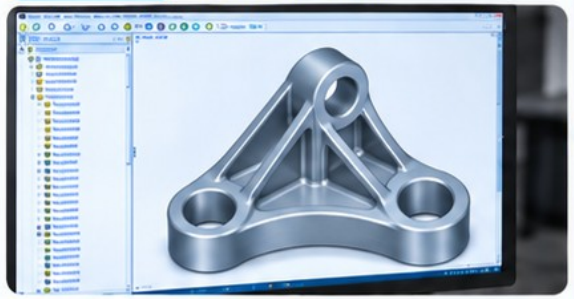
Від цифрової моделі до реалыного виробу

CAD → CAE → CAM → ЧПК / 3D-друк → контроль

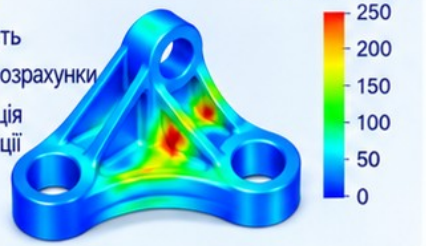
CAD — 3D-модель (проектування)



- створення 3D-моделі виробу
- розробка креслень
- параметричне моделювання

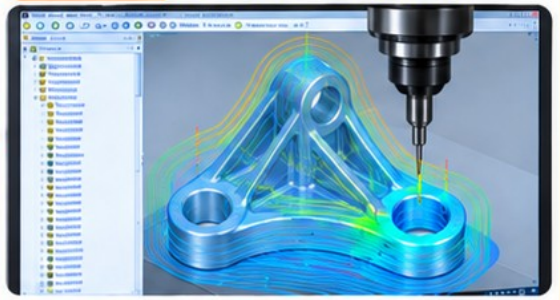
CAE — Інженерний аналіз (розрахунки)

- ☑ міцність
- ☑ жорсткість
- ☑ теплові розрахунки
- ☑ оптимізація конструкції



- віртуальні випробування
- аналіз навантажень
- зменшення вартості та часу розробки

CAM — Технологічна підготовка (траєкторії інструмента)



- створення траєкторій обробки
- вибір інструменту та режимів різання
- генерація керуючих програм (G-code)

3D-друк — Адитивне виробництво (за потреби)



- швидке виготовлення прототипів
- перевірка конструкції
- малосерійне виробництво

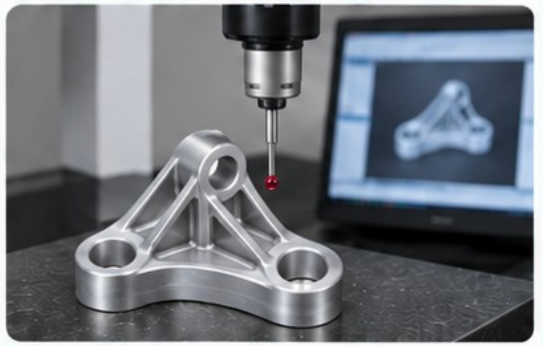
За потреби – виготовлення на 3D-принтері

ЧПК — Виробниче виготовлення (механічна обробка)



- автоматизована обробка на верстатах з ЧПК
- висока точність і повторюваність
- серійне виробництво

QC — Контроль якості (вимірювання)

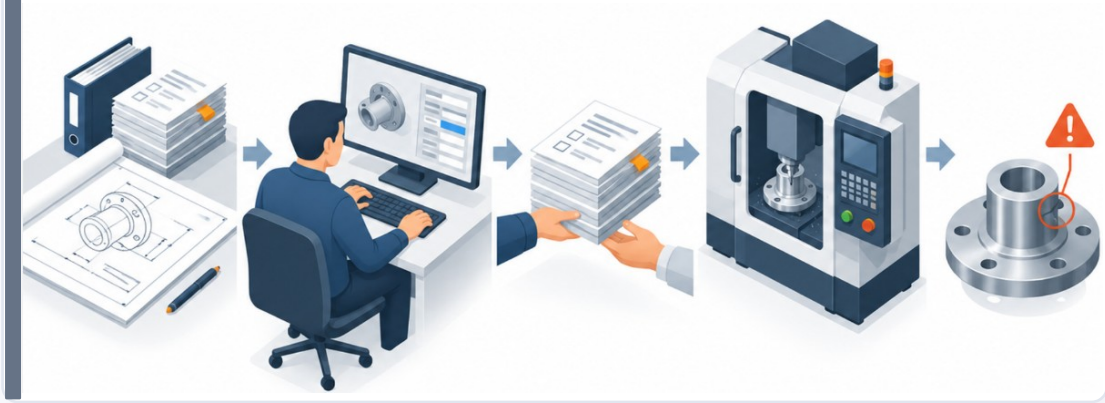


- контроль геометрії та розмірів
- порівняння з 3D-моделлю
- забезпечення відповідності вимогам

Цифрові технології дозволяють створювати якісні вироби швидше, точніше та ефективніше.

Традиційна логіка виробництва

- паперові креслення і локальні документи
- багато ручного перенесення даних
- довгі цикли узгодження
- помилки виявляються вже на фізичному етапі
- обладнання працює відносно ізольовано



Цифрове виробництво

- єдина 3D-модель як джерело даних
- віртуальна перевірка до виготовлення
- автоматизовані траєкторії та керуючі програми
- датчики, мережі, роботи, аналітика
- швидке внесення змін і повторна матеріалізація



Комп’ютерна матеріалізація = перетворення цифрового опису виробу на реальний фізичний об’єкт.

Індустрія 1.0

Пара і механізація
кінець XVIII ст.



Пара → Паровий двигун → Махове колесо → Ремінна передача → Лінійний вал і шківи → Ткацький верстат → Тканина

Машина замінює частину ручної праці та приводить у дію виробниче обладнання.

Індустрія 2.0

Електрика і конвеєр
початок XX ст.



Електрична енергія дозволила організувати масове серійне виробництво та впровадити конвеєр.

Індустрія 3.0

1970-ті
ЕОМ, ЧПК, автоматика



Програмовані виробничі процеси
Використання комп'ютерів, ЧПК, роботів і автоматики дозволило підвищити точність, продуктивність і гнучкість виробництва.

Індустрія 4.0

CPS, IIoT, AI, Digital Twin
сьогодні



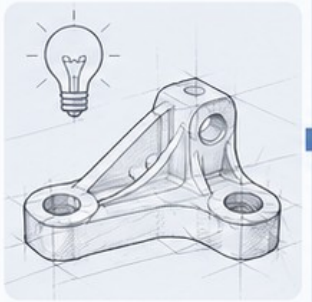
Обладнання і дані працюють як мережа
Завдяки підключенню, обміну даними та використанню штучного інтелекту виробництво стає більш гнучким, ефективним і адаптивним.

Наскрізний цифровий ланцюг

Від ідеї до готової деталі з високою якістю

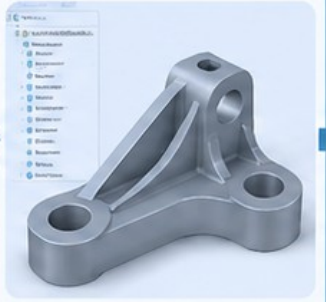
Цифрові технології — від ідеї до реального результату!

