точок траєкторії – так званих **опорних точок**. **Опорними** називають точки, у яких: змінюється напрямок руху інструмента; змінюється швидкість переміщення; подається технологічна команда.

Їх визначають на основі геометрії оброблюваної поверхні з урахуванням форми інструмента. Як правило, програмується не сама поверхня деталі, а траєкторія точки інструмента – вершини фрези або центра радіуса заокруглення. Фактично задається еквідистанта до контуру деталі (рис. 2.2).

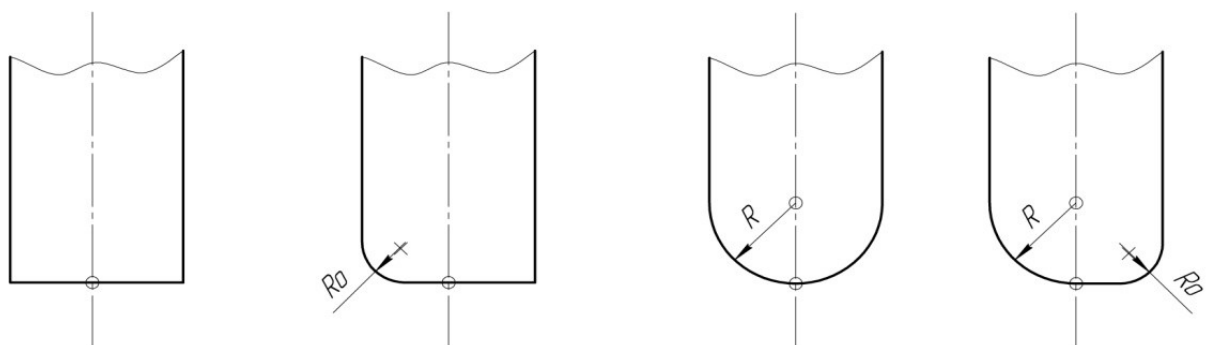


Рис. 2.2. Геометрія оброблюваної поверхні

Носії та стандарти запису керуючих програм. Для верстатів з ЧПК керуюча програма записується на програмоносії. Історично використовувалися перфострічки, перфокарти та магнітні стрічки, а в сучасних системах – USB-накопичувачі, пам'ять контролера або передача по мережі. Незалежно від типу носія, правила кодування інформації залишаються єдиними. Формат запису керуючих програм для верстатів з числовим програмним керуванням регламентується міжнародним стандартом ISO 6983, який визначає структуру програм мовою G-кодів.

Структура керуючої програми.

Керуюча програма являє собою послідовність кадрів (блоків). Кожний рядок програми називається **кадром** і містить: номер кадру; одне або кілька інформаційних слів (координати, режими, функції). Таким чином, саме кадр є мінімальною логічною командою, яку контролер верстата читає, аналізує і виконує.



Щоб краще зрозуміти, як контролер інтерпретує кадр та чому порядок слів має значення, перегляньте коротке пояснення у відео (див. QR-код).

Після ознайомлення з відеоматеріалом розглянемо структуру керуючої програми більш системно.

Програмування обробки на верстатах з ЧПК виконується мовою стандарту ISO (G- та M-коди).

Усі команди програми поділяються на дві основні групи:

- **G-коди** (підготовчі функції) – визначають режим роботи інтерполятора та тип руху інструмента (лінійне переміщення, дуга, система координат тощо);
- **M-коди** (допоміжні функції) – керують роботою обладнання (шпиндель, охолодження, зміна інструменту, завершення програми).

Керуюча програма складається з послідовності кадрів, які виконуються системою ЧПК строго один за одним. Кожен кадр містить щонайменше одну команду і розглядається системою як завершена інструкція.

Типова логічна структура керуючої програми. Незалежно від складності деталі, будь-яку програму обробки можна умовно поділити на чотири функціональні блоки.

1. Початок програми (підготовчий блок). Система переводиться у визначений стан:

- вибір системи одиниць (**G21**);
- скасування попередніх корекцій;
- вибір робочої системи координат;
- повернення інструменту у нуль верстата.

Цей блок часто називають **рядком безпеки**, оскільки він усуває невизначеність попереднього стану верстата.

2. Підготовка інструмента. Виконується:

- вибір інструмента;
- активація корекції;
- запуск шпинделя;
- увімкнення охолодження.

На цьому етапі верстат ще не обробляє деталь, а лише готується до різання.

3. Основна обробка. Найбільша частина програми – рух інструмента по траєкторії. Саме тут використовуються:

- координатні переміщення (**X, Z, Y**);
- робочі подачі **F**;
- інтерполяції **G00, G01, G02, G03**.

Контролер виконує рухи кадр за кадром, формуючи реальну траєкторію різання.

4. Завершення програми. Після обробки необхідно:

- вимкнути охолодження;
- зупинити шпиндель;
- відвести інструмент у нуль;
- завершити програму (**M30**).

Цей блок є обов'язковим – без нього верстат може залишитися у небезпечному стані.

Структура кадру керуючої програми. Кожна керуюча програма для верстата з ЧПК складається з послідовності кадрів. **Кадр** – це одна стрічка програми, яка містить всю інформацію для виконання конкретного етапу обробки або допоміжної функції. **Основні складові кадру:**

1. Порядковий номер кадру – позначається **Nxx**, де **xx** – будь-яке ціле число. Нумерація допомагає системі ЧПК та оператору відстежувати виконання програми. Приклад: **N10** – кадр номер 10.

2. Підготовчі функції (G-коди) – задають режими руху інструмента та тип обробки. У кадрі може бути декілька G-кодів, але вони повинні належати до різних груп функцій, і діяти до того моменту, поки не буде змінена іншою функцією тієї ж групи. Приклад: **G01** – лінійна інтерполяція, **G90** – абсолютне позиціонування.

3. Допоміжні функції (M-коди) – керують додатковими процесами: ввімкнення/вимкненням шпинделя, охолодженням, зміною інструменту. Приклад: **M03** – ввімкнення обертання шпинделя за годинниковою стрілкою.

4. Координати переміщення інструмента – задають позицію в просторі за осями X, Y, Z (а також U, V, W^2 для додаткових осей). Приклад: **X50.0 Y25.0 Z-5.0** – переміщення інструмента у точку з координатами $X = 50$ мм, $Y = 25$ мм, $Z = -5$ мм. Параметри подачі та швидкості –

² U, V, W зазвичай використовуються як додаткові лінійні координати (зміщення або інкрементальні осі) у системах із двома одночасними інструментами чи при багатоступеневих налаштуваннях, але це не стандартні обертальні осі ЧПК

швидкість переміщення інструмента або обертів шпинделя. Приклад: **F150** – подача 150 мм/хв, **S1000** – оберти шпинделя 1000 об/хв.

5. Додаткові параметри або коментарі – включають вибір інструмента, компенсації, виклик підпрограм, затримки, коментарі для зручності оператора. Текст у дужках () ігнорується системою ЧПК, але допомагає орієнтуватися в програмі. Приклад: (Фреза D10 – чистове точіння).

У програмуванні ЧПК кожен рядок програми, або кадр, виконує одну або кілька команд і закінчується натисканням Enter, тобто нового рядка. У кінці кадру **ставити крапку з комою не потрібно**, оскільки сучасні системи ЧПК (FANUC, Siemens та ін.) автоматично розпізнають кінець команди по переходу на новий рядок. Крапка з комою використовувалася лише в старих або специфічних системах як роздільник команд, але в сучасних версіях вона непотрібна і може викликати помилку. Тому при складанні програм слід писати кожен кадр окремо, чітко і зрозуміло, без додаткових роздільників.

Зразок повного коду:

```
N10 G01 X50.0 Y25.0 Z-5.0 F150 S1000 M08 T04 (Фреза D10)
```

Пояснення прикладу:

N10 – номер кадру;

G01 – режим лінійного переміщення інструмента (режим обробки);

X50.0 Y25.0 Z-5.0 – координати кінцевої точки переміщення;

F150 – швидкість подачі;

S1000 – оберти шпинделя;

M08 – ввімкнення охолодження;

T04 (Фреза D10 (чистове точіння)) – функція інструменту. **Фреза D10**

(чистове точіння) – це коментар для оператора, який програма ігнорує і не виконує.

Порада для студента: спершу розберіться з усіма складовими кадрю окремо, а потім практикуйтеся у складанні повних кадрів. Це допомагає уникнути помилок при програмуванні та забезпечує правильне виконання технологічної операції.

Кодові символи та команди керуючої програми. Щоб система ЧПК могла інтерпретувати керуючу програму, кожне слово кадрю записується у вигляді стандартизованого буквено-числового коду. Фактично керуюча програма є текстом, записаним спеціальною технологічною мовою, де кожна літера має строго визначене призначення. Літера визначає тип параметра (адресу), а число – його значення. Наприклад, **G01 X50 Z-10 F0.2** означає: **G01** – лінійне переміщення, **X50 Z-10** – координати кінцевої точки, **F0.2** – робоча подача.

Таким чином, для читання керуючої програми необхідно знати набір кодових символів, які фактично утворюють алфавіт мови програмування ЧПК. Знаючи їх, оператор або технолог може читати програму так само, як креслення. Найбільш поширені кодові символи наведені у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1. Кодові символи, які використовуються в КП

Символ	Значення
A	Кут повороту навколо осі X
B	Кут повороту навколо осі Y
C	Кут повороту навколо осі Z
D	Друга функція інструменту (вибір діаметра інструмента)
E	Друга функція подачі (швидкість гравірування або точність контурної обробки)
F	Перша функція подачі (швидкість подачі)
G	Підготовчі функції (G-коди)
H	Вибір компенсації довжини інструмента
I	Кругова інтерполяції або крок різьби паралельно осі X
J	Кругова інтерполяції або крок різьби паралельно осі Y
K	Кругова інтерполяції або крок різьби паралельно осі Z
L	Лічильник для циклів, що повторюються (число в діапазоні від 0 до 32767)
M	Допоміжні функції (M-коди)

Кінець табл. 2.1

Символ	Значення
N	Номер кадру
O	Ім'я/Номер програми
P	Затримка або виклик підпрограми G98, або виклик процедури G97
Q	Додаткові дані фіксованого циклу
R	Кругова інтерполяція або додаткові дані фіксованого циклу: для задання площини повернення
S	Функція головного руху (команда швидкості обертання шпинделя)
T	Перша функція інструменту (Код вибору інструмента)
U	Додаткова зовнішня лінійна вісь, що паралельна осі X
V	Додаткова зовнішня лінійна вісь, що паралельна осі Y
W	Додаткова зовнішня лінійна вісь, що паралельна осі Z
X	Первинна довжина переміщення, що паралельна осі X (переміщення по осі X)
Y	Первинна довжина переміщення, що паралельна осі Y (переміщення по осі Y)
Z	Первинна довжина переміщення, що паралельна осі Z (переміщення по осі Z)
%	Початок програми
(Кругла дужка ліва
)	Кругла дужка права
+	Плюс
-	Мінус
.	Крапка
;	Пропуск кадру
:	Головний кадр

Таким чином, кожний кадр програми є набором параметрів, записаних за правилом: [Адреса] + [Числове значення]. Наприклад, **N20 G01 X40 Z-12 F0.25 S800 M03**, де **N20** – номер рядка, **G01** – робоче лінійне переміщення, **X40 Z-12** – координати точки, **F0.25** – подача, **S800** – оберти шпинделя, **M03** – обертання шпинделя за годинниковою стрілкою. Отже, **керуюча програма** – це формалізований технологічний опис руху інструмента, записаний мовою кодових символів.

Основні G-коди. G-коди визначають підготовчі або робочі функції верстата. Вони задають тип інтерполяції, режим обробки, координатну систему та інші ключові параметри. Найпоширеніші G-коди наведені у табл. 2.2.

Таблиця 2.2. Підготовчі функції (G-коди)

Позначення	Опис
G00	Рух на швидкому ході (позиціонування без різання)
G01	Лінійна інтерполяція на заданій подачі для різання/обробки
G02	Кругова інтерполяція за годинниковою стрілкою (CW)
G03	Кругова інтерполяція проти годинникової стрілки (CCW)
G04	Пауза на заданий час
G05	Високошвидкісне керування (HSC), спеціальні функції (не стандарт ISO/FANUC)
G06	Зменшення допустимого рівня прискорення (застаріла або специфічна для деяких контролерів, зокрема FANUC)
G07	Відміна зменшення допустимого рівня прискорення (застаріла або специфічна для деяких контролерів, зокрема FANUC)
G08	Керування швидкістю подачі в точках перегину (опціонально)
G09	Відміна керування швидкістю подачі в точках перегину (опціонально)
G10	Встановлення значень робочих систем координат та відступів інструменту
G11	Відміна встановлених таблиць відступів / параметрів (G10 OFF)
G12	Кругова інтерполяція за годинниковою стрілкою в полярних координатах (CW)
G13	Кругова інтерполяція проти годинникової стрілки в полярних координатах (CCW)
G14	Можливість програмувати коефіцієнта підсилення по швидкості
G15	Відміна полярного режиму
G16	Вибір полярного режиму
G17	Вибір площини XY
G18	Вибір площини ZX
G19	Вибір площини YZ
G20	Використання дюймових одиниць

Продовження табл. 2.2

Позначення	Опис
G21	Використання міліметрових одиниць
G22	Активація осі
G23	Програмування умовного переходу
G24	Програмування безумовного переходу
G28	Повернення в нульову точку станка через проміжну позицію
G28.1	Каліброва вісь
G30	Повернення до іншої попередньо заданої точки
G31	Подача до сигналу пропуску
G32	Нарізання різьби без компенсуючого патрона
G34	Округлення двох лінійних ділянок (не стандарт FANUC)
G35	Відміна округлення двох лінійних ділянок (не стандарт FANUC)
G36	Відновлення параметрів відхилення, які встановлені в машинних параметрах (опціонально; не стандарт FANUC)
G37	Програмування координат полюса дзеркального відображення
G38	Активація дзеркального відображення, повороту, масштабування
G39	Відміна функції дзеркального відображення (опціонально; не стандарт FANUC)
G40	Відміна компенсації радіусу інструмента
G41	Компенсація радіусу інструмента ліворуч від контуру
G42	Компенсація радіусу інструмента праворуч від контуру
G43	Компенсація довжини інструмента (+). Задається параметром H
G44	Компенсація довжини інструмента (-) (не використовується у стандарті FANUC. Частіше лише G43/G49)
G49	Відміна компенсації на довжину інструменту
G50	Обмеження частоти обертання шпинделя / відміна режиму масштабування
G51	Режим масштабування
G52	Тимчасове зміщення робочої координатної системи
G53	Рух у абсолютних координатах станка, тобто ігнорування робочих систем координат (G54-G59) і позиціонування відносно машинного нуля (нуль станка)

Продовження табл. 2.2

Позначення	Опис
G54-G59 ³	Вибір робочої системи координат № 1-№6 (встановлення нуля деталі для обробки)
G60	Фіксована обробка контуру (жорстка траєкторія інструмента)
G61	Точне позиціонування (строга зупинка, модальна)
G62	Точне плавне позиціонування (часткова відміна режиму G61) для плавного проходження кривих без різких зупинок
G63	Режим точного нарізання різьби або фрезерування з імпульсною подачею
G64	Вільний режим різання
G65	Виклик нестандартного (універсального) макроциклу ⁴ для одного блоку; макроцикл виконується одноразово
G66	Модальний виклик макроциклу; після активації макрокоманда виконується для всіх наступних блоків обробки, поки не буде відмінена командою G67
G67	Відміна модального виклику макроциклу
G68	Активація обертання координатної системи; параметри: зазвичай X, Y – центр обертання, A – кут повороту (у градусах).
G69	Відміна обертання координатної системи (повертає систему координат до початкового, стандартного положення, тобто відмінює дію G68)
G70	Цикл чистової обробки, який застосовується після G71 для остаточного проходу по заданому контуру
G71	Цикл чорнового точіння, який видаляє основний припуск поздовжніми проходами
G72	Цикл чистового точіння (альтернатива G70); використовується для невеликих або завершальних проходів, знімає мінімальний припуск
G73	Постійний цикл високошвидкісного (переривчастого) свердління, який використовується для обробки глибоких отворів (з періодичним частковим підйомом інструмента для видалення стружки)

³ Позначення G54...G59 означає вибір робочої системи координат №1-6. Кожна система координат задає нульову точку деталі для обробки. Наприклад: G54 – перша робоча система координат (нульова точка деталі № 1), G55 – друга робоча система координат (нульова точка деталі № 2) ... G59 – шоста робоча система координат (нульова точка деталі № 6). Це дозволяє програмі ЧПК змінювати нульові точки для різних деталей або операцій без перепрограмування координат інструмента.

⁴ Макроцикл / макрокоманда – це запрограмована послідовність команд ЧПК, яка виконує певну повторювану операцію (наприклад, свердління, нарізання різьби, розточування) із заданими параметрами. Макрокоманди можуть мати параметри (X, Y, Z, R, P, Q тощо) для налаштування позицій, глибини, подачі та інших параметрів обробки.

Продовження табл. 2.2

Позначення	Опис
G74	Фіксований цикл нарізання лівої різьби або свердління (часто використовується для нарізання різьби мітчиком)
G75 ⁵	Робота з датчиком дотику / циклічне вимірювання
G76	Фіксований цикл тонкого розточування; параметри задаються детально через P, Q, R, X, Z
G77	Відміна фіксованого циклу, який був активований раніше (наприклад, свердлильного або токарного циклу)
G78	Активація свердлильної осі
G79	Деактивація однієї свердлильної осі або всіх відразу
G80	Відміна роботи стандартних циклів (відміна модального руху); дозволяє завершити роботу циклів G81-G89, уникнувши небажаних повторень і забезпечуючи безпечну зміну операцій
G81	Цикл свердління і чистового розточування центра отвору
G82	Цикл точкового свердління (поглиблення); виконує свердління з паузою у кінці ходу для утворення точкового поглиблення (наприклад, для центрування під свердла або заклепки)
G83	Стандартний цикл глибокого свердління з періодичним виводом свердла із отвору; параметри: R – рівень початку, Q – крок підйому/глибини для кожного циклу
G84	Цикл нарізання різьби (праве обертання, з компенсуючим патроном)
G85	Фіксований цикл розточування та повернення на швидкому ході без паузи
G86	Фіксований цикл розточування отвору з зупинкою в кінцевій точці та швидким поверненням
G87	Фіксований цикл розточування з підйомом вручну
G88	Фіксований цикл розточування з паузою і підйомом вручну
G89	Фіксований цикл розточування з паузою і розточуванням; інструмент рухається на робочій подачі вниз, зупиняється на заданий час (параметр P), після чого продовжує розточування або повертається
G90 ⁶	Абсолютне позиціонування – координати інструмента задаються відносно нульової точки робочої або машинної системи

⁵ Інструмент або датчик дотику рухається до деталі, фіксує контакт або положення поверхні, після чого ЧПК може автоматично скоригувати координати або виконати подальші дії. Застосовується для визначення нульових точок, перевірки розмірів, калібрування інструменту або контролю положення деталей.

⁶ Зручно для точного переміщення між контрольними точками

Позначення	Опис
G91 ⁷	Інкрементне (відносне) позиціонування – координати інструмента задаються відносно поточного положення
G92	Зміщення нуля робочої системи координат або обмеження максимальної частоти обертання шпинделя
G93	Програмування часу обробки кадру – контролер обчислює швидкість подачі так, щоб рух завершився за заданий час
G94 ⁸	Програмування подачі в мм/хв
G95 ⁹	Програмування подачі в мм/об
G96 ¹⁰	Функція постійної швидкості різання – підтримує постійний швидкісний режим різання по поверхні деталі, незалежно від діаметра заготовки
G97 ¹¹	Функція постійної частоти обертання шпинделя – встановлює стале число обертів шпинделя (RPM), незалежно від діаметра деталі
G98 ¹²	Повернення до початкової точки в постійному циклі – у фіксованих циклах свердління або розточування інструмент повертається до початкової точки перед наступним циклом
G99 ¹³	Повернення у площину R у фіксованих циклах – у фіксованих циклах свердління або розточування інструмент повертається у задану проміжну площину R, а не повністю на початкову точку

Примітка: G-коди формують логіку руху інструмента. Їх завжди поєднують із координатами та іншими параметрами кадру.

Всі **G-коди умовно поділяються на дев'ять груп**, що допомагає систематизувати їх та легко орієнтуватися у програмі:

Група I – позиціонування та інтерполяція: **G00** – швидкий хід у задану точку без різання; **G01** – лінійна інтерполяція для різання по прямій; **G02**

⁷ Зручно для повторюваних або циклічних переміщень, коли потрібне зміщення на певну величину

⁸ Підходить для стандартної обробки металу та деревини, де важлива постійна швидкість подачі інструмента

⁹ Застосовується у токарній та фрезерній обробці, де точність подачі на оберт має критичне значення

¹⁰ Використовується переважно при токарній обробці конічних або циліндричних деталей, де діаметр змінюється

¹¹ Часто використовується перед активацією G96, щоб перейти у постійне обертання

¹² Використовується у циклах G81-G89 для запобігання зіткнення інструмента з заготовкою

¹³ Використовується для скорочення часу циклу при серійному свердлінні або розточуванні

і **G03** – кругова інтерполяція за годинниковою стрілкою або проти годинникової стрілки.

Група II – вибір площини кругової інтерполяції: **G17, G18, G19** задають площину **XY, ZX** або **YZ**, що важливо при обробці дуг і кіл.

Група III – корекція інструмента по діаметру/радіусу: **G40, G41, G42** відповідають за компенсацію радіусу інструмента; від **G43** до **G52** забезпечують корекцію довжини або позиції інструмента.

Група IV – корекція на довжину або положення інструмента: від **G53** до **G59** використовуються для зміни нульових точок або вибору робочих систем координат. Наприклад, від **G54** до **G59** дозволяють обирати одну з шести робочих систем, що особливо зручно при обробці декількох деталей на одній установці.

Група V – точне та швидке позиціонування: від **G56** до **G62** забезпечують контроль швидкості і траєкторії інструмента для безпечного та ефективного переміщення.

Група VI – стандартні цикли обробки отворів: від **G80** до **G89** включають цикли свердління, розточування та нарізання різьби. Наприклад, **G81** – просте свердління, **G83** – глибоке свердління з періодичним виводом свердла.

Група VII – система координат та відлік переміщень: **G90** задає абсолютне позиціонування від нульової точки, **G91** – відносне (інкрементне) позиціонування від попередньої точки, **G92** – тимчасове зміщення «плаваючого нуля».

Група VIII – подача інструмента: **G94** визначає подачу в мм/хв, **G95** – подачу в мм на оберт шпинделя, що дозволяє точно регулювати швидкість подачі залежно від типу обробки.

Група IX – швидкість різання: **G96** встановлює постійну швидкість різання по поверхні деталі (CSS), а **G97** – фіксоване число обертів шпинделя (RPM).

У одному кадрі може бути кілька G-кодів, але вони повинні належати до різних груп, інакше верстат застосує лише останній код з групи. Наприклад:

N10 G01 G17 G94

де **G01** – лінійна інтерполяція (Група I);

G17 – площина XY (Група II);

G94 – подача мм/хв (Група VIII).

Більшість G-кодів є модальними, тобто діють постійно, доки їх не скасує інший код тієї ж групи. Наприклад, якщо кадр містить **G90** (абсолютне позиціонування), цей режим буде застосовуватися у всіх наступних кадрах, поки його не змінить **G91** (інкрементне позиціонування).

Таким чином, розуміння структури кадру, груп G-кодів і модальної поведінки функцій дозволяє правильно писати програми, легко відстежувати рухи інструмента і ефективно застосовувати різні режими обробки без помилок.

Основні M-коди. M-коди керують допоміжними функціями верстата, які не змінюють геометрію деталі, але є обов'язковими для процесу обробки. Найпоширеніші M-коди наведені у таблиці 2.3.

Таблиця 2.3. Допоміжні функції (M-коди)

Позначення	Опис
M00	Програмна зупинка
M01	Зупинка за вимогою програми – умовна зупинка програми, активується якщо увімкнено опцію «Optional Stop» на панелі керування; якщо опція не активована, верстат продовжує роботу без зупинки.
M02 ¹⁴	Зупинка КП, повернення робочих органів у вихідне положення
M03	Обертання шпинделя за годинниковою стрілкою; швидкість задається параметром S (RPM)
M04	Обертання шпинделя проти годинникової стрілки; швидкість задається параметром S (RPM)

¹⁴ Після M02 програма вважається завершеною, відновлення початкових координат (нуль станка)

Кінець табл. 2.3

Позначення	Опис
M05	Зупинка шпинделя
M06	Зміна інструменту ¹⁵
M07 ¹⁶	Увімкнення охолодження (повітря)
M08 ¹⁷	Увімкнення охолодження (рідина)
M09	Вимкнення охолодження (повітря / рідина)
M10	Затиснення стола або шпинделя; увімкнення гальм 4-ої осі
M11	Розтискання стола або шпинделя; вимкнення гальм 4-ої осі
M30 ¹⁸	Завершення програми і повернення у початкову точку
M36 ¹⁹	Вибір нижнього діапазону подачі або частоти обертання шпинделя – контролер обмежує максимальні значення подачі і обертів, що входять у «нижній діапазон»
M38 ²⁰	Вибір верхнього діапазону подачі або частоти обертання шпинделя – контролер дозволяє досягати вищих значень подачі та обертів, які входять у «верхній діапазон»
M47	Перезапуск від першого кадру – програма запускається повторно з першої команди, без ручного втручання
M48	Увімкнення контролю подачі та швидкості – вмикає контроль максимальної подачі та обертів шпинделя, заданих у програмі
M49	Відміна контролю подачі та швидкості – дозволяє ігнорувати обмеження подачі і обертів, корисно при спеціальних операціях
M98	Виклик підпрограми (наприклад, для повторюваних циклів обробки); викликає підпрограму, яка закінчується командою M99
M99 ²¹	Вихід з підпрограми або циклу; повертає керування до головної програми після підпрограми

¹⁵ Вказується номер інструмента через T (наприклад, T01 M06); використовується у модальних програмах для серійної обробки. Завжди спочатку переміщення у безпечну точку, потім T-номер + M06, і лише після цього G43 + обертання шпинделя.

¹⁶ Використовується для повітряного охолодження, очищення стружки

¹⁷ Використовується для охолодження інструмента і деталі рідиною

¹⁸ На відміну від M02, M30 може запускати програму повторно з початку при серійному виробництві

¹⁹ Застосовується, коли потрібно знизити подачу або частоту обертання для делікатної обробки або при використанні маленьких інструментів (наприклад: для тонкого свердління, тонкого фрезерування або обробки чутливих матеріалів).

²⁰ Використовується для збільшення подачі або обертів шпинделя для грубих операцій або при роботі з великими інструментами (наприклад: чорнове фрезерування, швидке свердління, обробка великих заготовок).

²¹ Якщо використовується в серійному циклі, може повторювати його

M-коди завжди використовуються у кадрах після визначення руху або одночасно з ним для підготовки інструмента.

Наведемо приклад кадру керуючої програми:

```
N20 G21 G90 G00 X0 Y0 Z50 M08  
N25 T01 M06  
N30 G01 X50 Y20 Z-10 F0.2 S800 M03  
N35 G00 Z50 M09  
N40 M30
```

Пояснення:

N20 – підготовчий кадр: встановлює метричну систему, абсолютне програмування, швидке переміщення та включає охолодження;

N25 – вибір інструмента та активація компенсації його довжини;

N30 – робочий хід: інструмент рухається до заданих координат на робочій подачі з обертами шпинделя;

N35 – вихід інструмента з деталі та вимкнення охолодження;

N40 – завершення програми і повернення у початкову точку.

Перед тим як писати програму, необхідно розбити деталь на траєкторії руху інструменту. Кожен рух – окремий кадр, де G-коди визначають тип руху, M-коди керують режимами, а координати і подача – параметри переміщення.

Порядок проведення роботи

1. Вступне пояснення викладачем. Викладач роз'яснює основні положення програмування верстатів з ЧПК, зокрема:

- структуру стандартної системи керування верстатом (CAD/CAM → підпрограма → контролер → виконавчі органи верстата);
- основні етапи підготовки керуючої програми (розробка технологічної операції, розрахунок координат, кодування та налагодження);
- призначення та структуру кадру керуючої програми (порядковий номер, підготовчі функції, допоміжні функції, координати переміщень, коментарі).

2. Демонстрація інтерфейсу Mach3 інженером. Студенти

спостерігають за тим, як відбувається:

- завантаження керуючої програми;
- встановлення параметрів інструменту;
- виконання базових команд переміщення та запуск обробки;
- контроль активованих G- та M-кодів.

3. Самостійна робота студента:

- розшифрувати кадр керуючої програми згідно з індивідуальним варіантом;
 - визначити, які G-коди та M-коди використовуються, та що вони роблять;
 - проаналізувати послідовність команд і зрозуміти логіку переміщень інструменту та виконання допоміжних функцій.

Контрольні питання

1. Які складові стандартної системи керування обладнанням з ЧПК і яку роль кожна з них виконує?

2. На яких етапах підготовки КП витрачається найбільше часу та чому?

3. Як розрізняти абсолютні та відносні переміщення у кадрах програми?

4. Чому для одного кадру можна використовувати декілька G-кодів, але не з однієї групи?

5. **Міні-кейс:** уявіть, що програма переміщує інструмент по прямій, але після запуску шпиндель не обертається. Які кадри або коди варто перевірити перш за все?

6. **Міні-кейс:** Ви виявили, що координати інструменту зсунулися на 2 мм по осі Y. Які кадри або підготовчі функції могли викликати цю помилку?

7. **Міні-кейс:** кадр містить G01 X100 Y50 Z-10 F150. Які потенційні помилки можуть виникнути, якщо F буде надто великою?

8. Міні-кейс: чи можна у одному кадрі використовувати дві G-функції з однієї групи? Чому так чи ні?

9. Міні-кейс: кадр з M30. Що відбувається після його виконання, і що буде, якщо забути цей кадр у кінці програми?

Зміст звіту

Звіт по роботі повинен містити наступні розділи:

1. Номер і назва, мета роботи.

2. Розшифровка кадру керуючої програми за індивідуальним варіантом згідно табл. 2.4, у якій має бути зазначено: порядковий номер кадру, використані G-коди та їх призначення, використані M-коди та їх функції, координати переміщень інструменту, допоміжні команди (коментарі, ввімкнення/вимкнення охолодження, зміна інструменту тощо).

3. Висновки щодо послідовності виконання кадрів та логіки обробки.

Таблиця 2.4. Приклад розшифровки кадру керуючої програми

№ кадру (N)	Команда / Слово	Тип коду (G, M, F, ...)	Значення чи призначення	Вісь			Додаткові осі U, V, W	Коментар або примітка
				X	Y	Z		
N01	G21	G-код	Встановлення метричної системи	-	-	-	-	Переводить систему в мм
N02	T01	F / T-код	Вибір інструмента № 1	-	-	-	-	Завантаження інструмента
N03	S500 M03	M-код / F-код	Включення шпинделя 500 об/хв, обертання за год. стрілкою	-	-	-	-	Початок головного руху
N04	G00 X50 Y20 Z10	G-код	Швидкий хід до стартової точки	50	20	10	-	Позиціонування перед обробкою
N05	G01 Z-5 F200	G-код / F-код	Лінійна інтерполяція, робоча подача 200 мм/хв	-	-	-5	-	Початок різання

Протокол практичної роботи № 2

Основи програмування на верстатах з ЧПК

Виконав/-ла студент/-ка _____ курсу
Група: _____
Прізвище та ініціали: _____
Дата виконання: « ____ » _____ 20__ р.
Оцінка: _____

Мета роботи – сформувати у студентів практичні вміння складання та аналізу керуючих програм обробки поверхонь деталей для верстатів з числовим програмним керуванням; навчити принципів побудови керуючих програм; закріпити розуміння структури кадру програми, систем координат та основних технологічних команд.

Індивідуальне завдання

У зазначеному переліку (табл. 2.5) оберіть Ваше індивідуальне завдання – по одному з кожного блоку: зеленого (легкий рівень складності), жовтого (середній рівень складності) та червоного (складний рівень).

Запишіть кадри обраних програм у полі нижче:

Таблиця 2.5. Варіанти індивідуальних завдань до практичної роботи № 2

№ варіанту	Завдання
1	N01 G90 G94 G21 G17 G01 X40 Y20 F100 S800 T1 M01
2	N02 G91 G94 G20 G17 G01 X1 Y2 Z-1 F300 S1200 T2 M30
3	N03 G90 G95 G21 G17 G01 X55 Y15 Z-10 F0.1 S500 T1 M04
4	N04 G91 G95 G20 G17 G01 X4 Y3 Z-2 F0.05 S1000 T1 M03
5	N05 G90 G94 G21 G17 G02 X10 Y15 R20 Z5 F200 S800 T3 M05
6	N06 G91 G95 G20 G17 G03 X1 Y2 R3 Z1 F0.05 S1400 T1 M08
7	N07 G90 G94 G21 G17 G00 X0 Y20 Z-30 F300 S800 T2 M07
8	N08 G91 G95 G20 G17 G03 X2 Y3 R2 Z-1.5 F0.2 S600 T1 M04
9	N09 G90 G94 G21 G17 G01 X50 Y60 F100 S700 T1 M07
10	N10 G91 G95 G20 G17 G01 X3 Z-3 F0.05 S650 T3 M07
11	N11 G90 G94 G21 G17 G00 X15 Y45 F250 S900 T2 M09
12	N12 G91 G94 G21 G17 G02 X100 Y80 I50 J-15 F100 S1000 T1 M01
13	N13 G90 G94 G21 G17 G03 X100 Y80 I-15 J50 F500 S600 T1 M30
14	N14 G91 G94 G21 G17 G02 X50 Y50 J-50 F500 S1100 T1 M03
15	N15 G90 G94 G21 G17 G03 X40 Y100 F500 S700 T2 M06
16	N16 G90 G95 G20 G17 G02 X2 Y3 R2 F0.1 S850 T3 M05
17	N17 G91 G95 G20 G17 G03 X1 Y0 Z-0.2 I-1 F0.05 S550 T1 M03
18	N18 G90 G94 G21 G17 G01 X0 Y50 Z-40 F100 S900 T2 M08

Розшифровка кадру керуючої програми

Розшифруйте код програми (відповідно до індивідуального варіанту), заповнивши табл. 2.6.

Таблиця 2.6. Розшифровки кадру керуючої програми

№ кадру (N)	Команда	Тип коду (G, M, F, ...)	Значення чи призначення	Вісь			Додатко ві осі (U, V, W)	Коментар
				X	Y	Z		
Кадр 1. _____								

4. Значення / Призначення – що саме робить команда, які режими чи дії включає (*встановлення метричної системи, вибір інструмента, включення шпинделя, лінійна інтерполяція* тощо).

5. Координати X, Y, Z та додаткові осі (U, V, W) – числові значення переміщень інструмента.

6. Коментар – додаткова інформація для розуміння, наприклад, зміна інструмента, включення охолодження, початок обробки конкретної поверхні тощо.

Висновки

У ході виконання практичної роботи я одержав практичні навички

навчився

..... Загалом робота допомогла мені **закріпити знання** з основ програмування на верстатах з ЧПК та застосувати їх у моделюванні обробки конкретної деталі.

Мета роботи: сформувати у студентів практичні вміння підготовки керуючої програми для обробки зовнішнього контуру деталей на верстатах з числовим програмним керуванням; навчити обґрунтовано обирати ріжучий інструмент, розраховувати режими різання та будувати траєкторію руху інструмента з урахуванням припусків і компенсації радіуса фрези; закріпити розуміння принципів визначення технологічних параметрів при контурному фрезеруванні.

Очікуваний результат: після виконання роботи студент повинен **знати:** особливості контурного фрезерування зовнішніх поверхонь; принципи вибору кінцевих фрез залежно від матеріалу та геометрії деталі; правила задання підходів і відходів інструмента; сутність компенсації радіуса інструмента (**G41, G42, G40**); залежність між швидкістю різання, частотою обертання шпинделя та подачею; вплив глибини різання і припуску на якість обробки; **вміти:** аналізувати креслення деталі та визначати послідовність обробки; розраховувати частоту обертання шпинделя і подачу; вибирати напрям обходу контуру; визначати точки врізання та виходу інструмента; скласти фрагмент керуючої програми для обробки зовнішнього контуру; перевіряти правильність траєкторії руху інструмента за текстом програми; **набути практичних навичок:** вибору режимів різання при фрезеруванні; застосування компенсації радіуса фрези; побудови траєкторії обробки; підготовки та перевірки керуючої програми перед виконанням на верстаті з ЧПК.

Обладнання та матеріально-технічне забезпечення: фрезерний верстат з числовим програмним керуванням DYNAMYTE 2800; персональний

комп'ютер із середовищем введення та перевірки керуючих програм; комплект кінцевих фрез різного діаметра; цангові або патронні затискні пристрої; навчальні заготовки з конструкційної сталі або алюмінієвого сплаву; креслення деталей та індивідуальні варіанти завдань; методичні вказівки до виконання роботи.

Короткі теоретичні відомості

Контурне фрезерування – це спосіб обробки, під час якого ріжучий інструмент рухається по траєкторії, що повторює форму зовнішньої поверхні деталі. На відміну від позиційної обробки, де важливі лише координати окремих точок, тут визначальною є безперервна траєкторія руху інструмента.

Основне завдання програміста ЧПК – не просто задати координати, а забезпечити:

- правильний підхід до контуру;
- стабільний рух по профілю;
- коректний вихід інструмента;
- відсутність врізання в матеріал²².

Для обробки зовнішнього контуру застосовують кінцеві фрези. Їх діаметр визначає:

- мінімальний радіус у кутах²³;
- точність геометрії;
- величину припуску;
- параметри подачі.

Правильний вибір фрези (рис. 3.1) безпосередньо визначає точність деталі, шорсткість поверхні та тривалість обробки. Під час програмування

²² **Врізання в матеріал** – це ситуація, коли інструмент несподівано або надто глибоко входить у заготовку, пошкоджуючи деталь або сам інструмент.

²³ **Мінімальний радіус у кутах** – це найменший радіус заокруглення, який можна отримати на куті деталі при обробці кінцевою фрезою. У реальному житті верстат і фреза не можуть робити ідеально гострі кути, тому на кутах завжди виходить маленьке заокруглення, яке називають *галтеллю*.

необхідно враховувати не лише діаметр інструмента, а і форму його ріжучої частини.



Рис. 3.1. Види кінцевих фрез (зліва направо): *а* – кульова кінцева фреза (ball end mill); *б* – циліндрична кінцева фреза з 4-ма канавками (4-flute end mill); *в* – циліндрична кінцева фреза з 3-ма канавками (3-flute end mill); *г* – конусна кінцева фреза (taper end mill); *д* – сферична кінцева фреза (radius end mill); *е* – кульова кінцева фреза більшого діаметра (ball end mill); *ж* – чорнова фреза (roughing end mill); *и* – кінцева фреза з радіусною кромкою (bull nose end mill)

Чим більша фреза – тим вища продуктивність, але менша точність у внутрішніх переходах. Чим менша – тим точніше обробка, але довше виконання.

