

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ
з дисципліни
«Проектування та багатокоординатна обробка в CAD/CAM системах»

для здобувачів освіти
за другим (магістерським) рівнем вищої освіти,

спеціальності G11 Машинобудування,
усіх освітніх програм та форм навчання

Конспект лекцій з дисципліни «Проектування та багатокординатна обробка в CAD/CAM системах» для здобувачів освіти за другим (магістерським) рівнем вищої освіти, спеціальності G11 Машинобудування усіх освітніх програм та форм навчання / Укл.: С.В. Танченко, В.В. Солоха – НУ «Запорізька політехніка», 2025. – 46 с.

Укладач: С.В. Танченко, ст. викладач
В.В. Солоха, доцент, к.т.н.

Рецензент: М.В. Фролов, доцент, к.т.н.

Відповідальний за випуск: В.П. Загородній зав. лаб.

Затвердженона засіданні кафедри
“Металорізальні верстати та інструмент”

Протокол № 1.
від “21” 08 2025

Рекомендовано
до видання НМК
Машинобудівного факультету
Протокол № 1.
від “26” 08 2025

ЗМІСТ

	С.
ВСТУП.....	4
ТЕМА 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ БАГАТОКООРДИНАТНОЇ ОБРОБКИ	5
1.1. Поняття координатних систем (машинна, деталі, інструмента).....	5
1.2. Кінематика багатокординатних верстатів (3+2, 5-осьові, гібридні)8	8
ТЕМА 2. КЛАСИФІКАЦІЯ СТРАТЕГІЙ ОБРОБКИ У БАГАТОКООРДИНАТНИХ СИСТЕМАХ ЧПУ	11
2.1 Контурна (profile / contour machining).....	14
2.2 Об'ємна (volumetric / area machining).....	16
2.3 Адаптивні стратегії (Adaptive clearing / Trochoidal milling / Spiral toolpaths)	19
2.4 Спеціалізовані стратегії обробки.....	23
ТЕМА 3. ОСОБЛИВОСТІ ПРОЦЕСУ РІЗАННЯ ПРИ БАГАТОКООРДИНАТНІЙ ОБРОБЦІ	27
3.1 Вибір інструменту для багатокординатної обробки	27
ТЕМА 4. РОБОТА В TEBIS.....	34
4.1 Інтерфейс і структура проекту у Tebis	36
4.2 САМ модуль	37
4.2.1 Job Manager і технологія NCJob.....	38
4.2.2 Симуляція та аналіз траєкторій інструменту.....	40
4.3 Менеджмент виробництва та управління виробництвом.....	41
4.4 САД модуль	42
4.4.1 Особливості САД-модуля Tebis.....	43
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	46

ВСТУП

Багатокоординатна обробка являє собою технологію керування верстатами з числовим програмним управлінням (ЧПУ), за якої траєкторія руху різального інструмента формується одночасним управлінням більш ніж трьома координатами. У практичному застосуванні найчастіше використовують чотирьох- та п'ятиосьові системи, оскільки саме вони забезпечують достатню гнучкість для реалізації складних технологічних завдань.

Використання багатокоординатної обробки дозволяє істотно скоротити кількість переналаджень верстата. Якщо при трьохосьовій обробці для виготовлення складної просторової деталі часто виникає потреба у багатьох операціях із фіксацією заготовки у різних положеннях, то при наявності додаткових осей більшість із цих дій виконується за один установ. Це не лише зменшує витрати часу, але й підвищує точність, адже кожна додаткова установка заготовки неминуче призводить до похибок суміщення.

Ще однією важливою перевагою є можливість якісної обробки складних криволінійних поверхонь. Приклади таких деталей включають турбінні лопатки з аеродинамічною формою, що потребує високої точності геометрії; медичні імпланти зі складним біонічним профілем; а також прес-форми й штампи, поверхні яких мають численні складні поверхні й радіуси. Тривісна обробка у таких випадках або неможлива, або потребує великої кількості допоміжних операцій, які роблять виробництво економічно не вигідним.