1 Ідея
вимоги



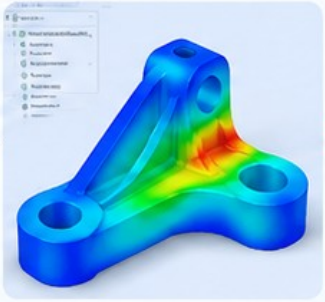
- потреба
- технічне завдання
- ескізи, концепція

2 CAD
3D-модель



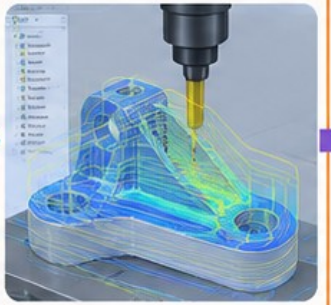
- створення 3D-моделі
- параметричне моделювання
- конструкторська документація

3 CAE
симуляція



- інженерний аналіз
- міцність, жорсткість
- оптимізація конструкції
- віртуальні випробування

4 CAM
технологія



- розробка траєкторій обробки
- вибір інструменту та режимів
- генерація керуючих програм

5 G-code
керування

```
N10 G21
N20 G90
N30 G17
N40 G54
N50 T1 M6
N60 S1200 M3
N70 G0 X0 Y0
N80 G1 Z-5 F200
N90 G1 X50 F300
N100 G2 X100 Y0 R50
N110 M30
```

G-code

- керуюча програма
- постпроцесор
- передача на верстат
- віртуальна перевірка

6 CNC / 3D
виготовлення



- обробка на ЧПК
- адитивне виробництво (3D-друк)
- виготовлення прототипів і серійних виробів

7 Контроль
вимірювання



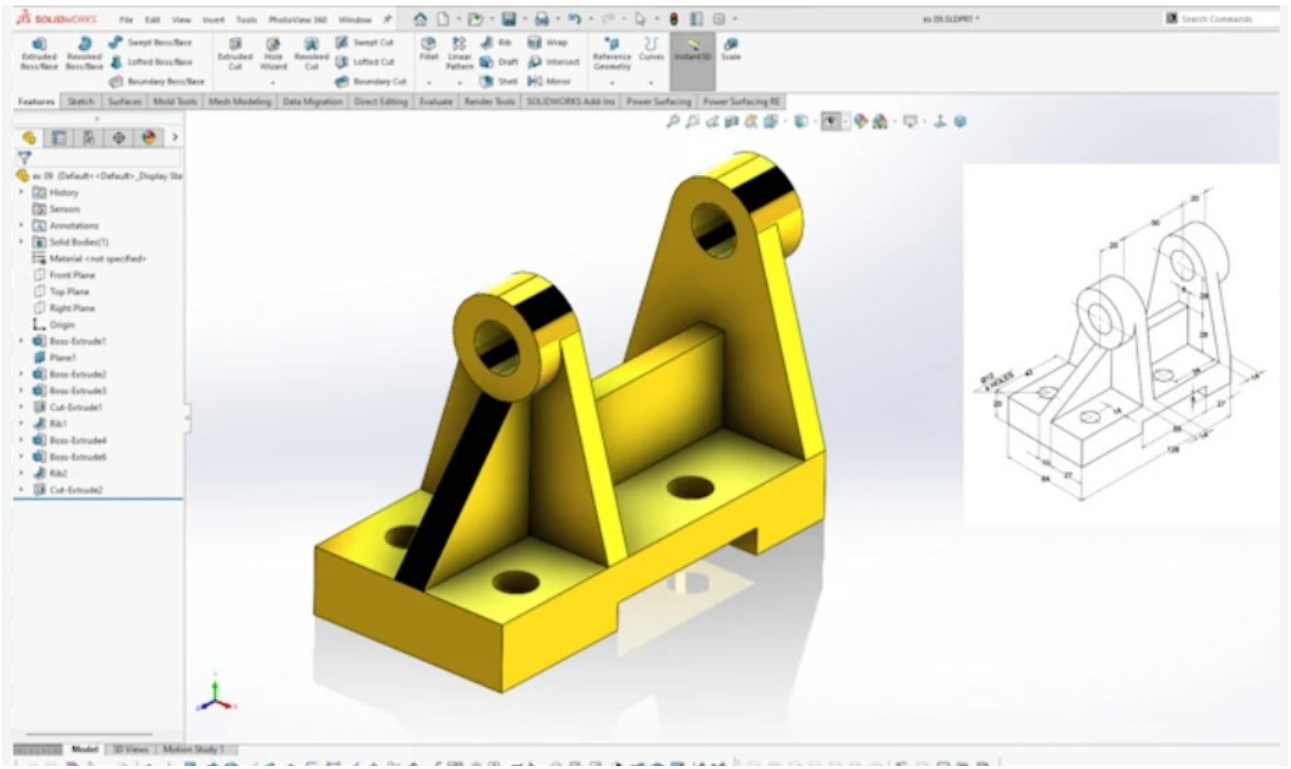
- контроль геометрії
- порівняння з 3D-моделлю
- аналіз якості
- відповідність вимогам

Дані передаються, використовуються і можуть уточнюватися на кожному етапі

Цифрова модель, що охоплює весь життєвий цикл виробу, дозволяє створювати якісні вироби швидше, точніше і ефективніше.

CAD: створення цифрової моделі виробу

CAD відповідає на запитання: «Яким має бути виріб?»



Приклад: креслення + параметрична 3D-модель у SOLIDWORKS

Що дає CAD інженеру?

01 Геометрія виробу
точна форма, розміри, отвори, радіуси, матеріал

02 Параметризація
швидка зміна розмірів і варіантів без побудови моделі з нуля

03 Креслення та документація
автоматичне формування видів, розрізів, розмірів і специфікацій

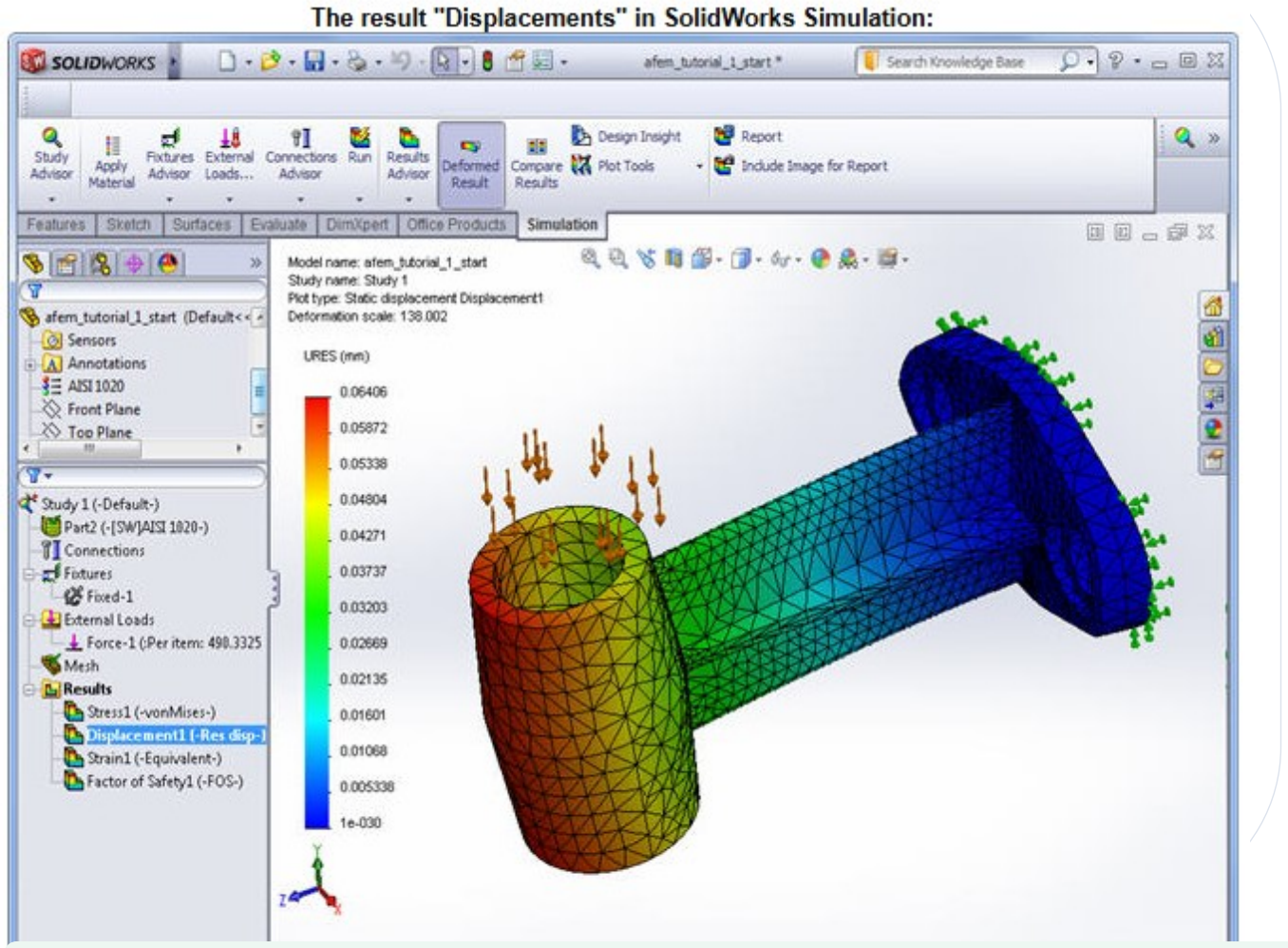
04 Єдине джерело даних
та сама 3D-модель передається далі в CAE, CAM, ЧПК і контроль