Перед складанням керуючої програми необхідно проаналізувати геометрію деталі. Форма поверхні фактично підказує форму інструмента (див. табл. 3.1).

Порада для студента: для правильного користування табл. 3.1: подивіться на креслення, визначте тип поверхні, оберіть форму фрези, тільки після цього задайте діаметр, подачу та оберти.

Важливо: Помилка вибору інструмента – найчастіша причина поломки фрези, а не помилка G-коду.

Таблиця 3.1. Вибір інструмента залежно від типу поверхні

Тип поверхні, елемент деталі	Рекомендована фреза	Назва англійською мовою	Причина вибору	
Площина		Плоска кінцева	Flat End Mill	Дає рівну поверхню та точні розміри
Паз прямокутний				Формує кути 90°
Кишеня (карман)		Плоска → чистова радіусна	Flat + Bull Nose	Спочатку продуктивність, потім чистота
Зовнішній контур		Радіусна	Bull Nose End Mill	Зменшує сколи та знос
3D поверхня		Кульова	Ball End Mill	Плавна траєкторія без сходинок
Складна криволінійна форма		Кульова	Ball End Mill	Мінімальна шорсткість
Чорнова обробка великого об'єму		Чорнова	Roughing End Mill	Швидке видалення матеріалу / нарізання різьби
Похилі стінки		Конічна	Tapered End Mill	Стабільність і жорсткість
Гравіювання		Конічна малого діаметра	Tapered End Mill	Точність у вузьких місцях
Кромка з радіусом		Радіусна	Bull Nose End Mill	Відсутність концентраторів напружень

Рух інструмента відносно заготовки може виконуватися:

- **зустрічне фрезерування** – подача проти напрямку обертання (рис. 3.2, а);

- **попутне фрезерування** – подача за напрямком обертання (рис. 3.2, б).

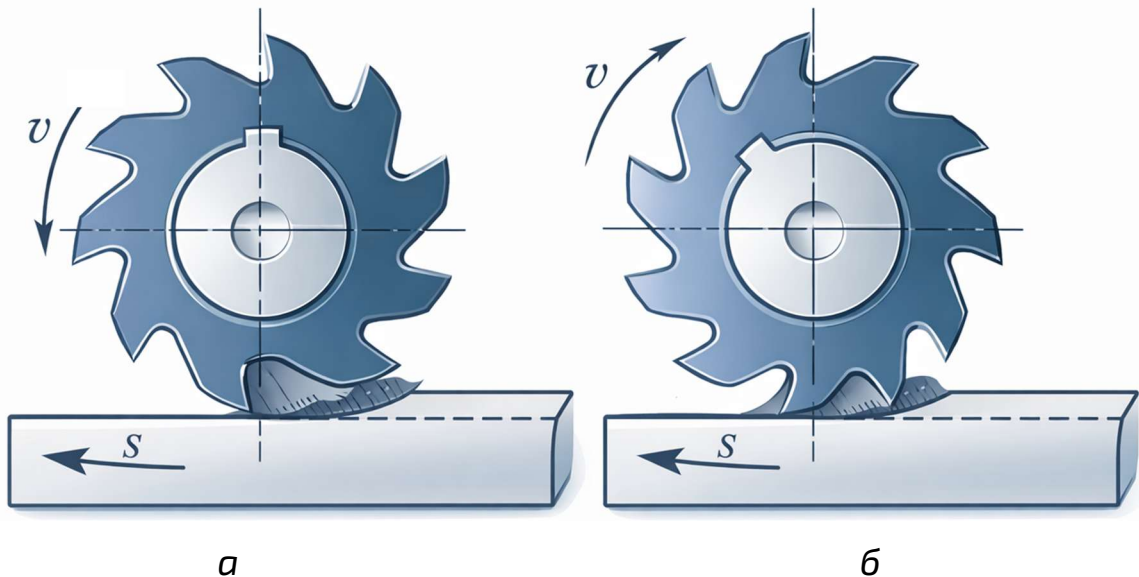


Рис. 3.2. Види фрезерування: а – зустрічне, б – попутне

У верстатах з ЧПК переважно застосовується попутне фрезерування, оскільки воно:

- забезпечує кращу шорсткість;
- зменшує знос інструмента;
- стабілізує навантаження на шпиндель.

Оскільки програміст задає геометрію деталі, а не центру фрези, система ЧПК повинна автоматично змістити траєкторію. Для цього використовується **компенсація**:

G41 – інструмент ліворуч від контуру;

G42 – інструмент праворуч від контуру;

G40 – відміна компенсації.

Для зовнішніх контурів зазвичай застосовують **G41** (інструмент ліворуч) – це дозволяє дотримуватися точних зовнішніх розмірів деталі. Для внутрішніх контурів (наприклад, пази чи отвори) використовують **G42** (інструмент справа), щоб уникнути врізань у внутрішню поверхню. Перед активацією **G41/G42** інструмент повинен бути над деталлю на безпечній висоті (*Z*-положення), інакше програма може почати різати неправильно. **Важливо:** компенсація вмикається на підході до контуру, а вимикається після виходу з нього.

Інструмент ніколи не повинен починати рух безпосередньо з контуру. Обов'язково задаються:

- точка безпечної висоти;
- точка врізання;
- точка входу в контур;
- точка виходу.

Це запобігає поломці інструмента, пошкодженню деталі та аварії верстата. Якщо цього не зробити – виникає врізання або стрибок траєкторії.

Початкова точка завжди повинна бути поза деталлю, на висоті безпечного підйому інструмента. Це дозволяє швидким ходом (**G00**) підійти до старту, не пошкодивши деталь. Підхід, врізання, обхід і вихід – стандартна логіка траєкторії:

- підхід над деталлю;
- врізання на потрібну глибину;
- обхід контуру з компенсацією радіуса;
- підняття інструмента після завершення.

Під час написання керуючої програми програміст задає не лише траєкторію інструмента, а й умови різання. При складанні керуючої програми для фрезерного верстата з ЧПК важливо правильно підбирати три основні технологічні параметри:

- **глибина різання** (h , мм) – товщина шару матеріалу, який знімає інструмент за один прохід;
- **частота обертання шпинделя** (S , об/хв) – швидкість обертання інструмента, яка забезпечує оптимальне знімання матеріалу;
- **подача** (F , мм/хв або мм/об) – швидкість переміщення інструмента відносно заготовки, що визначає якість обробки та навантаження на інструмент.

Вони розраховуються за формулами, поданими у табл. 3.2.

Таблиця 3.2. Формули розрахунку частоти обертання шпинделя, подачі та глибини різання

Частота обертання шпинделя	Подача	Глибина різання
$n = \frac{1000 \cdot V}{\pi \cdot D}, \quad (3.1)$	$F = S_z \cdot z \cdot n, \quad (3.2)$	$h = \frac{H_{\text{заготовки}} - H_{\text{залишок}}}{N_{\text{проходів}}}, \quad (3.3)$
де V – швидкість різання, м/хв; D – діаметр фрези, мм	де S_z – подача на зуб; Z – кількість зубів фрези	де h – глибина різання, мм; $H_{\text{заготовки}}$ – товщина матеріалу або висота шару, який треба зняти, мм; $H_{\text{залишок}}$ – залишок після обробки (для чистової обробки), мм; $N_{\text{проходів}}$ – кількість проходів інструмента.

Якщо швидкість обертання вибрана неправильно:

- замала швидкість → інструмент рве матеріал, з'являються задирки;
- завелика швидкість → перегрів, затуплення, підпал поверхні;
- оптимальна → чиста поверхня, стабільний звук різання.

Подача визначає товщину зрізуваної стружки:

- занадто мала → інструмент третється → швидко затуплюється;
- занадто велика → перевантаження → можливий скол фрези;
- правильна → стабільна стружка і рівний звук.

Не шпindel ь рiже матерiал – рiже товщина стружки на зуб. Тому подача i обертання завжди пiдбираються разом. Якщо збiльшити оберти – потрібно збiльшити подачу. Iнакше фреза почне полiрувати матерiал замість рiзання.

Розглянемо приклад розрахунку глибини рiзання, обертання шпинделя та подачі на конкретному прикладі:

Задача: необхідно обробити зовнішній контур деталі фрезою $D = 20$ мм, $Z = 4$ зуби, швидкість рiзання $V_c = 60$ м/хв, подача на зуб $f_z = 0,05$ мм, товщина шару $H_{\text{заготовки}} = 5$ мм, чистовий шар $H_{\text{зал}} = 1$ мм, кількість проходів $N = 2$.

1. Для визначення **обертання шпинделя**, використовуємо формулу (3.1) для підстановки даних:

$$S = \frac{1000 \cdot 60}{\pi \cdot 20} \approx 955 \text{ об/хв};$$

2. Для визначення **подачі**, підставляємо значення у формулу (3.2):

$$F = 0.05 \cdot 4 \cdot 955 \approx 191 \text{ мм/хв};$$

3. Для визначення **глибини рiзання**, підставляємо значення у формулу (3.3):

$$h = \frac{5 - 1}{2} = 2 \text{ мм за прохід.}$$

Отже, керуюча програма для заданого проходу повинна містити:

- частоту обертання шпинделя 955 об/хв;
- подачу 191 мм/хв;
- глибину рiзання 2 мм.

Типові помилки неправильного визначення частоти обертання шпинделя, подачі, глибини різання, використання **G41/G42** представлені в табл. 3.3.

Таблиця 3.3. Типові помилки неправильного визначення частоти обертання шпинделя, подачі, глибини різання, використання G41/G42

Помилка	Наслідки	Як уникнути
Використання G41/G42 не перед врізанням	Інструмент різатиме не за контуром → розмір деталі буде неправильним	Завжди активуйте компенсацію перед початком різання, над деталлю
Невірне Z-положення при підході	Врізання у заготовку або удар по деталі	Піднімайте інструмент на безпечну висоту ($Z >$ від 2 мм до 5 мм)
Занадто велика подача	Пошкодження інструмента, шорстка поверхня	Розрахуйте подачу відповідно до діаметра фрези та матеріалу
Занадто низькі оберти шпинделя	Перегрів та швидкий знос інструмента	Розрахуйте оберти за формулою або орієнтовними таблицями виробника інструмента
Ігнорування напрямку компенсації	Неправильні розміри зовнішнього контуру	Перевіряйте: зовнішній контур → G41, внутрішній контур → G42

Послідовність складання програми контурної обробки. При створенні програми завжди дотримуються технологічної логіки (рис. 3.3):

- 1. Підготовка системи координат** – вибір робочої системи (від **G54** до **G59**), установка нуля;
- 2. Вибір інструмента** – **Txx M06**, вказівка номера інструмента;
- 3. Задання обертів шпинделя** – **M03/M04 + Sxxx**;
- 4. Задання подачі** – **G94/G95**, визначення мм/хв або мм/об;
- 5. Підхід до деталі** – плавне переміщення інструмента до контуру (**G00**);
- 6. Ввімкнення компенсації інструмента** – **G41/G42** для правильного обходу контуру;

7. Обхід контуру – **G01/G02/G03**, обробка деталей за заданим профілем;

8. Відміна компенсації – **G40** після завершення контуру;

9. Відвід інструмента – швидкий хід (**G00**) у безпечну точку;

10. Завершення програми – **M05** (зупинка шпинделя), **M30** (кінець програми).



Рис. 3.3. Блок-схема складання програми контурної обробки

При програмуванні зовнішнього контуру деталі важливо правильно вибрати та застосувати G-коди для переміщення та інтерполяції, а також кілька допоміжних команд, щоб забезпечити точність, безпечне виконання програми і контроль процесу. Основні коди для зовнішнього контуру наведено в табл. 3.4.

Таблиця 3.4. Основні коди для зовнішнього контуру

Код	Призначення	Коментар
G00	Швидке переміщення інструмента	Використовується для підходу до початкової точки контуру перед початком різання
G01	Лінійна інтерполяція	Основний режим для обробки прямих ділянок зовнішнього контуру
G02 / G03	Кругова інтерполяція за або проти годинникової стрілки	Використовується для обробки дуг, кутів і радіусів на зовнішньому контурі
G17	Вибір площини обробки XY	Зовнішній контур фрезерують переважно в XY-площині
G41 / G42	Компенсація радіуса фрези	G41 – інструмент зліва від траєкторії, G42 – справа; забезпечує точне дотримання зовнішніх розмірів
G90 / G91	Абсолютне або інкрементне (відносне) позиціонування	G90 – координати від базової точки; G91 – від попередньої точки (рідко застосовується для зовнішнього контуру)
F	Подача	Задає швидкість руху інструмента під час різання; залежить від матеріалу та діаметра фрези
S	Частота обертання шпинделя	Підбирається відповідно до діаметра фрези та режиму обробки (чорнова чи чистова)
M03 (M04) / M05	Увімкнення / вимкнення шпинделя	M03 – увімкнення обертання за годинниковою стрілкою перед обробкою; M04 – обертання проти годинникової стрілки; M05 – вимкнення після завершення траєкторії
M08 / M09	Увімкнення / вимкнення охолодження	M08 – подача рідини охолодження під час різання; M09 – вимкнення після завершення процесу

Програма для фрезерування зовнішнього контуру складається у певній послідовності дій, і кожен елемент коду виконує конкретну функцію. Логіка така:

1. Підхід до деталі – інструмент швидко (**G00**) підводиться до початкової точки зовнішнього контуру. Якщо цього не зробити: інструмент може врізатися у заготовку або тримач, що призведе до поломки фрези та пошкодження деталі.

2. Компенсація радіуса фрези (G41/G42) – встановлюється перед початком різання, щоб врахувати діаметр інструмента. Неправильно обрана компенсація або її відсутність призведе до того, що зовнішній контур буде меншим або більшим за креслення, або фреза врізатиметься у деталь.

3. Обробка контуру – рухи інструмента за допомогою **G01** для прямих ліній і **G02/G03** для дуг. Зміна порядку координат або пропуск дуги може зіпсувати форму деталі, зробивши її не відповідною кресленню.

4. Подача (F) та обертання шпинделя (S, M03/M04) – підбираються відповідно до матеріалу та типу фрези. Неправильна подача або обертання шпинделя може спричинити перегрів фрези, задирки на деталі або поломку інструмента.

5. Завершення обробки – інструмент підводиться до вихідної або безпечної точки, вимикається шпиндель (**M05**) та охолодження (**M09**). Пропуск цього кроку може призвести до зіткнення з верстатом під час наступного руху або до залишку охолоджуючої рідини на робочій зоні.

Послідовність коду у програмі не випадкова – вона відповідає фізичній логіці роботи інструмента та безпечному процесу обробки. Якщо змінити порядок команд, інструмент може врізатися, фреза зламається, деталь буде неточною, а програма може не виконатися зовсім. Дотримання логіки дозволяє передбачити траєкторію, перевірити координати і забезпечити точність обробки.

Приклади керуючих програм. Щоб зрозуміти логіку роботи програми, розглянемо кожен її рядок як дію оператора верстата. Верстат виконує програму послідовно, тому помилка в одному кадрі змінює результат всієї обробки.

Свердління отворів із застосуванням постійного циклу. **Свердління** – це операція отримання отворів заданої глибини та координат. Якщо отворів багато, програмувати кожен рух інструмента окремо недоцільно. Тому використовують постійні цикли – верстат сам повторює однакові

рухи в нових точках. Це дозволяє скоротити програму, зменшити кількість помилок, забезпечити однакову глибину отворів.

Приклад керуючої програми представлено на рис. 3.4, а її розшифрування – у табл. 3.5.

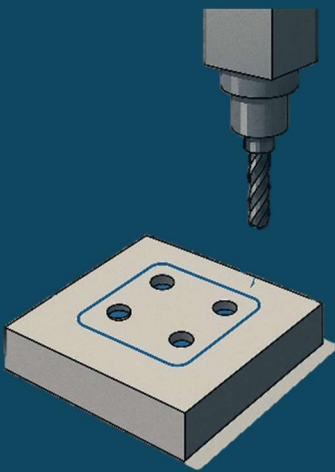
Версія для професіонала (ISO-режим, скорочена)	Повний запис (для початківця)	Зображення обробки
G21 G17 G90 G40 G49 G54 T1 M06 S1200 M03 G00 X10 Y10 Z5 G81 Z-15 R2 F120 X10 Y10 X40 Y10 X40 Y40 X10 Y40 G80 G00 Z50 M05 G00 X0 Y0 M30	N01 G21 G17 G90 G40 G49 G80 G54 N02 T1 M06 N03 S1200 M03 N04 G00 X10 Y10 Z5 N05 G81 Z-15 R2 F120 N06 G81 X10 Y10 Z-15 R2 F120 N07 G81 X40 Y10 Z-15 R2 F120 N08 G81 X40 Y40 Z-15 R2 F120 N09 G81 X10 Y40 Z-15 R2 F120 N10 G80 N11 G00 Z50 N12 M05 N13 G00 X0 Y0 N14 M30	

Рис. 3.4. Приклад керуючої програми для свердління отворів із застосуванням постійного циклу

Таблиця 3.5. Розшифрування керуючої програми для свердління отворів із застосуванням постійного циклу

№ кадру	Що робить	Пояснення
N01	Підготовка системи	G21 – одиниці мм, G17 – площина XY, G90 – абсолютне позиціонування, G40 – відміна компенсації інструмента, G49 – відміна корекції довжини, G80 – відміна стандартного циклу свердління, G54 – вибір робочої системи координат № 1
N02	Вибір інструмента	T1 M06 – вибір інструмента № 1 і його затиск
N03	Запуск шпинделя	S1200 M03 – встановлення швидкості шпинделя 1200 об/хв і обертання за годинниковою стрілкою

Кінець табл. 3.5

№ кадру	Що робить	Пояснення
N04	Підхід до першої точки	G00 X10 Y10 Z5 – швидкий хід над першою точкою обробки, без різання
N05	Налаштування циклу свердління	G81 Z-15 R2 F120 – встановлення параметрів циклу: глибина $Z = -15$ мм, відвід до $R = 2$ мм, подача $F = 120$ мм/хв
N06	Перший отвір	G81 X10 Y10 Z-15 R2 F120 – виконання свердління першого отвору за заданими параметрами
N07	Другий отвір	G81 X40 Y10 Z-15 R2 F120 – свердління другого отвору
N08	Третій отвір	G81 X40 Y40 Z-15 R2 F120 – свердління третього отвору
N09	Четвертий отвір	G81 X10 Y40 Z-15 R2 F120 – свердління четвертого отвору
N10	Відміна циклу	G80 – відміна стандартного циклу свердління, верстат повертається до ручного/звичайного режиму руху
N11	Відвід інструмента	G00 Z50 – швидкий хід інструмента в безпечну точку над деталлю
N12	Зупинка шпинделя	M05 – вимкнення шпинделя
N13	Повернення в нуль	G00 X0 Y0 – позиціонування інструмента в нульову точку системи координат
N14	Завершення програми	M30 – кінець програми, повернення каретки і станка у початкове положення

Обробка зовнішнього контуру плоскої прямокутної деталі.

Зовнішній контур деталі – це зовнішня межа (периметр) заготовки або виробу, яка визначає її остаточну форму і геометричні розміри. Іншими словами, це лінія, що окреслює деталь ззовні та відокремлює її поверхню від навколишнього простору. При фрезерній обробці контур задається у вигляді траєкторії руху інструмента, по якій фреза переміщується навколо деталі.

Обробка зовнішнього контуру є однією з найпоширеніших операцій у ЧПК. Її основне завдання – надати заготовці необхідну форму та точні

геометричні розміри відповідно до креслення. Така обробка застосовується для виготовлення корпусних деталей, пластин, плит, елементів механізмів та інших виробів із заданим профілем.

Під час контурної обробки інструмент рухається по заданій траєкторії навколо деталі. Для цього програміст ЧПК повинен правильно задати координати точок контуру, забезпечити плавний підхід інструмента до матеріалу, стабільний рух по профілю та безпечний відвід після завершення обробки. Особливу увагу приділяють компенсації радіуса інструмента (**G41** або **G42**), яка дозволяє врахувати реальний діаметр фрези та отримати точні розміри деталі.

Для обробки зовнішнього контуру зазвичай застосовують кінцеві фрези, оскільки вони дозволяють виконувати точну обробку плоских поверхонь і профілів. Діаметр фрези впливає на точність обробки, мінімальний радіус у кутах та параметри режимів різання.

При програмуванні важливо правильно вибрати напрям обходу контуру. Для зовнішнього контуру зазвичай використовують рух проти годинникової стрілки разом із лівою компенсацією радіуса інструмента (**G41**). Це дозволяє інструменту рухатися по траєкторії, зміщеній від геометричного контуру деталі на величину радіуса фрези.

Нижче наведено приклад програми контурної обробки прямокутної деталі з такими умовами: розмір деталі – 80 × 50 мм; нуль деталі розташований у лівому нижньому куті; використовується кінцева фреза діаметром 10 мм; обхід контуру виконується проти годинникової стрілки з використанням компенсації радіуса інструмента **G41**. Приклад керуючої програми наведено на рис. 3.5, а її розшифрування – у табл. 3.6.

Версія для професіонала (ISO режим, скорочена)	Повний запис (для початківця)	Зображення обробки
N01 G21 G17 G40 G49 G80 G90 G54	N01 G21 G17 G40 G49 G80 G90 G54	
N02 T1 M06	N02 T1 M06	
N03 S1200 M03	N03 S1200 M03	
N04 G00 X-5 Y-5 Z5	N04 G00 X-5 Y-5 Z50	
N05 G01 Z-5 F100	N05 G00 Z5	
N06 G41 D01 X0 Y0 F250	N06 G01 Z-5 F100	
N07 X80 Y0	N07 G01 G41 D01 X0 Y0 F250	
N08 X80 Y50	N08 G01 X80 Y0	
N09 X0 Y50	N09 G01 X80 Y50	
N10 X0 Y0	N10 G01 X0 Y50	
N11 G40 X-5 Y-5	N11 G01 X0 Y0	
N12 G00 Z50	N12 G01 G40 X-5 Y-5	
N13 M05	N13 G00 Z50	
N14 G00 X0 Y0	N14 M05	
N15 M30	N15 G00 X0 Y0	
	N16 M30	

Рис. 3.5. Приклад керуючої програми для свердління отворів із застосуванням постійного циклу

Таблиця 3.6. Розшифрування керуючої програми для свердління отворів із застосуванням постійного циклу

№ кадру	Що робить	Пояснення
N01	Підготовка системи	G21 – робота в мм; G17 – площина XY; G40 – відміна компенсації радіуса; G49 – відміна корекції довжини інструмента; G80 – відміна стандартних циклів; G90 – абсолютне позиціонування; G54 – вибір робочої системи координат
N02	Вибір інструмента	T1 M06 – встановлення фрези № 1
N03	Увімкнення шпинделя	S1200 – швидкість 1200 об/хв; M03 – обертання шпинделя за годинниковою стрілкою
N04	Швидкий підхід	G00 – швидке переміщення інструмента у стартову точку над заготовкою
N05	Підхід до поверхні	G01 Z-5 – врізання інструмента у матеріал на робочу глибину
N06	Увімкнення компенсації	G41 D01 – ліва компенсація радіуса інструмента
N07	Початок обходу контуру	Рух до стартової точки контуру
N08	Перша сторона	Обробка нижньої сторони прямокутника
N09	Друга сторона	Обробка правої сторони
N10	Третя сторона	Обробка верхньої сторони
N11	Четверта сторона	Обробка лівої сторони, завершення контуру
N12	Вимкнення компенсації	G40 – відміна компенсації та відхід від контуру
N13	Відвід інструмента	G00 Z50 – підняття інструмента на безпечну висоту

Кінець табл. 3.6

N14	Зупинка шпинделя	M05 – припинення обертання
N15	Повернення у нуль	G00 X0 Y0 – переміщення у нульову точку
N16	Завершення програми	M30 – кінець програми та готовність до нового запуску

Контурна обробка (фрезерування внутрішнього контуру). **Контурна обробка внутрішнього контуру** – це процес формування внутрішніх порожнин, отворів або пазів у деталі (наприклад, рамки, фланця з отвором або кришки з пазом) за допомогою кінцевої фрези. Обробка ведеться шарами по глибині. Важливо пам'ятати: програмується контур деталі, а не центр фрези, а інструмент рухається всередині контуру. Для точного формування внутрішніх контурів застосовується радіусна компенсація: **G41** – інструмент рухається зліва від контуру, **G42** – справа. Завдяки цьому верстат автоматично коригує положення інструмента, забезпечуючи точну форму отвору або порожнини.

При увімкненні компенсації **G41/G42** слід дотримуватися таких умов:

- лінійний рух (**G01**) – переміщення інструмента повинно бути прямолінійним;
- довжина руху \geq радіуса інструмента – для правильного розрахунку зміщення компенсації;
- чіткий напрям вектора руху – щоб уникнути помилок у траєкторії та врізання фрези в матеріал.

Без дотримання цих умов радіусна компенсація не працює коректно, що може призвести до неточностей внутрішнього контуру або пошкодження інструмента.

У більшості систем ЧПК (Fanuc, Siemens ISO, Haas) G-коди є модальними, тобто дія команди триває до виклику іншого режиму: наприклад, після **G01 Z-5 F120** лінійна інтерполяція залишається активною, поки не буде викликано **G00** (швидкий хід) або **G02/G03** (кругова інтерполяція). Радіусна компенсація активується через команду **G41 D2** або

G42 D2, де **D2** – це номер коректора у таблиці інструментів, а не безпосередньо числовий радіус або діаметр. Значення D у верстаті зберігається для кожного інструмента (табл. 3.7).

Таблиця 3.7. Таблиця значень D для радіусної компенсації

D	Інструмент	Радіус інструмента, мм	Примітка
1	T1	3,0	Коректор для T1
2	T2	5,0	Коректор для T2
3	T3	8,0	Коректор для T3

Під час виконання **G41 D2 X0 Y0 F250** верстат бере радіус з таблиці для **D2** – 5 мм у цьому прикладі (табл. 3.7), і автоматично зміщує центр фрези на цей радіус від запрограмованого контуру, забезпечуючи точне фрезерування внутрішньої порожнини. Після обробки компенсацію вимикають командою **G40**, щоб інструмент міг безпечно відходити від контуру, не враховуючи радіус. Таким чином, правильне використання **G41/G42** з **D**-номером гарантує точність обробки та безпечно переміщення інструмента по внутрішньому контуру. Приклад керуючої програми представлено на рис. 3.6, а її розшифрування – у табл. 3.8.

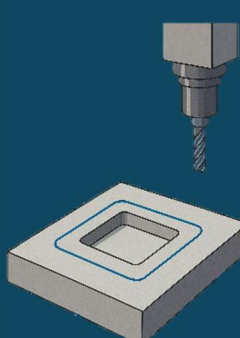
Версія для професіонала (ISO режим, скорочена)	Повний запис (для початківця)	Зображення обробки
G21 G17 G40 G49 G80 G90 G54	N01 G21 G17 G40 G49 G80 G90 G54	
T1 M06 S1200 M03	N02 T1 M06 S1200 M03	
G00 X-5 Y-5 Z5	N03 G00 X-5 Y-5 Z5	
G01 Z-5 F100	N04 G01 Z-5 F100	
G41 D2 X0 Y0 F250	N05 G01 G41 D2 X0 Y0 F250	
X80 Y0	N06 X80 Y0 F250	
Y50	N07 X80 Y50 F250	
X0 Y50	N08 X0 Y50 F250	
Y0	N09 X0 Y0 F250	
G40 X-5 Y-5	N10 G01 G40 X-5 Y-5 F250	
G00 Z50	N11 G00 Z50	
M05	N12 M05	
G00 X0 Y0	N13 G00 X0 Y0	
M30	N14 M30	

Рис. 3.6. Керуюча програма для фрезерування внутрішнього контуру

Таблиця 3.8. Розшифрування програми для фрезерування внутрішнього контуру

№ кадру	Що робить	Пояснення
N01	Підготовка системи	G21 – одиниці вимірювання в мм; G17 – площина XY для інтерполяції; G40 – відміна компенсації інструмента; G49 – відміна корекції довжини інструмента; G80 – відміна стандартних циклів свердління; G90 – абсолютне позиціонування; G54 – вибір робочої системи координат №1
N02	Вибір інструмента та обертів шпинделя	T1 M06 – вибір інструмента № 1; S1200 – шпиндель 1200 об/хв; M03 – обертання шпинделя за годинниковою стрілкою
N03	Швидкий підхід над заготовкою	G00 X-5 Y-5 Z5 – переміщення інструмента над деталлю у безпечну точку швидким ходом
N04	Врізання до робочої висоти	G01 Z-5 F100 – лінійне переміщення інструмента до робочої висоти із подачею 100 мм/хв
N05	Включення компенсації інструмента	G01 G41 D2 X0 Y0 F250 – увімкнення лівої компенсації радіуса фрези (D2 = 5 мм), рух до стартової точки контуру з подачею F= 250 мм/хв
N06	Рух вздовж першої сторони контуру	X80 Y0 F250 – обробка першої сторони прямокутника лінійною інтерполяцією
N07	Рух вздовж другої сторони контуру	X80 Y50 F250 – обробка другої сторони прямокутника
N08	Рух вздовж третьої сторони контуру	X0 Y50 F250 – обробка третьої сторони прямокутника
N09	Рух вздовж четвертої сторони контуру	X0 Y0 F250 – обробка четвертої сторони прямокутника, завершення обходу контуру
N10	Вимкнення компенсації та відхід	G01 G40 X-5 Y-5 F250 – відключення компенсації радіуса та переміщення інструмента за межі контуру
N11	Швидкий відвід	G00 Z50 – підняття інструмента на безпечну висоту швидким ходом
N12	Зупинка шпинделя	M05 – зупинка обертання шпинделя після завершення обробки
N13	Повернення в нульову точку	G00 X0 Y0 – переміщення інструмента у нульову точку робочої системи координат
N14	Кінець програми	M30 – завершення програми та повернення до початкового стану

*Фрезерування круглого глухого отвору (кармана). **Круглий карман*** – це заглиблення круглої форми, яке створюється на поверхні деталі шляхом видалення матеріалу фрезою на задану глибину. На відміну від отвору, карман зазвичай не проходить через усю деталь і має плоске дно та вертикальні або злегка нахилені стінки. Такі елементи широко

застосовуються в машинобудуванні та приладобудуванні. Круглі кармани використовують для розміщення кріпильних елементів, підшипників, ущільнювальних кілець, посадочних місць деталей або для створення технологічних заглиблень у конструкції виробу. У деяких випадках вони також дозволяють зменшити масу деталі або забезпечити необхідний простір для встановлення інших елементів конструкції.

Фрезерування круглого кармана виконується переважно за допомогою кінцевих фрез. Під час програмування необхідно правильно задати координати центра кармана, його діаметр і глибину, а також врахувати діаметр інструмента. Важливим елементом програмування є вибір траєкторії руху фрези. Найбільш поширеним способом обробки є спіральне фрезерування (рис. 3.7), коли інструмент поступово опускається у матеріал і рухається по круговій траєкторії, формуючи карман шар за шаром. Такий спосіб забезпечує плавне врізання інструмента в матеріал, рівномірне навантаження на фрезу та кращу якість обробленої поверхні.

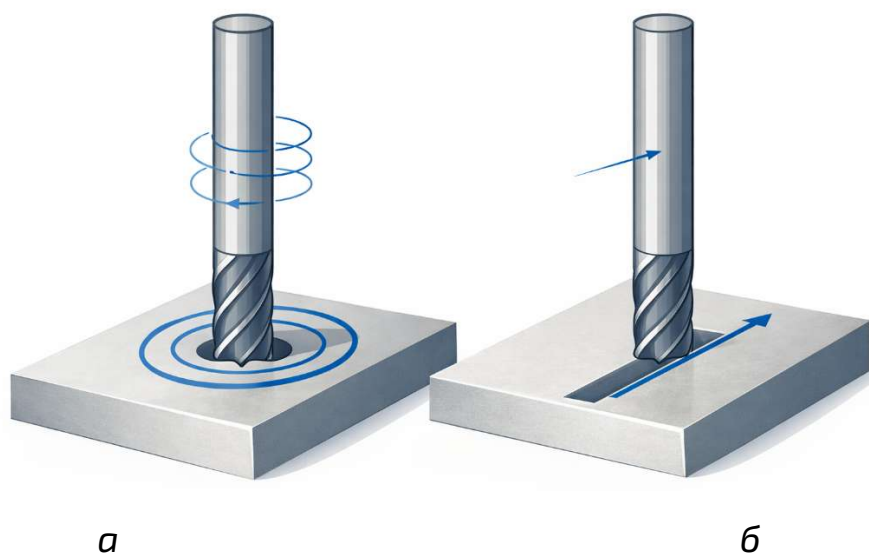


Рис. 3.7. Способи фрезерувань: *а* – спіральне; *б* – прямолінійне

Під час виконання операції інструмент зазвичай починає рух із центра майбутнього кармана, після чого переміщується до робочого радіуса

і виконує круговий рух, поступово формуючи стінки заглиблення. При цьому інструмент може опускатися на невеликі кроки по глибині, що дозволяє поступово досягти необхідної глибини обробки. Після завершення формування кармана інструмент відводиться у безпечну точку, а обробка вважається завершеною.

Далі розглянемо приклад програмування фрезерування круглого кармана з такими вихідними даними: діаметр кармана становить $\varnothing 40$ мм, глибина – 5 мм, центр кармана розташований у точці X0 Y0, а для обробки використовується кінцева фреза діаметром 10 мм. Формування кармана виконується методом спірального фрезерування із використанням кругової інтерполяції, що дозволяє забезпечити плавну і стабільну обробку матеріалу. Приклад керуючої програми для фрезерування круглого глухого отвору представлено на рис. 3.8, а розшифрування програми – у табл. 3.9.

Версія для професіонала (ISO режим, скорочена)	Повний запис (для початківця)	Зображення обробки
N01 G21 G17 G40 G49 G80 G90 G54	N01 G21 G17 G40 G49 G80 G90 G54	
N02 T1 M06	N02 T1 M06	
N03 S1200 M03	N03 S1200 M03	
N04 G00 X0 Y0 Z5	N04 G00 X0 Y0 Z50	
N05 G01 Z-5 F100	N05 G00 Z5	
N06 G01 X15 Y0 F250	N06 G01 Z-5 F100	
N07 G02 I-15 J0	N07 G01 X15 Y0 F250	
N08 G02 I-15 J0	N08 G02 X15 Y0 I-15 J0	
N09 G00 Z50	N09 G02 X15 Y0 I-15 J0	
N10 M05	N10 G00 Z50	
N11 G00 X0 Y0	N11 M05	
N12 M30	N12 G00 X0 Y0	
	N13 M30	

Рис. 3.8. Приклад керуючої програми для фрезерування круглого глухого отвору

**Таблиця 3.9. Розшифрування програми для фрезерування
круглого глухого отвору**

№ кадру	Що робить	Пояснення
N01	Підготовка системи	G21 – одиниці мм; G17 – робоча площина XY; G40 – відміна компенсації радіуса; G49 – відміна корекції довжини; G80 – відміна стандартних циклів; G90 – абсолютне позиціонування; G54 – вибір робочої системи координат
N02	Вибір інструмента	T1 M06 – встановлення фрези № 1
N03	Увімкнення шпинделя	S1200 – швидкість обертання 1200 об/хв; M03 – обертання шпинделя за годинниковою стрілкою
N04	Швидкий підхід	G00 – переміщення інструмента до центру кармана над заготовкою
N05	Підхід до поверхні	Переміщення інструмента ближче до поверхні деталі
N06	Врізання у матеріал	G01 Z-5 – опускання інструмента на робочу глибину з подачею
N07	Вихід на радіус кармана	Переміщення інструмента від центру до траєкторії фрезерування
N08	Перша кругова інтерполяція	G02 – рух по колу за годинниковою стрілкою, формування стінки кармана
N09	Додатковий обхід	Повторне коло для очищення поверхні кармана
N10	Відвід інструмента	G00 Z50 – швидке підняття інструмента у безпечну точку
N11	Зупинка шпинделя	M05 – припинення обертання шпинделя
N12	Повернення у нуль	G00 X0 Y0 – повернення інструмента до нульової точки
N13	Завершення програми	M30 – кінець програми і підготовка до нового запуску

Примітка: *I, J* задають центр кола відносно стартової точки; можна комбінувати кілька **G02/G03** для формування складних круглих контурів (рис. 3.9).

Таким чином, керуюча програма не є набором кодів – це послідовність технологічних дій, які виконує інструмент. При складанні власної програми необхідно спочатку продумати рух інструмента, і лише потім записувати коди.

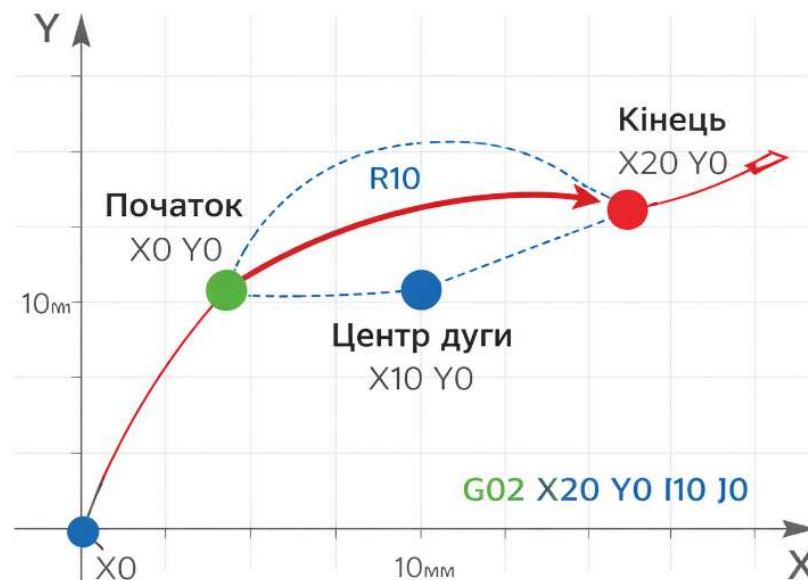


Рис. 3.9. Побудова дуги кругової інтерполяції за координатами центру (G02, I, J)

Порядок проведення роботи

1. Вступне пояснення викладачем:

- ознайомлення студентів з основними принципами програмування операцій на фрезерному верстаті з ЧПК;
- пояснення структури керуючої програми: кадри, слова, G- та M-коди тощо, координатні системи, технологічні команди;
- короткий огляд правил безпечної роботи та перевірки правильності програми перед запуском на верстаті.

2. Демонстрація інженером:

- демонстрація роботи верстата за готовою керуючою програмою у реальному або віртуальному режимі;
- пояснення логіки послідовності рухів інструмента, ввімкнення шпинделя та системи охолодження;
- пояснення типових помилок та способів їх уникнення.