Додатковим чинником ефективності є підвищення точності та якості поверхні. Завдяки можливості орієнтації інструмента у просторі забезпечується оптимальний кут різання, зменшується довжина вильоту інструмента, що, у свою чергу, знижує рівень вібрацій і підвищує стійкість процесу. Як результат, отримана поверхня має меншу шорсткість і краще відповідає вимогам до високоточних виробів.

У сукупності всі ці фактори зумовлюють скорочення виробничого циклу. Тривалість виготовлення деталі зменшується завдяки скороченню кількості установок, зниженню необхідності у проміжних технологічних операціях і підвищенню стабільності самого процесу. Це робить багатокоординатну обробку невід'ємною складовою сучасного високотехнологічного виробництва.

Приклади виробів де застосовується багатокоординатна обробка наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 - Періоди експлуатації обладнання

Галузь	Приклади застосування
Авіаційне та космічне машинобудування	Елементи силових установок; Деталі складних аеродинамічних форм
Виробництво енергетичного обладнання	Робочі колеса турбін; Компресори; Генератори
Автомобільна промисловість	Штампи; Прес-форми; Прототипи; Серійні деталі
Медичні технології	Індивідуальні імпланти; Протези
Інструментальне виробництво	Прес-форми; Штампи; Оснащення

ТЕМА 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ БАГАТОКООРДИНАТНОЇ ОБРОБКИ

Багатокоординатна обробка є розвитком традиційної трьохкоординатної технології, яка обмежена рухом інструмента лише вздовж осей X , Y та Z . Додавання додаткових поворотних осей (A , B , C) дозволяє орієнтувати інструмент у просторі та обробляти заготовку з різних боків без повторних переналагоджень. Основою цієї технології є правильне узгодження геометрії заготовки, систем координат і кінематики верстата, що у комплексі дозволяє автоматизованим системам САМ створювати оптимальні траєкторії руху інструмента.

1.1. Поняття координатних систем (машинна, деталі, інструмента)

Використання координатних систем у верстатів з ЧПУ дають можливість описати положення робочих органів та їх рухи в просторі. Для багатокоординатної обробки (3+ осі) розуміння і вірне налаштування трьох типів систем — **машинної (MCS)**, системи **деталі (WCS)** і системи інструмента (**TCS**) — є передумовою як коректного програмування, так і гарантії точності, уникнення колізій і безпечного запуску NC-програму.

Машинна система координат (Machine Coordinate System — MCS)

Машинна система координат (Рис. 1.1) жорстко зв'язана з конструкцією верстата і визначає «фізичний» нуль машини (machine home, reference position). У MCS осі позначаються як X , Y , Z (лінійні) і, за

потреби, A/B/C (обертальні). MCS використовується контролером для представлення абсолютних позицій і є основою, від якої відлічуються усі інші зміщенні або локальні системи. **Практичне значення:** будь-яке переміщення, повернення в нуль чи команда з абсолютними координатами кінцево інтерпретується в MCS — тому позиція MCS має бути верифікована після калібрувань, перемикань режимів та при запуску програми.

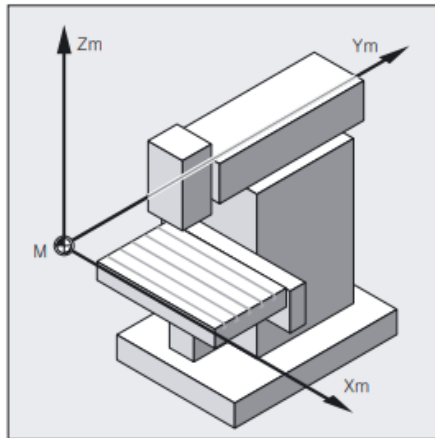


Рисунок 1.1 - Машинна система координат (MCS)

Система координат деталі (Workpiece Coordinate System — WCS)

Система координат деталі (Рис. 1.2)— це локальний набір осей, прив'язаний до технологічної бази заготовки (позиція нуля заготовки — work zero, G54...G59 в стандартних контролерах). Управляючі програми обробки пишуться відносно WCS, а постпроцесор переводить траєкторії у рухи відносно MCS із врахуванням зміщення робочої системи координат відносно базової машинної системи.