Результат: 3D-модель, готова до CAE → CAM → виробництва

SOLIDWORKS CATIA Siemens NX

CAE: віртуальна перевірка до виготовлення

Приклад реального розрахунку в SOLIDWORKS Simulation: карта переміщень



1. Граничні умови

Зелені позначки показують закріплення деталі; помаранчеві стрілки — прикладене навантаження.

2. Скінченно-елементна сітка

Геометрія поділена на скінченні елементи, для яких чисельно обчислюється поведінка конструкції.

3. Карта переміщень

Колірна шкала URES (мм) показує величину результуючих переміщень: від мінімальних до максимальних.

4. Інженерне рішення

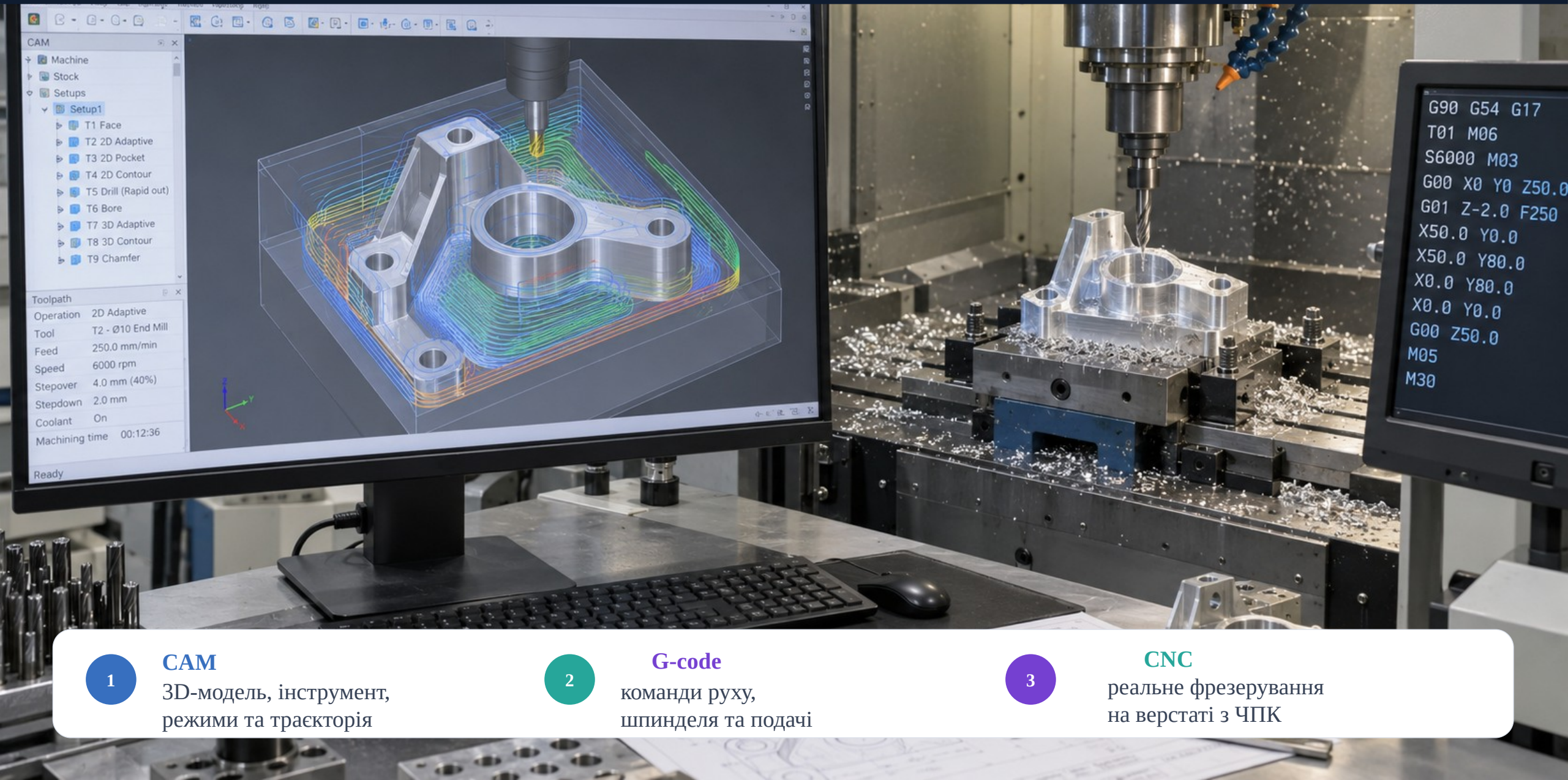
За результатами оцінюють жорсткість і за потреби змінюють геометрію, матеріал або умови навантаження.

CAE дозволяє оцінити поведінку деталі ще до її фізичного виготовлення.