3. Практичне завдання для студента:

- аналіз індивідуального креслення деталі (визначення базової точки, контуру обробки, мінімальних радіусів та кількості переходів);

- вибір інструмента та типу обробки для кожного переходу (чорнова / чистова);
- розрахунок режимів різання: частота обертання шпинделя, подача та глибина різання;
- побудова траєкторії руху інструмента (підхід, врізання, обхід контуру, вихід);
- складання керуючої програми для двох переходів обробки деталі: чорновий та чистовий;
- перевірка програми: логічний аналіз координат, компенсацій та відсутності врізань;
- демонстрація та аналіз результатів виконання програми на верстаті або у віртуальному режимі.

Порядок виконання роботи

1. Аналіз завдання. Студент отримує індивідуальне креслення деталі та визначає:

- базову точку;
- контур обробки;
- мінімальні радіуси;
- кількість переходів.

2. Вибір інструмента. Обґрунтувати діаметр фрези та тип обробки (чорнова/чистова).

3. Розрахунок режимів різання для визначення:

- частоти обертання шпинделя;
- подачі;
- глибини різання.

4. Побудова траєкторії. Накреслити послідовність руху інструмента:

- підхід;
- врізання;
- обхід;

- вихід.

5. Складання керуючої програми для двох переходів обробки – чорнового та чистового.

6. Перевірка програми, а саме:

- правильності координат;
- компенсації радіуса;
- відсутності врізань.

7. Демонстрація – інженер запускає програму на верстаті або у віртуальному режимі. Студент аналізує відповідність траєкторії кресленню.

8. Висновки про проведену роботу та успішність складеної керуючої програми.

Контрольні питання

1. Поясніть, які типи систем координат використовуються у верстатах з ЧПК і чим відрізняється абсолютне позиціонування від інкрементного (відносного).

2. Що таке підготовчі функції (G-коди) та допоміжні функції (M-коди)? Наведіть приклади їх застосування у програмуванні фрезерної обробки.

3. Чому важливо правильно визначати базову точку деталі перед складанням керуючої програми?

4. Що таке компенсація радіуса фрези (G41/G42) і в яких випадках вона застосовується під час обробки зовнішніх та внутрішніх контурів?

5. Поясніть логіку розрахунку режимів різання: обертання шпинделя, подачі та глибини різання. Чому ці параметри взаємопов'язані і як їх неправильно обрані значення можуть вплинути на результат обробки?

6. Міні-кейс: студент обрав фрезу діаметром 12 мм для обробки контуру з мінімальним радіусом 8 мм. Чи правильний цей вибір? Якщо ні – що станеться під час обробки і як виправити?

7. Міні-кейс: при програмуванні двох проходів студенти вибрали глибину різання 5 мм на чорновому проході для матеріалу сталі 45. Обґрунтуйте, чому це може бути небезпечно і яку глибину слід обрати.

8. Міні-кейс: студент отримав завдання обробити прямокутний карман 40 мм x 20 мм, глибиною 5 мм. Підкажіть, як логічно розбити обробку на чорновий і чистовий проходи, щоб уникнути перевантаження інструмента та забезпечити чистоту поверхні.

9. Поясніть, чому при обробці контуру із зовнішнім радіусом необхідно використовувати компенсацію радіуса фрези (G41/G42). Що станеться, якщо її не застосувати?

10. Міні-кейс: студент програмує свердління серії отворів однакової глибини. Коли краще використовувати постійний цикл (G81) і чому? Які помилки можуть виникнути при ручному прописуванні координат кожного отвору?

11. Обробка деталі передбачає контур з кутами 30° і 120°. Як правильно запрограмувати траєкторію інструмента, щоб уникнути перевантаження шпинделя на поворотах? Які команди слід застосувати для оптимізації руху?

Зміст звіту

Звіт по роботі повинен містити наступні розділи:

1. Номер, назву та мету роботи.
2. Аналіз завдання відповідно до індивідуального креслення.
3. Обґрунтування вибору інструмента.
4. Розрахунок режимів різання – частоти обертання шпинделя, подачі, глибини різання.
5. Побудова траєкторії – накреслену послідовність руху інструмента (підхід, врізання, обхід, вихід).
6. Керуючі програму для двох переходів обробки – чорнової та чистової).

7. Перевірку програми на правильність координат, компенсація радіуса, відсутність врізань.

8. Результати демонстрації.

9. Висновки з узагальненням проведеної роботи, зроблених висновків щодо послідовності обробки, ефективності розподілу переходів і установів.

Протокол практичної роботи № 3

Визначення параметрів програмування для фрезерування зовнішнього контуру деталі

Виконав/-ла студент/-ка _____ курсу
Група: _____
Прізвище та ініціали: _____
Дата виконання: « _____ » _____ 20 ____ р.
Оцінка: _____

Мета роботи – сформувати у студентів практичні вміння підготовки керуючої програми для обробки зовнішнього контуру деталей на верстатах з числовим програмним керуванням; навчити обґрунтовано обирати ріжучий інструмент, розраховувати режими різання та будувати траєкторію руху інструмента з урахуванням припусків і компенсації радіуса фрези; закріпити розуміння принципів визначення технологічних параметрів при контурному фрезеруванні.

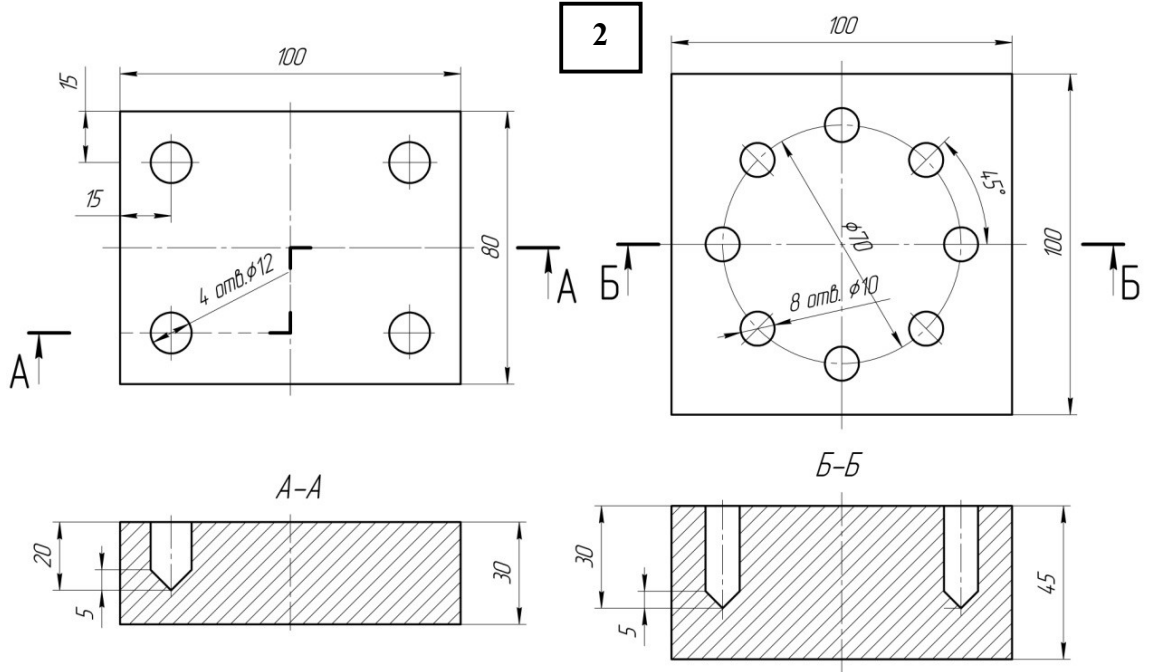
Аналіз завдання

Оберіть завдання відповідно до свого варіанту²⁴.

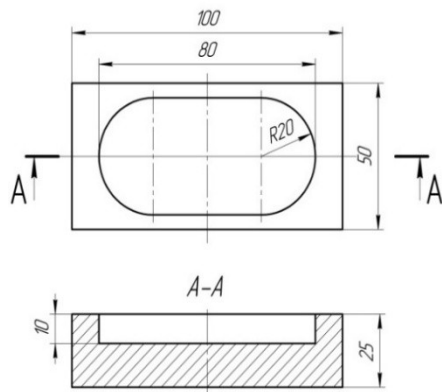
Вкажіть номер свого варіанту: _____

²⁴ Дана практична робота передбачає 18 варіантів креслень, які подано на трьох аркушах. Варіант для виконання визначається та розподіляється викладачем. Під час роздрукування протоколу практичної роботи **студент може друкувати лише той аркуш, на якому розміщене його креслення**, без необхідності друкувати два інші аркуші з варіантами.

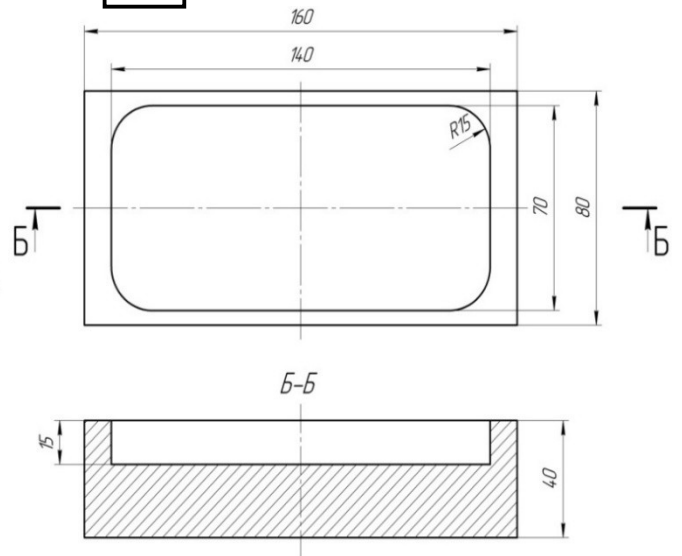
1



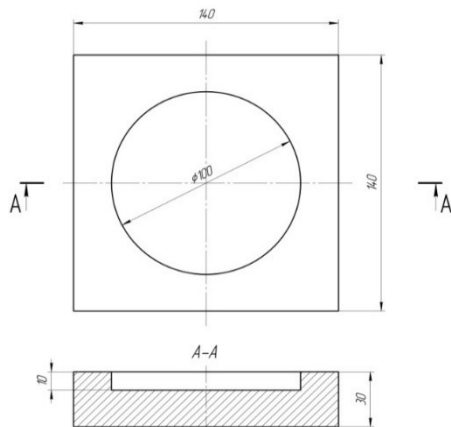
3



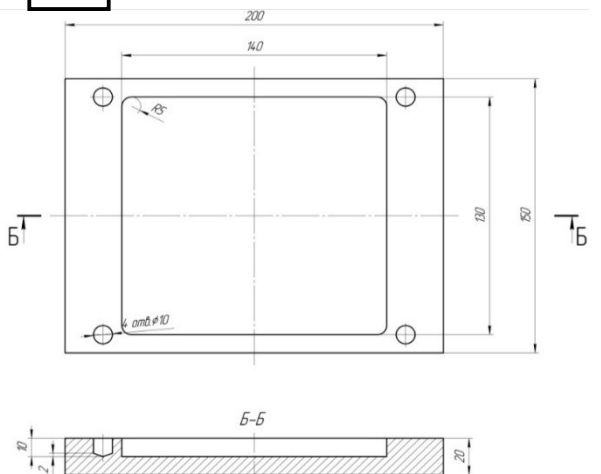
4



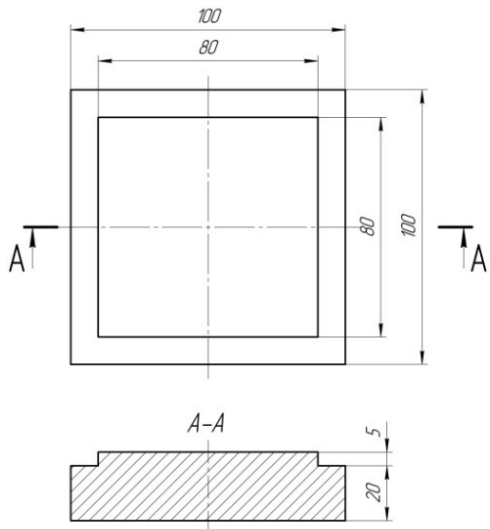
5



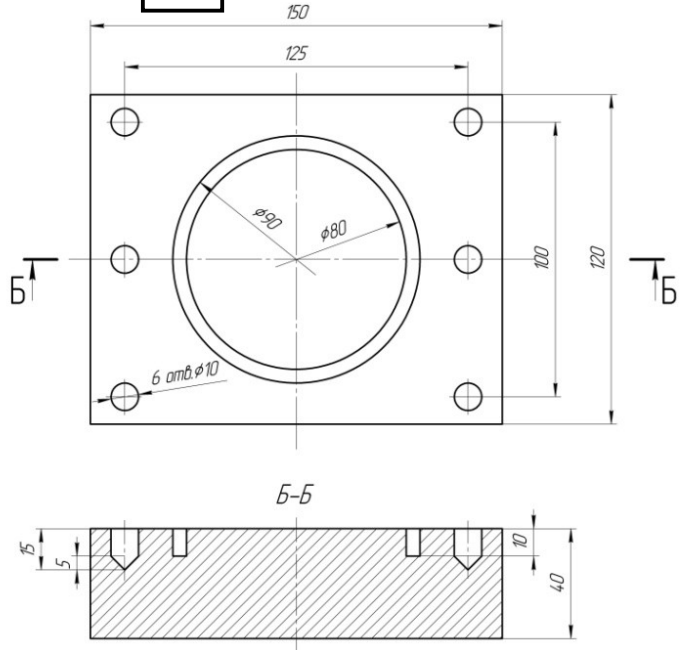
6



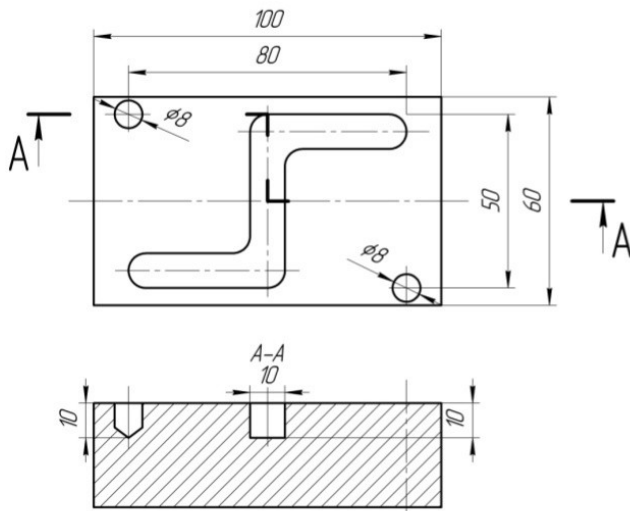
7



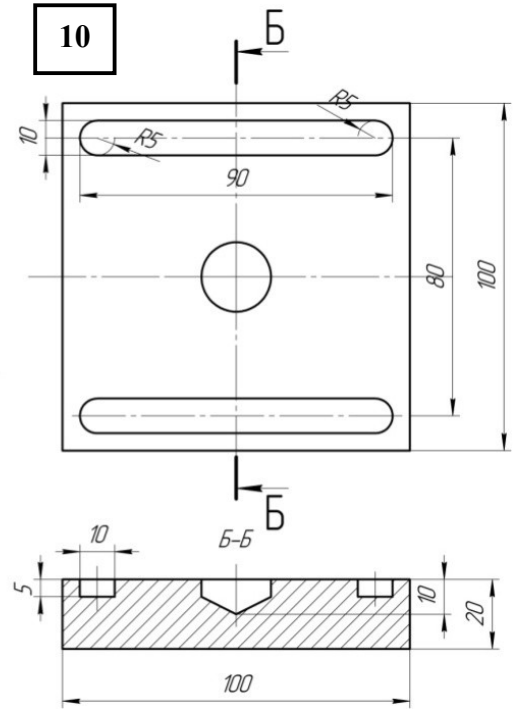
8



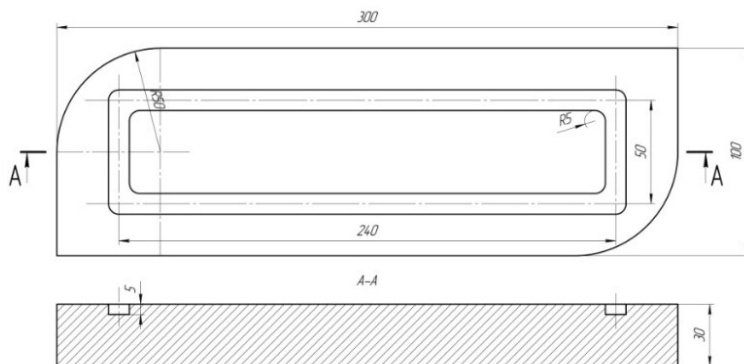
9



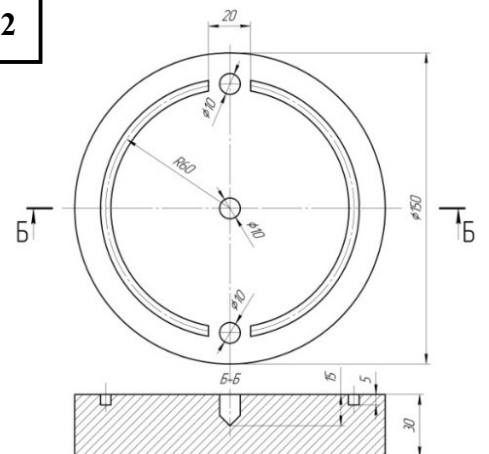
10



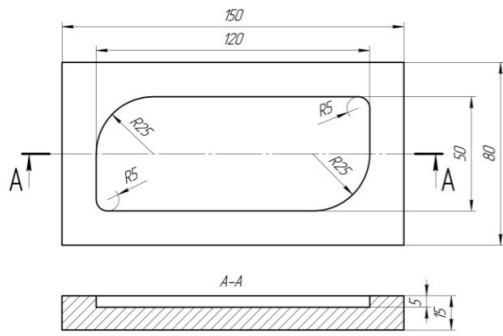
11



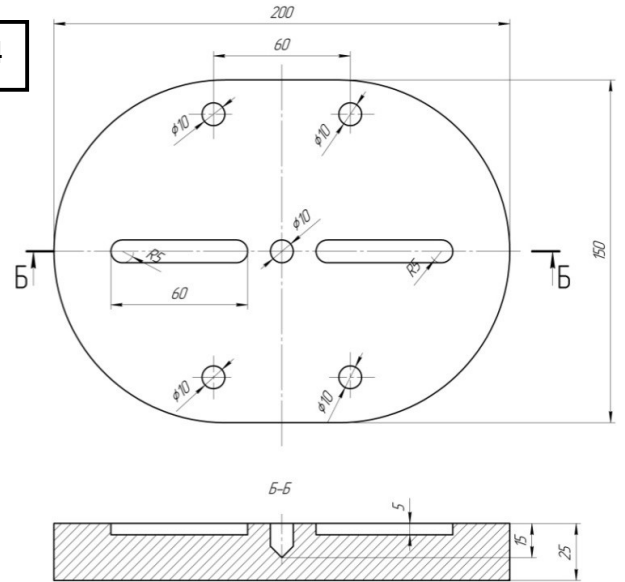
12



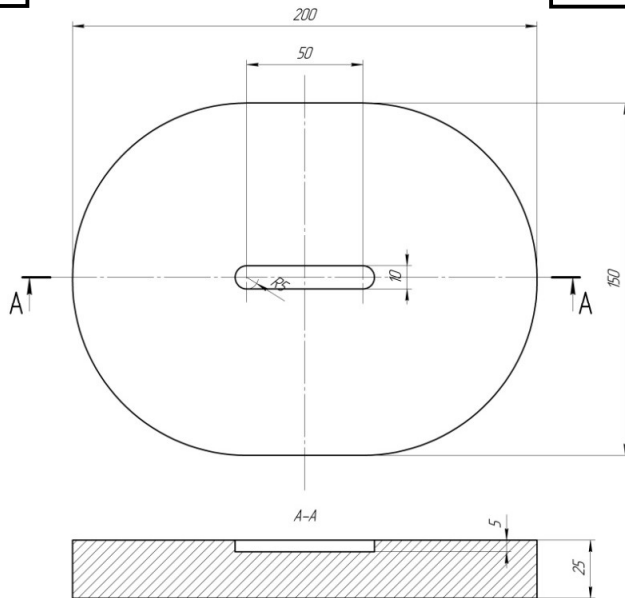
13



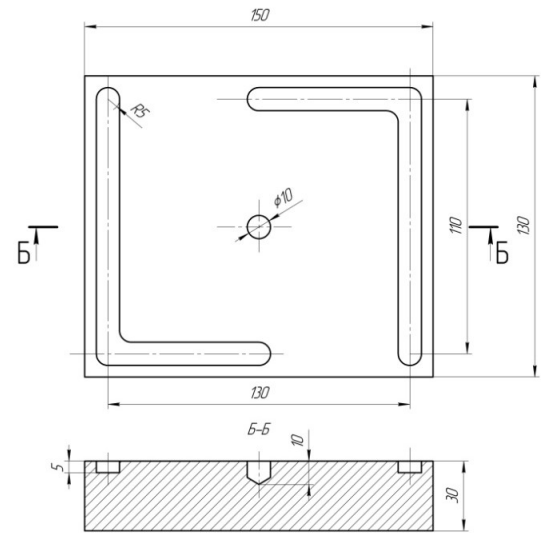
14



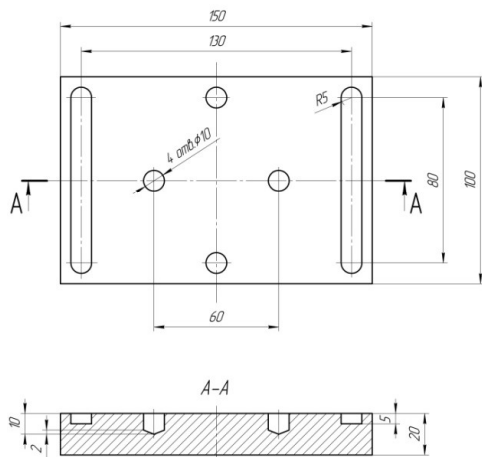
15



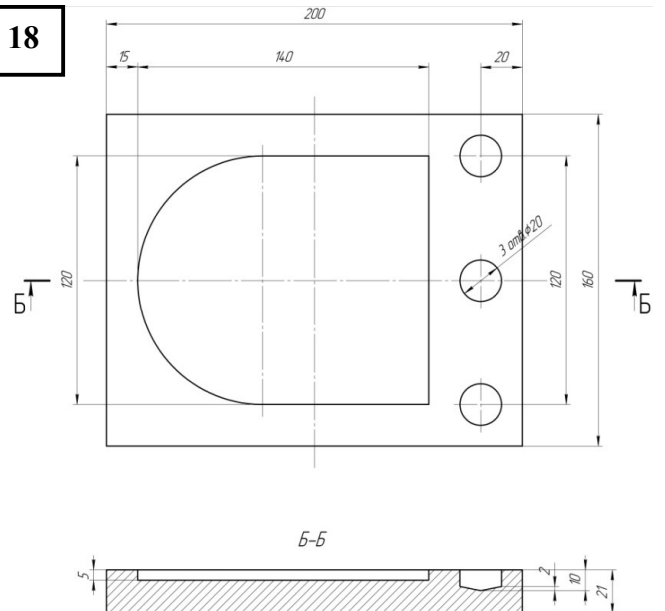
16



17



18



Креслення деталі: _____

Базова точка: _____

Контур обробки: _____

Мінімальні радіуси: _____

Кількість переходів: _____

Опишіть логіку визначення базової точки і послідовність обробки контуру.

Вибір інструмента

Діаметр фрези: _____

Тип фрези (чорнова/чистова): _____

Обґрунтування вибору*: _____

***Поясніть, чому обрали саме цю фрезу для цього переходу, який вплив на точність та швидкість обробки.**

Розрахунок режимів різання

Розрахуйте частоту обертання шпинделя (S , об/хв), подачу (F , мм/хв), глибину різання (h , мм) відповідно до обраної деталі, та заповніть табл. 3.10 нижче.

Таблиця 3.10. Розрахунок режимів різання

Параметр	Розрахунок, значення
Глибина різання (h , мм)	
Частота обертання шпинделя (S , об/хв)	
Подача (F , мм/хв)	

Поясніть, як взаємопов'язані ці параметри та чому їх правильно обирати разом.

Побудова траєкторії руху інструмента

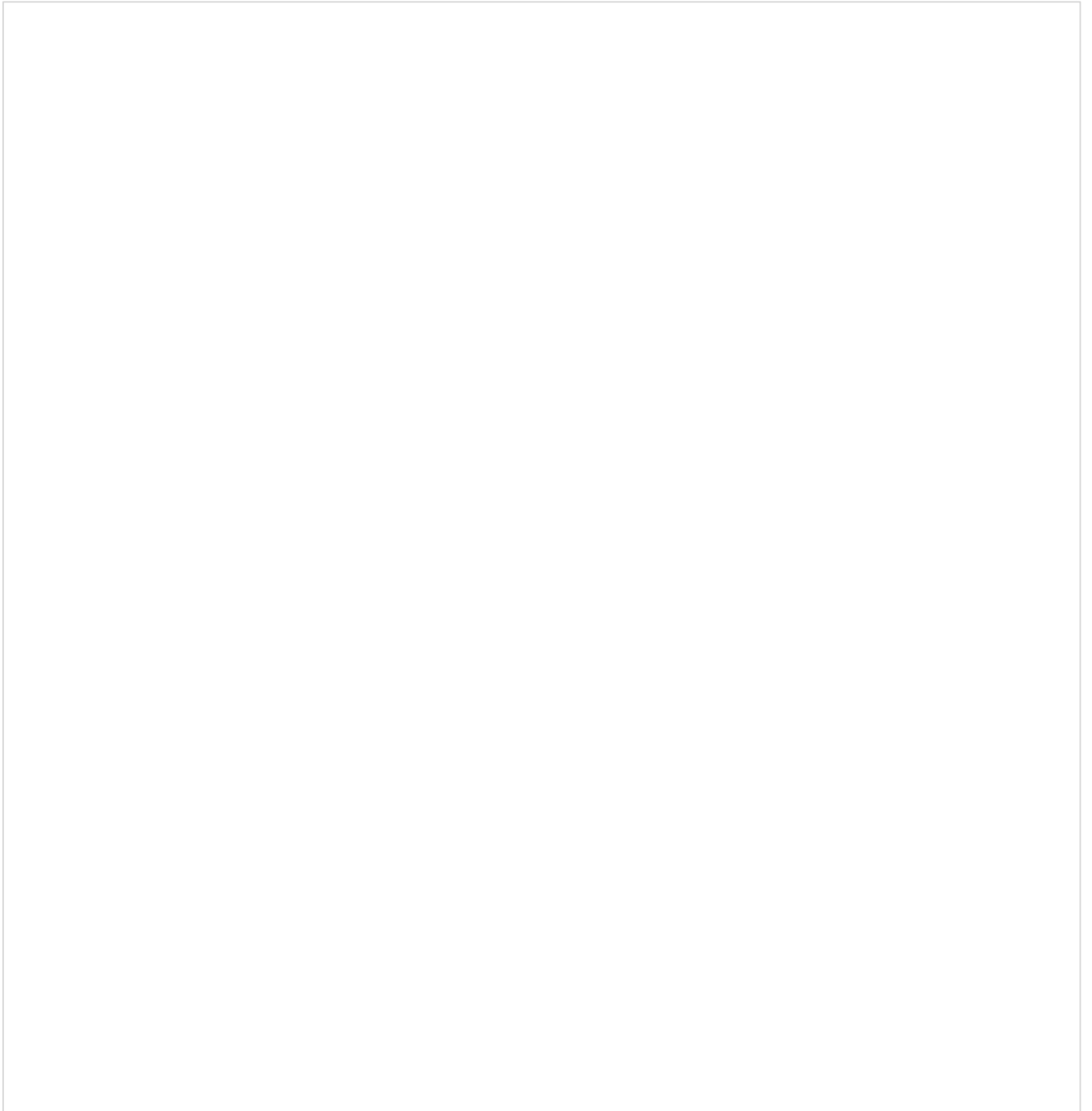
Накресліть траєкторію (підхід, врізання, обхід контуру, вихід) або опишіть її словами. **Поясніть логіку послідовності рухів, урахування радіусів інструмента та безпечних зон.**

Підхід: _____

Врізання: _____

Обхід контуру: _____

Вихід: _____



Складання керуючої програми

Запишіть програми для двох переходів так, щоб можна було зрозуміти логіку рухів, включення охолодження, шпинделя та компенсації.

Перший перехід (чорновий): _____

Другий перехід (чистовий): _____

Внесіть кадри програми в табл. 3.11, використовуючи координати, G- та M-коди, подачу та обертання шпинделя. Додайте коментарі у поясненні, щоб зрозуміти логіку кожного руху інструмента.

Демонстрація

Опишіть результати запуску програми на верстаті / у віртуальному режимі²⁵ (відповідність траєкторії кресленню, коментарі інженера та власні спостереження)

Висновки

Під час роботи я опанував _____

Здобув практичні навички _____

Ознайомився з логікою та послідовністю виконання _____

Виконаний аналіз показав мою здатність практично застосовувати отримані знання та навички, а також уміння _____

²⁵ Симуляція у програмних пакетах NC Viewer, G-Wizard Editor, CAMotics, Fusion 360, SolidCAM, SprutCAM тощо

Мета роботи: сформувати у студентів практичні навички програмування кругових та дугових траєкторій на верстатах з числовим програмним керуванням, зокрема вміння визначати геометричні параметри дуги (радіус, координати центра, початкову та кінцеву точки), обґрунтовано задавати напрям кругової інтерполяції (G02, G03), коректно використовувати параметри I , J , K або радіус R під час програмування, а також виконувати розрахунок і перевірку траєкторії руху інструмента під час фрезерування канавок і кругових контурів; сформувати системне розуміння принципів програмування кругових та дугових переміщень у системах ЧПК.

Очікуваний результат: після виконання роботи студент повинен **знати:** геометричну сутність кругової інтерполяції в системах ЧПК, різницю між лінійною та круговою інтерполяцією, принципи задання дуги через координати центра I , J , K та через радіус R , правила визначення напрямку обходу (за та проти годинникової стрілки), особливості програмування повного кола, півкола та сегментів кола; типові помилки при заданні дуг у площинах XY , XZ , YZ ; вплив похибки геометричних розрахунків на точність обробки; **вміти:** визначати координати початкової та кінцевої точки дуги, розраховувати координати центра кола відносно початкової точки, вибирати доцільний спосіб задання дуги (через R або через I , J), визначати доцільний напрям кругової інтерполяції, складати фрагмент керуючої програми для фрезерування канавки по дузі або повному колу, логічно перевіряти коректність траєкторії без використання графічного симулятора; **набути практичних навичок:** геометричного

аналізу креслення деталі, програмування кругових траєкторій у площині XY, уникнення помилок надмірної або недостатньої дуги, побудови замкненого кругового контуру, підготовки та попереднього контролю керуючої програми перед запуском на верстаті.

Обладнання та матеріально-технічне забезпечення: фрезерний верстат з числовим програмним керуванням DYNAMYTE 2800; фрезерно-свердлильний верстат з ЧПК Syil X3; персональний комп'ютер із середовищем введення та перевірки керуючих програм (Mach3, NC-редактор або САМ-симулятор); комплект кінцевих фрез малого та середнього діаметра; цангові патрони або інші затискні пристрої; навчальні заготовки з конструкційної сталі або алюмінієвого сплаву; креслення деталей із завданням на фрезерування дугової канавки або круглого контуру; індивідуальні варіанти геометричних параметрів; методичні вказівки до виконання роботи.

Короткі теоретичні відомості

Геометрична сутність кругової інтерполяції. При обробці деталей на верстатах з числовим програмним керуванням траєкторія інструмента задається не безперервною лінією, а послідовністю математично описаних переміщень.

Найпростішим є прямолінійне переміщення – лінійна інтерполяція (G01). Однак більшість машинобудівних поверхонь містять радіуси, фаски, канавки, отвори та заокруглення. Для їх формування застосовується **кругова інтерполяція** – рух інструмента по дузі кола з постійним радіусом. Система ЧПК не «малює» коло – вона: знає початкову точку, знає кінцеву точку, знає центр або радіус, обчислює задані координати з заданим кроком. Тобто **інтерполяція** – це процес обчислення координат між заданими геометричними точками, проте це не просто рух по дузі, а орієнтований рух, тобто рух у певному напрямку.

Вибір початкової точки та безпечної висоти при фрезеруванні. При програмуванні дуг, півкравів або кола на верстатах з ЧПК надзвичайно

важливо правильно визначити початкову точку інструмента і безпечну відстань (висоту) для руху інструмента. Цей вибір безпосередньо впливає на точність обробки та безпеку роботи.

Початкова точка – це точка, з якої інструмент починає обробку деталі. Вона визначає:

- напрям обходу дуги чи кола (**G02** або **G03**);
- положення центру дуги (**I, J**);
- точки врізання та виходу інструмента.

Правила вибору початкової точки:

1. Початкова точка повинна знаходитися на контурі деталі, який буде оброблятися.

2. Вона має бути логічно найближчою до початку траєкторії: це скорочує холостий хід і зменшує час обробки.

3. Для внутрішніх канавок початкова точка зазвичай розташовується на зовнішньому краю канавки, а для зовнішніх – на внутрішньому краю контуру.

4. Координати початкової точки мають бути чіткими і зручними для розрахунку центра дуги або радіуса R .

Наприклад, для півкола, радіусом 15 мм, центр зміщений на **I15 J0**, початкова точка може бути верхньою точкою дуги: **X0 Y15**.

Безпечна висота – це відстань інструмента над деталлю, при якій він може переміщатися без контакту з заготовкою. Параметри вибору:

- висота повинна бути достатньою, щоб уникнути зіткнення з виступами або іншими деталями;
- зазвичай визначається як 2 мм чи 5 мм над найвищою точкою оброблюваної деталі або згідно з технічною документацією;
- при програмуванні висота задається в координаті Z перед початком руху по XY .

Наприклад, якщо товщина заготовки 10 мм, а висота точки обробки $Z = 0$ мм, безпечна висота може бути $Z = 5$ мм. Інструмент підіймається

на Z5, переміщується у початкову точку, і лише після цього опускається на робочу глибину.

Правильний вибір початкової точки забезпечує правильний напрям обходу дуги та точність обробки. Неправильний вибір початкової точки або безпечної висоти може призвести до:

- зіткнення інструмента з деталлю;
- неправильного обходу дуги (помилки траєкторії);
- пошкодження заготовки або інструмента.

Позначення початкової точки та безпечної висоти на ескізі деталі.
Щоб правильно запрограмувати обробку дуг або кола, перед початком руху інструмента важливо визначити початкову точку (A) та безпечну висоту (Z). Приклад позначення початкової точки (A) та безпечної висоти (Z) показано на рис. 4.1.

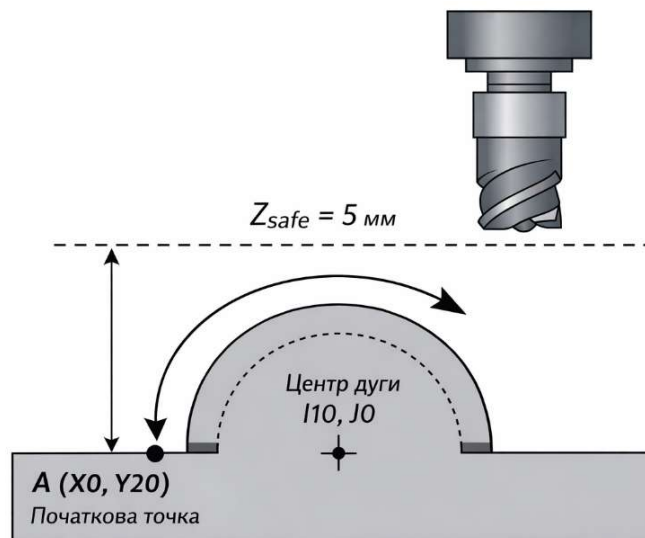


Рис. 4.1. Позначення початкової точки (A) та безпечної висоти (Z) на ескізі

Так, початкова точка (A) інструмента:

- позначається на ескізі великим кружком або точкою на контурі деталі;
- поруч пишеться «A – початкова точка» або координати (X, Y);

- на схемі можна намалювати стрілку, що показує напрям руху інструмента від цієї точки.

Безпечна висота / відстань інструмента позначається паралельно осі Z над деталлю. На ескізі можна намалювати штрихову лінію над поверхнею деталі з підписом « $Z_{safe} = 5 \text{ мм}$ ». Інструмент піднімається до цієї висоти при переміщенні у початкову точку, щоб не зачепити деталь або виступи.

Напрями руху інструмента при круговій інтерполяції (G02 та G03). Під час програмування дугових переміщень система числового програмного керування повинна отримати не лише геометричні параметри дуги (початкову і кінцеву точки, радіус або координати центра), але й напрям руху інструмента. Це пояснюється тим, що через дві задані точки можна провести не одну, а дві дуги одного радіуса: коротшу та довшу, а також дуги, розташовані по різні боки від хорди. Без вказівки напрямку система керування не зможе однозначно визначити, яку саме траєкторію необхідно виконати.

Для задання напрямку використовуються **команди кругової інтерполяції**:

G02 – переміщення інструмента по дузі за годинниковою стрілкою;

G03 – переміщення інструмента по дузі проти годинникової стрілки.

Визначення напрямку виконується відносно системи координат верстата. У фрезерній обробці прийнято вважати, що спостерігач дивиться на деталь з додатнього напрямку осі Z (зверху на оброблювану поверхню). Якщо в такому положенні інструмент переміщується праворуч уздовж кола – використовується **G02**, якщо ліворуч – **G03**. Отже, напрям задається не «за кресленням», а відносно орієнтації координатної системи.

Сутність команд **G02** і **G03** полягає у виборі сторони, з якої інструмент буде огинати центр кола. Зміна лише однієї команди при незмінних координатах початку, кінця і центра призводить до побудови іншої дуги.

Таким чином, напрям інтерполяції визначає геометрію контуру так само, як і самі координати.

Правильне визначення напрямку має важливе технологічне значення. По-перше, від нього залежить форма деталі: неправильний вибір призведе до обробки протилежного радіуса і отримання браку. По-друге, напрям пов'язаний із безпекою – інструмент може врізатися в матеріал або вийти за межі заготовки. По-третє, він впливає на роботу компенсації радіуса фрези: при поєднанні з командами корекції траєкторія може зміститися на протилежний бік профілю.