CAM: від 3D-моделі до траєкторії та G-коду

Реальний цифровий маршрут: CAM-програмування → обробка на ЧПК → керуюча програма

CAM перетворює геометрію на керований процес



1 **CAM**
3D-модель, інструмент, режими та траєкторія

2 **G-code**
команди руху, шпинделя та подачі

3 **CNC**
реальне фрезерування на верстаті з ЧПК

Верстати з ЧПК: фізична ланка цифрового процесу

Керуюча програма перетворюється на координовані рухи обладнання



3 осі

X • Y • Z
типові фрезерні операції, площини, пази, отвори

5 осей

X • Y • Z + 2 поворотні осі
складні поверхні, менше перевстановлень

Автоматизація

магазин інструментів • автоматична зміна • корекції інструменту

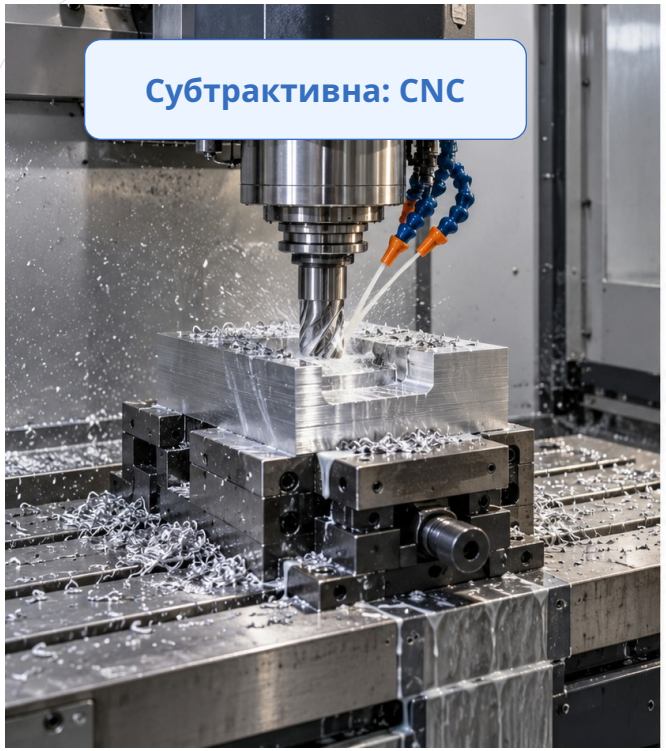
Контроль процесу

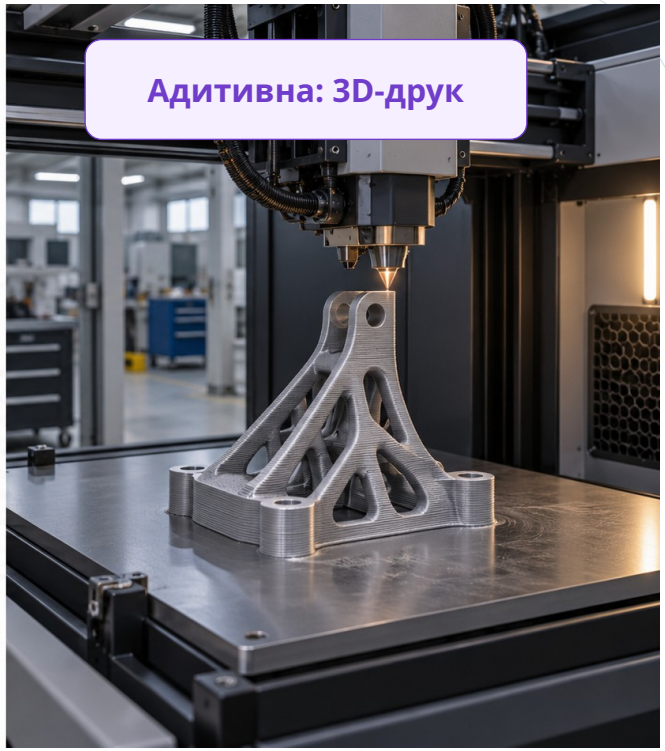
навантаження • стан верстата • аварії • пробний запуск

ЧПК-верстат перетворює цифрову програму на точне фізичне виготовлення деталі.

Адитивна та субтрактивна матеріалізація

Два різні способи перетворити цифрову модель на фізичний виріб





Субтрактивна: CNC-фрезерування

- матеріал видаляється із заготовки
- висока точність і якість поверхні
- обмеження: доступ інструменту та відходи матеріалу

Адитивна: 3D-друк

- матеріал додається пошарово
- складна внутрішня геометрія і швидке прототипування
- обмеження: підтримки, орієнтація, післяобробка

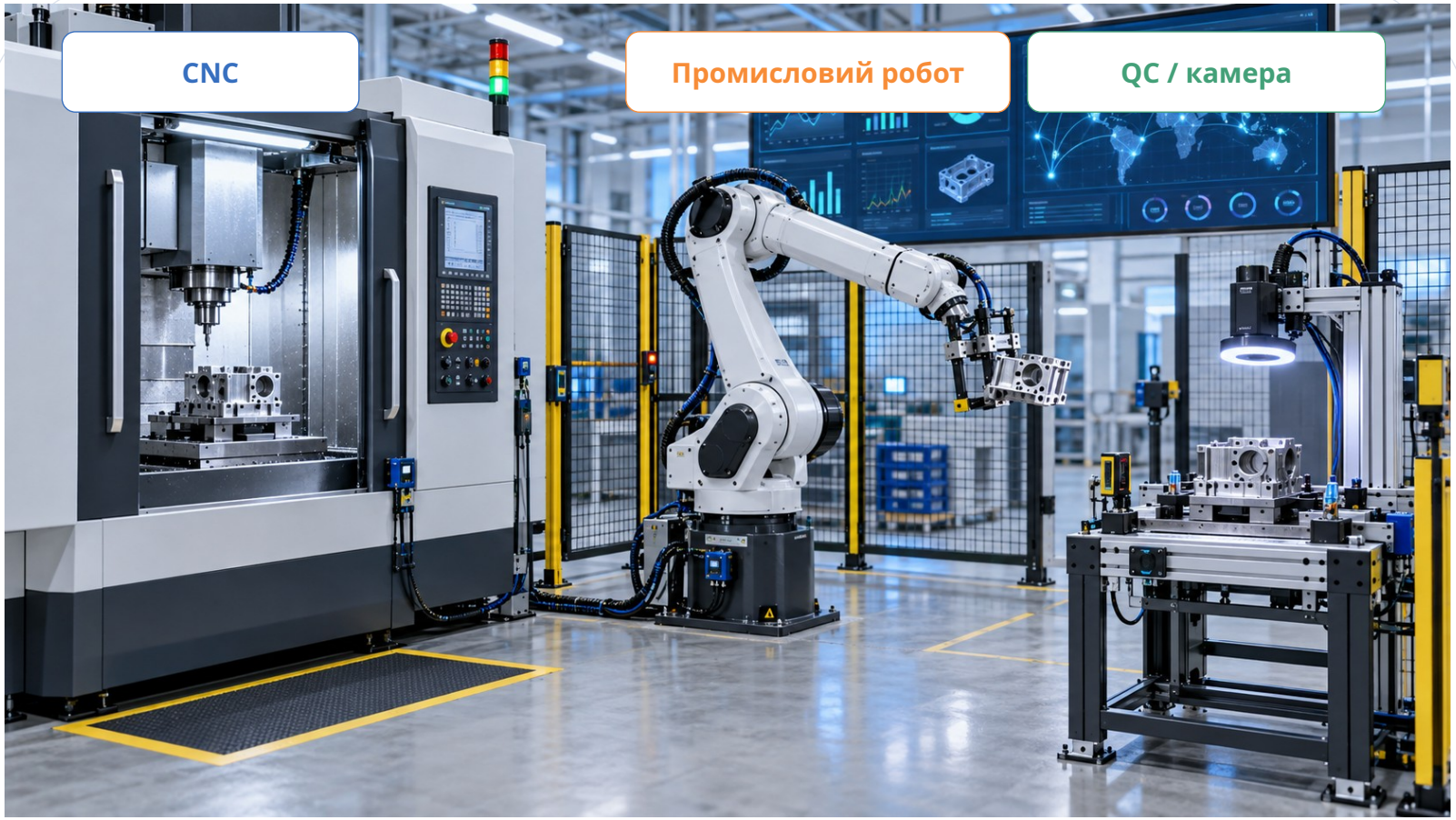
Гібридний підхід

- 3D-друк формує складну заготовку
- CNC забезпечує точні базові та функціональні поверхні
- поєднання швидкості, свободи форми й точності

Сучасне виробництво часто поєднує 3D-друк і механічну післяобробку в одному цифровому ланцюгу.

Робототехніка та IIoT

Коли цифрове керування охоплює вже не один верстат, а цілу виробничу ділянку



CNC + робот

автоматичне завантаження, розвантаження та переміщення деталей

Датчики / IIoT

вібрація • температура • навантаження • стан обладнання

Контроль якості

камера та датчики перевіряють виріб безпосередньо в автоматизованій комірці

Дані та аналітика

інформація передається у мережу для моніторингу, аналізу та прогнозування

IIoT створює замкнений цикл: обладнання → дані → аналіз → рішення → коригування процесу.

PLM, MES та ERP: інформаційний «хребет» виробництва

Різні рівні керування працюють з узгодженими виробничими даними



ERP замовлення • ресурси • закупівлі • фінанси
планує, що і коли потрібно підприємству

MES завдання цеху • виконання • простої • завантаження
керує виробництвом у реальному часі

CNC верстати • роботи • датчики • контроль
фізичний рівень виконання операцій

PLM — єдиний цифровий простір життєвого циклу виробу
CAD-моделі • креслення • специфікації • технологічні дані • історія змін

PLM зберігає дані про виріб, ERP планує ресурси, MES керує виконанням, а обладнання реалізує процес фізично.

Цифровий двійник та штучний інтелект

Фізичний об’єкт і його цифрове представлення постійно обмінюються даними



Дані від обладнання

температура • вібрація • навантаження • час циклу • стан інструмента

Digital Twin

модель відображає фактичний стан об’єкта та дозволяє моделювати сценарії

AI-аналітика

виявлення дефектів • прогноз зносу • оптимізація режимів • пошук закономірностей

Інженерне рішення

результати аналізу повертаються у процес для коригування параметрів і конструкції

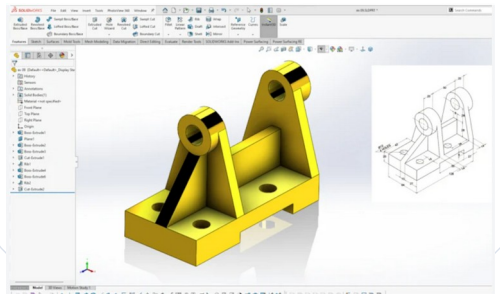
AI-контроль дефектів | прогноз зносу | оптимізація режимів | генеративний дизайн

Практичний маршрут матеріалізації деталі

Один цифровий ланцюг: від 3D-моделі до виготовлення, контролю та коригування

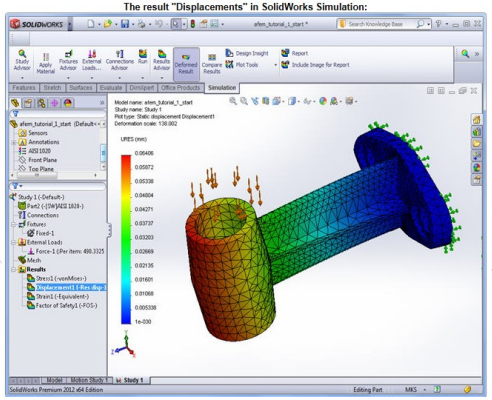
1 CAD-модель

форма • розміри • матеріал



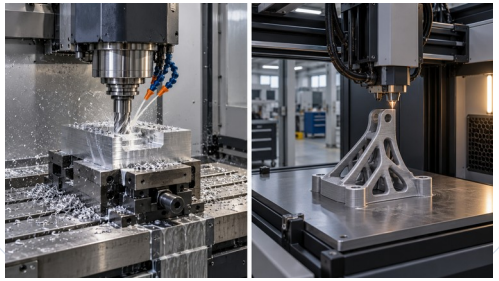
2 CAE

міцність • жорсткість • перевірка



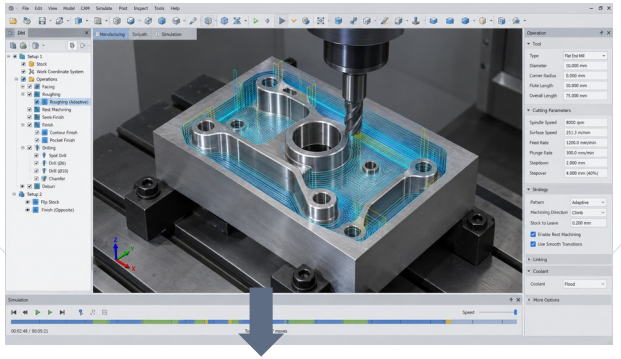
3 Спосіб виготовлення

CNC / 3D-друк / гібрид



4 CAM

бази • інструмент • режими • траєкторії



5 Постпроцесор

CAM → G-code для конкретної ЧПК

```
N10 G21  G90 G54
T01 M06  S8000 M03
G01 X60 Y0 F500
```

6 Матеріалізація

обробка на ЧПК або 3D-друк



7 Контроль

геометрія • розміри • поверхня



Замкнений цикл: результати контролю коригують CAD-модель, режими, інструмент або базування.

Що отримує підприємство і що змінюється для інженера

Цифровізація дає переваги, але підвищує вимоги до системності, даних і компетентностей



Інженер працює з усім цифрово-виробничим ланцюгом

Переваги

- швидше внесення змін, менше невдалих прототипів
- коротше переналагодження, краща повторюваність і контроль
- масова індивідуалізація та накопичення виробничих даних

Виклики

- сумісність форматів і систем, кібербезпека
- якість та версійність даних, вартість впровадження
- потреба у навчанні персоналу та перевірці цифрових рішень

Компетентності інженера

- CAD / CAE / CAM, основи ЧПК і технології
- базування, інструмент, режими, читання виробничих даних
- автоматизація, IIoT і критична перевірка AI-рішень

Головна компетентність майбутнього інженера — бачити не окрему програму, а весь цифрово-виробничий ланцюг.

Що таке системи ЧПК

ЧПК — точність в ідеях, реальність у деталях

Система ЧПК – це комплекс апаратних та програмних засобів, призначений для автоматизованого керування технологічним обладнанням (найчастіше — верстатами) на основі введеної в неї програми.

В комплекс входить комп'ютер (цифровий контроллер) на якому використовується спеціальне програмне забезпечення. По його командам електронні драйвери вмикають сервоприводи або інші механізми і додатково відслідковують правильність роботи цих механізмів.



Фактично це інформаційний центр верстата, який читає цифрові інструкції і точно виконує їх, переміщуючи інструменти та заготовку для виготовлення деталі.

ЧПК та CNC (Computer numerical control) у сучасному контексті є синонімами, хоча термін CNC спочатку підкреслював використання саме комп'ютера як основного контролера.

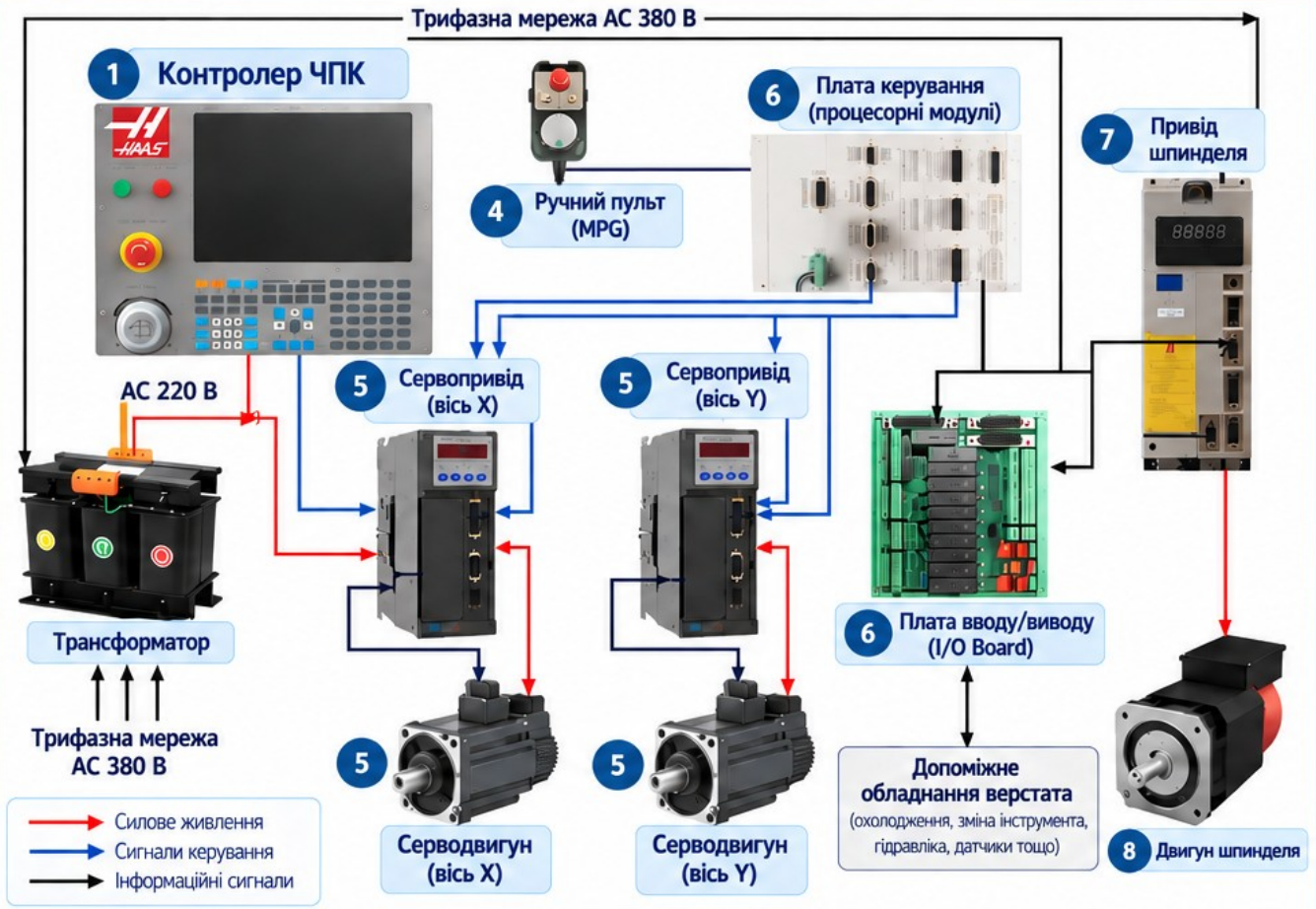
Керуюча програма → Контролер ЧПК → Електронні драйвери → Сервоприводи і механізми → Рух інструментів та заготовки