У практиці часто виникають такі **помилки**:

- центр визначено правильно, але вибрано протилежний напрям;
- внутрішня канавка програмується як зовнішній контур;
- при великих дугах ($> 180^\circ$) система будує іншу частину кола або видає повідомлення про помилку інтерполяції.

Щоб уникнути помилок, перед складанням програми доцільно виконати логічну перевірку. Необхідно схематично накреслити дугу, позначити початкову та кінцеву точки, визначити положення центра та уявно задати стрілку руху інструмента. Лише після цього обирається команда **G02** або **G03**.

Отже, команди **G02** та **G03** є не просто позначенням напрямку обертання, а засобом однозначного визначення геометрії траєкторії. Вони забезпечують правильне формування контуру, точність обробки та безпечну роботу обладнання.

Програмування дуги за допомогою координат центра (I, J, K). Після визначення напрямку руху інструмента наступним етапом програмування кругової інтерполяції є задання геометрії дуги. Найбільш універсальним і точним способом є **опис траєкторії через координати її центра**. У цьому випадку система керування отримує не лише початкову та кінцеву точки переміщення, а й положення центра кола, відносно якого будується дуга.

Особливістю цього методу є те, що центр задається не абсолютними координатами, а зміщенням від початкової точки дуги. Тобто фактично програмується вектор, який з'єднує початок руху інструмента з центром кола. Позначення параметрів мають такий зміст:

I – зміщення центра по осі X ;

J – зміщення центра по осі Y ;

K – зміщення центра по осі Z .

У більшості фрезерних операцій обробка відбувається у площині XU , тому використовується лише I та J .

Розглянемо геометричний зміст параметрів на прикладі: Нехай інструмент починає рух у точці A і повинен перейти в точку B по дузі кола з центром O . Система ЧПК не обчислює центр самостійно – його визначає технолог або програміст. Координати центра обчислюють як різницю координат, використовуючи формули (4.1) та (4.2):

$$I = X_O - X_A, \quad (4.1)$$

$$J = Y_O - Y_A, \quad (4.2)$$

де I – зміщення центра по осі X від початкової точки; фактично це відстань і напрям від A до O уздовж осі X ; J – зміщення центра по осі Y від початкової точки; відстань і напрям від A до O уздовж осі Y .

Уявіть дугу кола: початкова точка A , кінцева точка B , центр O . Система ЧПК повинна знати не тільки куди рухатися, а й навколо якого центру. Команди **G02/G03** із параметрами I та J дають системі вектор від початку дуги до центра. Тобто I і J – це координати центра відносно початкової точки, а не абсолютні координати в системі деталі.

Розглянемо на прикладі:

- початкова точка: **X20 Y10**;

- кінцева точка: **X40 Y10**;
- центр кола: **X30 Y10**.

Підставляємо значення у формули (4.1) та (4.2) і, відповідно до обчислення, одержуємо:

$$I = 30 - 20 = 10,$$

$$J = 10 - 10 = 0.$$

Програмний запис виглядатиме так:

G02 X40 Y10 I10 J0

Це означає: від поточної позиції інструмента виконати дугу за годинниковою стрілкою до точки **X40 Y10** з центром, зміщеним на 10 мм вправо від початку руху.

Метод координат центра є основним у промисловому програмуванні, оскільки він:

- забезпечує математичну однозначність траєкторії;
- дозволяє програмувати дуги будь-якого розміру;
- дає можливість будувати дуги більше 180°;
- використовується в САМ-системах;
- не викликає неоднозначностей при складних контурах.

Фактично система керування отримує повну геометричну інформацію і не виконує додаткових припущень.

Координатна система і поняття зміщення. У більшості верстатів з ЧПК для фрезерування використовується площина *X_Y*, де:

вісь X – горизонтальна;

вісь Y – вертикальна;

вісь Z – напрямок підйому або занурення інструмента.

Параметри *I* та *J* не вказують абсолютну позицію центра дуги на столі верстата, а відносне зміщення від початкової точки дуги:

- I = зміщення по осі X ;
- J = зміщення по осі Y .

Це означає, що центр може знаходитись праворуч, ліворуч, вище або нижче від початкової точки, і кожне положення впливає на траєкторію (рис. 4.2). Так:

- якщо **центр праворуч по осі X** → параметр I **додатний** (рис. 4.2, а);
- якщо **центр ліворуч по осі X** → параметр I **від'ємний** (рис. 4.2, б).

Це визначає горизонтальне положення дуги. Наприклад, при обробці канавки правий центр забезпечує дугу, що «огинає» матеріал з потрібного боку. Якщо знак переплутати, дуга буде побудована з протилежного боку, що може призвести до зрізу зайвого матеріалу або контакту інструмента з необробленою частиною.

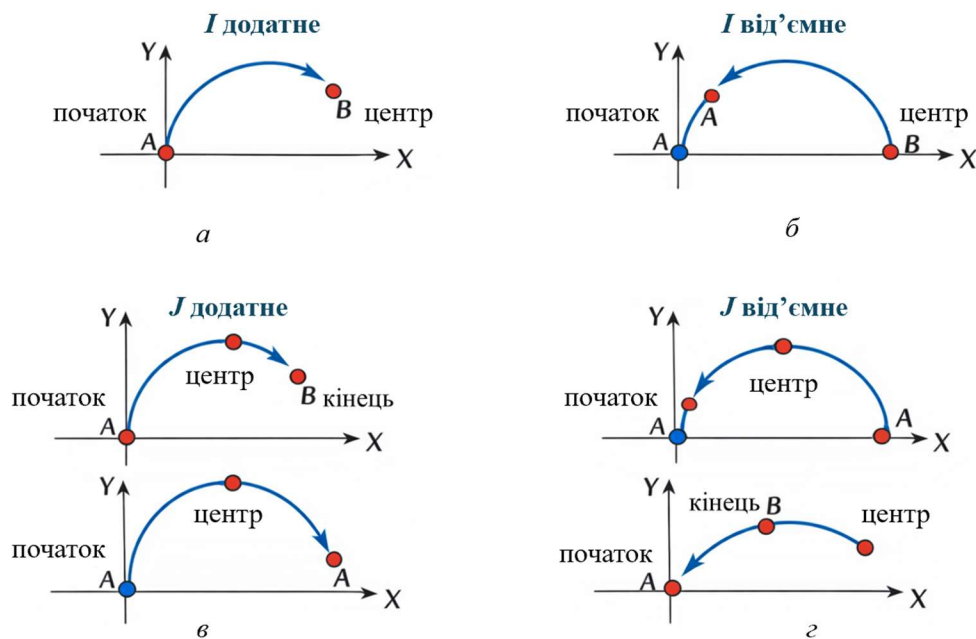


Рис. 4.2. Траєкторії при різних положеннях центра дуги: а – вправо від початкової точки; б – вліво від початкової точки; в – вище початкової точки; г – нижче початкової точки

З іншого боку:

- якщо **центр вище початкової точки** → параметр J **додатний** (рис. 4.2, в);

• якщо **центр нижче початкової точки** → параметр **J від'ємний** (рис. 4.2, з).

Це визначає вертикальне розташування дуги. Особливо важливо при обробці внутрішніх канавок або півкругів – неправильне положення по осі Y може спричинити занадто великий або занадто малий радіус дуги.

У більшості випадків I та J одночасно визначають точне

положення центра в площині. Наприклад: $I = +15$, $J = -10$. Це значить, що центр знаходиться праворуч і нижче початкової точки.

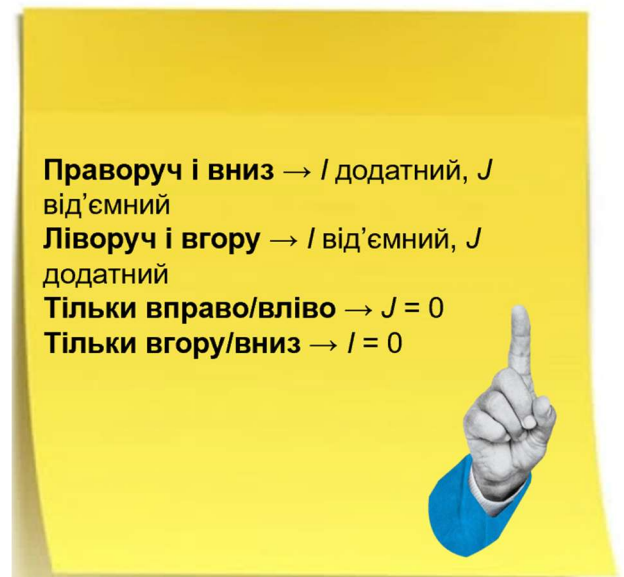
Таке положення формує дугу, яка проходить знизу та вправо від початкової точки – правильно для півкола або канавки, що огинає внутрішню частину деталі. Зміна знаку хоча б одного параметра змінює сторону обходу центру і, відповідно, траєкторію інструмента.

Неправильне визначення I та J не тільки змінює форму дуги, а й взаємодіє з командою **G02/G03**: якщо обрати неправильний знак I або J , інструмент рухатиметься у протилежну сторону, навіть якщо команда **G02/G03** вірна. Це може призвести до врізання в матеріал, пошкодження деталі або навіть аварійного зупинення верстата.

Тому при складанні програми завжди слід:

- накреслити схему дуги на комп'ютері / на папері;
- визначити положення центра відносно початкової точки;
- перевірити знаки I та J , а також напрям **G02/G03**;
- лише після цього вводити команду у ЧПК.

Програмування дуги через радіус. Існує також альтернативний спосіб програмування дуги – через радіус R . Цей метод є простішим для запису та підходить для швидкого програмування простих дуг, але має



суттєві обмеження та менш контрольований, ніж метод I, J . Суть методу полягає в тому, що при програмуванні оператор задає:

- початкову точку дуги;
- кінцеву точку дуги;
- величину радіуса дуги R .

Система ЧПК самостійно обчислює положення центра кола та проміжні координати траєкторії інструмента. Наприклад:

G02 X40 Y10 R10

Ця команда означає: від поточної позиції інструмента побудувати дугу з радіусом 10 мм за годинниковою стрілкою до точки **X40 Y10**. Метод R економить час і простий у записі, оскільки не потрібно вручну обчислювати координати центра.

Програмування через радіус має **ряд переваг**:

- **простота запису** – не потрібно обчислювати координати центра;
- **швидкість застосування** – зручно для швидкого програмування невеликих і простих дуг;
- **придатність для малих дуг** ($< 180^\circ$) – особливо ефективно для зовнішніх контурів та заокруглень деталей.

Цей метод часто використовується на практичних заняттях для швидкого ознайомлення зі створенням дугових траєкторій.

Незважаючи на простоту, метод R має серйозні **обмеження**:

- **неоднозначність при великих дугах** – якщо дуга перевищує 180° , система може обрати неправильний шлях обходу, що призведе до побудови дуги з протилежного боку;

Інженерне правило

R – для простих дуг менше 180° , швидких зовнішніх контурів.

I, J – для будь-яких дуг, точного позиціонування, внутрішніх канавок та повних кіл.

Метод I, J забезпечує математичну однозначність траєкторії та контроль над рухом інструмента, а метод R економить час за рахунок зменшення контролю та безпеки.



- **неможливість точного контролю центру** – при внутрішніх канавках або складних контурах центр обчислюється системою, що може спричинити неточності;

- **небезпека для внутрішніх контурів** – інструмент може врізатися у заготовку або контактувати з необробленими ділянками;

- **обмеження для повних кіл** – метод не дозволяє створювати коло 360° однією командою; необхідно розбивати на півдуги або застосовувати метод I, J .

Таким чином, метод R підходить лише для простих дуг і зовнішніх контурів, тоді як складні або точні операції вимагають координатного методу через I та J .

Розглянемо на прикладі: півкругла канавка з радіусом 15 мм, початкова точка **X0 Y15**, кінцева **X30 Y15**. Відповідно до заданих параметрів код має такий вигляд:

```
G02 X30 Y15 R15
```

Система автоматично обчислює центр і будує дугу. Якщо дуга мала і простора, все працює правильно. Якщо ж деталь складна або дуга більше 180° , результат може бути неточним, тому для таких випадків завжди застосовується метод I, J .

Програмування дуги через радіус R – зручний спосіб для простих задач, але для серйозної промислової обробки інженери віддають перевагу методу через координати центра. Це гарантує точність, однозначність траєкторії, безпечність роботи верстата та можливість обробки складних контурів і повних кіл. Порівняння методів програмування через I, J та R представлено на рис. 4.3.

Розглянемо особливості складання коду програми відповідно до конкретних завдань.

Приклад програмування фрезерування напівкруглої канавки. Розглянемо класичну задачу: обробка півкруглої канавки на фрезерному

верстаті з ЧПК. Канавка розташована на поверхні деталі, її півколо має радіус $R = 15$ мм. Початкова точка інструмента – **X0 Y15**, кінцева точка **X30 Y15**. Використовуємо метод через координати центра (I, J) для точності.

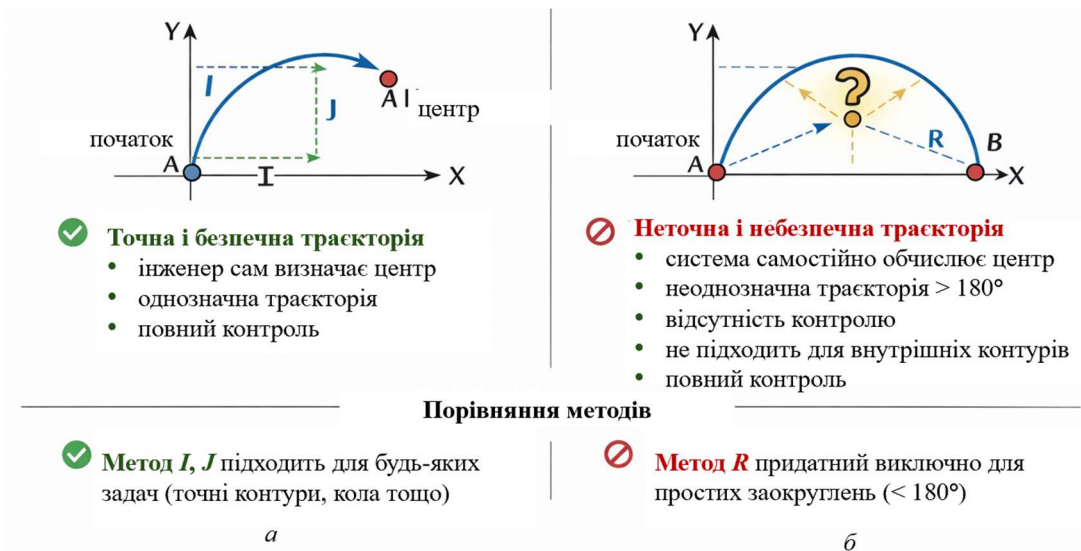


Рис. 4.3. Порівняння методів програмування дуги через координати центра I, J (а) та радіус R (б)

Схема обробки:

- початкова точка: **X0 Y15**;
- кінцева точка: **X30 Y15**;
- центр півкола: **X15 Y15**, зміщення від початку дуги: $I = 15, J = 0$;
- напрям руху: **G02** (за годинниковою стрілкою, огинаючи центр справа).

Програма верстата (див. розшифрування програми у табл. 4.1):

```

N10 G21 G17 G90
N20 G0 X0 Y15
N30 G43 H01 Z5
N40 S1500 M03
N50 G1 Z-5 F200
N60 G02 X30 Y15 I15 J0 F300
N70 G0 Z5
N80 M05
N90 G0 X0 Y0
N100 M30
    
```

Таблиця 4.1. Розшифрування програми фрезерування напівкруглої канавки через параметри I, J

Кадр	Команда	Що робить	Пояснення
N10	G21 G17 G90	Встановлює одиниці (мм), площину XY, абсолютне позиціонування	Підготовка верстата до обробки; система знає, що координати задаються від нуля деталі
N20	G0 X0 Y15	Перехід у початкову точку канавки	Швидке переміщення інструмента без різання
N30	G43 H01 Z5	Встановлення інструмента і компенсації по висоті	Забезпечує правильне положення інструмента щодо заготовки
N40	S1500 M03	Обертання шпинделя з частотою 1500 об/хв	Початок обертання інструмента для різання
N50	G1 Z-5 F200	Опускання інструмента на глибину обробки з подачею 200 мм/хв	Початок різання на задану глибину
N60	G02 X30 Y15 I15 J0 F300	Кругова інтерполяція півкола за годинниковою стрілкою	X30 Y15 – кінцева точка; I15 J0 – координати центра відносно початку дуги; F300 – подача під час різання
N70	G0 Z5	Підйом інструмента після завершення обробки	Безпечне переміщення інструмента над заготовкою
N80	M05	Зупинка шпинделя	Завершення обертання інструмента
N90	G0 X0 Y0	Повернення у вихідну позицію	Підготовка верстата для наступної операції або завершення роботи
N100	M30	Кінець програми	Скидання програми та підготовка до нової роботи

Альтернативна програма для фрезерування напівкруглої канавки через радіус R матиме такий вигляд (див. розшифрування програми у табл. 4.2):

```

N10 G21 G17 G90
N20 G0 X0 Y15
N30 G43 H01 Z5
N40 S1500 M03
N50 G1 Z-5 F200
N60 G02 X30 Y15 R15 F300
N70 G0 Z5
N80 M05
N90 G0 X0 Y0
N100 M30
    
```

Таблиця 4.2. Розшифрування програми фрезерування напівкруглої канавки через радіус R

Кадр	Команда	Що робить	Пояснення
N10	G21 G17 G90	Встановлює одиниці (мм), площину XY, абсолютне позиціонування	Підготовка верстата до обробки
N20	G0 X0 Y15	Перехід у початкову точку канавки	Швидкий переміщення
N30	G43 H01 Z5	Встановлення інструмента і компенсації по висоті	Забезпечує правильне положення
N40	S1500 M03	Обертання шпинделя з частотою 1500 об/хв	Початок різання
N50	G1 Z-5 F200	Опускання інструмента з подачею 200 мм/хв	Початок різання
N60	G02 X30 Y15 R15 F300	Кругова інтерполяція півкола з радіусом R	Система обчислює центр; F300 – подача
N70	G0 Z5	Підйом інструмента	Безпечно переміщення
N80	M05	Зупинка шпинделя	Завершення обертання
N90	G0 X0 Y0	Повернення у вихідну позицію	Підготовка до наступної операції
N100	M30	Кінець програми	Скидання програми

Приклад фрезерування канавки по колу. Розглянемо на прикладі задачі: на заготовці необхідно виконати канавку у вигляді повного кола радіусом 20 мм, центр кола зміщений від початкової точки інструмента на $I = 20$ мм, $J = 0$ мм. Інструмент починає роботу з верхньої точки кола (**X0 Y20**). Потрібно скласти програму для верстата з ЧПК та визначити, який метод програмування буде найбільш ефективним і безпечним.

Порівняємо методи програмування I, J та R для конкретного прикладу. Так, метод через координати центра I, J : однозначно задає центр кола та напрям руху інструмента; підходить для повного кола, внутрішніх та зовнішніх контурів; забезпечує контроль траєкторії і точність. Водночас метод через радіус R : неоднозначний для 360° ; часто потрібно розбивати на дві півдуги; може викликати помилку обчислення центру та небезпечні зіткнення інструмента з заготовкою; підходить лише для швидких навчальних прикладів або зовнішніх дуг менше 180° . Таким чином для цієї задачі найкращий метод – через I, J , метод R не підходить через повне коло.

Програма фрезерування канавки по колу через координати центра I, J виглядатиме так (див. розшифрування програми у табл. 4.3):

```

N10 G21 G17 G90
N20 G0 X0 Y20
N30 G43 H01 Z5
N40 S1200 M03
N50 G1 Z-5 F150
N60 G02 X0 Y20 I20 J0 F250
N70 G0 Z5
N80 M05
N90 G0 X0 Y0
N100 M30
    
```

Таблиця 4.3. Розшифрування програми фрезерування канавки по колу через координати I, J

Кадр	Команда	Що робить	Пояснення
N10	G21 G17 G90	Встановлює одиниці (мм), площину XY, абсолютне позиціонування	Підготовка верстата
N20	G0 X0 Y20	Перехід у початкову точку кола	Швидке переміщення без різання
N30	G43 H01 Z5	Встановлення інструмента та компенсації по висоті	Точне положення інструмента
N40	S1200 M03	Обертання шпинделя з частотою 1200 об/хв	Початок різання
N50	G1 Z-5 F150	Опускання інструмента на глибину обробки з подачею 150 мм/хв	Початок різання
N60	G02 X0 Y20 I20 J0 F250	Кругова інтерполяція повного кола з подачею 250 мм/хв	X0 Y20 – початкова / кінцева точка; I20 J0 – центр; F250 – подача
N70	G0 Z5	Підняття інструмента	Безпечне переміщення
N80	M05	Зупинка шпинделя	Завершення обертання
N90	G0 X0 Y0	Повернення у вихідну позицію	Підготовка до наступної операції
N100	M30	Кінець програми	Завершення роботи

Порядок проведення роботи

1. Вступне пояснення викладача:

- основних положень програмування дуг і кола (**G02/G03, I/J, R**);
- напрямів руху інструмента, вибір початкової точки та безпечних висот Z ;

- вплив подачі, частоти обертання шпинделя та глибини різання на якість обробки.

2. Демонстрація інженером:

- рухів інструмента по індивідуальній схемі деталі;
- перевірка програми на симуляторі або макеті перед фактичним фрезеруванням;
- пояснення логіки складання траєкторії і вибору методу I, J або R .

3. Самостійна робота студентів:

- аналіз креслення та схеми своєї індивідуальної деталі;
- визначення початкової точки, координат центра дуги та напрямку руху інструмента;
- розрахунок параметрів різання: подача, частота обертання шпинделя, глибина різання;
- складання керуючої програми для обробки канавки;
- перевірка програми на симуляторі перед запуском;
- кожен студент повинен **обґрунтувати вибір методу програмування (I, J чи R) і напрям руху**, зазначити точки врізання та виходу інструмента.

Зміст звіту

Звіт повинен містити:

- 1. Загальні дані:** номер, назву та мету роботи;
- 2. Ескіз деталі з індивідуального завдання;**
- 3. Пояснення вибору** початкової точки, центру дуги та параметрів різання;
- 4. Програми** для фрезерування канавки, з коментарями кожного рядка;
- 5. Результати перевірки** програми на симуляторі;
- 6. Висновок:** оцінку правильності траєкторії, можливі помилки та шляхи їх усунення.

Контрольні питання

1. Поясніть, чим відрізняється G02 від G03. Як напрям руху інструмента впливає на обробку внутрішніх та зовнішніх контурів?
2. **Міні-кейс:** у вас є внутрішня канавка півколом. Інструмент має рухатися всередину деталі. Який код G02 чи G03 обрати і чому?
3. Чому використання координат центра для кругової інтерполяції більш безпечно та точне, ніж програмування через R ?
4. Наведіть приклад ситуації, коли неправильне задання I або J призведе до помилки обробки.
5. Які обмеження має метод програмування дуги через радіус? Для яких типів дуг метод R підходить, а для яких – категорично не рекомендується?
6. Як зміна глибини різання та подачі впливає на точність та якість обробки дуги? Що відбудеться, якщо подачу задати занадто великою при обробці півкола?
7. **Міні-кейс:** необхідно обробити повне коло 40 мм радіусом у внутрішній частині деталі. Який метод програмування (I, J або R) оберете і чому?
8. Як би ви запрограмували траєкторію, яка містить пряму лінію та дугу? Опишіть кроки. Які потенційні проблеми можуть виникнути при неправильному поєднанні прямолінійних і дугових сегментів?
9. Що слід враховувати при програмуванні дуг для внутрішніх контурів порівняно з зовнішніми? Які ризики при переплутаному напрямку обходу центру?
10. **Міні-кейс:** У вас є півколо на краю деталі, інструмент починає з X0 Y10. Центр півкола зміщений на I10 J0. Опишіть логіку визначення точки врізання та виходу інструмента.

Протокол практичної роботи № 4

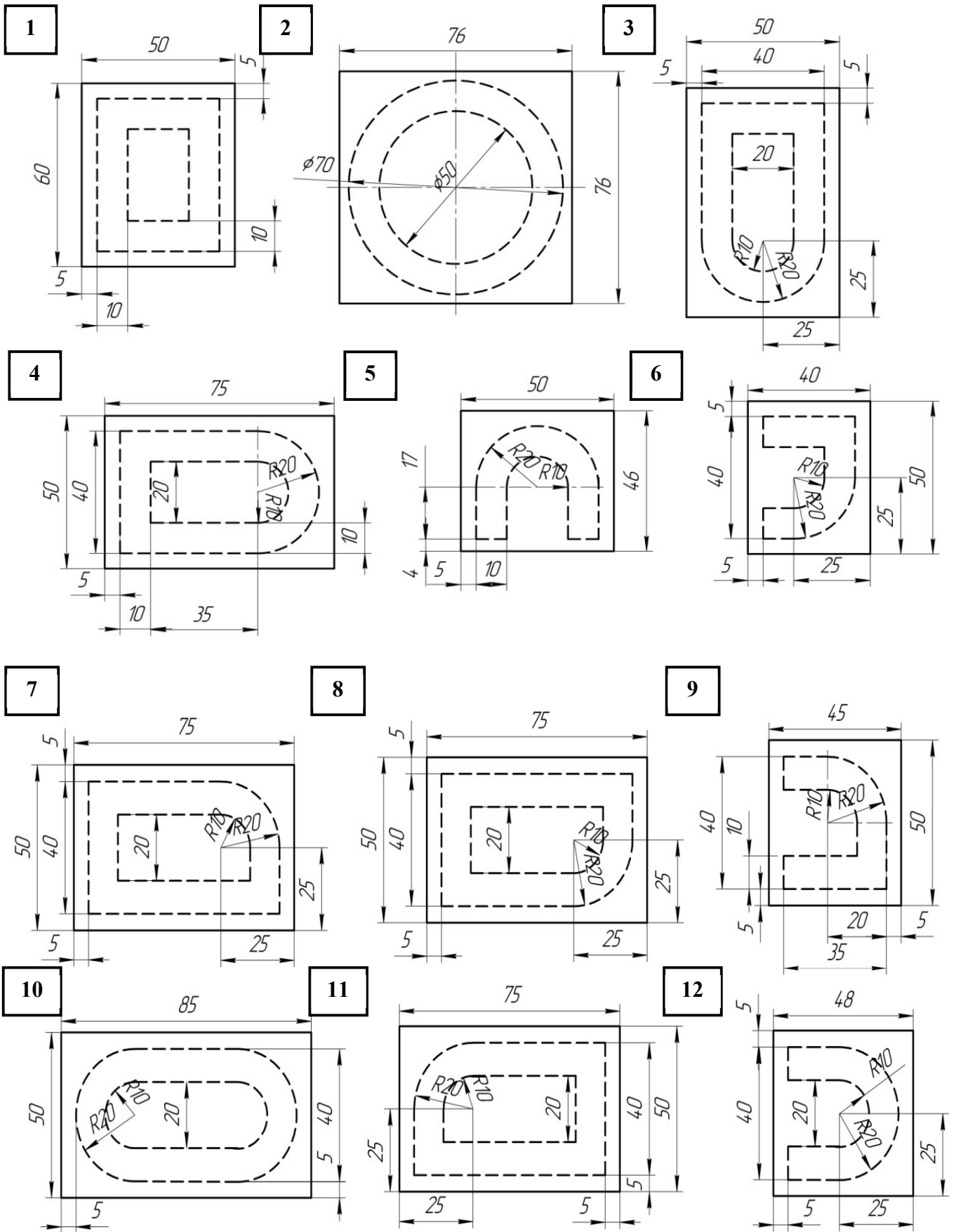
Визначення параметрів програмування дуги та кола

Виконав/-ла студент/-ка _____ курсу
Група: _____
Прізвище та ініціали: _____
Дата виконання: « ____ » _____ 20 ____ р.
Оцінка: _____

Мета роботи – сформувати у студентів практичні навички програмування кругових та дугових траєкторій на верстатах з числовим програмним керуванням, зокрема вміння визначати геометричні параметри дуги (радіус, координати центра, початкову та кінцеву точки), обґрунтовано задавати напрям кругової інтерполяції (G02, G03), коректно використовувати параметри I , J , K або радіус R під час програмування, а також виконувати розрахунок і перевірку траєкторії руху інструмента під час фрезерування канавок і кругових контурів; сформувати системне розуміння принципів програмування кругових та дугових переміщень у системах ЧПК.

Вибір деталі

Оберіть завдання відповідно до свого варіанту. Вкажіть номер свого варіанту: _____



Перевірка програми / симуляція

Симуляція програми²⁶ (*dry run*) виконана: Так Ні

Помилки та виправлення (якщо були):

Висновки

Під час роботи я опанував _____

Здобув практичні навички _____

Ознайомився з логікою та послідовністю виконання _____

Виконаний аналіз показав мою здатність практично застосовувати отримані знання та навички, а також уміння _____

²⁶ Програмні пакети: NC Viewer, G-Wizard Editor, CAMotics, Fusion 360, SolidCAM, SprutCAM тощо

Мета роботи: сформувати практичні навички програмування операцій обробки отворів на верстатах з числовим програмним керуванням із використанням стандартних циклів; навчити визначати технологічні параметри свердління, зенкерування та розгортання, обирати інструмент і режими різання та поглибити розуміння принципів програмування таких операцій.

Очікуваний результат: після виконання роботи студент повинен **знати:** види операцій обробки отворів та їх технологічне призначення; структуру стандартних циклів свердління (**G81, G82, G83** та ін.); правила задання глибини обробки, відводу інструмента та безпечної висоти; взаємозв'язок між діаметром свердла, матеріалом деталі та режимами різання; особливості координатного позиціонування при обробці групи отворів; **вміти:** аналізувати креслення деталі та визначати послідовність обробки отворів; обирати тип циклу свердління відповідно до технологічної задачі; розраховувати частоту обертання шпинделя та подачу; правильно задавати параметри R, Z, F, S у циклах обробки отворів; складати та перевіряти керуючу програму в середовищі Mach3; **набути практичних навичок:** програмування координатного свердління; використання стандартних циклів обробки отворів; підготовки та налагодження програми перед виконанням на верстаті з ЧПК; аналізу можливих помилок траєкторії інструмента.

Обладнання та матеріально-технічне забезпечення: фрезерний верстат з числовим програмним керуванням DYNAMYTE 2800; свердлильний верстат з ЧПК «Syil X3»; персональний комп'ютер

із системою керування Mach3; комплект свердел різного діаметра; зенкери та розгортки; інструментальні патрони (цангові, свердлильні); навчальні заготовки з конструкційної сталі або алюмінієвого сплаву; креслення деталі та індивідуальні варіанти розташування отворів; методичні вказівки до виконання роботи.

Короткі теоретичні відомості

Обробка отворів є однією з найпоширеніших операцій у машинобудуванні. На відміну від контурної обробки, де форму визначає траєкторія руху інструмента, при обробці отворів геометрію формує сам інструмент, а система ЧПК керує його позиціонуванням та режимами різання.

Точність, шорсткість та взаємне розташування отворів визначають працездатність вузла (посадка валів, болтові з'єднання, базування деталей), тому програмування таких операцій вимагає чіткого технологічного обґрунтування.

Види операцій обробки отворів та їх технологічне призначення. Отвір у машинобудуванні – це не просто порожнина в матеріалі. У більшості випадків він є функціональним елементом вузла: забезпечує посадку під вал, підшипник, штифт або різьбове з'єднання. Тому від отвору вимагають не тільки наявності діаметра, а й точності розміру, співвісності, перпендикулярності та необхідної шорсткості поверхні. Саме з цієї причини отвори майже ніколи не отримують одразу за одну операцію – їх формують поетапно, поступово підвищуючи точність. Операція обробки отворів проходить поетапно: свердління → зенкерування → розгортання → зенкування.

Свердління – це операція отримання первинного (чорнового) отвору суцільним різальним інструментом – свердлом. Під час свердління:

- формується геометрія отвору;
- видаляється основний об'єм матеріалу;
- виникають найбільші сили різання.

Особливості:

- невисока точність (12-14 квалітет);
- значна шорсткість;
- можливе відхилення осі.

Свердло працює в найскладніших умовах: воно одночасно ріже, транспортує стружку і центрується в матеріалі. Через це отвір після свердління завжди має похибки – овальність, конусність, биття.

Зенкерування – це операція обробки отвору спеціальним інструментом – зенкером з метою підвищення точності та вирівнювання геометрії. Після свердління отвір має нерівну поверхню, відхилену вісь, неправильний діаметр, а зенкер стабілізує вісь, вирівнює стінки та зменшує похибки форми. Операція локальна – працює лише у верхній зоні. Точність підвищується до 10-11 квалітету.

Розгортання – це чистова операція точної обробки отвору розгорткою для отримання заданого розміру та шорсткості. Розгортка не формує отвір, не виправляє вісь, а лише знімає дуже тонкий шар матеріалу. Точність: 7-9 квалітет; шорсткість (Ra): від 1.25 мкм до 2.5 мкм. Фактично це операція доведення.

Зенкування (конічне та циліндричне/торцеве) – це формування фаски або конічної поверхні у верхній частині отвору для створення уступу (зенківка конічна), формування посадочного гнізда, заглиблення під болт або втулку (зенківка циліндрична). Виконується для: посадки гвинта, зняття задирок, підготовки під різьбу. У цьому випадку використовується циліндричний інструмент з направляючим штифтом. Зенкування виконується на певну глибину для утворення циліндричної ступінчастої частини, зміни діаметра верхньої частини отвору.

Потрібно розмежовувати конічне зенкерування та зенкування посадочного місця (див. табл. 5.1). Обидва процеси називаються «зенкування», але виконують різні функції: одне формує конічну фаску, друге – створює циліндричне посадочне заглиблення. Перед

програмуванням необхідно чітко визначити, яка саме геометрія потрібна відповідно до креслень, і лише після цього обирати інструмент та задавати глибину обробки. Саме правильне розуміння різниці дозволяє уникнути технологічних помилок при складанні керуючої програми.

Якщо замість конічного зенкування виконати циліндричне:

- гвинт не сяде правильно;
- вузол втратить жорсткість.

Якщо замість циліндричного зробити лише фаску:

- головка болта виступатиме;
- порушиться базування.

Таблиця 5.1. Зенкування конічне та циліндричне (різниця)

Ознака	Конічне зенкування	Циліндричне зенкування
Форма	Конус 	Циліндр 
Призначення	Під потайну головку	Під болт, втулку
Зміна діаметра	Ні (основний отвір не змінюється)	Так (верхня частина розширюється)
Глибина	Невелика	Чітко задана

У навчальній літературі часто наводиться повна технологічна схема обробки отвору: свердління → зенкерування → розгортання → зенкування (циліндричне / під кріплення). Однак ця послідовність не є обов'язковою для кожного отвору. Вона застосовується лише тоді, коли отвір виконує функцію точного базування або посадки. У більшості деталей отвори мають простіше призначення – щоб через них проходив болт або щоб у них нарізати різьбу. Тому спосіб обробки отвору визначають не тим, що в деталі є отвір, а тим, для чого він потрібний у конструкції.

Перш за все слід встановити, яку роль відіграє отвір у конструкції. Якщо отвір лише забезпечує проходження болта, точність його діаметра не впливає на працездатність вузла. У цьому випадку достатньо сформувати отвір і усунути задирки на вході, щоб забезпечити правильне встановлення кріплення. Технологічний процес обмежується свердлінням і зняттям фаски. Виконання розгортання або напівчистої обробки не покращує роботу вузла, але значно збільшує трудомісткість і знос інструмента.

Інша ситуація виникає при підготовці отвору під різьбу. Тут також не вимагається високоточний діаметр, оскільки профіль різьби формується мітчиком. Важливо лише отримати правильний початковий діаметр і забезпечити чистий вхід інструмента. Тому застосовується схема: свердління → зенкування. Розгортання в даному випадку є недоцільним, оскільки різьбонарізний інструмент змінює геометрію поверхні, і попередня високоточна обробка втрачає сенс.

Повна технологічна послідовність використовується тоді, коли отвір є базовим або посадковим елементом – наприклад, під штифт, вал або підшипник. У такому випадку необхідна точність діаметра та форми. Свердління створює лише заготовку отвору, підготовче зенкерування стабілізує вхід і вісь, розгортання забезпечує задану точність, а кінцеве зенкування формує функціональні елементи (фаску або посадочне заглиблення). Лише поєднання цих операцій гарантує правильне базування деталей у вузлі.

Отже, кількість операцій визначається вимогами до точності. У практиці машинобудування більшість отворів є кріпильними, тому найпоширенішою є спрощена схема – свердління та зняття фаски. Повна схема застосовується лише для відповідальних посадок.

Таким чином, технолог повинен керуватися **принципом мінімальної достатності: обирати не максимальну кількість операцій, а лише ті, що необхідні для забезпечення функції деталі**. Саме це і є ознакою правильно побудованого технологічного процесу.

Основні технологічні параметри операцій обробки. Будь-яка операція обробки отвору – свердління, зенкерування, розгортання чи зенкування – виконується за певними режимами різання. Від правильно вибраних параметрів залежить не лише продуктивність, але й точність отвору, шорсткість поверхні, стійкість інструмента і навіть безпека роботи. Тому перед складанням керуючої програми технолог зобов'язаний визначити режими різання, а вже потім переносити їх у код програми.

Незалежно від виду обробки використовують однакову групу параметрів:

- швидкість різання V , м/хв;
- частота обертання шпинделя n , об/хв;
- подача на оберт S , мм/об;
- хвилинна подача F , мм/хв;
- глибина різання t , мм.

Ці величини взаємопов'язані і визначаються послідовно.

Швидкість різання визначає температуру в зоні контакту інструмента з матеріалом. Її вибирають за довідковими таблицями (див. QR-код) залежно від:

- матеріалу деталі (сталь, алюміній, чавун);
- матеріалу інструмента (HSS, твердий сплав);
- виду обробки (чорнова, напівчистова, чистова).

Орієнтовні співвідношення такі:
свердління → середня швидкість різання,
зенкерування → трохи менша, розгортання
→ найменша (зі зростанням точності
потрібно зменшувати теплові деформації).



Після вибору швидкості різання обчислюють **частоту обертання** за формулою (5.1):

$$n = \frac{1000 \cdot V}{\pi D}, \quad (5.1)$$

де V – швидкість різання, м/хв; $\pi \approx 3,1416$; D – діаметр інструмента, мм.

Отримане значення округлюють до найближчого значення, яке може забезпечити верстат. Саме цей параметр задається у програмі через команду S .



Подача визначає товщину зрізуваного шару і впливає на навантаження інструмента. Її вибирають за довідниками (див. QR-код) залежно від: діаметра інструмента, матеріалу, точності обробки. Загальна закономірність: свердління → найбільша подача, зенкерування → середня подача, розгортання → найменша подача. Це

пояснюється тим, що чистові інструменти зрізають тонкий шар і не повинні деформувати отвір.