Сучасні технології створюють можливості

Структурна схема системи ЧПК (Haas)

Призначення основних елементів

CNC MACHINE TOOLS
BUILT TO MAKE YOU BETTER



1 Контролер ЧПК
Читає керуючу програму, формує команди керування осями, шпинделем і допоміжними функціями.

2 Живлення і трансформатор
Трифазна мережа AC 380 В надходить на трансформатор, який формує потрібні напруги (зокрема AC 220 В) для живлення електронних компонентів.

3 Трансформатор
Знижує напругу з 380 В до необхідних рівнів (наприклад, 220 В) для живлення контролера, сервоприводів, плат і периферії.

4 Ручний пульт (MPG)
Дозволяє оператору вручну переміщувати осі та виконувати налагодження верстата.

5 Сервоприводи і серрродвигуни
Сервоприводи отримують сигнали від контролера і керують струмом, швидкістю та моментом серводвигунів осей (X, Y тощо). На двигунах встановлені енкодери, які передають інформацію про фактичне положення.

6 Плата вводу/виводу (I/O Board)
Забезпечує обмін сигналами з датчиками та керування допоміжними пристроями: охолодження, зміна інструмента, гідравліка, пневматика, освітлення, кінцеві вимикачі тощо.

7 Привід шпинделя
Керує частотою обертання і напрямком обертання двигуна шпинделя відповідно до команд ЧПК (наприклад, S3000 M03).

8 Двигун шпинделя
Забезпечує обертання шпинделя з заданою швидкістю.

Принцип роботи системи

Керуюча програма → Контролер ЧПК → Сервоприводи / привід шпинделя → Двигуни (осі, шпиндель) → Механічний рух верстата

Зворотний зв'язок (енкодери, датчики)

Переваги системи ЧПК

- Висока точність і повторюваність
- Автоматизація обробки
- Надійність та стабільна робота
- Гнучкість налаштування
- Мінімальне втручання оператора

PRECISION
PRODUCTIVITY
PEOPLE

Види верстатів з ЧПК

Types of CNC machine tools

Сучасні технології для точного майбутнього!

Токарні верстати з ЧПК
CNC lathes



- Точіння зовнішніх і внутрішніх поверхонь
- Нарізання різьби
- Відрізання, канавки, фаски



Фрезерні верстати з ЧПК
CNC milling machines

Вертикальні
Vertical milling machine



- Обробка площин, пазів, кишень
- Контури, отвори, 3D-поверхні



Горизонтальні
Horizontal milling machine



- Висока продуктивність
- Обробка складних деталей
- Серійне виробництво



Фрезерні обробні центри
CNC machining centers

Вертикальний ОЦ
Vertical machining center



- Комплексна обробка
- Зміна інструмента (АТС)
- 3–4–5 осей



Горизонтальний ОЦ
Horizontal machining center



- Висока жорсткість
- Обробка з 4–5 осей
- Автоматизація



Токарно-фрезерні центри
CNC mill-turn centers



- Точіння + фрезерування
- Комплексна обробка
- Менше встановлень
- Висока точність



5-осьові обробні центри
5-axis CNC machines



- Одночасна обробка по 5 осях
- Складні 3D-поверхні
- Висока точність
- Авіаційна та медична галузі



Свердлильні верстати з ЧПК
CNC drilling machines



- Свердління отворів
- Зенкування, розгортання
- Нарізання різьби (жорстке)



Шліфувальні верстати з ЧПК
CNC grinding machines



- Плоске, циліндричне, внутрішнє шліфування
- Висока точність і якість поверхні



Електроерозійні верстати
EDM machines



- Обробка твердих матеріалів
- Складні контури і порожнини
- Безконтактна обробка



Лазерні верстати з ЧПК
CNC laser cutting machines



- Різання листового матеріалу
- Висока швидкість
- Мінімальна зона термічного впливу



Плазмові / Гідроабразивні верстати з ЧПК
CNC plasma / waterjet cutting machines



- Різання металу, каменю, композитів
- Великі товщини
- Складні контури без термічного впливу

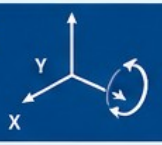


Кількість керованих осей:
Number of controlled axes:

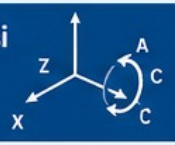
3-осьові
3-axis



4-осьові
4-axis



5-осьові
5-axis



Різні верстати – більше можливостей!

Основні види фрезерних операцій

Different types of milling operations



Схематичне розташування інструментів відносно заготовки

Класифікація операцій

Тип операції визначає геометрію інструмента та траєкторію його руху.

1. **Фрезерування уступів**
   Shoulder milling
2. **Торцеве фрезерування**
   Face milling
3. **Профільне фрезерування**
   Profile milling
4. **Фрезерування пазів і відрізання**
   Groove milling / parting off
5. **Фрезерування фасок**
   Chamfer milling
6. **Токарне фрезерування**
   Turn milling
7. **Обробка зубчастих коліс**
   Gear machining
8. **Отвори, порожнини та кишені**
   Holes, cavities / pocketing

Вибір операції › тип фрези › траєкторія › якість поверхні та продуктивність

Плавний вхід фрези в різання

Менше ударів → довший ресурс пластин

Roll into cut • постійне залучення фрези

Траєкторія входу інструмента



✕ різкий / прямий вхід ✓ плавне «закочування»

Суть прийому

Фрезу бажано вводити у різання по плавній траєкторії, а не різко через край заготовки.

Це зменшує ударне навантаження на різальні пластини, знижує вібрації та допомагає стабільніше формувати стружку.

Рекомендації

- ✓ **Плавний вхід**
  програмувати roll into cut.
- ✓ **Якщо неможливо**
  зменшити подачу під час входу.
- ✓ **Попутне фрезерування**
  стружка формується від товстої до тонкої.
- ✓ **Діаметр фрези**
  на 20–50% більший за ширину заготовки.
- ✓ **Положення фрези**
  зміщувати від центра для тоншої стружки на виході.

Що дає плавна траєкторія?