Подача визначається за формулою (5.2):

$$F = n \cdot S, \quad (5.2)$$

де n – частота обертання шпинделя, об/хв; S – подача на один оберт, мм/об.

Саме значення F записується у керуючу програму.

На відміну від фрезерування, де **глибина різання** (t) безпосередньо задається як товщина шару, що зрізається за прохід, при обробці отворів поняття глибини різання пов'язане з припуском, який залишено після попередньої операції.

Тобто глибина різання тут – це не довільно вибране значення, а технологічно обґрунтована різниця між діаметрами інструмента і вже отриманого отвору. Інакше кажучи, кожен наступний інструмент не формує отвір «з нуля», а лише уточнює його геометрію.

Для операцій обробки отворів **глибину різання** визначають за формулою (5.3):

$$t = \frac{D_{\text{інстр.}} - D_{\text{попер.}}}{2}, \quad (5.3)$$

де $D_{\text{інст.}}$ – діаметр поточного інструмента; $D_{\text{попер.}}$ – діаметр отвору після попередньої операції.

Ми ділимо різницю навпіл, тому що інструмент знімає матеріал по радіусу, а не по діаметру. Для різних операцій формула (5.3) буде дещо змінюватись (табл. 5.2).

Таблиця 5.2. Формули розрахунку глибини різання (t) для операцій свердління, зенкерування та розгортання

Свердління	Зенкерування	Розгортання
$t = \frac{D_{\text{свердла}}}{2}$	$t = \frac{D_{\text{зенкера}} - D_{\text{свердла}}}{2}$	$t = \frac{D_{\text{розгортки}} - D_{\text{зенкера}}}{2}$
Формула має такий вигляд, адже немає попереднього отвору. Свердло формує отвір повністю, і цей етап є чорновим	Знімається відносно великий припуск для виправлення геометрії. Зазвичай це десять міліметра. Якщо зробити менше – інструмент не стабілізує вісь. Якщо більше – можливе биття і перевантаження	Це чистова операція, тому припуск мінімальний. Типове значення: соті міліметра. Тут важливо: розгортка не повинна різати багато – вона доводить форму, а не обробляє матеріал

Іще одним важливим параметром є **глибина отвору по осі Z**. Часто студенти помилково сприймають її як просте значення з креслення, наприклад «глибина 20 мм», і задають його у програмі ЧПК без урахування особливостей інструмента. Насправді верстат рухає тільки ріжучу частину

інструмента, а не форму отвору, тому глибина Z визначає шлях вершини інструмента, що забезпечує правильне формування отвору відповідно до креслення.

Правильне визначення глибини z необхідне для того, щоб:

- забезпечити повне формування циліндричної частини отвору;
- уникнути недорізу на дні;
- запобігти пошкодженню інструмента;
- гарантувати точність і правильну геометрію отвору.

Кінцевий розмір канавки, уступу або глибини обробки з урахуванням z визначається як сума глибини отвору за кресленням та додаткового технологічного ходу для врахування форми ріжучої частини інструмента за формулою (5.7):

$$z = H + \Delta, \quad (5.7)$$

де H – базовий або номінальний розмір деталі, який задається кресленням або технологічним завданням, мм; Δ – технологічний припуск на чистову обробку, мм.

Для свердла цей додатковий хід зазвичай становить приблизно 0,3 діаметра свердла ($\Delta \approx 0,3 D$).

Для зенкерування додатковий хід менший, оскільки цей інструмент лише уточнює діаметр і вирівнює вхід у отвір. Для розгортання, як чистової операції, додатковий хід зазвичай не потрібен, бо інструмент знімає мінімальний шар матеріалу і формує точний діаметр

Координата Z у програмі ЧПК одночасно визначає:

- фактичну глибину обробки інструмента;
- безпеку обробки (щоб не прорізати дно або не пошкодити деталь);
- повноту формування циліндричної частини отвору;
- правильне дотримання технологічного припуску для наступних операцій.

Помилка у визначенні z призводить до браку: отвір може бути недорізаним, конусним або неправильного діаметра, а інструмент може пошкодитися.

Стандартні цикли свердління. Обробка отворів є однією з найпоширеніших операцій у машинобудуванні, і для її успішного виконання необхідно враховувати не тільки геометрію деталі, а й технологічні параметри та послідовність рухів інструмента. У ЧПК для цього використовують стандартні цикли свердління (див. табл. 5.3), які дозволяють автоматизувати повторювані дії, зменшити обсяг програмного коду та знизити ймовірність помилок під час обробки однієї або кількох однакових деталей.

Таблиця 5.3. Загальні цикли свердління

Код циклу	Назва	Призначення
G81	Прості свердління	Створення отворів на задану глибину без пауз; інструмент заходить на глибину і повертається
G82	Свердління з витримкою	На дні отвору робиться пауза (для чистоти дна)
G83	Глибоке свердління (поступове)	Інструмент заходить поступово, з виходом для видалення стружки.
G85	Розгортання	Чистова обробка отворів з відводом без обертання інструмента
G86	Зенкерування	Робочий хід до z , потім швидкий підйом без обертання
G89	Розгортання з витримкою	Подібно до G85, але з паузою на дні

Цикл свердління – це блок команд, що задає весь алгоритм обробки отвору: підхід до деталі, опускання інструмента до заданої глибини, витримку (за потреби) і повернення на безпечну висоту. Таким чином, оператору не потрібно писати окремі кадри для кожного руху: всі параметри обробки інтегровані у цикл.

Найпоширенішими стандартними циклами на сучасних верстатах є **G81**, **G82** та **G83**. **G81** використовується для простого свердління отворів без витримки на дні; цей цикл підходить для чорнової обробки, коли основна мета – швидко отримати отвір заданої глибини. **G82** застосовується, коли важливо досягти чистоти дна отвору: після опускання на робочу глибину інструмент утримується на місці певний час, що дозволяє уникнути задирок і нерівностей. **G83** призначений для глибоких свердлень, коли необхідно видаляти стружку частинами: інструмент проходить отвір поступовими підходами, з поверненням на безпечну висоту після кожного етапу.

Крім цих базових циклів, існують спеціальні: G85, G86, G89, які застосовують для чистової обробки, зенкерування або розгортання отворів. Їхня особливість полягає в зміні траєкторії підйому інструмента після завершення робочого ходу: деякі цикли повертають інструмент швидким рухом без обертання, деякі включають паузу на дні.

Кожен цикл задається набором параметрів: X, Y – координати центру отвору; Z – глибина обробки; R – безпечна висота, на якій інструмент підходить до деталі; F – подача; S – частота обертання шпинделя; M – додаткові команди (охолодження, витримка). Правильне завдання цих параметрів є ключем до успішного програмування та уникнення зіткнень інструмента з деталлю.

При виборі циклу слід враховувати технологічне призначення отвору. Для звичайних отворів без підвищених вимог до чистоти дна та точності використовують **G81**. Якщо необхідно отримати більш чисту поверхню, підбирають **G82**, а при глибоких отворах – **G83**, щоб уникнути засмічення та пошкодження інструмента. Чистові цикли **G85**, **G86**, **G89** застосовуються після свердління, коли головне – точність і якість обробки.

Вводяться цикли у програму після підготовки інструмента і позиціонування на безпечну висоту: спочатку задаються **T**, **M06**, **S**, **M03**, потім **G00** до точки старту, а далі викликається обраний цикл

із зазначенням координат, глибини та подачі. Для групи отворів змінюються лише координати X та Y , а вся логіка циклу залишається незмінною. Після завершення обробки використовується G80, що скасовує активний цикл. Наприклад, для свердління чотирьох отворів на деталі можна скласти програму (розшифрування програми наведено у табл. 5.4), що наводиться нижче.

```

N01 T1 M06
N02 S1200 M03
N03 G00 X10 Y10 Z5
N04 G81 Z-12 R2 F120
N05 X40 Y10
N06 X40 Y40
N07 X10 Y40
N08 G80
N09 M05
N10 M30

```

Таблиця 5.4. Розшифровка програми для свердління чотирьох отворів

№ кадру	Що робить команда	Пояснення
N01	Вибір інструмента № 1	Підбираємо свердло потрібного діаметру для отворів
N02	Включення шпинделя 1200 об/хв	Задаємо обертання шпинделя у прямому напрямку для свердління
N03	Швидкий хід до початкової точки	Підводимо інструмент над першим отвором на безпечну висоту $Z = 5$ мм
N04	Проста програма циклу свердління	$Z = -12$ мм – глибина свердління, $R = 2$ мм – безпечна висота над деталлю, $F = 120$ мм/хв – робоча подача
N05	Зміна координат для другого отвору	Цикл повторюється, зміна координат X , Y для нового отвору
N06	Зміна координат для третього отвору	Повторення циклу для третього отвору, координати з креслення
N07	Зміна координат для четвертого отвору	Повторення циклу для четвертого отвору
N08	Відміна циклу	Завершуємо активний цикл, повертаємося до ручного керування або наступної операції
N09	Зупинка шпинделя	Безпечно завершення обертання перед виведенням інструмента
N10	Кінець програми	Завершуємо програму, можна запуснути наступний варіант обробки

У цьому прикладі G81 задає весь алгоритм: опускання до $Z = -12$ мм, відхід на безпечну висоту $R = 2$ мм, подача $F = 120$ мм/хв. Координати X, Y змінюють розташування отворів у групі. Важливо пам'ятати, що помилка у виборі R або Z може призвести до зіткнення інструмента з деталлю, а невірні координати – до зміщення всіх отворів.

Задання глибини, відводу і безпечної висоти при обробці отворів. Однією з ключових особливостей програмування циклів свердління є правильне визначення робочої глибини Z , безпечної висоти R та подачі F . Ці параметри визначають не лише точність і якість обробки, а й безпеку виконання операції.

Параметр Z задає робочу глибину свердління, тобто ту точку, до якої інструмент повинен проникнути у матеріал. Глибина Z визначається за технічними кресленнями деталі та технологічним призначенням отвору: $Z =$ товщина деталі + припуск на чистову обробку. Якщо планується подальше розгортання чи зенкерування, до Z додають невеликий припуск (від 0,1 мм до 0,2 мм), щоб забезпечити точну чистову обробку. При багатоступеневому свердлінні Z може задаватися поетапно, якщо отвір глибокий і потрібне видалення стружки частинами (для **G83**).

Параметр R – це висота відводу (площини безпечного підходу), на якій інструмент починає свій робочий хід над деталлю. Вона обирається так, щоб забезпечити безпечне переміщення інструмента:

- **$R \geq$ найвища точка деталі + 1 мм або + 2 мм;** це дозволяє уникнути зіткнення при швидкому переміщенні.
- **R не повинна бути занадто великою,** інакше збільшується час обробки холостим ходом.

При груповій обробці R може бути однаковою для всіх отворів.

Параметр F визначає швидкість подачі інструмента під час свердління. Подача залежить від діаметра інструмента, матеріалу деталі

та типу операції (чорнова або чистова). Неправильна подача може викликати задирки, ламання свердла або погану якість отвору.

Параметр F Залежить від матеріалу деталі, діаметра свердла та типу операції:

- для м'яких металів (алюміній) – більша подача;
- для твердих металів (сталь) – менша подача, щоб уникнути перегріву;
- при глибоких отворах подачу можна зменшувати для уникнення великого навантаження на свердло.

Орієнтовна формула для підбору подачі F :

$$F = f \cdot n, \quad (5.8)$$

де f – подача на один оберт інструмента, мм/об; n – частота обертання шпинделя, об/хв.

Вона називається орієнтовною, оскільки розрахована для ідеальних умов: рівної поверхні, точного матеріалу, нормального стану інструменту. У реальному виробництві на подачу впливають: нерівності заготовки, зношення інструмента, коливання або люфти верстата, нерівномірне охолодження або мастило, різні властивості матеріалу (твердість, в'язкість, крихкість). Тому фактична подача може відрізнятись від розрахованої за формулою. Основне призначення розрахунку за формулою (5.8) – дати приблизне значення подачі, щоб: запобігти грубим помилкам при програмуванні, визначити порядок величини F перед точним розрахунком, швидко підібрати режими на початковому етапі. Тобто це стартова рекомендація, яку потім уточнюють експериментально або за допомогою спеціальних довідників і таблиць різання.

При складанні програми із стандартним циклом обробки отворів послідовність рухів завжди однакова:

1. Швидке переміщення до площини відводу (площини безпечного підходу) R :

- інструмент переміщується над деталлю без контакту з матеріалом;
- команда: **G00 X... Y... Z**.

2. Робочий рух до глибини Z із подачею F :

• інструмент опускається і виконує, наприклад, свердління до заданої глибини;

- команда: цикл **G81/G82/G83** із параметром Z .

3. Повернення в площину відводу R :

• після завершення робочого ходу інструмент піднімається на R швидким ходом;

- далі можна змінювати координати для наступного отвору.

Важливо: щоб скоротити час холостих переміщень, потрібно обирати R лише трохи вище поверхні деталі. Глибина Z повинна враховувати припуск на чистову обробку, якщо планується зенкерування або розгортання.

Координатне позиціонування групи отворів. **Координатне позиціонування групи отворів** – це метод програмування операцій обробки, який дозволяє обробляти декілька отворів послідовно без повторного програмування циклу для кожного отвору. Ідея полягає в тому, що стандартний цикл свердління (**G81, G82, G83**) задається один раз, а координати кожного отвору вводяться як параметри, які система ЧПК обробляє автоматично.

Для чого потрібне координатне позиціонування:

• **економія часу:** не потрібно писати окрему програму для кожного отвору;

• **зменшення помилок:** координати задаються чітко, а система повторює цикл точно, що важливо для групи отворів з однаковими технологічними вимогами;

- **уніфікація програмування:** один цикл працює для різних розташувань, що зручно при серійному або масовому виробництві;

- **забезпечення точності:** правильне координатне позиціонування дозволяє точно дотримуватися відстаней між отворами, що критично для посадки валів, кріплень або інших вузлів.

Координатне позиціонування правильно виконувати за етапами:

1. Визначення нульової точки деталі. Перед початком обробки слід вибрати систему координат (точку 0) і визначити початкову точку інструмента, від якої будуть обчислюватися всі координати отворів.

2. Вибір циклу обробки (G81 – стандартне свердління; G82 – свердління з витримкою на дні; G83 – глибоке свердління з поступовим підходом).

3. Задання параметрів циклу (X, Y – координати центру отвору; Z – глибина свердління; R – площина відводу (площина, на якій інструмент може переміщатися без контакту з деталлю); F – робоча подача).

4. Повторення циклу для групи отворів. Після першого кадру циклу, змінюються лише координати X та Y для наступних отворів. Система автоматично застосовує ті ж параметри Z, R та F , забезпечуючи однакову обробку для всіх отворів групи.

Припустимо, потрібно обробити чотири отвори у квадратному розташуванні: відстань між отворами по X та Y дорівнює 40 мм; перший отвір (**X10, Y10**). Фрагмент програми виглядатиме так (розшифрування програми наведено у табл. 5.5):

```
%  
...  
N10 G00 X10 Y10  
N11 G81 Z-12 R2 F120  
N12 X50 Y10  
N13 X50 Y50  
N14 X10 Y50  
N15 G80  
...  
%
```

Таблиця 5.5. Розшифрування фрагменту програми з повторним циклом для групи отворів

№ кадру	Що робить команда	Пояснення (чому саме ця команда)
N10	Швидке позиціонування інструмента до першої точки свердління	G00 – режим швидкого переміщення без різання; X10 Y10 – координати першого отвору відносно нульової точки системи координат деталі (X0 Y0)
N11	Запускає стандартний цикл свердління. Свердлить перший отвір	G81 – цикл свердління; Z-12 – глибина отвору; R2 – безпечна висота, на якій інструмент переміщається між отворами; F120 – робоча подача
N12	Свердлить другий отвір	X50 Y10 – зміщення по осі X на 40 мм від першого отвору, такий самий Z, R, F застосовуються автоматично
N13	Свердлить третій отвір	X50 Y50 – зміщення по Y на 40 мм від другого отвору; всі параметри циклу зберігаються
N14	Свердлить четвертий отвір	X10 Y50 – завершальний отвір у групі; координати задають розташування прямокутника
N15	Завершення циклу свердління	G80 – команда скасовує дію стандартного циклу, дозволяє безпечно переміщувати інструмент далі

Керуючі програми для обробки отворів. Обробка отворів на верстатах з ЧПК виконується за допомогою керуючої програми, яка складається з трьох логічних частин: підготовка, цикл обробки, завершення. Кожна частина відіграє важливу роль для точності та безпеки обробки.

На етапі **підготовки** встановлюється інструмент, оберти шпинделя та початкова позиція інструмента над деталлю. Наприклад:

N01 T01 M06	; встановлення інструмента № 1
N02 G90 G54	; встановлення абсолютних координат та робочої системи координат деталі
N03 S1200 M03	; запуск шпинделя з частотою обертання 1200 об/хв за годинниковою стрілкою
N04 G00 G43 H01 Z50	; компенсація довжини інструмента
N05 G00 X10 Y10 Z50	; швидке переміщення інструмента до першого отвору над деталлю

Цей етап критично важливий: без правильної підготовки інструмент може зачепити деталь або патрон, а невірне позиціонування призведе до неточності всіх отворів. Пропуск підготовки неприпустимий

Цикл обробки відповідає за безпосередню обробку отворів. Застосовуються стандартні цикли **G81**, **G82**, **G83**. Координатне позиціонування групи отворів дозволяє задати один цикл, а змінювати лише координати X та Y для кожного отвору, що економить час і забезпечує точність. Приклад програми для чотирьох отворів розміщений далі.

Як видно з прикладу, один цикл застосовується до всіх отворів, координати X та Y задають розташування, а параметри Z , R і F залишаються незмінними для всіх отворів групи.

N06 G81 Z-12 R2 F120	; стандартний цикл свердління: глибина Z-12, площа відводу R2, подача F120
N07 X40 Y10	; другий отвір
N08 X40 Y40	; третій отвір
N09 X10 Y40	; четвертий отвір
N10 G80	; завершення циклу свердління

Після обробки потрібно безпечно завершити програму, зупинити шпиндель та відвести інструмент. Зробити це можна таким чином:

N11 G00 Z50	; відведення інструмента на безпечну висоту Z50
N12 M05	; зупинка шпинделя
N13 G00 X0 Y0	; відведення інструмента у безпечну позицію X0 Y0
N14 M30	; завершення програми

Пропуск етапу завершення може призвести до аварійної ситуації або пошкодження інструмента.

Тепер розглянемо приклад повного вигляду керуючої програми для обробки отворів, розшифрування якої наведено у табл. 5.6:

%
 Назва КП (наприклад 0100 чи Drill)
 N01 T01 M06
 N02 G90 G54
 N03 S1200 M03
 N04 G00 G43 H01 Z50
 N05 G00 X10 Y10 Z50
 N06 G81 Z-12 R2 F120
 N07 X40 Y10
 N08 X40 Y40
 N09 X10 Y40
 N10 G80
 N11 G00 Z50
 N12 M05
 N13 G00 X0 Y0
 N14 M30
 %

Таблиця 5.6. Розшифрування програми повного циклу обробки отворів

№ кадру	Що робить команда	Пояснення (чому саме ця команда)
N01	Встановлює інструмент № 1	Інструмент підбирається відповідно до діаметра та типу обробки
N02	Встановлення режиму програмування і системи координат	G90 – абсолютні координати; G54 – робоча система координат деталі
N03	Запуск шпинделя за годинниковою стрілкою з частотою обертання 1200 об/хв	Встановлює частоту обертання та напрям шпинделя для правильного різання; S1200 – частота обертання; M03 – обертання за годинниковою стрілкою
N04	Швидке підняття інструмента з урахуванням довжини інструмента	G43 – компенсація довжини інструмента; H01 – коректор інструмента; Z50 – безпечна висота
N05	Швидке переміщення інструмента до першого отвору	Інструмент займає стартову позицію без контакту з деталлю; X10 Y10 – координати першого отвору
N06	Запуск стандартного циклу свердління. Свердління першого отвору	Z-12 – глибина свердління; R2 – площина безпечного підходу; F120 – подача під час свердління. Застосовується до всіх отворів
N07	Свердління другого отвору	Повтор циклу для другого отвору; координати змінені (X40 Y10), решта параметрів залишаються незмінними

Кінець табл. 5.6

№ кадру	Що робить команда	Пояснення (чому саме ця команда)
N08	Свердління третього отвору	Інструмент переходить у нову позицію (X40 Y40) і виконує свердління з тими ж параметрами. Цикл повторюється автоматично
N09	Свердління четвертого отвору	Завершальний отвір групи (X10 Y40); всі параметри циклу зберігаються
N10	Завершення циклу свердління	Скасовує дію стандартного циклу G81; інструмент можна безпечно переміщувати далі
N11	Відведення інструмента на безпечну висоту	Інструмент швидко піднімається (Z50) над деталлю для уникнення зіткнення
N12	Зупинка шпинделя	Інструмент перестає обертатися; підготовка до завершення програми
N13	Відведення інструмента у початкову позицію	Забезпечує безпечне повернення інструмента у початкову точку (X0 Y0)
N14	Завершення програми	Програма закінчена; верстат готовий для наступної операції

Таким чином, обробка отворів на верстатах з ЧПК – це комплексна операція, що вимагає розуміння технологічних параметрів, правильного вибору інструментів та циклів обробки, координатного позиціонування та безпечного переміщення інструмента. Оператор повинен вміти аналізувати креслення, обирати свердла та режими різання залежно від матеріалу деталі, задавати глибину обробки, безпечну висоту та подачу. Використання стандартних циклів (**G81**, **G82**, **G83**) та координатного позиціонування дозволяє ефективно обробляти групи отворів, зменшуючи ризик помилок і забезпечуючи точність. Логічна структура програми – підготовка, цикл обробки та завершення – гарантує безпеку та повторюваність операцій. Розуміння цих принципів дає можливість не лише виконувати операцію, а й грамотно складати керуючі програми для будь-яких варіантів деталей.

Порядок проведення роботи

1. Вступне пояснення викладача:

- основні принципи обробки отворів на верстатах з ЧПК;

- види операцій: свердління, зенкерування, розгортання, зенкування; їх технологічне призначення;
- стандартні цикли G81, G82, G83 та їх параметри;
- вибір інструменту та розрахунок параметрів різання (подача, частота обертання шпинделя, глибина);
- координатне позиціонування групи отворів, вибір початкової точки та безпечної висоти Z;
- правила складання керуючої програми: підготовка, цикл обробки, завершення.

2. Демонстрація інженером:

- показ рухів інструмента по індивідуальній схемі деталі;
- перевірка програми на симуляторі або макеті перед фактичним свердлінням;
- пояснення логіки вибору циклу та параметрів для конкретного матеріалу та діаметра інструмента.

3. Самостійна робота студентів:

- аналіз креслення та індивідуальної схеми деталі;
- визначення початкової точки, безпечної висоти Z, координат центру циклу свердління;
- розрахунок параметрів різання: подача, частота обертання шпинделя, глибина свердління;
- складання керуючої програми для обробки групи отворів;
- перевірка програми на симуляторі або паперовий «*dry run*» перед запуском;
- обґрунтування вибору стандартного циклу (G81, G82, G83) та напрямку руху, зазначення точок врізання та виходу інструмента.

Контрольні питання

1. Що таке стандартний цикл свердління G81 і для чого він застосовується?

2. Чим відрізняється цикл G82 від G81? Наведіть приклад ситуації, коли потрібно використати G82.

3. Опишіть, що означає безпечна висота R у циклі свердління та чому її важливо задавати.

4. **Міні-кейс:** деталь має групу із чотирьох отворів, розташованих по прямокутнику. Опишіть, як можна скоротити час програмування та уникнути помилок.

5. Чому не можна пропускати етап підготовки програми? Наведіть приклад наслідків.

6. Як вибрати початкову точку інструмента для обробки отворів на новій заготовці?

7. **Міні-кейс:** студент переплутав координати X та Y для групи отворів. Що станеться з результатом обробки і як цього уникнути?

8. Чим координатне позиціонування групи отворів економить час у порівнянні з окремим циклом для кожного отвору?

9. Як взаємопов'язані діаметр свердла, матеріал деталі та режими різання? Наведіть приклад обчислення подачі та обертів для сталі.

10. Опишіть алгоритм складання керуючої програми для обробки отворів на верстаті з ЧПК, включаючи підготовку, цикл та завершення.

Зміст звіту

Звіт повинен містити:

1. **Загальні дані:** номер, назву та мету роботи.
2. **Ескіз деталі з індивідуального завдання студента,** із зазначенням отворів для обробки.
3. **Обґрунтування вибору початкової точки та параметрів різання**
 - обґрунтування початкової точки інструмента;
 - вибір безпечної висоти Z ;
 - розрахунок параметрів подачі, частоти обертання шпинделя та глибини свердління;

- обґрунтування вибору циклу (G81/G82/G83) для конкретної групи отворів.

4. Запис керуючої програми, а саме:

- програмний код з коментарями для кожного рядка;
- зазначення координат X , Y , глибини Z , подачі F , безпечної висоти R .

5. Результати перевірки програми на симуляторі.

6. Висновок: оцінка правильності траєкторії, можливі помилки та їх виправлення.

Протокол практичної роботи № 5

Визначення параметрів програмування для обробки отворів

Виконав/-ла студент/-ка _____ курсу

Група: _____

Прізвище та ініціали: _____

Дата виконання: « _____ » _____ 20__ р.

Оцінка: _____

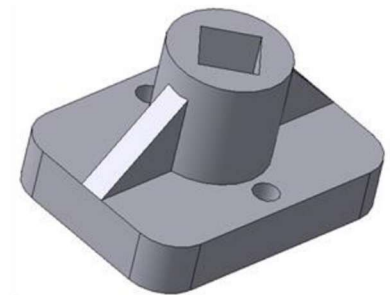
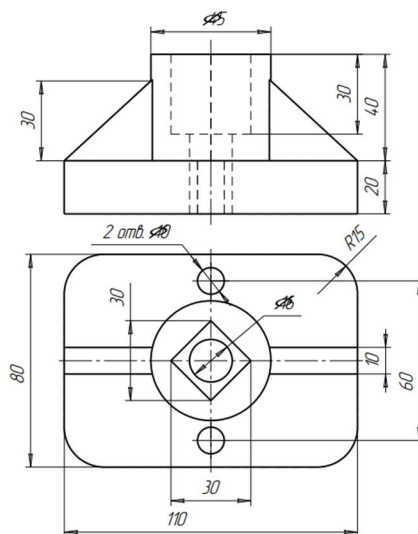
Мета роботи – сформувати практичні навички програмування операцій обробки отворів на верстатах з числовим програмним керуванням із використанням стандартних циклів; навчити визначати технологічні параметри свердління, зенкерування та розгортання, обирати інструмент і режими різання та поглибити розуміння принципів програмування таких операцій.

Вибір деталі

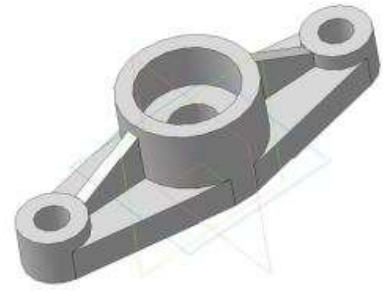
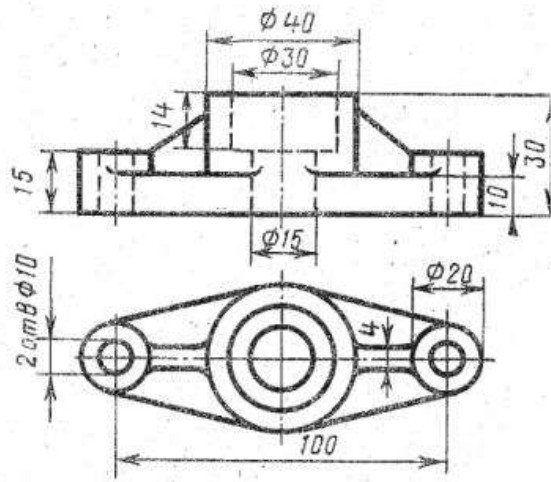
Оберіть завдання відповідно до свого варіанту. Позначте на схемі отвори для обробки.

Вкажіть номер свого варіанту: _____

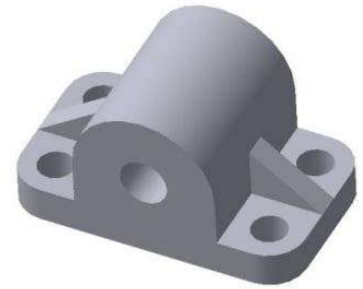
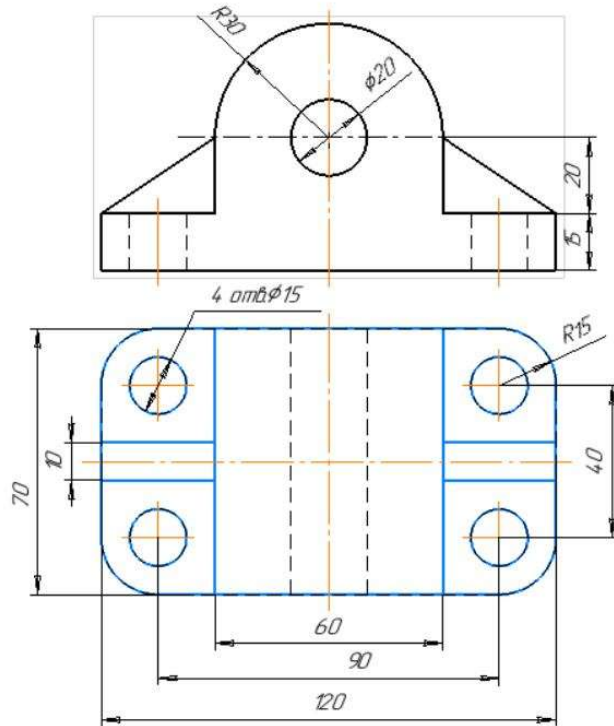
1



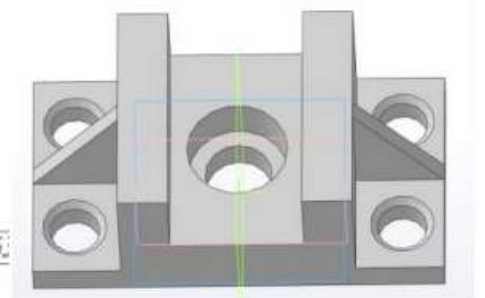
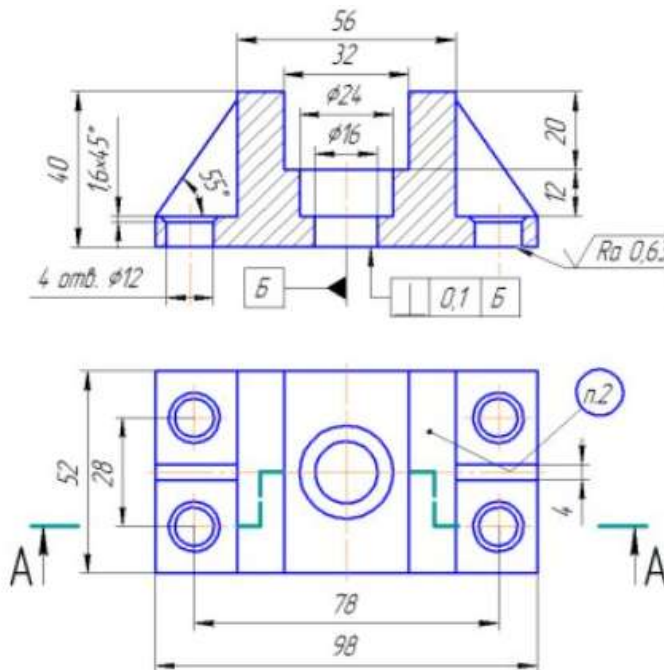
2



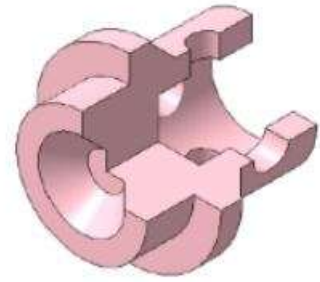
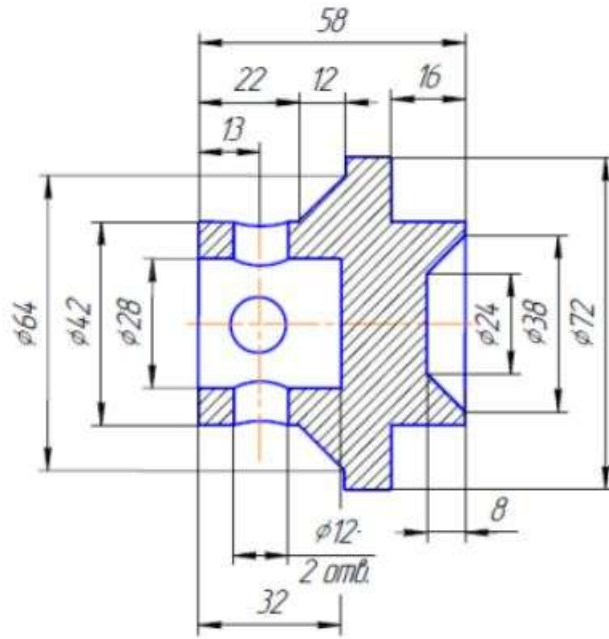
3



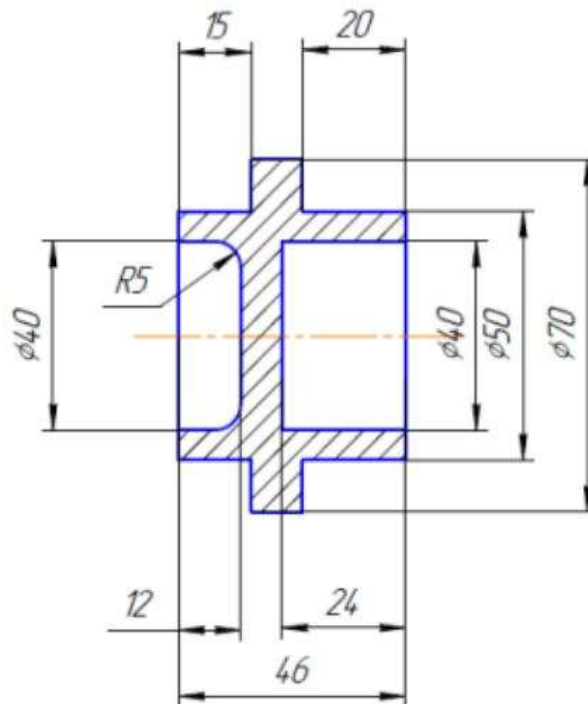
4



5



6



Обґрунтування вибору початкової точки та параметрів різання

Поясніть вибір початкової точки та параметрів різання. Позначте їх на ескізі обраної деталі.

Початкова точка інструмента (X, Y, Z): _____

Безпечна висота Z (R або Z_{safe}): _____

Висновки

Під час роботи я опанував _____

Здобув практичні навички _____

Ознайомився з логікою та послідовністю виконання _____

Виконаний аналіз показав мою здатність практично застосовувати отримані знання та навички, а також уміння _____

Мета роботи: сформувані у студентів практичні навички послідовного програмування обробки складних циліндричних та ступінчастих поверхонь на верстатах з числовим програмним керуванням; навчити аналізувати креслення та технологічні вимоги до ступінчастого вала, визначати послідовність обробки його окремих ділянок, розраховувати режими різання для кожної ділянки та формувати керуючу програму з урахуванням переходів між ділянками, точок врізання і виходу інструмента; розвинути розуміння принципів перевірки правильності траєкторії та забезпечення безпечного переміщення інструмента.

Очікуваний результат: після виконання роботи студент повинен **знати:** особливості обробки ступінчастих циліндричних поверхонь; принципи вибору інструменту та режимів різання для кожної ділянки вала; правила визначення точок врізання, відходів та переходів між ступенями; структуру керуючої програми для складних деталей; **вміти:** аналізувати креслення ступінчастого вала та визначати послідовність обробки; розраховувати подачу, швидкість обертання шпинделя та глибину різання для кожної ділянки; складати повну керуючу програму для обробки ступінчастого вала; перевіряти правильність траєкторії руху інструмента; обґрунтовувати вибір режими різання та стратегії обробки; **набути практичних навичок:** послідовної обробки ступінчастих деталей; застосування переходів між циліндричними ділянками; складання та перевірки керуючої програми для верстатів з ЧПК.

Обладнання та матеріально-технічне забезпечення: верстат з ЧПК (фрезерний або токарно-фрезерний, наприклад DYNAMYTE 2800);

токарний верстат з ЧПК «ORAC MBC 84»; комп'ютер із програмним забезпеченням для складання та перевірки керуючих програм (Mach3 або подібне програмне середовище); інструменти (циліндричні та конічні фрези, свердла, патронні та цангові затискні пристрої); заготовки: металеві вали (конструкційна сталь або алюмінієвий сплав); креслення деталей та індивідуальні варіанти завдань; методичні вказівки до виконання роботи.

Короткі теоретичні відомості

Ступінчастий вал – це циліндрична деталь із послідовними ділянками різного діаметра (ступенів), яка зазвичай використовується для передачі крутного моменту в механізмах або як частина рухомих вузлів у машинах (рис. 6.1).



Рис. 6.1. Вал-шестерня циліндричного редуктора

У структурі ступінчастого валу виділяють:

- циліндричні ділянки (ступені): кожна ділянка має власний діаметр та довжину;
- конічні ділянки або фаски (за потреби): для монтажу підшипників або зубчастих коліс;
- площини для посадки деталей: шліци, отвори, різьба (якщо передбачено конструкцією);
- перехідні ділянки: від одного діаметра до іншого, які забезпечують плавне або точне з'єднання ступенів.

Важливо розуміти, що кожен ступінь вала має технологічні вимоги: точний діаметр, допуски, шорсткість поверхні та положення щодо інших ділянок.

Відмінності програмування на фрезерному та токарному верстатах. Хоча верстати DYNAMYTE 2800 та ORAC MBC 84 працюють за принципом числового програмного керування, їхні функції, структура обробки та логіка програмування суттєво відрізняються. Ці відмінності

визначають правильний підхід до складання керуючої програми та вибору параметрів обробки.

DYNAMYTE 2800 – це фрезерний верстат з ЧПК, призначений для обробки плоских, контурних та складних поверхонь. Основна задача – формування траєкторії руху інструмента в тривимірному просторі (XY та Z), обробка зовнішніх та внутрішніх контурів, пазів, дуг і кіл. Для цього активно застосовуються команди кругової інтерполяції (**G02/G03**), компенсації радіуса фрези (**G41/G42**), а також точне задання початкової точки та напрямку руху інструмента. Важливим є вибір інструмента за матеріалом деталі та геометрією контуру, а також оптимальний розрахунок подачі та частоти обертання шпинделя.

ORAC MBC 84 – токарний верстат з ЧПК, призначений для обробки циліндричних, конічних та ступінчастих поверхонь на обертових заготовках. Логіка обробки на токарному верстаті суттєво відрізняється: робота виконується у площині XZ , вісь Y не використовується, а інструмент переміщується вздовж осі X (поперечна вісь – діаметр заготовки) та Z (поздовжня вісь – довжина заготовки). Особлива увага приділяється визначенню початкової точки інструмента та безпечної висоти Z_{safe} для уникнення зіткнень під час переходів між ступенями. Керуюча програма складається з трьох основних етапів: підготовка (вибір інструмента, обертів шпинделя, позиції), цикл обробки (**G00/G01/G02/G03**), та завершення (зупинка шпинделя, повернення у початкову точку). Невиконання будь-якого з етапів або помилки в послідовності обробки можуть призвести до браку деталі, пошкодження інструмента або аварійної ситуації на верстаті.

Таким чином, хоча обидва верстати використовують ЧПК, DYNAMYTE 2800 зосереджений на контурній та об'ємній обробці у трьох осях, а ORAC MBC 84 – на циліндричних та ступінчастих деталях із точним координатним позиціонуванням у площині XZ . Для практичної роботи № 6

студенти виконують обробку ступінчастого вала саме на ORAC MBC 84, оскільки це класична токарна операція. У таблиці б.1 узагальнено основні відмінності обох верстатів:

Таблиця б.1. Основні відмінності фрезерного (DYNAMYTE 2800) та токарного (ORAC MBC 84) верстатів

Характеристика	DYNAMYTE 2800 (фрезерний)	ORAC MBC 84 (токарний)
Призначення	Обробка плоских, контурних, поверхонь об'ємних	Обробка циліндричних, конічних, ступінчастих деталей
Осі	X, Y, Z	X, Z
Рух інструмента	Інструмент рухається по X, Y, Z, обробляє контури	Заготовка обертається, інструмент рухається по X, Z
Основні команди	G00/G01 – прямолінійні переміщення, G2/G3 – дугові інтерполяції, G41/G42 – компенсація радіуса фрези, F – подача, S – частота обертання шпинделя	G00/G01 – переміщення різця по X, Z, G02/G03 – дугові інтерполяції для конусів та фасок, M03/M05 – запуск/зупинка шпинделя, S – частота обертання шпинделя, T – вибір інструмента
Особливості	Контурна обробка, компенсація радіуса, напрям руху по X, Y	Токарна обробка, відведення на X_{safe} , Z_{safe} , визначення початкової точки, послідовна обробка ступенів
Параметри різання	Підбираються залежно від матеріалу та контуру	Підбираються залежно від діаметру та довжини ступеня, матеріалу заготовки
Типові помилки	Невірна компенсація радіуса, обрана траєкторія, перевищення подачі	Невірне визначення початкової точки, неправильна послідовність ступенів, неправильний вибір інструмента, ігнорування X_{safe} , Z_{safe}
Фото установок		

Обробка ступінчастого вала на токарному верстаті з числовим програмним керуванням «ORAC MBC 84» вимагає особливої уваги до послідовності операцій, вибору інструмента та побудови траєкторії руху по

осях Z (вздовж вала) та X (радіально). Ступінчастий вал складається з циліндричних ділянок різного діаметра, і кожен ступінь потребує точного дотримання розмірів, допусків та відстані між суміжними поверхнями. Технологічно правильна послідовність обробки забезпечує доступ різця до кожного ступеня без ризику контакту з уже обробленими ділянками. Для цього передбачаються відведення інструмента на безпечну відстань (X_{safe} , Z_{safe}) при переходах між ступенями, що гарантує уникнення зіткнень і пошкодження деталі.

Вибір інструмента для кожного ступеня визначається діаметром оброблюваної поверхні та матеріалом заготовки. Токарні різці застосовують для обробки основних циліндричних ділянок, а фасонні або конічні – для обробки фасок та конічних переходів. Параметри різання – подача, частота обертання шпинделя та глибина різання – підбираються з урахуванням геометрії кожного ступеня та твердості матеріалу. Недотримання цих параметрів може призвести до перевищення допусків, появи вібрацій, зносу інструмента або погіршення шорсткості поверхні.

Діаметр токарного різця обирають так, щоб він відповідав діаметру оброблюваного ступеня або був трохи меншим, забезпечуючи правильне проходження по траєкторії без залишків матеріалу та без перевищення допусків. Занадто великий різець може зачепити сусідні ступені або оброблену поверхню, а надто малий потребує додаткових проходів, що збільшує час обробки і ймовірність помилок.

Кожен ступінь обробляють окремо, починаючи з ділянок, доступ до яких не обмежує обробку інших ступенів. Різець підводять на робочу глибину по осі X , після чого переміщують вздовж вала по осі Z . Після завершення обробки ступеня інструмент відводять на X_{safe} і переміщують до наступного ступеня. Для переходів між ділянками використовують прямолінійні рухи (**G01**) або дугову інтерполяцію (**G02/G03**) при обробці

конічних переходів, що дозволяє плавно обробляти поверхні та зберігати точність позиціонування.

Правильне визначення початкової точки інструмента (X_0 , Z_0) та безпечної відстані є критично важливим для уникнення зіткнень. Необхідно дотримуватися правильної послідовності обробки, контролювати параметри різання для кожного ступеня та забезпечувати логічну, безпечну траєкторію руху різця. Невиконання будь-якої з цих умов може призвести до браку деталі, пошкодження інструмента або небезпечної ситуації на верстаті.

Таким чином, обробка ступінчастого вала на токарному верстаті «ORAC MBC 84» є складною технологічною операцією, яка поєднує технологічне планування, правильний вибір інструмента, точне визначення параметрів різання та побудову безпечної траєкторії руху по осях X та Z , що забезпечує високоточний результат та безпечне виконання операцій.

Розробка керуючої програми для обробки ступінчастого вала на верстатах із числовим програмним керуванням вимагає системного підходу до планування кожного кроку. Програма повинна забезпечувати точність обробки, безпечні переміщення інструмента та повторюваність операцій для всіх ступенів вала.

Програма складається з трьох взаємопов'язаних частин: **підготовки, циклу обробки** та **завершення**. На етапі **підготовки** визначають інструмент для обробки кожного ступеня, встановлюють оберти шпинделя (S) та подачу (F), а також переміщують інструмент у початкову точку та на безпечну відстань (X_{safe} , Z_{safe}). Цей етап є критично важливим для забезпечення безпеки обробки і правильного старту програми. Пропуск підготовки або невірно задані параметри можуть призвести до зіткнення інструмента з деталлю або пошкодження інструмента.

У **циклі обробки** відбувається безпосередньо обробка кожного ступеня вала. Інструмент підводять на робочу глибину, виконують рухи по

осі X , Z (для циліндричних поверхонь) та при необхідності використовують дугову інтерполяцію (**G02/G03**) для обробки переходів або фасок. Після завершення обробки поточного ступеня інструмент відводять на X_{safe} і переміщують до наступного ступеня. Така послідовність забезпечує точність розташування ступенів та виключає можливість контакту інструмента з уже обробленими поверхнями.

Етап завершення програми включає відхід інструмента у безпечну позицію, зупинку шпинделя та подачі та закінчення виконання програми (**M30**). Цей етап гарантує безпечне завершення обробки та підготовку верстата до наступного завдання.

При складанні програми слід дотримуватися кількох важливих принципів. По-перше, для кожного ступеня необхідно обирати інструмент та параметри різання відповідно до його діаметра та матеріалу. По-друге, траєкторія руху інструмента повинна бути логічною та безпечною для переходу між ступенями. По-третє, програму слід перевіряти на симуляторі або виконувати «*dry run*» перед фактичним фрезеруванням, щоб уникнути помилок у координатах або параметрах різання.

Потрібно також зазначити, що для токарного верстата з ЧПК ORAC MBS 84 існує певний набір команд, які відрізняються від класичних фрезерних верстатів на кшталт DYNAMYTE 2800. Це пов'язано з тим, що верстат виконує токарну обробку циліндричних та ступінчастих поверхонь, де заготовка обертається, а інструмент переміщується по осях X (діаметр) та Z (довжина). Основні специфічні команди представлені в табл. 6.2.

Особливості команд ORAC:

- Y -вісь відсутня, всі переміщення обмежені X (діаметр) та Z (довжина);
- обертання заготовки замінює рух Y ; отже, дугові інтерполяції **G02/G03** у площині XZ формують конусні або ступінчасті профілі;

- **M03/M04/M05** – обов'язкові для керування шпинделем, у фрезерних верстатах шпиндель часто працює безпосередньо під час руху інструмента, а тут потрібно чітко запускати і зупиняти;

- *T* та *S* – критично важливі для безпечного старту програми та точності обробки.

Таблиця 6.2. Основний набір команд для токарного верстату ЧПК ORAC MBC 84

Команда	Призначення	Коментар
G00	Швидкий холостий хід інструмента	Переміщення інструмента між точками без обробки; використовується для переходів між ступенями та виходу на безпечну висоту
G01	Прямолінійне різання (лінійна інтерполяція)	Використовується для точного проходу по ділянці обробки ступеня або циліндра; подача задається через <i>F</i>
G02, G03	Дугова інтерполяція (конус, фаска)	G02 – за годинниковою стрілкою, G03 – проти годинникової стрілки; дозволяє обробляти конічні ділянки або плавні переходи між ступенями
M03, M04	Запуск шпинделя (M03 – за годинниковою стрілкою, M04 – проти годинникової стрілки)	Важливо для визначення напрямку обертання заготовки під час обробки
M05	Зупинка шпинделя	Використовується у кінці циклу обробки
T	Вибір інструмента	ORAC MBC 84 зазвичай має обмежену кількість позицій; вибір інструмента передбачає правильну підготовку програми
S	Задання частоти обертання шпинделя	В обертах на хвилину; підбирається залежно від матеріалу заготовки та діаметра ступеня
X, Z	Координати позиціонування інструмента	ORAC працює лише в площині <i>XZ</i> , тому <i>Y</i> не використовується; <i>X</i> – поперечна вісь, <i>Z</i> – поздовжня вісь
G90, G91	Абсолютне / інкрементне позиціонування	G90 – абсолютне позиціонування, G91 – інкрементне (відносне) позиціонування; критично для точного позиціонування інструмента при обробці ступенів. Система координат залишається незмінна – абсолютна/глобальна

Кінець табл. 6.2

Команда	Призначення	Коментар
G40, G41, G42	Компенсація різця	Використовується рідко, в основному для профільної обробки, але може застосовуватися для фасок
G28, G30	Повернення в нуль або в попередньо задану точку	Використовується для підготовки інструмента до наступного ступеня або для безпечного виходу з програми

Розглянемо приклад програми для ступінчастого вала (розшифрування програми наведено у табл. 6.3):

```

N01 T1
N02 G50 S2000
N03 G00 X50 Z5
N04 S1500 M03
N05 G01 Z0 F0.2
N06 G01 X30
N07 G01 Z-20
N08 G00 X50
N09 G01 X20 Z-40
N10 G01 X25
N11 G01 Z-60
N12 G00 X50
N13 M05
N14 G00 X50 Z10
N15 M30
    
```

Таблиця 6.3. Розшифрування програми точіння ступінчастого вала

№ кадру	Що робить команда	Пояснення (чому саме ця команда)
N01	Вибір інструмента № 1	Вказує номер інструмента, наприклад, токарний різець для обробки циліндричних ступенів
N02	Обмеження обертів шпинделя	Забезпечує безпечну роботу шпинделя і запобігає перевантаженню
N03	Перехід до початкової точки	Різець швидко переміщується на безпечну відстань, перед стартом
N04	Запуск шпинделя з поданою швидкістю обертання	S1500 – частота обертання шпинделя, M03 – обертання за годинниковою стрілкою
N05	Опускання різця на початок обробки першого ступеня	Плавне переміщення по осі Z з подачею F0.2
N06	Обробка діаметру першого ступеня	Різець рухається по осі X для формування діаметра ступеня

Кінець табл. 6.3

№ кадру	Що робить команда	Пояснення (чому саме ця команда)
N07	Обробка довжини першого ступеня	Переміщення вздовж вала по Z для завершення обробки ступеня
N08	Відвід інструмента на безпечну відстань після обробки X_{safe}	Забезпечує безпечний перехід до наступного ступеня
N09	Перехід до другого ступеня	Рух до початку другого ступеня з урахуванням X_{safe}, Z_{safe}
N10	Обробка діаметру другого ступеня	Формування потрібного діаметра по осі X
N11	Обробка довжини другого ступеня	Рух вздовж осі Z до кінця оброблюваної ділянки
N12	Відвід інструмента на X_{safe} після обробки	Забезпечення безпечного виходу інструмента
N13	Зупинка шпинделя	Завершення обертання інструмента
N14	Відвід інструмента на безпечну позицію X_{safe}, Z_{safe}	Гарантує, що різець не контактує з деталлю після обробки
N150	Кінець програми	Програма завершена, готова до наступного циклу

Типові помилки при програмуванні ступінчастого вала. Складання керуючої програми для обробки ступінчастого вала є комплексним процесом, що поєднує технологічне планування, точний розрахунок параметрів різання, логічне побудування траєкторії руху інструмента та контроль безпеки. Недотримання будь-якого з цих аспектів може призвести до браку деталі, пошкодження інструмента або створення небезпечної ситуації на верстаті.

Найпоширеніші помилки включають:

1. Неправильне визначення початкової точки та безпечної відстані X_{safe}, Z_{safe} . Якщо початкова точка обрана неправильно, вся траєкторія руху інструмента зміщується, що призводить до неточностей у розмірах ступенів або зіткнення інструмента з деталлю. Недостатнє підняття різця між обробкою ступенів також може спричинити контакт із вже обробленими ділянками, що може пошкодити деталь і інструмент.

2. Порухення послідовності обробки ступенів. Спроба обробити внутрішні або вузькодоступні ділянки до обробки більш відкритих ступенів

ускладнює доступ інструмента або потребує додаткових переміщень. Це знижує ефективність обробки та підвищує ризик помилок.

3. Невідповідність діаметра інструмента діаметру ступеня. Занадто великий інструмент може зачепити вже оброблені ділянки або залишити необроблені зони, занадто малий – потребує додаткових проходів, що збільшує час обробки та підвищує ймовірність нерівномірної шорсткості поверхні.

4. Ігнорування параметрів різання для кожного ступеня. Діаметр, матеріал та геометрія кожного ступеня визначають оптимальні подачу, частота обертання шпинделя та глибину різання. Недотримання цих параметрів може спричинити перегрів інструмента, вібрації, погіршення шорсткості поверхні або поломку інструмента.

5. Пропуск етапів програми (підготовка або завершення). Наприклад, відсутність відводу інструмента на X_{safe} перед переміщенням до наступного ступеня або пропуск зупинки шпинделя в кінці програми створює ризики для обладнання та оператора.

Контроль за правильністю вибору інструмента, параметрів різання, початкової точки та послідовності обробки є невід'ємною частиною навчання інженера, що працює на токарних верстатах з ЧПК. Дотримання цих правил забезпечує високу точність обробки, безпеку роботи та ефективне використання обладнання.

Порядок проведення роботи

1. Вступне пояснення викладача:

- основи токарної обробки ступінчастого вала на верстатах із ЧПК, особливості обробки ділянок різного діаметра;
- ознайомлення з координатною системою XZ , вибір початкової точки інструмента та безпечної точки відводу X_{safe} , Z_{safe} ;
- принципи вибору інструменту для кожного ступеня та розрахунок параметрів різання: подача, частота обертання шпинделя, глибина різання;

- демонстрація команд ORAC MBC 84 (G00, G01, G02/G03, M03/M04/M05, T, S) та їхнього призначення.

2. Демонстрація інженером:

- рух інструмента по індивідуальному варіанту ступінчастого вала на макеті або симуляторі верстата;
- показ складання програми, логіки послідовності обробки ступенів, відведення на X_{safe} , Z_{safe} та переходів між ступенями;
- вказівки щодо правильного вибору інструмента та розрахунку режимів різання.

3. Самостійна робота студентів:

- аналіз креслення своєї індивідуальної деталі (ступінчастого вала);
- визначення початкової точки інструмента та безпечної відстані X_{safe} , Z_{safe} ;
- вибір інструментів для кожного ступеня та розрахунок параметрів різання;
- побудова логічної послідовності обробки ступенів;
- складання керуючої програми на ORAC MBC 84 відповідно до індивідуального завдання;
- перевірка програми на симуляторі²⁸ або «*dry run*» перед фактичним запуском на верстаті;
- кожен студент повинен обґрунтувати вибір траєкторії, команд інтерполяції та параметрів обробки.

Контрольні питання

1. Що таке ступінчастий вал і які його основні елементи?
2. **Міні-кейс:** у вас є вал із трьома ступенями діаметром 40 мм, 30 мм і 20 мм. Який порядок обробки ви б обрали і чому?
3. Які особливості обробки ступенів на токарному верстаті з ЧПК ORAC MBC 84 у порівнянні з фрезерним верстатом?

²⁸ Програмні пакети: NC Viewer, G-Wizard Editor, CAMotics, Fusion 360, SolidCAM, SprutCAM тощо

4. Як правильно обрати інструмент для кожного ступеня і що може статися при невідповідному виборі?

5. **Міні-кейс:** вибрано прохідний різець для виготовлення різьби. Як це вплине на обробку?

6. Що таке початкова точка інструмента і безпечна X_{safe} , Z_{safe} ? Чому їх правильне визначення критично важливе?

7. Які команди ORAC MBC 84 використовуються для: холостого ходу, прямолінійного різання, запуску шпинделя та дугової інтерполяції?

8. **Міні-кейс:** уявіть, що ви пропустили команду M03 перед обробкою – що станеться?

9. Які типові помилки трапляються при складанні програми для ступінчастого вала і як їх уникнути?

10. **Міні-кейс:** студент забув відвести інструмент на X_{safe} під час переходу. Які заходи безпеки та технологічні наслідки?

Зміст звіту

Звіт повинен містити:

1. **Загальні дані:** номер, назву та мету роботи.

2. **Ескіз ступінчастого вала з індивідуального завдання студента,** із зазначенням початкової точки інструмента, X_{safe} , Z_{safe} та важливих контрольних точок.

3. **Обґрунтування вибору інструментів та параметрів різання:**

- вказати, який інструмент обрано для кожного ступеня та чому;
- розрахунок подачі, частоти обертання шпинделя, глибини різання для кожного ступеня.

4. **Складання керуючої програми:**

- повний програмний код для ORAC MBC 84;
- розшифрування кадрів у таблиці з графами.

5. **Результати перевірки** програми на симуляторі або макеті.

6. **Висновок:** можливі помилки та шляхи їх вирішення.

Протокол практичної роботи № 6

Розробка керуючої програми для обробки ступінчастого вала

Виконав/-ла студент/-ка _____ курсу
Група: _____
Прізвище та ініціали: _____
Дата виконання: « _____ » _____ 20__ р.
Оцінка: _____

Мета роботи – сформувати у студентів практичні навички послідовного програмування обробки складних циліндричних та ступінчастих поверхонь на верстатах з числовим програмним керуванням; навчити аналізувати креслення та технологічні вимоги до ступінчастого вала, визначати послідовність обробки його окремих ділянок, розраховувати режими різання для кожної ділянки та формувати керуючу програму з урахуванням переходів між ділянками, точок врізання і виходу інструмента; розвинути розуміння принципів перевірки правильності траєкторії та забезпечення безпечного переміщення інструмента.

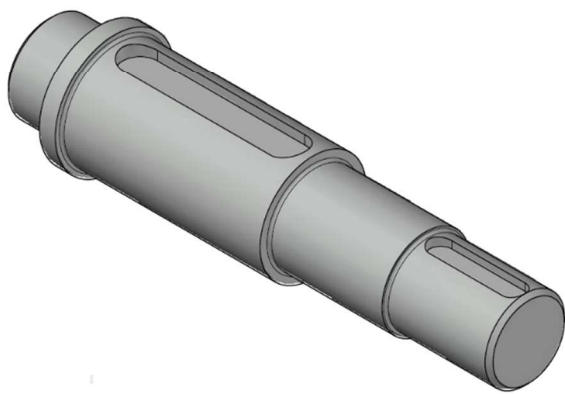
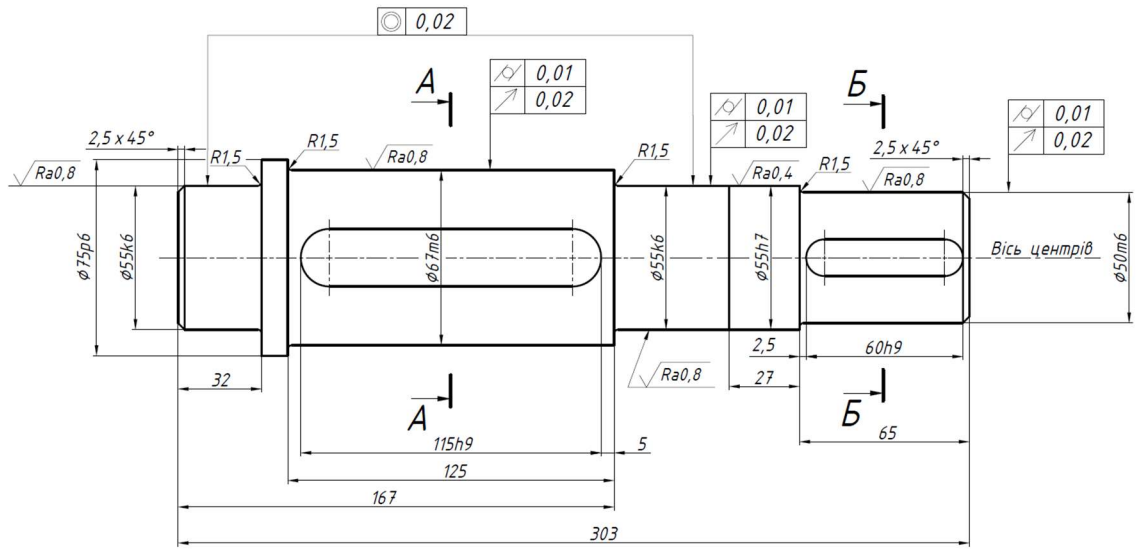
Вибір деталі

Оберіть завдання відповідно до свого варіанту.

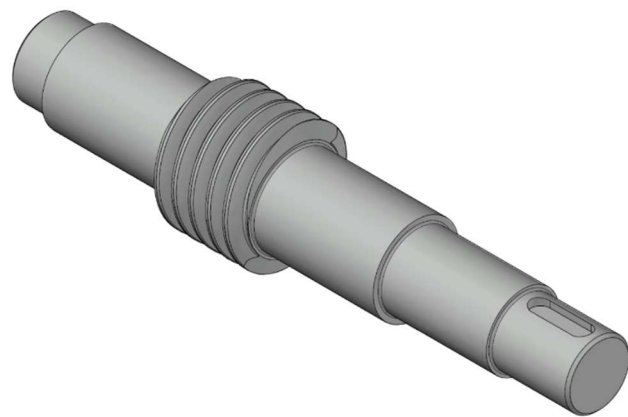
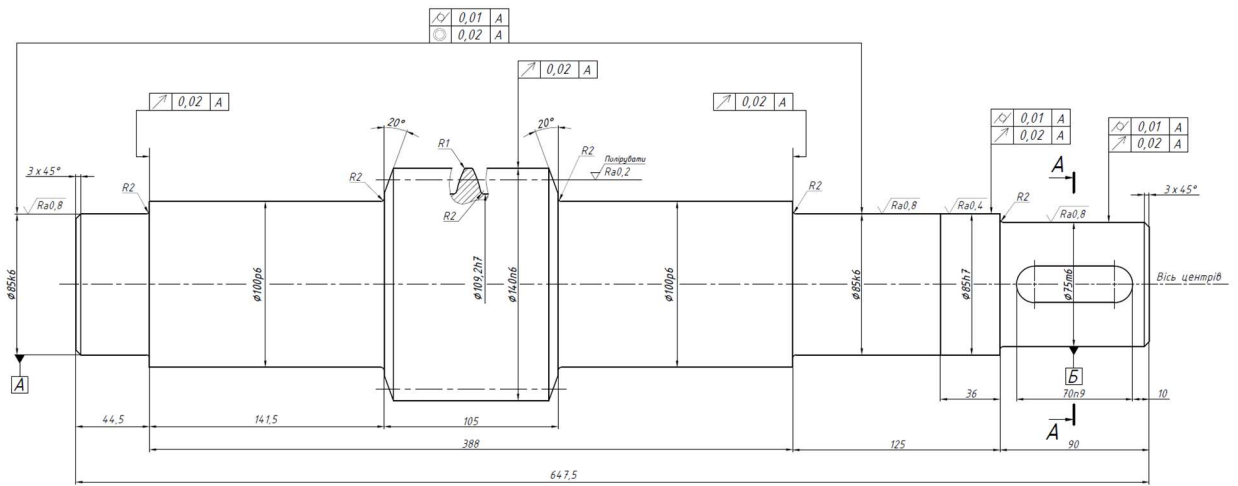
Вкажіть номер свого варіанту: _____

Позначте на ескізі початкову точку інструмента (X_0 , Z_0), безпечну відстань X_{safe} , Z_{safe} та ключові контрольні точки.

1



2



Обґрунтування вибору інструментів та параметрів різання

Обґрунтуйте вибір інструментів та параметрів різання. Позначте їх на ескізі обраної деталі.

Відобразіть значення у табл. 6.4.

Таблиця 6.4. Інструменти та основні параметри різання

Ступінь	Діаметр інструмента	Тип інструмента	Подача F (мм/хв)	Частота обертання шпинделя S (об/хв)	Глибина різання t (мм)	Пояснення вибору

Поясніть, чому вибір інструмента та параметрів різання відповідає конкретному ступеню.

Складання керуючої програми для ORAC MBC 84

Запишіть керуючу програму для свого індивідуального варіанту. Використовуйте команди ORAC: G00, G01, G02/G03 (за необхідності), M03/M04/M05, T, S.

Код програми: _____

Висновки

Під час роботи я опанував _____

Здобув практичні навички _____

Ознайомився з логікою та послідовністю виконання _____

Виконаний аналіз показав мою здатність практично застосовувати отримані знання та навички, а також уміння _____

Мета роботи: сформувати у студентів практичні навички визначення енергії ударної дії при дробоструминній обробці; навчити розраховувати параметри ударного впливу частинок дробу на поверхню деталі залежно від матеріалу та її властивостей; обґрунтовано обирати режим дробоструминної обробки для забезпечення ефективного поверхневого зміцнення без ризику деформацій або пошкодження матеріалу та поглибити теоретичні знання з відповідної технології.

Очікуваний результат: після виконання практичної роботи студент повинен *знати*: сутність дробоструминної обробки як методу поверхневого зміцнення матеріалів; основні властивості матеріалів, що впливають на процес (твердість HB, границя текучості σ_T); основні параметри частинок дробу (діаметр, маса, швидкість), що визначають кінетичну енергію та імпульс удару; зв'язок між кінетичною енергією удару, частотою ударів та глибиною пластичної деформації поверхневого шару; особливості вибору режиму дробоструминної обробки для різних матеріалів (вуглецеві сталі, конструкційні сплави, алюміній, мідь, бронза); **вміти**: використовувати довідкові таблиці властивостей матеріалів та густини дробу для розрахунків; розраховувати об'єм однієї частинки дробу, її масу, кінетичну енергію, імпульс, кількість частинок на секунду та сумарну енергію потоку; оцінювати глибину пластичної деформації поверхневого шару залежно від матеріалу; обґрунтовано обирати діаметр, швидкість та масову витрату дробу для ефективного зміцнення поверхні; аналізувати ризики надмірної деформації або недостатнього зміцнення матеріалу і коригувати режим обробки; **набути практичних**

навичок: проведення розрахунку параметрів ударної дії дробу для конкретного матеріалу; вибір оптимального режиму дробоструминної обробки з урахуванням властивостей деталі; оцінка результатів обробки та внесення коригувань у режим процесу для досягнення необхідної глибини зміцнення поверхні.

Обладнання та матеріально-технічне забезпечення: методичні вказівки до практичної роботи; довідкові таблиці фізичних величин; калькулятор або програмне забезпечення для обчислення; зошит або електронний інструмент для оформлення розрахунків; комп'ютер із доступом до навчальної платформи (за потреби).

Короткі теоретичні відомості

Поверхнєве зміцнення (поверхнєве пластичне деформування; далі – ППД) – це технологічний процес зміни фізико-механічних властивостей поверхневого шару деталі без зміни її хімічного складу, що здійснюється шляхом контрольованого пластичного деформування – наклепу.

Ударні методи зміцнення базуються на багаторазовій локальній дії імпульсних навантажень, які викликають:

- пластичну деформацію поверхневого шару;
- формування залишкових стискуючих напружень;
- підвищення твердості;
- збільшення втомної міцності;
- зменшення ризику тріщиноутворення.

Ключовим параметром процесу є енергія ударної дії, що визначає глибину та інтенсивність зміцнення.

У сучасному машинобудуванні найбільш поширеними є два методи – дробоструминна та низькочастотна ударна обробка.

Дробоструминна обробка – це процес поверхневого зміцнення, при якому поверхня деталі піддається багаторазовим ударам металевих

(дробу) або керамічних частинок, що розганяються повітряним або механічним потоком.

Під час дробоструминної обробки:

- частинки дробу масою m рухаються зі швидкістю v ;
- кожна частинка при зіткненні передає поверхні кінетичну енергію;
- у поверхневому шарі виникає локальна пластична деформація;
- формується система залишкових стискуючих напружень.

Оскільки удари мають випадковий характер і покривають велику площу, формується рівномірний зміцнений шар. Ефект зміцнення залежить від:

- енергії кожного удару;
- кількості ударів;
- швидкості частинок;
- їх маси;
- часу обробки;
- щільності покриття поверхні.

Ключовим елементом процесу є **дріб (шрот)** – матеріал, який використовується для ударної обробки. Дріб характеризується трьома основними параметрами: матеріалом, формою та діаметром частинок.

Матеріал дробу. Для різних матеріалів деталей підбирають відповідний дріб (рис. 7.1). Найпоширеніші типи:

- **сталевий дріб** – має високу густину та масу частинок, передає значну кінетичну енергію; використовується для поверхневого зміцнення твердих сталей та легованих сплавів;

- **керамічний / скляний дріб** – легший за сталевий, забезпечує помірну енергію удару; рекомендовані для м'яких матеріалів, алюмінієвих та кольорових сплавів, де необхідно уникнути надмірної деформації, а також для очищення поверхні;

- **дріб із сплавів міді або бронзи** – застосовується для спеціальних випадків, коли потрібно зміцнення м'яких або корозійностійких поверхонь.

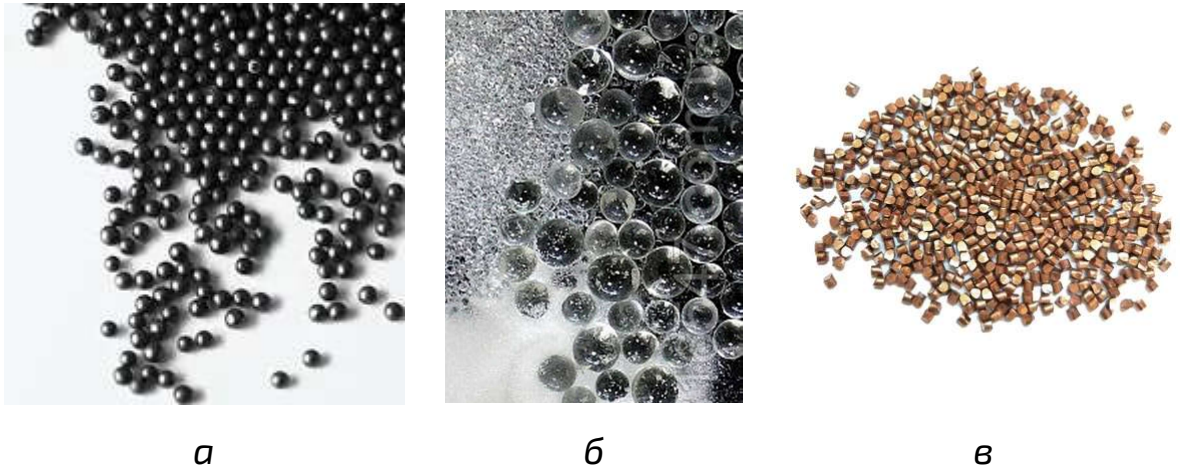


Рис. 7.1. Типи дробу: *а* – сталевий; *б* – скляний; *в* – мідний

Форма та розмір частинок дробу визначають характер удару та розподіл енергії на поверхні:

- **сферичні частинки** забезпечують рівномірний розподіл ударів і стабільні розрахунки кінетичної енергії (рис. 7.1, *а*, *б*);
- **колотий або овальний дріб** збільшує локальний ефект деформації, але ускладнює точні розрахунки (рис, 7.1, *в*).

Діаметр частинки визначає її масу i , відповідно, кінетичну енергію: більший діаметр \rightarrow більша маса \rightarrow більша енергія удару при тій же швидкості. Вибір діаметра дробу повинен враховувати матеріал деталі та бажану глибину зміцнення.

Кінетична енергія частинки E_k визначає **глибину пластичної деформації** поверхневого шару, а сумарна енергія потоку $E_{\text{заг}}$ визначає інтенсивність зміцнення. Надмірна енергія або велика маса частинок може призвести до локальних тріщин або надмірного наклепування поверхні – перенаклепу. Тому при розрахунку режиму обробки необхідно

порівнювати кінетичну енергію частинки з твердістю та границею текучості матеріалу.

Обираючи режим дробоструминної обробки, враховують взаємозв'язок між властивостями дробу та матеріалом деталі:

- для **твердих сталей** (наприклад, Сталь 45, Сталь 60) доцільно використовувати важкий металевий дріб і середні або високі швидкості польоту частинок, щоб досягти необхідної глибини зміцнення;

- для **м'яких або кольорових сплавів** (Алюміній, Мідь, Бронза) – легший, скляний або керамічний дріб, менші швидкості, щоб уникнути надмірної пластичної деформації;

- вибір діаметра частинок та масової витрати дробу визначає як **кількість ударів на одиницю поверхні**, так і **інтенсивність зміцнення**.

Розрахунки параметрів для дробоструминної обробки. Величини, які використовуються для розрахунків параметрів процесу дробоструминної обробки наведено в табл. 7.1.

Таблиця 7.1. Перелік фізичних величин, що використовуються в розрахунках параметрів процесу дробоструминної обробки

Позначення	Назва величини	Одиниця СІ	Фізичний зміст
d	Діаметр дробинки	м	Визначає об'єм і масу частинки
V	Об'єм частинки	м^3	Характеризує геометричні розміри
ρ	Густина матеріалу дробу	$\text{кг}/\text{м}^3$	Визначає масу при заданому об'ємі
m	Маса частинки	кг	Впливає на імпульс і енергію
v	Швидкість польоту	м/с	Найвпливовіший параметр
E_k	Кінетична енергія	Дж	Визначає інтенсивність зміцнення
p	Імпульс	$\text{кг}\cdot\text{м}/\text{с}$	Характеризує ударну дію
\dot{m}	Масова витрата дробу	кг/с	Визначає продуктивність
n	Кількість частинок за секунду	1/с	Визначає густоту ударів
H_B	Твердість за Брінеллем	МПа (умовно)	Характеризує опір пластичній деформації
σ_T	Границя текучості	МПа	Визначає початок пластичної деформації

Правильне поєднання матеріалу дробу, діаметра частинок і швидкості дозволяє досягти оптимальної глибини зміцнення та рівномірного наклепування поверхні без пошкоджень.

Основні розрахункові залежності для дробоструминної обробки включають за такими параметрами: об'єм однієї частинки дробу, маса частинки дробу, кінетична енергія частинки, імпульс частинки, кількість частинок за секунду, сумарна енергія потоку, оцінка глибини пластичної деформації.

Об'єм однієї частинки визначається для встановлення її маси, а отже – подальшого розрахунку імпульсу та кінетичної енергії. Для сферичної частинки використовується формула (7.1):

$$V = \frac{\pi d^3}{6}, \quad (7.1)$$

де V – об'єм частинки, м^3 ; $\pi \approx 3,1416$; d – діаметр дробу, м .

Формула одержана з формули об'єму кулі (7.2) після підстановки формули радіусу кола – r (7.3):

$$V = \frac{4}{3} \pi r^3, \quad (7.2)$$

$$r = \frac{d}{2}. \quad (7.3)$$

Маса частинки дробу m – це маса однієї окремої дробинки, яка бере участь в ударі по поверхні деталі; вона визначається за формулою (7.4):

$$m = \rho V, \quad (7.4)$$

де m – маса частинки, кг; ρ – густина матеріалу дробу, кг/м³; V – об'єм частинки, м³.

Маса є мірою інертності тіла – тобто його здатності чинити опір зміні швидкості. У випадку дробоструминної обробки це означає: чим більша маса частинки, тим більший її імпульс, тим сильніший механічний вплив при ударі. Маса визначає, скільки речовини бере участь у передачі енергії матеріалу деталі.

Густина характеризує масу одиниці об'єму. Чим більша густина дробу – тим більша маса частинки при однаковому діаметрі. Наприклад, для сталевого дробу $\rho \approx 7700 - 7850$ кг/м³. Зміна густини прямо пропорційно змінює масу. Густина дробу обирається з таблиці 7.2 відповідно до його матеріалу.

Таблиця 7.2. Довідкова таблиця густин матеріалів дробу

Матеріал дробу	Густина ρ , кг/м ³	Особливості застосування
Сталевий дріб	від 7700 кг/м ³ до 7850 кг/м ³	Найпоширеніший
Чавунний дріб	від 6800 кг/м ³ до 7200 кг/м ³	Крихкий, інтенсивна дія
Нержавіючий дріб	від 7600 кг/м ³ до 7800 кг/м ³	Для нержавіючих сталей
Керамічний дріб	від 3500 кг/м ³ до 3900 кг/м ³	М'яка обробка
Скляний дріб	від 2400 кг/м ³ до 2600 кг/м ³	Очищення, легке зміцнення

Кінетична енергія частинки – це енергія руху дробинки, яка визначає її здатність виконувати механічну роботу під час удару по поверхні деталі.

Вона розраховується за формулою (7.5):

$$E_k = \frac{mv^2}{2}, \quad (7.5)$$

де E_k – кінетична енергія, Дж; m – маса частинки, кг; v – швидкість, м/с.

Кінетична енергія показує яку кількість механічної роботи може виконати частинка під час зіткнення з поверхнею. Під час удару ця енергія витрачається на: локальну пластичну деформацію, формування вм'ятини, створення залишкових стискуючих напружень, часткове нагрівання матеріалу, пружне відновлення поверхні. Таким чином, кінетична енергія – це міра інтенсивності впливу дробу на матеріал. Вона прямо пропорційна масі та квадрату швидкості та є найбільш впливовим параметром: збільшення швидкості в 2 рази → збільшення енергії в 4 рази.