менше входів/виходів → менше ударів → стабільніша стружка → менший знос → вища продуктивність

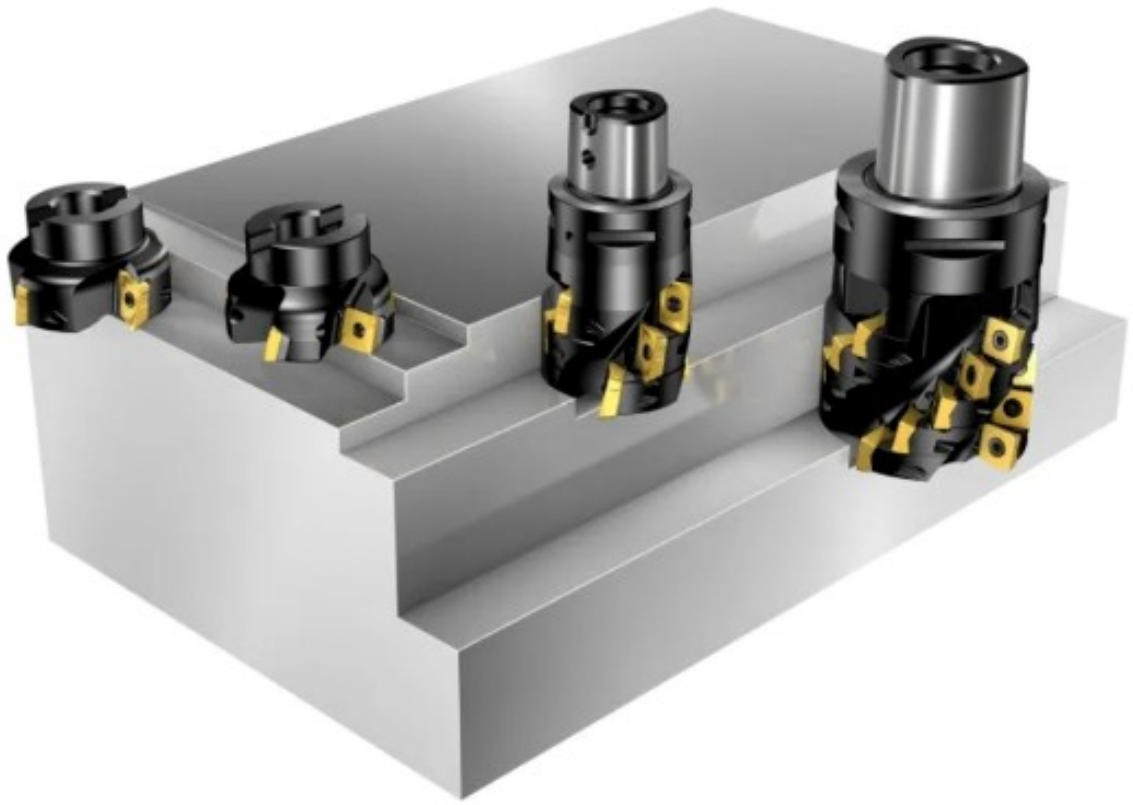
Головне:

Фреза має входити в матеріал м'яко й залишатися в різанні якомога стабільніше.

Фрезерування уступів

Shoulder milling

Уступ = площина + вертикальна стінка



Суть операції

Фрезерування уступів — це обробка, під час якої одночасно формують горизонтальну площину та вертикальну стінку уступу, зазвичай з кутом 90°.

Операції

- уступ + площина
- кромкове фрезерування
- обробка тонких стінок

Інструменти

- кінцева фреза
- фреза 90°
- корпусна фреза з пластинами

Важливо

Точність уступу залежить від жорсткості системи, вильоту інструмента та правильного вибору фрези.

Фрезерування уступів застосовують для отримання ступінчастих поверхонь, базових полиць, напрямних, пазів і корпусних елементів.

90° уступ → контроль геометрії → якісна деталь

Фрезерування пазів (канавок)

Groove or slot milling

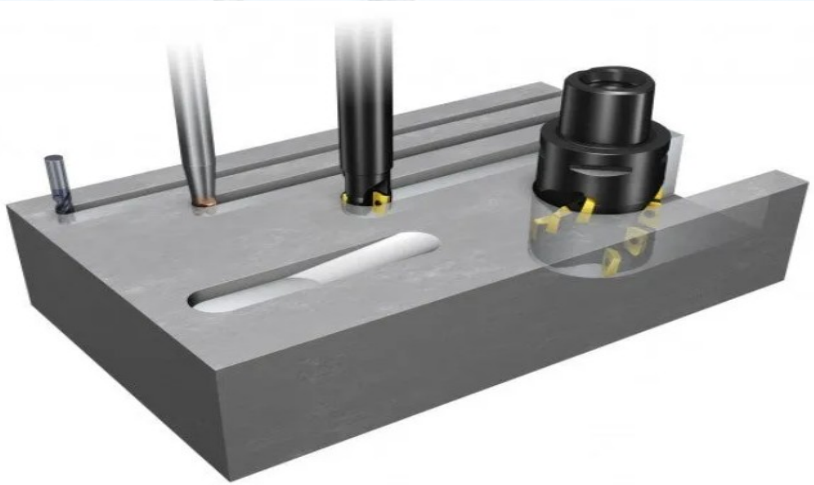
Різні пази — більше можливостей!

Суть операції

Фрезерування пазів — це операція, при якій у заготовці формують канавки (пази) з використанням бічного і торцевого фрезерування або кінцевого фрезерування.



Приклад фрезерування пазів



Основні особливості

- Пази можуть бути короткими або довгими
- Відкритими або закритими
- Прямими або криволінійними
- Глибокими або неглибокими
- Широкими або вузькими
- Вибір інструмента залежить від ширини, глибини і довжини паза
- Доступний тип верстата і частота виконання операції впливають на вибір інструмента

Переваги фрезерування пазів (бічне і торцеве)

- \+ Відкриті пази
- \+ Глибокі пази
- \+ Регульована ширина/допуски
- \+ Фрезерування групи пазів
- \+ Відрізання
- ✓ Широкий діапазон ширини і глибини

Обмеження

- − Закриті пази
- − Тільки прямолінійні пази
- − Складніше видалення стружки

Фрезерування пазів широко застосовується для виготовлення канавок, шліців, технологічних пазів, відрізання та інших елементів у деталях різної складності.

Точні пази — надійні конструкції!

Фрезерування отворів і порожнин (кишень)

Milling holes and cavities / pockets

Суть операції

Фрезерування отворів і кишень застосовують, коли потрібно сформувати отвір, поглиблення або закриту порожнину не лише свердлінням, а й керованою траєкторією фрези.

Інструмент може входити у матеріал похило, по спіралі, зануренням або пошарово.

Вибір методу залежить від:

- ширини та глибини кишені
- відкритої чи закритої форми
- жорсткості інструмента
- можливостей верстата
- видалення стружки



Приклад способів фрезерування отворів і кишень

Для чого використовують

- кишені та гнізда
- отвори великого діаметра
- замкнені контури
- внутрішні кути
- полегшувальні порожнини

Ключова ідея

Траєкторія підбирається під форму порожнини: для глибоких кишень потрібне надійне врізання і хороше відведення стружки.