Параметр кінетичної енергії визначається при дробоструминній обробці для:

1. Забезпечення пластичної деформації. Щоб відбулося зміцнення, напруження від удару повинні перевищити границю текучості матеріалу: $\sigma_{уд.} > \sigma_{т.}$ Якщо енергія недостатня – матеріал деформується лише пружно, і зміцнення не відбувається.

2. Для прогнозування глибини зміцненого шару. Чим більша кінетична енергія: тим більша глибина пластичної деформації; тим глибший зміцнений шар; тим вищий рівень залишкових стискуючих напружень (див. формулу (7.9)).

3. Для запобігання пошкодженню матеріалу. Надмірна кінетична енергія може призвести до: утворення мікротріщин; руйнування поверхневого шару; надмірної шорсткості; відшарування покриттів. Особливо це критично для: високовуглецевих сталей, загартованих матеріалів, крихких сплавів.

4. Для підбору оптимального режиму – знаючи кінетичну енергію, можна: змінити швидкість, підібрати діаметр дробу, змінити матеріал дробу, обґрунтувати витрати дробу.

Імпульс частинки p – це фізична величина, яка характеризує кількість руху частинки, тобто її здатність передати своєму тілу або

поверхні деталі механічний вплив при ударі. Для твердих матеріалів імпульс має важливіше значення, ніж сама енергія.

Математично імпульс частинки розраховується за формулою (7.6):

$$p = mv, \quad (7.6)$$

де m – маса частинки, кг; v – швидкість, м/с.

Імпульс показує, наскільки «сильний» удар частинки може бути при контакті з поверхнею деталі. Велика маса або висока швидкість → більший імпульс → більш виражена ударна дія. Імпульс визначає глибину локальної пластичної деформації на поверхні. Він важливий там, де матеріал досить твердий і його пластичне зміцнення залежить не тільки від енергії, а від механічного імпульсу удару.

Імпульс є необхідним для визначення параметром при дробоструминній обробці, адже за такого виду обробки необхідно:

1. Контролювати ударну дію дроби. Імпульс допомагає визначити, чи достатньо сили для пластичної деформації поверхневого шару без утворення тріщин або вм'ятин.

2. Прогнозувати глибину зміцненого шару. Глибина пластичної деформації прямо залежить від імпульсу та границі текучості матеріалу.

3. Порівнювати різні режими обробки. Дробинки однакового розміру, але різної швидкості або маси, мають різний імпульс – це дозволяє підбирати оптимальні режими для різних матеріалів.

4. Оцінювати ефективність обробки для різних матеріалів. Для м'яких матеріалів важливіша енергія, а для твердих – імпульс.

Кількість частинок за секунду n – це показник того, скільки окремих частинок дроби вдаряє по оброблюваній поверхні за одиницю часу;

параметр обчислюється за формулою (7.7):

$$n = \frac{\dot{m}}{m}, \quad (7.7)$$

де \dot{m} – масова втрата дробу, кг/с; m – маса однієї частинки, кг.

Визначення кількості частинок за секунду необхідно для:

1. Визначення інтенсивності ударної дії: чим більше частинок падає на поверхню за секунду, тим сильніше поверхня піддається пластичній деформації. Наприклад, одна велика частинка з високою енергією може зробити локальне поглиблення, але регулярні багаторазові удари багатьох частинок формують рівномірний зміцнений шар.

2. Розрахунку сумарної енергії ударного потоку (див. формулу (7.8)): якщо n занадто мало \rightarrow обробка буде неефективною, поверхня не зміцниться; якщо n надмірно велике \rightarrow перевантаження матеріалу, можливе утворення мікротріщин або надмірне шліфування.

3. Планування режиму обробки: кількість частинок дозволяє контролювати час обробки та дозволяє визначити продуктивність процесу – скільки поверхні можна обробити за одиницю часу без перевантаження.

Сумарна енергія потоку $E_{\text{заг}}$ – це фізична величина, яка характеризує загальну ударну дію всього потоку частинок дробу на поверхню деталі за одиницю часу; вона розраховується за формулою (7.8):

$$E_{\text{заг}} = nE_k, \quad (7.8)$$

де n – кількість частинок, що потрапляють на поверхню за секунду, с^{-1} ;

E_k – кінетична енергія однієї частинки, Дж.

Визначення сумарної енергії потоку при дробоструминній обробці

проводиться з метою:

1. Оцінки інтенсивності зміцнення: дробоструминна обробка полягає в багатократних ударах частинок. Сумарна енергія потоку дозволяє визначити, наскільки швидко та ефективно поверхня набуває необхідних механічних властивостей (твердість, залишкові напруження).

2. Прогнозування глибини зміцненого шару: якщо сумарна енергія потоку низька – шар зміцнення буде малий або процес неефективний, якщо занадто велика – ризик утворення мікротріщин, надмірної деформації або руйнування поверхні.

3. Підбору режимів обробки: оптимальної швидкості подачі дробу, витрати дробу, частоти ударів для досягнення бажаної якості поверхні.

4. Контролю продуктивності: величина дозволяє оцінити ефективність процесу з точки зору часу та матеріальних витрат – чи досягається потрібна енергія зміцнення за заданий проміжок часу.

Оцінка глибини пластичної деформації h – це максимальна товщина шару поверхні деталі, у якому відбулися необоротні (пластичні) зміни структури матеріалу в результаті удару дробу. Іншими словами, це шар металу, який фактично «зміцнівся» під дією ударів дробу: зросла щільність матеріалу, зменшилась пористість, підвищилася твердість та стійкість до втоми. Оцінка глибини пластичної деформації розраховується за формулою (7.9):

$$h \sim \sqrt{\frac{E_k}{\sigma_T}}, \quad (7.9)$$

де E_k – кінетична енергія, Дж; σ_T – границя текучості матеріалу, МПа.

Чим більша границя текучості – тим менша глибина зміцнення при однаковій енергії.

Параметр визначається при дробоструминній обробці для:

1. Контролю ефективності обробки: глибина деформації показує, наскільки поверхня зміцнилася (якщо шар занадто тонкий – зміцнення буде недостатнім; якщо занадто товстий або енергія надмірна – можуть з'явитися мікротріщини або пошкодження).

2. Підбору параметрів процесу: діаметру дробу, швидкості удару, масової витрати дробу, тривалості обробки. Це дозволяє досягти потрібного зміцнення без надмірної витрати матеріалу та енергії.

3. Прогнозування властивостей матеріалу: відомо, що зміцнений шар покращує втомну міцність, зносостійкість і корозійну стійкість. Глибина h дозволяє оцінити, наскільки довго деталь буде служити у реальних умовах експлуатації.

Приклад розрахунку параметрів для дробоструминної обробки.
Виходимо з даних табл. 7.2.

Таблиця 7.2. Вихідні дані для розрахунку параметрів дробоструминної обробки

Параметр	Позначення	Значення	Примітки
Матеріал деталі	–	Сталь 45	Використовувати таблицю властивостей матеріалів
Діаметр частинки дробу	d	0,8 мм	Перевести в метри: $d = 0,0008$ м
Густина дробу	ρ	7800 кг/м ³	Сталевий дріб
Швидкість польоту дробу	v	60 м/с	Задається режимом процесу
Масова витрата дробу	\dot{m}	0,5 кг/с	Приклад для оцінки інтенсивності

Для початку визначимо твердість (HV) та границю текучості (σ_T) для матеріалу деталі – Сталі 45. Ці параметри визначаємо за таблицею 7.3, відповідно до якої $HV = 180-240$ МПа, границя текучості відповідно $\sigma_T \approx 355$ МПа.

Щоб правильно використовувати табл. 7.3:

1. Оберіть матеріал для вашої деталі (наприклад, Сталь 45 або АМг6).

2. Визначте допустиму енергію удару: орієнтуйтеся на твердість (HV) та границю текучості (σ_T); для матеріалів з високою HV і σ_T потрібна більша кінетична енергія дробу для зміцнення.

3. Розрахуйте параметри, а потім порівняйте кінетичну енергію E_k з твердістю та границею текучості для оцінки ефективності зміцнення.

4. Оберіть режим дробоструминної обробки:

- для м'яких матеріалів (Алюміній, Мідь) використовуйте меншу швидкість або дрібніший діаметр дробу;
- для твердих сталей (Сталь 60, 30ХГСА) – більшу швидкість або масивніший дріб, щоб досягти необхідної глибини зміцнення.

5. Оцініть ризики:

- якщо кінетична енергія E_k надмірна для обраного матеріалу – можливі мікротріщини або перенаклеп (руйнування поверхні);
- якщо кінетична енергія E_k недостатня – зміцнення поверхні буде слабким.

Таблиця 7.3. Зведена довідкова таблиця властивостей матеріалів

Матеріал або сплав	HV	Границя текучості σ_T , МПа	Особливості при дробоструминній обробці
Вуглецеві сталі			
Сталь 20	від 120 до 160	250	Добре піддається зміцненню; енергія удару невисока
Сталь 45	від 180 до 240	355	Оптимальний варіант; середня енергія удару достатня
Сталь 60	від 240 до 300	500	Потрібна більша енергія для ефективного зміцнення
Конструкційні леговані сталі			
40Х	від 200 до 250	600	Висока зносостійкість; середня енергія удару ефективна
30ХГСА	від 240 до 300	700	Авіаційні деталі; потрібна контрольована енергія удару

Кінець табл. 7.3

Матеріал або сплав	НВ	Границя текучості σ_T , МПа	Особливості при дробоструминній обробці
Нержавіючі сталі			
AISI 304	від 150 до 190	215	Схильна до наклепу; помірна енергія удару
AISI 420	від 200 до 250	450	Потрібна вища енергія удару; ризик локальної деформації
Алюмінієві сплави			
AMг6	від 70 до 90	160	Дуже пластичний матеріал; низька енергія удару достатня
Д16	від 100 до 120	300	Потрібен контроль енергії удару; середня глибина зміцнення
Мідь та бронза			
Мідь	від 50 до 80	200	Дуже пластична; ризик надмірної деформації при великій енергії
БрОЦС	від 80 до 120	250	Помірна твердість; контролювати швидкість та діаметр дробу

Розрахуємо основні параметри відповідно до вихідних даних:

1.1. Об'єм частинки дробу визначаємо за формуло (7.1). Після підстановки одержуємо:

$$V = \frac{3,1416 \cdot (0,0008)^3}{6} \approx 2,68 \cdot 10^{-10} \text{ м}^3.$$

Об'єм частинки необхідний для визначення її маси. Враховуйте, що кубічна залежність діаметра сильно впливає на енергію удару.

1.2. Масу частинки дробу визначаємо за формулою (7.4). Після підстановки числових значень одержуємо:

$$m = 7800 \cdot 2,68 \cdot 10^{-10} \approx 2,09 \cdot 10^{-6} \text{ кг.}$$

1.3. Кінетичну енергію частинки визначаємо за формулою (7.5). Після підстановки числових значень одержуємо:

$$E_k = 0,5 \cdot 2,09 \cdot 10^{-6} \cdot 60^2 \approx 3,77 \cdot 10^{-3} \text{ Дж.}$$

Це енергія, яка передається матеріалу при ударі. Для Сталі 45 E_k у межах 0,002-0,008 Дж забезпечує помірне зміцнення.

1.4. Імпульс частинки визначаємо за формулою (7.6). Після підстановки числових значень одержуємо:

$$p = 2,09 \cdot 10^{-6} \cdot 60 \approx 1,25 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м/с.}$$

Імпульс характеризує локальну ударну дію на поверхню. Впливає на глибину деформації.

1.5. Кількість частинок за секунду визначаємо за формулою (7.7). Після підстановки числових значень одержуємо:

$$n = \frac{0,5}{2,09 \cdot 10^{-6}} \approx 2,39 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}.$$

1.6. Сумарна енергія потоку визначається за формулою (7.8). Після підстановки числових значень одержуємо:

$$E_{\text{заг}} = 2,39 \cdot 10^5 \cdot 3,77 \cdot 10^{-3} \approx 901 \frac{\text{Дж}}{\text{с}}.$$

1.7. Оцінка глибини пластичної деформації визначається за формулою (7.9). Після підстановки числових значень одержуємо:

$$h \sim \sqrt{\frac{3,77 \cdot 10^{-3}}{355 \cdot 10^6}} \approx 3,26 \cdot 10^{-6} \text{ м} \approx 3,3 \text{ мкм.}$$

Глибина зміцненого шару зростає з енергією удару і зменшується зі збільшенням твердості/границі текучості матеріалу.

При плануванні дробоструминної обробки перш за все необхідно проаналізувати властивості матеріалу деталі, для якої обирається режим

обробки. У нашому прикладі матеріалом є Сталь 45, яка характеризується твердістю HB від 180 до 240 та границею текучості $\sigma_T \approx 355$ МПа. Ці параметри визначають, яку кінетичну енергію удару дробу можна застосувати для ефективного зміцнення поверхні без ризику виникнення мікротріщин або надмірної пластичної деформації.

З розрахунку параметрів для частинки дробу діаметром 0,8 мм і швидкістю польоту 60 м/с ми отримали наступні величини (табл. 7.4): об'єм частинки $V \approx 2,68 \cdot 10^{-10}$ м³, масу $m \approx 2,09 \cdot 10^{-6}$ кг, кінетичну енергію $E_k \approx 3,77 \cdot 10^{-3}$ Дж, імпульс $p \approx 1,25 \cdot 10^{-4}$ кг·м/с, кількість частинок за секунду $n \approx 2,39 \cdot 10^5$ с⁻¹ та сумарну енергію потоку $E_{заг} \approx 901$ Дж/с. Розрахована глибина пластичної деформації поверхневого шару склала приблизно 3,3 мкм.

Таблиця 7.4. Результати розрахунків для Сталі 45

Параметр	Значення
Об'єм частинки V	$2,68 \cdot 10^{-10}$ м ³
Маса частинки m	$2,09 \cdot 10^{-6}$ кг
Кінетична енергія E_k	$3,77 \cdot 10^{-3}$ Дж
Імпульс p	$1,25 \cdot 10^{-4}$ кг·м/с
Кількість частинок n	$2,39 \cdot 10^5$ с ⁻¹
Сумарна енергія потоку $E_{заг}$	901 Дж/с
Глибина пластичної деформації h	3,3 мкм

Аналіз цих параметрів дозволяє зробити висновок, що обрана швидкість і діаметр дробу забезпечують помірне зміцнення поверхні Сталі 45. Кінетична енергія частинки перебуває в межах допустимого діапазону від 0,002 Дж до 0,008 Дж, що забезпечує ефективне поверхневе зміцнення без ризику мікротріщин. Імпульс і сумарна енергія потоку достатні для рівномірного нанесення ударів по оброблюваній поверхні.

При виборі режиму дробоструминної обробки важливо враховувати кілька факторів. По-перше, діаметр частинок визначає масу частинки та кількість ударів на одиницю часу. Дрібні частинки забезпечують велику

густину ударів з меншим енергетичним впливом кожного удару, що підходить для помірного зміцнення поверхні. Великі частинки створюють меншу кількість ударів, але більшу енергію кожного, що може призвести до локальної деформації або тріщин. По-друге, швидкість польоту частинок впливає на кінетичну енергію квадратично: підвищення швидкості збільшує енергію удару та глибину пластичної деформації, зменшення швидкості знижує ефективність зміцнення. По-третє, масова витрата дроби визначає кількість частинок, що потрапляють на поверхню за секунду, і, відповідно, рівномірність зміцнення.

У нашому прикладі обраний діаметр 0,8 мм і швидкість 60 м/с забезпечують оптимальні умови для Сталі 45: енергія удару достатня для досягнення глибини деформації $\sim 3,3$ мкм, а кількість ударів гарантує рівномірне зміцнення поверхні. Важливо контролювати стабільність цих параметрів під час процесу, оскільки будь-яке відхилення швидкості або масової витрати дроби може змінити кінетичну енергію удару і вплинути на якість зміцнення.

Якщо матеріал буде м'якший (наприклад, алюмінієві сплави або мідь), рекомендується зменшити швидкість або діаметр дроби, щоб уникнути надмірної пластичної деформації. Для більш твердих сталей (Сталь 60, 30ХГСА) слід збільшити швидкість або масу частинки дроби для досягнення необхідної глибини зміцнення.

Таким чином, вибір режиму дробоструминної обробки базується на аналізі властивостей матеріалу деталі та розрахункових параметрів частинки дроби. Стабільність діаметра, швидкості та масової витрати дроби забезпечує ефективне і рівномірне поверхневе зміцнення без ризику пошкодження матеріалу. Дотримання цих правил дозволяє студенту розуміти взаємозв'язок між кінетичною енергією удару, твердістю матеріалу та глибиною пластичної деформації, а також на практиці обирати оптимальний режим дробоструминної обробки для різних матеріалів.

Порядок проведення роботи

1. Вступне пояснення викладача, який ознайомлює студентів із теоретичними основами дробоструминної обробки та принципами розрахунку енергії ударної дії:

- основні принципи дробоструминної обробки: сутність процесу, мета поверхневого зміцнення деталей, вплив ударної дії на властивості матеріалу (твердість, наклеп);
- основні параметри дробоструминної обробки: діаметр дробу, швидкість, масова витрата, матеріал дробу;
- розрахунок кінетичної енергії та імпульсу частинок дробу, оцінка сумарної енергії потоку;
- використання довідкових таблиць властивостей матеріалів деталі та густин матеріалів дробу для підбору режиму обробки;
- правила оцінки глибини пластичної деформації та безпечності процесу для конкретного матеріалу.

2. Самостійна робота студентів:

- аналіз вихідних даних відповідно до варіанта;
- розрахунки параметрів дробоструминної обробки;
- аналіз отриманих результатів: порівняння кінетичної енергії частинок та допустимого діапазону для конкретного матеріалу, оцінка глибини зміцнення та ефективності режиму;
- обґрунтування вибору оптимального режиму дробоструминної обробки (діаметр дробу, швидкість, масова витрата) з урахуванням властивостей матеріалу деталі.

Контрольні питання

1. Ви отримали деталь із АМгб. При розрахунку кінетичної енергії дробу з'ясувалося, що глибина пластичної деформації виходить значно більшою. Як ви скоригуєте швидкість або діаметр дробу, щоб уникнути надмірної деформації?

2. Сталева деталь 60 марки потребує глибокого зміцнення. Кінетична енергія, отримана при стандартних параметрах дробу, виявилась недостатньою. Які способи збільшення енергії удару без зміни матеріалу дробу ви можете запропонувати?

3. Для Сталі 45 масова витрата дробу збільшилась удвічі. Як це вплине на сумарну енергію потоку та глибину зміцнення?

4. Уявіть, що замість сталевого дробу ви використали бронзовий дріб з тією ж густиною. Що зміниться у розрахунках кінетичної енергії та імпульсу?

5. Під час обробки нержавіючої сталі AISI 420 з високою швидкістю дробу виявили мікротріщини на поверхні. Які параметри варто змінити для зменшення ризику тріщин і зберегти глибину зміцнення?

6. Як зменшити витрату дробу, щоб економно проводити обробку, але не знизити ефективність зміцнення?

7. Ви розраховали режим для Сталі 45. Тепер деталь виготовлена з Д16 (алюмінієвий сплав). Які параметри дробу потрібно змінити і чому?

8. Якщо збільшити діаметр дробу на 50 %, а швидкість залишити без змін, як зміняться кінетична енергія та імпульс частинки?

9. Сталева деталь повинна бути зміцнена до глибини 5 мкм. Ваші розрахунки дають 3 мкм. Яким способом можна досягти бажаної глибини, не пошкодивши поверхню?

Зміст звіту

Звіт по роботі повинен містити наступні розділи:

- 1. Загальні дані:** номер, назву та мету роботи.
- 2. Аналіз вихідних даних індивідуального завдання** відповідно до варіанту.
- 3. Розрахунок основних параметрів дробоструминної обробки:**
 - об'єму частинки дробу V , м³;
 - маси частинки m , кг;
 - кінетичної енергії частинки E_k , Дж;

- імпульсу частинки p , кг·м/с;
- кількості частинок за секунду n , с⁻¹;
- сумарної енергії потоку $E_{\text{заг}}$, Дж/с;
- глибини пластичної деформації h , мкм.

4. Обґрунтування вибору режиму дробострумінної обробки

- вказати оптимальний діапазон енергії для конкретного матеріалу;
- пояснити, чому обраний діаметр дробу та швидкість забезпечують потрібну глибину пластичної деформації без перевищення допустимого навантаження на поверхню.

5. Висновок: оцінка правильності обраного режиму.

Протокол практичної роботи № 7

Розрахунок енергії ударної дії інструментів для поверхневого зміцнення

Виконав/-ла студент/-ка _____ курсу
Група: _____
Прізвище та ініціали: _____
Дата виконання: « ____ » _____ 20 ____ р.
Оцінка: _____

Мета роботи – сформувати у студентів практичні навички визначення енергії ударної дії при дробоструминній обробці; навчити розраховувати параметри ударного впливу частинок дроби на поверхню деталі залежно від матеріалу та її властивостей; обґрунтовано обирати режим дробоструминної обробки для забезпечення ефективного поверхневого зміцнення без ризику деформацій або пошкодження матеріалу та поглибити теоретичні знання з відповідної технології.

Аналіз вихідних даних індивідуального завдання

Заповніть таблицю 7.5 відповідно до свого варіанту індивідуального завдання (табл. 7.6).

Таблиця 7.5. Аналіз вихідних даних індивідуального завдання

Параметр	Позначення	Значення	Примітки
Матеріал деталі	–		З довідкової таблиці властивостей матеріалів
<i>HV</i>	–		Твердість матеріалу
Границя текучості, МПа	σ_T		З довідкової таблиці
Діаметр дробу, мм	<i>d</i>		Обрати з варіанту
Густина дробу, кг/м ³	ρ		Довідкова таблиця
Швидкість дробу, м/с	<i>v</i>		З варіанту завдання
Масова витрата дробу, кг/с	<i>m</i>		З варіанту завдання

Таблиця 7.6. Варіанти індивідуальних завдань для практичної роботи № 7

№	Матеріал деталі	HV	Границя текучості σ_T , МПа	Діаметр дробу <i>d</i> , мм	Швидкість дробу <i>v</i> , м/с	Масова витрата <i>m</i> , кг/с	Матеріал дробу
1	Сталь 20	140	250	0,8	50	0,4	Сталь
2	Сталь 20	140	250	1,0	60	0,5	Сталь
3	Сталь 45	210	355	0,6	55	0,35	Сталь
4	Сталь 45	210	355	0,8	65	0,5	Сталь
5	Сталь 60	270	500	0,8	60	0,45	Сталь
6	Сталь 60	270	500	1,0	70	0,55	Сталь
7	40Х	225	600	0,6	60	0,4	Сталь
8	40Х	225	600	0,8	65	0,5	Сталь
9	30ХГСА	270	700	1,0	70	0,55	Сталь
10	AISI 304	170	215	0,6	40	0,3	Сталь
11	AISI 304	170	215	0,8	50	0,4	Сталь
12	AISI 420	225	450	0,8	55	0,45	Сталь
13	АМг6	80	160	0,6	35	0,25	Сталь
14	АМг6	80	160	0,8	40	0,3	Сталь
15	Д16	110	300	0,8	50	0,35	Сталь
16	Мідь	65	200	0,6	30	0,2	Сталь
17	Мідь	65	200	0,8	35	0,25	Сталь
18	БрОЦС	100	250	0,8	40	0,3	Сталь

Таблиця 7.9.³⁰ Довідкова таблиця оптимальної енергії удару та глибини зміцнення для різних матеріалів

Матеріал деталі	НВ	σ_T , МПа	Діапазон енергії частинки E_k , Дж	Глибина пластичної деформації h , мкм	Коментар, доцільність
Вуглецева сталь 20	від 120 до 160	~250	від 0,002 Дж до 0,005 Дж	від 20 мкм до 35 мкм	Підходить для стандартної дробоструминної обробки
Вуглецева сталь 45	від 180 до 240	~355	від 0,004 Дж до 0,008 Дж	від 25 мкм до 45 мкм	Потрібна середня енергія, щоб не пошкодити поверхню
Вуглецева сталь 60	від 240 до 300	~500	від 0,006 Дж до 0,010 Дж	від 30 мкм до 50 мкм	Висока міцність – потрібна велика енергія
Конструкційна сталь 40Х	від 200 до 250	400	від 0,005 Дж до 0,009 Дж	від 25 мкм до 45 мкм	Підходить для зносостійких деталей
Конструкційна сталь 30ХГСА	від 240 до 300	~500	від 0,006 Дж до 0,010 Дж	від 30 мкм до 50 мкм	Потребує високої енергії для зміцнення
Нержавіюча сталь AISI 304	від 150 до 190	300	від 0,003 Дж до 0,006 Дж	від 20 мкм до 40 мкм	Легко наклепується, слід контролювати енергію
Нержавіюча сталь AISI 420	від 200 до 250	~400	від 0,005 Дж до 0,009 Дж	від 25 мкм до 45 мкм	Потребує вищої енергії для досягнення потрібної деформації
Алюмінієвий сплав АМгб, Д16	від 70 до 90	150	від 0,001 Дж до 0,003 Дж	від 15 мкм до 25 мкм	Дуже пластичний, не потребує великої енергії
Мідь	від 50 до 80	120	від 0,001 Дж до 0,002 Дж	від 10 мкм до 20 мкм	Дуже пластична, надмірна енергія може пошкодити поверхню
БрОЦС	від 80 до 120	~200	від 0,002 Дж до 0,004 Дж	від 12 мкм до 25 мкм	Помірна твердість, середня енергія достатня

³⁰ У таблиці наведено типові орієнтовні діапазони. Значення твердості та межі текучості матеріалу взято з довідкових таблиць загальнодоступних джерел (див. Metal Strength Chart та інші). Для конкретної деталі у виробничих умовах ці значення уточнюються на основі сертифікатів постачальника матеріалу.

Висновки

Під час роботи я опанував _____

Здобув практичні навички _____

Ознайомився з логікою та послідовністю виконання _____

Виконаний аналіз показав мою здатність практично застосовувати отримані знання та навички, а також уміння _____

Мета роботи: сформувати практичні навички вимірювання температури поверхні деталі пірометром та виконання теплового розрахунку для оцінки ефективності лазерної термомеханічної обробки; навчити коригувати результати з урахуванням коефіцієнта емісії поверхні.

Очікуваний результат: після виконання практичної роботи студент повинен **знати:** фізичну сутність комбінованої лазерної термомеханічної обробки; закономірності формування температурного поля при локальному лазерному нагріванні; принцип дії інфрачервоних пірометрів та їх особливості; вплив коефіцієнта емісії поверхні на точність вимірювань; умови забезпечення стабільного теплового режиму та необхідність корекції вимірюваної температури. **вміти:** виконувати розрахунок локального нагріву поверхні ΔT і розрахункової температури $T_{\text{реал}}$; визначати скориговану температуру $T_{\text{кор}}$ з урахуванням коефіцієнта емісії ε ; оцінювати відносну похибку δ і її вплив на точність контролю; обґрунтовувати вибір засобів контролю температури; аналізувати параметри технологічного процесу з позицій теплового балансу та стабільності температурного поля; проводити аналітичну оцінку впливу потужності лазера, радіуса променя та властивостей матеріалу на нагрів поверхні; **набути практичних навичок:** розрахунку теплових параметрів лазерної термомеханічної обробки для різних матеріалів (30ХГСА, Сталь 45); роботи з паспортними характеристиками пірометрів GM1350, GM1650, GM1651; визначення та коригування коефіцієнта емісії поверхні; аналітичної оцінки стабільності температурного режиму; оформлення таблиць вимірювань відповідно до вимог технічної документації.

Обладнання та матеріально-технічне забезпечення: інфрачервоний пірометр типу GM1350, GM1650 або GM1651 – відповідно до варіанта завдання; деталь (заготовка) для вимірювання температури – матеріал і геометричні параметри визначаються індивідуальним варіантом завдання; паспортні характеристики пірометра та довідкові дані щодо теплофізичних властивостей матеріалу заготовки; розрахункові таблиці виконання інженерних розрахунків (за потреби); методичні вказівки до виконання практичної роботи.

Короткі теоретичні відомості

Сутність лазерної термомеханічної обробки. **Лазерна термомеханічна обробка** – це комбінований технологічний процес поверхневого зміцнення, при якому локальний нагрів матеріалу концентрованим лазерним випромінюванням поєднується з механічним впливом (пластична деформація, накочування, ударна дія тощо), що забезпечує формування зміцненого поверхневого шару із заданими фізико-механічними властивостями. Процес відноситься до висококонцентрованих енергетичних методів обробки та характеризується високою локалізацією теплового впливу, швидким нагріванням і охолодженням, мінімальною зоною термічного впливу та можливістю точного керування структурою поверхневого шару.

Фізична сутність цього процесу полягає у послідовній (комбінована обробка) або одночасній (гібридна обробка) дії двох взаємопов'язаних факторів. Перший фактор – термічний вплив лазера, який створює локальну зону нагріву з високою густиною потужності. Внаслідок цього в матеріалі відбуваються фазові перетворення, змінюється мікроструктура та знижується опір деформації. Другий фактор – механічний вплив, що здійснюється до або під час нагріву, і який викликає інтенсивну пластичну деформацію поверхневого шару. Механічна дія формує залишкові стискуючі напруження, що підвищує мікротвердість та

зносостійкість обробленої поверхні. Теплова енергія лазерного променя після пластичної деформації забезпечує кінцеве структурне зміцнення, що робить процес високоефективним.

Процес лазерної термомеханічної обробки визначається рядом керованих параметрів. Одним із ключових є потужність лазерного випромінювання (P), яка безпосередньо впливає на інтенсивність нагріву та глибину прогріву матеріалу. Важливим параметром є густина потужності (q), яка визначається як відношення потужності лазера до площі лазерної плями, і саме вона визначає характер теплових процесів у зоні впливу. Діаметр лазерної плями (d) також критично впливає на локальність процесу та рівномірність розподілу температури. Не менш важливим є параметр швидкості переміщення променя (v), що регулює час теплового впливу на кожну точку поверхні, а ключовим керованим параметром залишається температура (T) в зоні обробки, оскільки вона визначає глибину зміцненого шару, характер фазових перетворень та ступінь пластичної деформації. Параметри механічного впливу – сила контакту, частота ударів або глибина деформації – також безпосередньо впливають на мікроструктуру та експлуатаційні властивості поверхні.

Лазерне термомеханічне зміцнення має низку технологічних особливостей, які роблять його високоефективним методом обробки. По-перше, лазерна енергія концентрується у вузькій зоні, що забезпечує локальність і мінімізує теплові деформації деталі. По-друге, процес відбувається швидко, часто в межах мілісекунд, що дозволяє досягати високої продуктивності та зберегти zdeформований поверхневий шар після ППД. По-третє, технологія легко автоматизується і інтегрується у сучасні виробничі системи з числовим програмним керуванням. Однак ефективність процесу реалізується лише за умови точного контролю температурного режиму, оскільки невірне визначення або нестабільність температури може призвести до перегріву, оплавлення, утворення тріщин або недостатнього зміцнення.

Температура є визначальним параметром лазерної термомеханічної обробки, оскільки вона контролює механізми структурних перетворень, глибину прогріву та кінцеві експлуатаційні властивості поверхневого шару. Після дробоструминної обробки поверхня набуває підвищеної шорсткості, що, у свою чергу, збільшує поглинальну здатність лазерного випромінювання та локальну ефективність нагріву. Якщо температура стає надто високою, можлива деструкція поверхні або грубозернистість, а при недостатній температурі зміцнення буде неефективним, і механічний вплив не забезпечить очікуваний результат. Тому точне визначення та підтримання оптимальної температури є критично важливим для забезпечення високої якості комбінованого процесу дробоструминної та лазерної обробки.

Для забезпечення стабільності теплового режиму необхідно підтримувати тепловий баланс між енергією, що надходить від лазера, і енергією, що відводиться матеріалом. У математичній формі це можна виразити як рівність вхідної та вихідної потужності, або як умову стабільності температури в часі (8.1):

$$\frac{dT}{dt} \approx 0, \quad (8.1)$$

де dT – зміна температури, °C; dt – проміжок часу, с.

Якщо цей показник близький до нуля, це означає, що температура стабільна.

Досягти цього можливо шляхом використання безконтактних методів контролю температури, зокрема інфрачервоних пірометрів. Такі прилади дозволяють в реальному часі відслідковувати температуру в зоні лазерного впливу та коригувати параметри процесу, наприклад, потужність лазера, швидкість переміщення променя або діаметр лазерної плями (за рахунок зміни фокусної відстані). Це гарантує формування

високоякісного зміцненого шару з необхідними фізико-механічними властивостями.

Методика визначення температури пірометрами. Для контролю температурного режиму у комбінованій лазерній термомеханічній обробці застосовуються безконтактні інфрачервоні пірометри. Найпоширенішими у лабораторній практиці є пірометр **GM1350** (рис. 8.1) або його аналоги – **GM1650** та **GM1651**. Ці прилади дозволяють безпечно вимірювати температуру поверхонь, включаючи важкодоступні ділянки, а також об'єкти, контакт з якими небезпечний для людини. Безконтактний принцип роботи забезпечує збереження безпеки оператора, дозволяючи уникнути прямого контакту з високотемпературними зонами або джерелами лазерного випромінювання.



Рис. 8.1. Безконтактний інфрачервоний пірометр GM1350

Кожен пірометр має свої технічні межі роботи: GM1350: від -18 до +1350 °C; GM1650: від +200 до +1650 °C; GM1651: від -30 до +1650 °C.

Ці діапазони дозволяють використовувати прилади як для відносно низькотемпературних процесів, так і для високотемпературних зон лазерної обробки.

Пірометр визначає температуру поверхні деталі за рахунок інфрачервоного випромінювання, яке об'єкт самостійно випромінює при нагріванні. Оптична система приладу збирає та фокусує це

випромінювання на детекторі. Детектор перетворює теплову енергію в електричний сигнал, який обробляється електронним блоком приладу і виводиться на дисплей у вигляді числового значення температури.

Для підвищення точності вимірювань пірометри оснащені лазерним покажчиком, що дозволяє візуально визначити точку або область, з якої проводиться вимірювання. Це особливо важливо при локальному нагріві деталі, коли температура може різко змінюватися в сусідніх зонах.

На рисунку 8.2 показані головні частини пірометра GM1350 та його функціональні клавіші.



Рис. 8.2. Головні частини пірометра Venetech GM1350 і його функціональні клавіші: 1 – інфрачервоний датчик; 2 – лазерний покажчик зони вимірювання; 3 – рідкокристалічний дисплей; 4 – кнопка STO CAL (збереження результатів); 5 – кнопка SET (підтвердження введеного значення); 6 – кнопки зміни параметрів ▲ і ▼; 7 – кнопка MODE (вибір режиму роботи); 8 – кнопка Вкл./Викл. лазерного покажчика зони вимірювання, підсвічування екрану; 9 – курок для ввімкнення приладу, початку вимірювання; 10 – відсік для джерела живлення (у держаку) [13]

Рідкокристалічний дисплей пірометра GM1350 містить численні індикатори, що допомагають контролювати процес вимірювання (рис. 8.3).

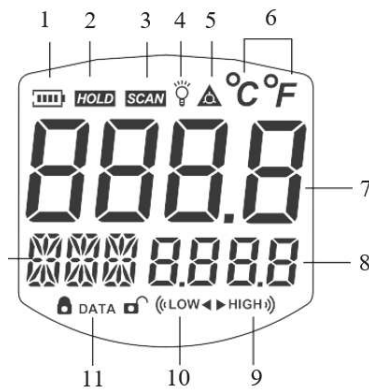


Рис. 8.3. Індикатори дисплею Venetech GM1350: 1 – поточний рівень заряду батареї; 2 – утримання показань; 3 – вимір температури; 4 – підсвітка дисплею; 5 – лазерний покажчик увімкнення; 6 – одиниці виміру: °C / °F; 7 – виміряна температура: 888.8; 8 – значення коефіцієнта випромінювання: 888.8 та ін.; 9 – HIGH – активний, якщо вимірюване значення більше за верхню установлену межу; 10 – LOW – активний, якщо вимірюване значення менше за нижню установлену межу; 11 – DATA – індикатор запису в пам'ять або зчитування з пам'яті; 12 – індикатор режиму

Пірометр визначає температуру поверхні за рахунок інфрачервоного випромінювання, яке поглинається оптичною системою і фокусується на детекторі. Детектор перетворює теплову енергію в електричний сигнал, який електронний блок обробляє та виводить на дисплей. Лазерний покажчик допомагає точно націлити пірометр на точку або область вимірювання, що особливо важливо при локальному нагріві деталей. Технічні параметри GM1350 наведено в таблиці 8.1.

Таблиця 8.1. Технічні параметри GM1350

Технічні параметри	Значення
Діапазон	від -18 °C до +1350 °C
Похибка	±3°C від -18 °C до 0 °C
	±1,5 °C або ±1,5 % від 0 °C до 1350 °C
Дискретність	0,1
Повторення	1 % або 1 °C
Оптичне розширення	50:1
Час реакції (відгуку)	500 мс
Коефіцієнт випромінювання	від 0,1 до 1 (за замовчуванням: 0,95)
Спектральна чутливість	від 8 мкм до 14 мкм

Кінець табл. 8.1

Технічні параметри	Значення
Пам'ять	12 значень
Живлення	батарея 9 В типу «Крона» (6F22)
Час безперервної роботи	12 год (з лазером); 22 год (без лазера)
Умови експлуатації	від 0 °С до 40 °С; від 10 RH до 95 % RH
Умови зберігання	від –20 °С до 60°С; 10 % RH до 95 % RH
Розміри (В×Ш×Г)	141 мм × 60 мм × 200 мм
Маса	270 г

Заходи безпеки при роботі з пірометром. Безпека оператора при роботі з пірометрами є пріоритетом. Лазерний покажчик, який інтегрований у прилад, значно полегшує точне наведення, але одночасно вимагає обережності. Слід дотримуватися наступних правил:

1. Не спрямовувати лазерний промінь в очі або на поверхні з високим коефіцієнтом відбиття, щоб уникнути пошкодження зору відбитим лазерним променем.

2. Захищати прилад від електромагнітних полів, джерел тепла, різких перепадів температур та потрапляння вологи, оскільки це може порушити точність вимірювань.

3. Уникати забруднення оптики: пил, пара, дим та інші частки впливають на точність, створюючи перешкоди оптичним елементам.

Дотримання цих рекомендацій забезпечує не лише точність вимірювань, а й довговічність приладу.

Хід роботи при вимірюванні температури пірометром. При роботі з пірометром GM1350 (а також його аналогами GM1650 та GM1651) важливо дотримуватися послідовності дій та правил безпеки, щоб забезпечити точність вимірювань та уникнути пошкоджень приладу.

1. Підготовка приладу. Вставте батарею у відсік живлення, дотримуючись полярності. На дисплеї відобразиться поточний рівень заряду батареї, що дозволяє контролювати працездатність приладу. Після

ввімкнення на дисплеї протягом 1 секунди відображається версія прошивки приладу.

2. Увімкнення та первинне вимірювання. Натисніть і утримуйте курок для ввімкнення пірометра та початку вимірювання. Наведіть лазерний покажчик на поверхню об'єкта. Поточне значення температури відображається на дисплеї (рис. 8.3, 7). Показання оновлюються протягом усього часу утримання курка та активності індикатора SCAN (рис. 8.3, 3). Щоб зафіксувати поточне значення температури, відпустіть курок – на дисплеї з'явиться індикатор HOLD (рис. 8.3, 2).

Примітки. Зі збільшенням відстані до об'єкта (D) зростає діаметр області вимірювання (S). Розмір об'єкта має бути більшим за діаметр області. На рис. 8.4 проілюстровано принцип формування плями вимірювання інфрачервоного пірометра та її збільшення зі зростанням відстані до об'єкта, де: S – діаметр плями вимірювання, мм; D – відстань від пірометра до об'єкта, мм; $D : S = 12 : 1$ (рис. 8.4, б) – оптичне співвідношення приладу. Оптичне співвідношення 12 : 1 означає, що на кожні 12 одиниць відстані припадає 1 одиниця діаметра плями вимірювання. Тому при 300 мм $\rightarrow S \approx 25$ мм, при 900 мм $\rightarrow S \approx 75$ мм, при 1500 мм $\rightarrow S \approx 25$ мм. Таким чином, зі збільшенням відстані до об'єкта діаметр плями вимірювання пропорційно зростає.

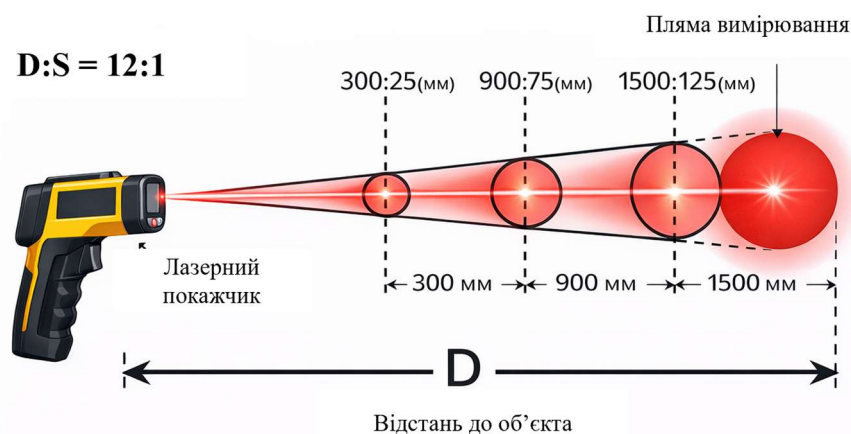


Рис. 8.4. Залежність діаметра плями вимірювання (S) від відстані до об'єкта (D)

Пірометр вимірює середню температуру в межах усієї плями вимірювання, а не точку, на яку вказує лазер. Лазерний покажчик слугує лише для наведення та не визначає реальний розмір зони вимірювання. Саме тому необхідно правильно визначити оптимальну точку вимірювання інфрачервоним пірометром (рис. 8.5).



Рис. 8.5. Пошук оптимальної точки вимірювання інфрачервоним пірометром

Якщо діаметр плями менший за розмір об'єкта – вимірювання коректне (рис. 8.6, а), дорівнює розміру об'єкта – граничне (8.6, б), перевищує розмір об'єкта – некоректне, адже на результат вимірювання впливає температура фону (рис. 8.6, в). Якщо співвідношення розмірів об'єкта та плями випромінювання граничне або некоректне (рис. 8.6, б, в), точність вимірювань значно знижується, і вимірювання не рекомендується.

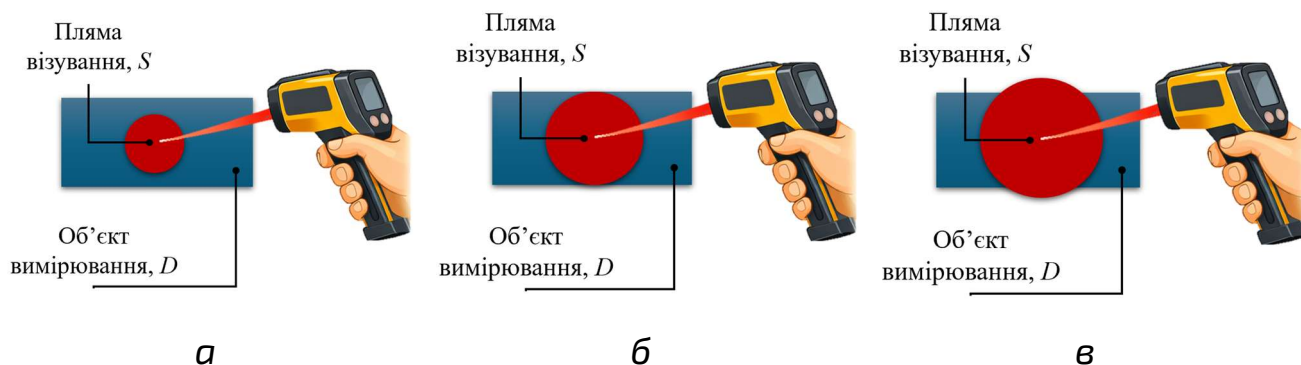


Рис. 8.6. Варіанти вимірювання температури залежно від співвідношення розміру плями візування (S) та об'єкта (D):
 а – правильне ($S < D$); б – граничне ($S = D$); в – некоректне ($S > D$)

3. Пошук максимальної температури. Щоб визначити найбільш гарячу точку на поверхні, утримуючи курок, проскануйте об'єкт вздовж і впоперек, вгору і вниз, поки не знайдете точку з максимальною температурою (рис. 8.7). Цей прийом дозволяє виявити локальні «гарячі» ділянки, що особливо важливо при лазерному термомеханічному впливі.

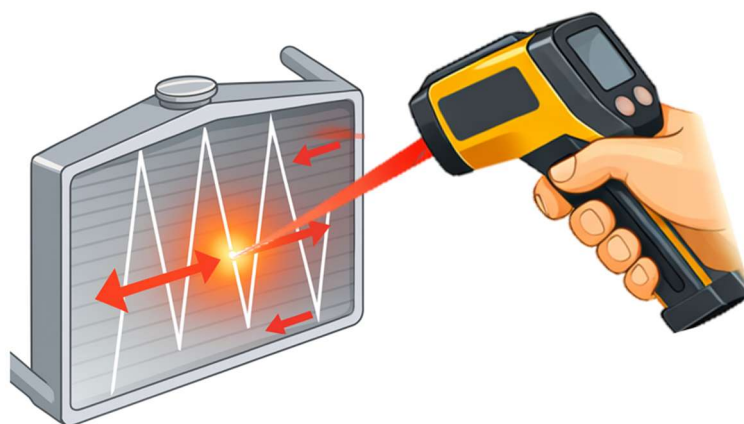


Рис. 8.7. Пошук максимальної температури інфрачервоним пірометром

4. Увімкнення підсвітки та лазерного покажчика. Для увімкнення або вимкнення підсвітки дисплея чи лазерного покажчика натисніть відповідну кнопку кілька разів. Індикатори (рис. 8.3, 4) та (рис. 8.3, 5) показують поточний стан функцій.

5. Вибір режиму роботи. Натисніть кнопку **MODE** потрібну кількість разів та підтвердіть вибір кнопкою **SET**. Індикатори (рис. 8.3, 12)

та (рис. 8.3, 8) відображають активний режим та параметри. Пірометр має такі режими роботи:

- **MAX** – вимірювання із запам'ятовуванням максимального значення;
- **MIN** – вимірювання із запам'ятовуванням мінімального значення;
- **DIF** – визначення різниці між поточним показанням та утримуваним значенням на дисплеї;
- **AVG** – визначення середнього значення температури;
- **HAL (high)** – звуковий сигнал при досягненні заданої максимальної температури; підтвердження кнопкою **SET**. Активується індикатор **HIGH**;
- **LAL (low)** – звуковий сигнал при досягненні мінімальної температури; підтвердження кнопкою **SET**. Активується індикатор **LOW**;
- **STO** – вимірювання з можливістю збереження результатів у пам'ять при натисканні кнопки **STO/CAL**. Якщо пам'ять заповнена, на дисплеї з'являється повідомлення **FUL**. Щоб переглянути або очистити пам'ять, використовуються кнопка **STO/CAL** та утримання її протягом 3 секунд для активації індикатора **CLR**;
- **EMS** (режим за замовчуванням) – вимірювання з заданим коефіцієнтом випромінювання, який можна встановлювати кнопками ▲ та ▼ у діапазоні від 0,1 до 1. Найчастіше використовується значення 0,95. Для поверхонь з високим коефіцієнтом відбиття (блискучих або світлих) рекомендується коригувати коефіцієнт для зменшення похибки. Таблиця 8.2 містить середні значення коефіцієнтів для різних матеріалів.

6. Вибір температурної шкали. Для вибору одиниць вимірювання (°C / °F) використовуйте перемикач у відсіку живлення. Відповідний індикатор (рис. 8.3, б) на дисплеї відображає вибрану шкалу.

7. Автовимкнення приладу. Якщо протягом 30 секунд не виконуються жодні дії, пірометр автоматично вимикається для економії батареї.

Таблиця 8.2. Середнє значення коефіцієнта випромінювання для різних матеріалів

Матеріал	Коефіцієнт випромінювання	Матеріал	Коефіцієнт випромінювання
Алюміній	0,30	Залізо	0,70
Азбест	0,95	Свинець	0,50
Асфальт	0,95	Вапняк	0,98
Базальт	0,70	Масло	0,94
Латунь	0,50	Фарба	0,93
Цегла	0,90	Папір	0,95
Вугілля	0,85	Пластмаса	0,95
Кераміка	0,95	Гума	0,95
Бетон	0,95	Пісок	0,90
Мідь	0,95	Шкіра	0,98
Земля	0,94	Сніг	0,90
Заморожена їжа	0,90	Сталь	0,80
Гаряча їжа	0,93	Текстиль	0,94
Скло (плоске)	0,85	Вода	0,93
Лід	0,98	Дерево	0,94

Обслуговування пірометра. Для забезпечення тривалої та точної роботи пірометра необхідно дотримуватися правил його обслуговування. Оптичні елементи приладу, зокрема лінза, є найважливішими для точності вимірювання, тому вони потребують особливої уваги.

Рекомендується очищати лінзу за допомогою очищеного стиснутого повітря, наприклад, із застосуванням лабораторного компресора. Поток повітря видаляються дрібні частинки пилу та пилоподібні забруднення, що можуть спотворювати інфрачервоне випромінювання і, як наслідок, знижувати точність вимірювання. Після видалення часток повітрям лінзу можна акуратно протерти м'якою вологою тканиною, яка не залишає ворсу.

Особливу увагу слід приділити матеріалу лінзи. Якщо лінза виготовлена з пластику, категорично забороняється використовувати розчинники або агресивні хімічні засоби для очищення, оскільки вони можуть пошкодити поверхню та змінити оптичні властивості. Також не

можна занурювати прилад у воду або піддавати його дії рідин, оскільки це може призвести до виходу з ладу електронного блоку та оптики.

Дотримання цих правил обслуговування дозволяє:

- зберегти точність вимірювань у межах заводських характеристик;
- продовжити термін служби приладу;
- уникнути пошкодження оптичних та електронних елементів;
- забезпечити безпеку оператора під час роботи.

Основи теплового розрахунку. Вимірювання температури поверхні деталі пірометром є лише першим етапом контролю процесу лазерної термомеханічної обробки. Для того, щоб ці дані мали практичну цінність, необхідно оцінити їх точність.

Саме для цього використовують розрахунок відносної похибки δ (8.2):

$$\delta = \frac{T_{\text{вим}} - T_{\text{реал}}}{T_{\text{реал}}} \cdot 100 \%, \quad (8.2)$$

де $T_{\text{вим}}$ – показання пірометра, °С; $T_{\text{реал}}$ – розрахункова температура поверхні деталі за формулою локального нагріву поверхні ΔT , °С.

При комбінованій лазерній термомеханічній обробці поверхневий шар матеріалу піддається сильному локальному нагріву у зоні впливу лазерного променя. Для контролю процесу і забезпечення якісного зміцнення критично важливо знати наскільки сильно нагрівається поверхня. Саме тут і використовується приблизна формула локального нагріву поверхні ΔT , яку розраховують за формулою (8.3) та підставляють у формулу розрахунку відносної похибки (8.2).

Формула розраховується так:

$$\Delta T = \frac{\eta P}{2\pi\lambda r}, \quad (8.3)$$

де η – коефіцієнт поглинання лазерної енергії матеріалу; P – потужність лазера, Вт; λ – теплопровідність матеріалу, Вт/(м·К); r – радіус лазерного променя або зони нагріву, м.

Як бачимо, для розрахунку локального нагріву поверхні деталі ΔT необхідно знати коефіцієнт поглинання лазерної енергії η та теплопровідність матеріалу λ . Коефіцієнт η показує, яку частину енергії лазера поглинає поверхня металу і перетворює на тепло. Точне значення η залежить від багатьох чинників: стан поверхні, шорсткість, оксидна плівка, температура під час обробки. Для низьколегованих сталей 30ХГСА та Сталі 45 точних табличних значень у відкритих джерелах немає. Тому у навчальній практиці використовують орієнтовні значення, що базуються на дослідженнях поглинання вуглецевих та конструкційних сталей при використанні Nd: YAG лазера ($\lambda = 1064$ нм). **Орієнтовне значення η для 30ХГСА і Сталі 45** від 0,85 до 0,90³¹. Це означає, що приблизно 85-90 % енергії лазера перетворюється на тепло на поверхні.

Теплопровідність λ визначає, як швидко тепло розподіляється в об'ємі матеріалу. Для сталей 30ХГСА та Сталі 45 орієнтовні значення наведені в табл. 8.3.

Таблиця 8.3. Орієнтовні значення λ для сталі при Nd: YAG (1064 нм)

Матеріал	λ , Вт/(м·К)	Примітка
30ХГСА	45	середньоглегована конструкційна сталь
Сталь 45	44	середньовуглецева конструкційна сталь

Після обчислення ΔT розрахункова температура поверхні (8.4):

$$T_{\text{реал}} = T_0 + \Delta T, \quad (8.4)$$

³¹ Коефіцієнт поглинання η для сталей під Nd: YAG лазер є орієнтовним, і для конструкційних марок сталі (30ХГСА, сталь 45) його беруть з публікаційних даних про поведінку схожих сталей. Студент повинен це враховувати і вказувати у своїх розрахунках, що дана величина в межах розрахунків даної практичної роботи не є жорсткою константою, а служить виключно для інженерної оцінки режиму нагріву.

де T_0 – початкова температура деталі перед обробкою (наприклад, кімнатна, 25 °C), °C; ΔT – зміна температури, тобто приріст нагріву інструмента або заготовки, який виникає під час обробки внаслідок тертя, деформації, ударного навантаження чи лазерного впливу, °C.

Прилад, який вимірює температуру безконтактно (інфрачервоний пірометр), не фіксує саму температуру поверхні, а реєструє теплове інфрачервоне випромінювання, яке випромінює нагріта поверхня. Інтенсивність такого випромінювання прямо залежить від температури, але також залежить і від того, яка частка енергії насправді випромінюється поверхнею.

Цю властивість матеріалу описує коефіцієнт емісії ε ³² – безрозмірна величина, що показує, яку частину теплового випромінювання поглинає і випромінює реальний об'єкт порівняно з абсолютно чорним тілом, для якого $\varepsilon = 1$. Значення ε може лежати в діапазоні від 0 (поверхня, що не випромінює) до 1 (поверхня ідеально випромінює). На металах це значення зазвичай значно менше за 1 і залежить від складу металу, стану поверхні, її шорсткості та наявності оксидної плівки.

Найпоширеніший шлях для отримання значення ε – використання довідкових табличних значень емісійності матеріалів. Такі таблиці наводяться в технічних паспортах приладів для безконтактного вимірювання температури, у збірниках з теплофізичних властивостей матеріалів або на сайтах виробників вимірювального обладнання [33].

Таблиці емісійності наведені для багатьох металів, але не завжди конкретно для кожної марки сталі. У таких випадках значення ε для аналогічної групи металів беруть як орієнтовне.

Для практичних потреб вимірювання температури під час проведення лабораторних та практичних робіт часто використовують табличні

³² Інша величина A (поглинальна здатність) часто використовується в старих джерелах, але у сучасній термодинаміці та лазерній обробці її приймають рівною ε для нерухомої поверхні

значення емісії для сталі як матеріалу у певному стані поверхні (полірована, шорстка тощо). Це пояснюється тим, що саме стан поверхні значно впливає на ε , а не незначні відмінності в хімічному складі сталевих сплавів³³ [31].

Наприклад, для сталі в загальному випадку у галузевих довідниках можна знайти такі орієнтовні значення [32]:

- сталь холоднокатана, із захисною оксидною плівкою або шорсткою поверхнею: $\varepsilon \approx$ від 0,7 до 0,9 (добре випромінює);
- сталь полірована або оброблена: $\varepsilon \approx$ від 0,1 до 0,3 (низьке випромінювання);
- сталь з матовою, шорсткою поверхнею: $\varepsilon \approx$ від 0,4 до 0,6.

Ці значення характерні для сталей у загальному вигляді і підходять для навчальних розрахунків, коли точних експериментальних даних немає.

Оскільки сталеві сплави 30 ХГСА (легована конструкційна сталь) і сталь 45 (вуглецева конструкційна сталь) мають схожу кристалічну структуру і фізичні властивості, то для спрощення практичних розрахунків доцільно приймати значення ε за такими категоріями поверхні:

Для загартованої та трохи шорсткої поверхні (фактична, як вона є в дійсності після обробки, тобто поверхню не ідеально гладку чи ідеально чорну, а таку, яка сформувалася в результаті технологічного процесу):

- $\varepsilon \approx 0,7$ – це значення відповідає сталевій поверхні з оксидною плівкою або матовою структурою, що характерно для нагрітих і оброблених сталей [32];
- для відносно гладкої або полірованої поверхні (наприклад, шліфувана деталь): $\varepsilon \approx$ від 0,2 до 0,3 [33]. Такі значення характерні для металевих поверхонь із низьким випромінюванням після механічної обробки – вони ближчі до сталевих поверхонь у полірованому стані.

³³ Всі леговані сталі, нержавіючі сталі та інструментальні сталі – це приклади сталевих сплавів, тобто вони не чисто залізо + вуглець, а багатокомпонентні сплави заліза.

Корекція на ε виконується за формулою (8.5):

$$T_{\text{кор}} = \frac{T_{\text{вим}}}{\sqrt[4]{\varepsilon}}, \quad (8.5)$$

де $T_{\text{вим}}$ – скоригована температура поверхні після врахування впливу шорсткості, плівок та похибок вимірювання, °C; ε – коефіцієнт емісії поверхні матеріалу, безрозмірна величина.

Приклад розрахунку температури поверхні та корекції на емісійність наведемо відповідно до вихідних даних:

- матеріал: 30ХГСА (легована конструкційна сталь);
- потужність лазера Nd: YAG: $P = 100$ Вт;
- радіус лазерного променя: $r = 1,5$ мм = 0,0015 м;
- початкова температура деталі: $T_0 = 25$ °C;
- коефіцієнт поглинання $\eta = 0,85$;
- теплопровідність $\lambda = 45$ Вт/(м · К);
- коефіцієнт емісії поверхні $\varepsilon = 0,7$ (матова, шорстка поверхня після термічної обробки).

Спочатку розрахуємо локальний нагрів ΔT , підставивши одержані значення у формулу (8.3):

$$\Delta T = \frac{0,85 \cdot 100}{2\pi \cdot 45 \cdot 0,0015} = \frac{85}{2 \cdot 3,1416 \cdot 45 \cdot 0,0015} = \frac{85}{0,4241} \approx 200,4 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Отже, локальний нагрів $\Delta T \approx 200,4$ °C.

Тепер розрахуємо температури поверхні $T_{\text{реал}}$, підставивши значення у формулу (8.4):

$$T_{\text{реал}} = 25 + 200,4 \approx 225,4 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Це температура, яку поверхня повинна мати після впливу лазера без урахування похибки пірометра та емісії поверхні.

Припустимо, що пірометр показав $T_{\text{вим}} = 220\text{ }^\circ\text{C}$, у такому випадку, після підстановки значень у формулу (8.2) відносна похибка складатиме:

$$\delta = \left| \frac{220 - 225,4}{225,4} \right| \cdot 100\% \approx 2,4\%.$$

Відповідно до розрахунку, пірометр показав температуру трохи нижчу за розрахункову, що типово для поверхні з $\varepsilon < 1$.

Тепер розрахуємо корекцію на коефіцієнт емісії ε , підставивши значення у формулу (8.5):

$$T_{\text{кор}} = \frac{220}{\sqrt[4]{0,7}} = \frac{220}{0,9129} \approx 241,0\text{ }^\circ\text{C}.$$

Після корекції одержано значення $241\text{ }^\circ\text{C}$, тобто реальна температура поверхні насправді вища, ніж показав прилад.

Окрім традиційних інфрачервоних пірометрів та двоколірних пірометрів, для контролю температури поверхні після комбінованої лазерної термомеханічної обробки можуть застосовуватися й інші методи. **Двоколірні пірометри** залишаються найпоширенішими через їх здатність безконтактно вимірювати температуру навіть при змінному коефіцієнті емісії поверхні, що характерно для шорстких або частково окислених металевих деталей. Вони реєструють теплове випромінювання на двох довжинах хвиль і визначають температуру незалежно від значення ε , що забезпечує високу точність вимірювань на поверхнях із неоднорідним покриттям або шорсткістю.

Для одержання розподілу температури на поверхні застосовують **інфрачервоні камери (тепловізори)**. Вони дозволяють отримати

двовимірну карту температури, що особливо корисно при нагріванні великих деталей або на поверхнях із нерівномірним поглинанням лазерного променя. Однак точність таких вимірювань залежить від правильного калібрування емісії матеріалу, тому вони дають трохи більшу похибку порівняно з двоколірними пірометрами.

Контактні методи, такі як **термопари** або **опірні термометри (RTD)**, теоретично можуть використовуватися для контролю локальної температури. Термопари реєструють термоелектричний ефект на з'єднанні двох різнорідних металів, а RTD – зміну опору провідника при нагріванні. Ці методи забезпечують точні локальні значення температури, проте їх практичне застосування обмежене через контакт із поверхнею: на шорстких або гарячих деталях лазерного зміцнення датчики можуть пошкоджуватися, а швидкі імпульси лазера не завжди дозволяють зафіксувати максимальну температуру.

Серед сучасних контактних рішень перспективними є **оптичні фіброволоконні сенсори (Fiber Bragg Grating, FBG)**. Вони дозволяють реєструвати локальні зміни температури через зсув довжини хвилі світла у волокні, що робить їх швидкими, точними і стійкими до високих температур.

Менш практичними для промислового застосування у лазерному термодформаційному зміцненні є **люмінесцентні термометри**, які вимагають нанесення спеціального покриття на поверхню. Хоча вони дозволяють безконтактно вимірювати температуру, покриття може змінювати механічні або термічні властивості деталі, а також додавати похибку через неоднорідність шару.

Таким чином, для лазерного термодформаційного зміцнення найбільш ефективними та точними методами є двоколірні пірометри та оптичні фіброволоконні сенсори, які дозволяють швидко і безконтактно вимірювати температуру навіть на шорстких або легованих сталях. Інфрачервоні камери також застосовуються для оцінки розподілу

температури, хоча вони дають дещо більшу похибку через залежність від емісії поверхні. Контактні методи можна використовувати тільки у спеціально підготовлених експериментальних умовах, а люмінесцентні покриття – лише у випадках, коли можна допустити попереднє нанесення шару на поверхню. Такий підхід дозволяє поєднувати точність і практичність вимірювань у процесі комбінованої лазерної термомеханічної обробки.

Порядок проведення роботи

1. Вступне пояснення викладача:

- сутність комбінованої лазерної термомеханічної обробки, основні параметри та особливості;
- ознайомлення з пірометрами GM1350, GM1650, GM1651, принципом безконтактного вимірювання температури та технікою безпеки;
- пояснення необхідності визначення коефіцієнта емісії поверхні ε та його впливу на точність вимірювань;
- демонстрація розрахунків локального нагріву ΔT , розрахункової температури $T_{\text{реал}}$, відносної похибки δ та корекції $T_{\text{кор}}$.

2. Демонстрація інженером / викладачем:

- показ вимірювання температури поверхні деталі згідно з індивідуальним варіантом;
- пояснення внесення даних у таблицю вимірювань (табл. 8.5);
- вказівки щодо аналізу отриманих результатів і заповнення шаблону звіту.

3. Самостійна робота студентів:

- вимірювання температури поверхні деталі пірометром згідно з індивідуальним завданням;
- запис результатів у таблицю вимірювань (табл. 8.5);
- проведення розрахунків ΔT , $T_{\text{реал}}$, δ та $T_{\text{кор}}$;
- аналіз отриманих результатів та оформлення висновків у шаблоні;

- кожен студент повинен обґрунтувати правильність вибору коефіцієнта емісії, потужності лазера та інших параметрів для свого варіанту.

Контрольні питання

1. Що таке комбінована лазерна термомеханічна обробка і які основні параметри впливають на її ефективність?

2. Поясніть, чому важливо підтримувати постійну температуру поверхні під час обробки та яку роль тут відіграє безконтактне вимірювання пірометром.

3. Опишіть принцип дії пірометрів GM1350, GM1650, GM1651. Чим вони відрізняються один від одного за діапазоном вимірювань?

4. Що таке коефіцієнт емісії ε поверхні? Як його неправильне визначення впливає на точність вимірювання температури?

5. Для чого розраховують локальний нагрів ΔT і розрахункову температуру $T_{\text{реал}}$? Які фізичні властивості матеріалу враховуються у цих розрахунках?

6. Наведено пірометром температуру $T_{\text{вим}} = 220 \text{ }^\circ\text{C}$ для сталі 30ХГСА. Визначте, яка буде скоригована температура $T_{\text{кор}}$, якщо $\varepsilon = 0,7$, та поясніть етапи розрахунку.

7. **Міні-кейс:** у студента виміряна температура пірометром нижча за розрахункову на $15 \text{ }^\circ\text{C}$. Які фактори могли призвести до такої різниці? Назвіть як мінімум три можливі причини та способи їх усунення.

8. Поясніть роль коефіцієнта поглинання η та теплопровідності λ у визначенні локального нагріву. Як зміна цих параметрів вплине на $T_{\text{реал}}$?

9. **Міні-кейс:** для деталі зі сталі 45 використовують лазер Nd:YAG потужністю 100 Вт і радіусом променя 2 мм. Студент розрахував $\Delta T = 180 \text{ }^\circ\text{C}$. Початкова температура $T_0 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$, $\varepsilon = 0,75$. Визначте $T_{\text{кор}}$ та оцініть, чи відповідає температура умовам безпечного нагріву для обробки.

10. Як і чому проводиться оцінка відносної похибки δ ? Яку інформацію вона дає інженеру при контролі температурного режиму лазерної термомеханічної обробки?

Зміст звіту

Звіт по роботі повинен містити наступні розділи:

1. Загальні дані: номер, назву та мету роботи.

2. Аналіз даних індивідуального завдання відповідно до варіанту:

- матеріалу деталі (30ХГСА / Сталь 45);
- потужності лазера P , Вт;
- радіуса лазерного променя r , м;
- початкової температури T_0 , °С;
- коефіцієнта поглинання η ;
- теплопровідності λ , Вт/(м·К);
- коефіцієнта емісії поверхні ε ;
- інших параметрів за індивідуальним завданням.

3. Вимірювання температури поверхні пірометром та внесення даних до табл. 8.5.

4. Розрахунок основних параметрів лазерної термомеханічної обробки:

- локального нагріву поверхні ΔT , °С;
- розрахункової температури $T_{\text{реал}}$, °С;
- відносної похибки δ , %;
- корегованої температури $T_{\text{кор}}$ з урахуванням ε , °С;
- формулювання висновку щодо впливу параметрів лазера та матеріалу на температуру поверхні.

5. Висновки з обґрунтуванням правильності та точності вимірювань:

- вказати, як обрані значення коефіцієнта емісії ε вплинули на результати;

- пояснити, чи знаходяться результати вимірювань у межах допустимих похибок;
- оцінити вплив потужності лазера, радіуса променя та стану поверхні на точність і ефективність обробки.

Протокол практичної роботи № 8

Методика визначення та підтримання постійної температури при комбінованій лазерній термомеханічній обробці

Виконав/-ла студент/-ка _____ курсу
Група: _____
Прізвище та ініціали: _____
Дата виконання: « ____ » _____ 20 ____ р.
Оцінка: _____

Мета роботи – сформувати практичні навички вимірювання температури поверхні деталі пірометром та виконання теплового розрахунку для оцінки ефективності лазерної термомеханічної обробки; навчити коригувати результати з урахуванням коефіцієнта емісії поверхні.

Вимірювання температури пірометром

1. Визначте параметри свого індивідуального завдання (Матеріал, P , r , T_0 , η , λ , ε) відповідно до табл. 8.4.

Вкажіть номер свого індивідуального завдання: _____

2. За допомогою пірометра виміряйте температуру поверхні деталі згідно з ескізом.

3. Результати занесіть до табл. 8.5.

Перенесіть одержані дані до табл. 8.6, зазначивши дії, необхідні для корекції температури (за потреби).

Таблиця 8.6. Контроль та корекція температури поверхні деталі під час лазерної термомеханічної обробки

Ескіз деталі з місцем для вимірювання температури			
№ з/п	Параметр	Значення	Зауваження / дії щодо корекції
1	$T_0, ^\circ\text{C}$		
2	$T_{\text{вим}}, ^\circ\text{C}$		
3	Коефіцієнт емісії ε		
4	$T_{\text{кор}}, ^\circ\text{C}$		
5	$\Delta T, ^\circ\text{C}$		
6	$T_{\text{реал}}, ^\circ\text{C}$		
7	$\delta, \%$		

Висновки

1. Порівняйте виміряну температуру пірометром з розрахунковою та скоригованою на ε .

2. Визначте, наскільки точними були вимірювання, та зробіть висновок про ефективність процесу лазерної термомеханічної обробки.

3. Зробіть короткий аналіз впливу матеріалу, потужності лазера, радіуса променя та емісії поверхні на результат.

Під час роботи я навчився _____

Ознайомився з логікою складання розрахунків та оцінки режиму комбінованої лазерної термомеханічної обробки. Виконаний аналіз показав _____

Оцінка точності вимірювань пірометром та розрахунків ($T_{\text{вим}}$, $T_{\text{реал}}$, $T_{\text{кор}}$) показала _____

Висновки щодо впливу матеріалу, потужності лазера, радіуса променя та емісії поверхні на результати _____

ДОДАТКИ

Додаток А

Титульний лист практичної роботи

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Кафедра лазерної техніки та фізико-технічних технологій

ЗВІТ

з практичних робіт

з дисципліни «Системи керування технологічним обладнанням»

студента/-ки _____ курсу НН ІМЗ ім. Є. О. Патона

групи _____

(Прізвище, ім'я, по батькові)

Таблиця обліку виконання практичних робіт

№ з/п	Назва практичної роботи	Оцінка	Підпис викладача
1	Визначення основних елементів технологічного процесу механічної обробки деталей		
2	Основи програмування на верстатах з ЧПК		
3	Визначення параметрів програмування для фрезерування зовнішнього контуру деталі		
4	Визначення параметрів програмування дуги та кола		
5	Визначення параметрів програмування для обробки отворів		
6	Розробка керуючої програми для обробки ступінчастого вала		
7	Розрахунок енергії ударної дії інструментів для поверхневого зміцнення		
8	Методика визначення та підтримання постійної температури при комбінованій лазерній термомеханічній обробці		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Андрієвська В. В. Аналіз методів і засобів вимірювання температури об'єктів. *Матеріали XLVIII науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ*, м. Вінниця, 13 берез. 2019 р. 2019. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fitki/all-fitki-2019/paper/view/7019>.
2. Афанасьєва О. В., Лалазарова Н. О., Федоренко Є. П. Лазерна поверхнева обробка матеріалів : монографія. Харків : ФОРМ Панов А. Л., 2020. 100 с.
3. Виноградов-Салтиков В. О., Єщенко О. І., Бірюков Д. В. Теплохімічні вимірювання. Особливості вимірювання температури аірометрами: навчальний практикум, лабораторний практикум. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 33 с. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/7ea38c9c-bf5e-407a-b504-84ff3a86c8eb/content>.
4. Гайворонський В. А., Гиль О. О., Мірошніченко В. М. Програмування автоматизованого обладнання : навч. посіб. Київ : Кондор, 2007. 290 с.
5. Генератор QR-код – ME -QR. *QR Code Generator: Create QR Code FREE / ME-QR*. URL: <https://me-qr.com/uk> (дата звернення: 24.02.2026).
6. Гетьман О. Г., Більцька Н. В., Баскова Г. В. Технічне креслення. Читання та деталювання креслеників загального вигляду : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. 143 с.
7. Данилейко О. О. Підвищення експлуатаційних властивостей сталевих виробів комбінованою лазерною термомеханічною поверхневою обробкою : дис. ... д-ра філософії в галузі техн. наук : 131. Київ, 2023. 246 с.
8. Дерібо О. В., Лозінський Д. О., Сердюк О. В. Технології для верстатів з числовим програмним керуванням. Вінниця : ВНТУ, 2023. 116 с.

9. Джемелінський В. В., Лесик Д. А. Основи професійної діяльності : навч. посіб. Київ : НТУУ «КПІ», 2017. 177 с.

10. Джемелінський В. В., Лесик Д. А., Данилейко О. О. Основи професійної діяльності: домашня робота. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 25 с.

11. Допуски, посадки та технічні вимірювання. Практикум. Частина 1 / Ю. І. Адеменко та ін. Івано-Франківськ : Симфонія форте, 2016. 188 с.

12. Допуски, посадки та технічні вимірювання. Практикум. Частина 1 / Ю. І. Адеменко та ін. Івано-Франківськ : Симфонія форте, 2016. 164 с.

13. Інфрачервоний пірометр. Інструкція по експлуатації. URL: <https://s4.electro-market.com.ua/content/instructions/gm1350rus.pdf> (дата звернення: 24.02.2026).

14. Ковальов В. А., Гаврушкевич А. Ю., Гаврушкевич Н. В. Інноваційне обладнання автоматизованого виробництва. Конструкційні особливості та основи програмування верстатів з числовим програмним керуванням. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорв., 2020. 156 с. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/50c7ca2b-c60b-4db9-bd53-738420847db4/content>.

15. Ковальов В. А., Гаврушкевич А. Ю., Гаврушкевич Н. В. Обладнання автоматизованого виробництва: верстати з числовим програмним керуванням: практикум. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 115 с. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/53704653-1378-4bd7-8e77-a77e487d2ea1/content>.

16. Ковальов В. А., Гаврушкевич А. Ю., Гаврушкевич Н. В. Обладнання автоматизованого виробництва: верстати з числовим програмним керуванням: програмування в системі HEIDENHAIN TNC 640 : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 80 с. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/015111fc-1013-40c0-ba33-708be4603ecc/content>.

17. Ковальов В. А., Гаврушкевич А. Ю., Гаврушкевич Н. В. Посібник для практичного програмування верстатів з ЧПК. Київ : НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2019. 114 с.

18. Курс ЧПК. Інженерно-технічний центр «ВаріУс». *YouTube*. URL: <https://www.youtube.com/@VariUsGroup> (дата звернення: 25.02.2026).

19. Лесик Д. А. Системи керування технологічним обладнанням. Робоча програма навчальної дисципліни (силабус). *Кафедра ЛТФТ*. URL: [https://ltft.kpi.ua/documents/syllabuses/bachelor/var/СКТ0_виб_де_нна_Лесик_ост%20\(на%20жовтень\).pdf](https://ltft.kpi.ua/documents/syllabuses/bachelor/var/СКТ0_виб_де_нна_Лесик_ост%20(на%20жовтень).pdf) (дата звернення: 25.02.2026).

20. Муляр Ю. І., Дерібо О. В. Програмування токарної обробки на верстатах з ЧПК. Вінниця : ВНТУ, 2024. 90 с.

21. Онофрейчук Н. В. Основи обробки та програмування на верстатах з числовим програмним керуванням : підручник. Львів : Світ, 2019. 352 с.

22. Островерх Є. В. Інструментальне забезпечення технологічних процесів обробляння матеріалів у машинобудуванні. Харків : НТУ «ХПІ», 2019. 272 с.

23. Посібник із програмування ЧПК для початківців і програмістів. *STYLECNC*. URL: <https://uk.stylecnc.com/blog/cnc-programming.html> (дата звернення: 25.02.2026).

24. Пупань Л. І. Постпроцеси адитивних технологій. Харків : НТУ «ХПІ», 2023. 91 с.

25. Російсько-український-англійський словник з механіки / Уклад.: В. М. Бастун та ін. Київ: Наук. думка, 2009. 512 с. (Словники України)

26. Сєдінкін Л. М. Програмування обробки деталей на верстатах з оперативними системами керування : навч. посіб. Суми : Вид-во СУМДУ, 2006. 209 с.

27. Системи автоматизованого програмування верстатів з ЧПК : навч. посіб. / С. Л. Міранцов та ін. Краматорськ : ДДМА, 2011. 152 с.

28. Технологія конструкційних матеріалів: обробка металевих виробів різанням: практикум / Д. А. Лесик та ін. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 119 с.

URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/b5debb9d-7ae0-4474-bfae-a9a7226e9a25/content>.

29. Технологія ремонту машин та обладнання: курс лекцій / О. І. Сідашенко та ін. Харків: ХНТУСГ, 2016. 359 с.

30. Bevor Sie zu YouTube weitergehen.
URL: <https://www.youtube.com/@VariUsGroup> (date of access: 25.02.2026).

31. Definition and influence of emissivity. *PYRO Pyrometers by KELLER ITS*. URL: <https://surl.li/shimzh> (date of access: 24.02.2026).

32. Emissivity – Metals – Selmatec Systems GmbH. *Robuste Machine Vision Systeme | Selmatec – Selmatec Systems GmbH*.
URL: <https://surl.li/etmeqz> (date of access: 24.02.2026).

33. Metals Emissivity Table | Instrumart. *Test & Measurement Instruments with Engineering Support | Instrumart*. URL: <https://surl.li/tjybja> (date of access: 24.02.2026).

34. STEINEL | Emissivities. *STEINEL | Produkte STEINEL Tools*.
URL: <https://surl.li/vhwcoa> (date of access: 24.02.2026).



**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**