Способи обробки

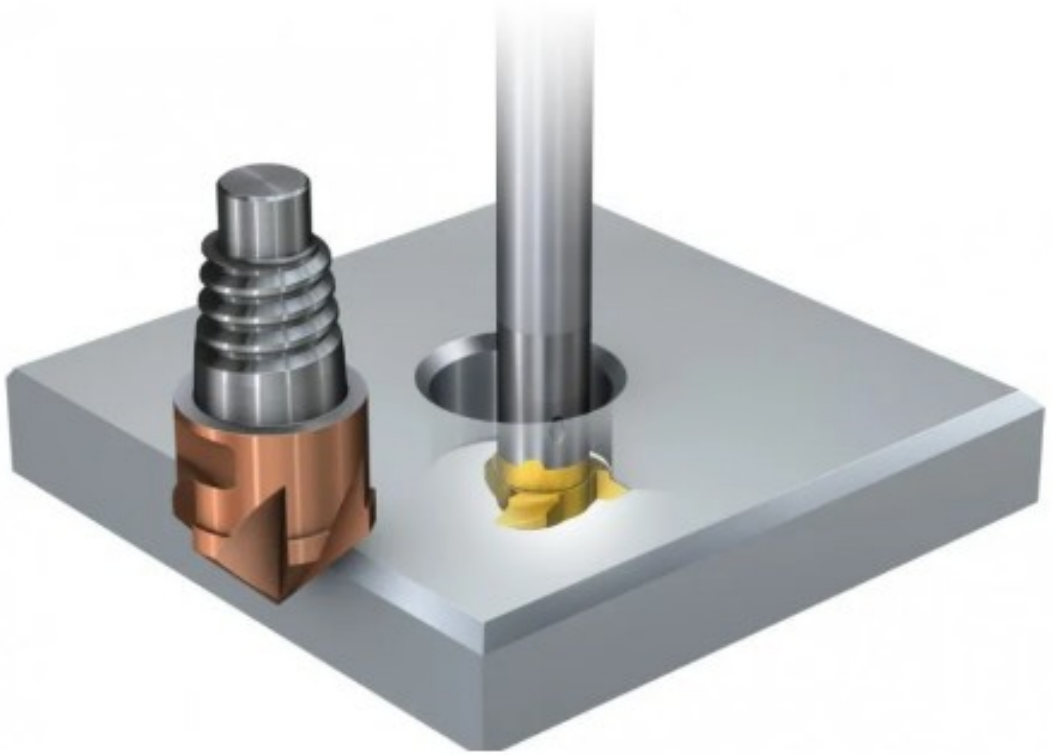
1. Лінійне похиле врізання
2. Кругове / спіральне врізання
3. Розширення отвору
4. Кругове зовнішнє фрезерування
5. Плунжерне фрезерування
6. Переривчасте заглиблення
7. Пошарове фрезерування
8. Закриті кишені та кути

Головний висновок: немає одного універсального способу. Інструмент і траєкторію обирають за формою, глибиною, жорсткістю та продуктивністю.

Фрезерування фасок

Chamfer milling

Кромка без задирок → якісне складання



Обробка кромки фасковою фрезою

Що це таке?

Фрезерування фасок — це обробка кромки деталі для формування нахиленої поверхні, найчастіше під кутом 45°.

Використовують для:

- зняття фасок на кромках;
- V-подібних канавок;
- видалення задирок;
- підготовки під зварювання;
- обробки піднутрень.

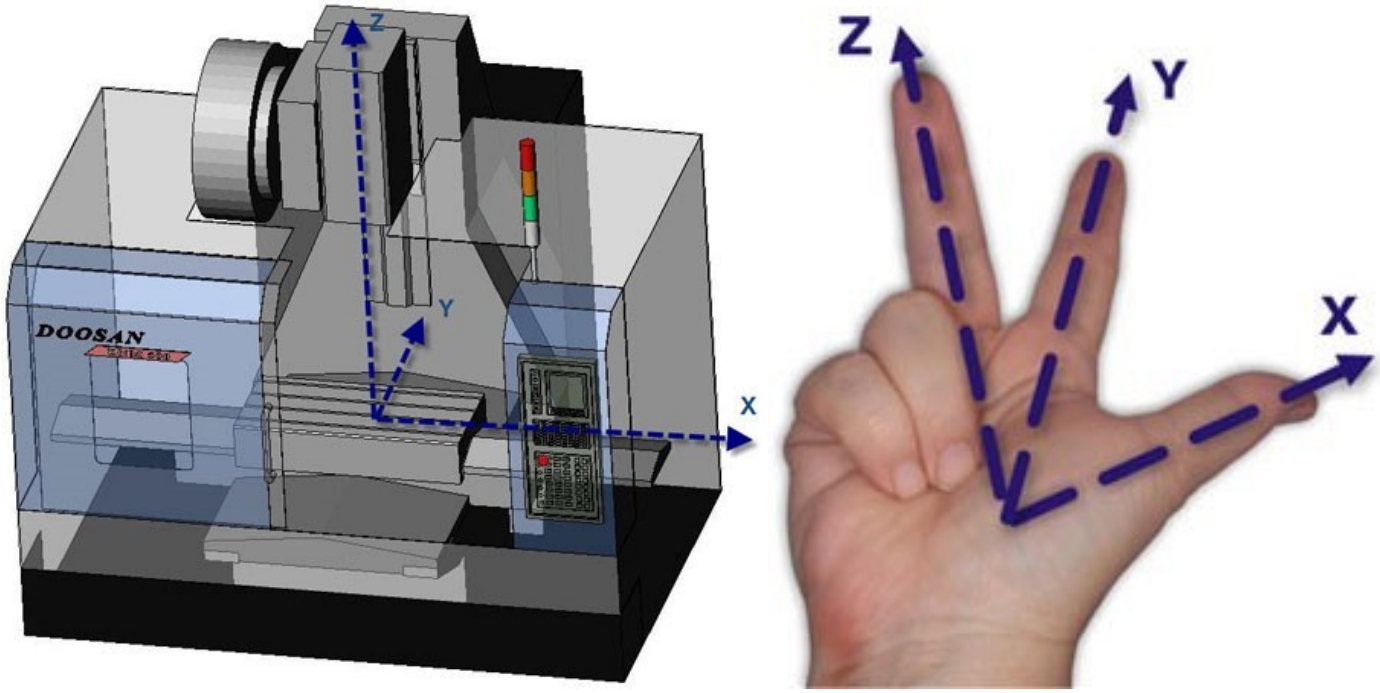
Яким інструментом?

- фаскова фреза;
- кінцева фреза;
- мала торцева фреза;
- кромкова фреза;
- спеціальний інструмент.

Кромка деталі → Підведення фрези → Зняття фаски → Видалення задирок → Якісна кромка

Фаска зменшує гостроту кромки, полегшує складання та покращує безпечність деталі.

Система координат верстата з ЧПУ



Визначення координат верстата по правилу «правої руки»

Конфігурації (осі) фрезерних обробних центрів

3-осьовий VMC



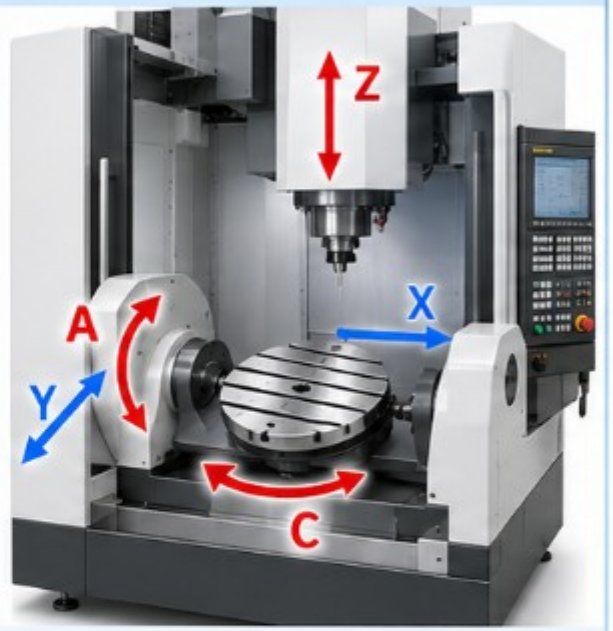
Вертикальний обробний центр; стіл фіксований; типові операції: площини, пази, отвори

4-осьовий VMC/HMC



Додаткова поворотна вісь; менше перевстановлень; доступ до кількох сторін деталі.

5-осьовий зі столом



X, Y, Z + A/C; шпиндель фіксований; складні поверхні за один установ.

5-осьовий з поворотною головкою



X, Y, Z + B/C; найбільш гнучка обробка складних деталей.

Більше осей → менше установів → вища точність і продуктивність