Ключові моменти при виборі WCS:

- технологічна зручність (точка на деталі до якої легко прив'язати інструмент при його онулені);
- мінімізація негативних координат і як наслідок спрощення опису траєкторії;
- узгодження з кресленням та конструкторською системою.

Практичні підказки: в САМ-середовищі зазвичай створюють декілька WCS для різних операцій/установок; необхідно перевіряти відповідність WCS у симуляції перед постпроцесингом.

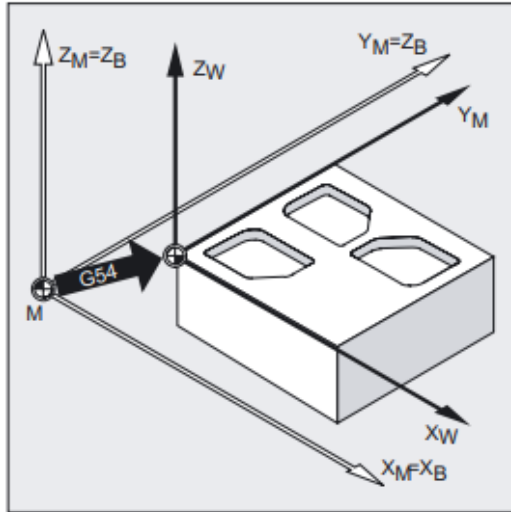


Рисунок 1.2 - Система координат деталі (WCS) та її зміщення відносно MCS

Система координат інструмента (Tool Coordinate System — TCS)

Система координат інструмента (Рис. 1.3) визначає локальну систему, прив'язану до інструмента (точка початку відліку — зазвичай це геометрична вершина ріжучої частини інструмента). На розташування TCS впливають такі параметри інструмента: довжина інструмента (tool length offset), радіус (tool radius), форма (spherical, ballnose/flat end/taper) — і саме у цій системі CAM система обчислює корекції геометрії інструмента.

У багатокоординатній обробці роль TCS зростає: орієнтація інструмента (нахил, поворот) змінює відносно положення ріжучої кромки до поверхні, отже помилки в TCS призводять до систематичних похибок у всіх обробках, особливо при складних 5-осьових траєкторіях. Тому TCS має бути точно вказана та перевірена (датчиками, калібруванням).

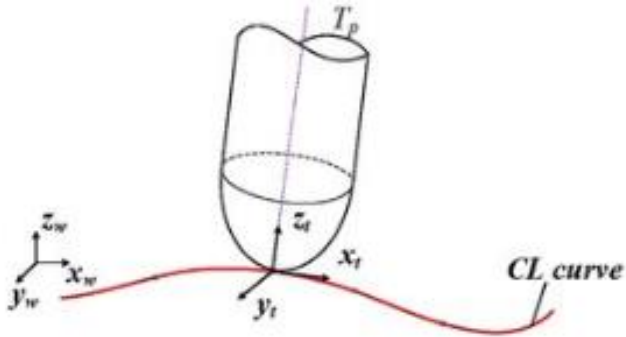


Рисунок 1.3 - Система координат інструмента (TCS)

1.2. Кінематика багатокординатних верстатів (3+2, 5-осьові, гібридні)

Кінематика багатокординатних верстатів визначає характер руху робочих органів (столу, інструмента, шпинделя) відносно заготовки та безпосередньо впливає на точність, продуктивність і технологічні можливості системи числового програмного керування. У сучасному машинобудуванні застосовують декілька принципів кінематичних схем, серед яких найбільш поширені:

- трьохкоординатна з додатковим позиціонуванням (3+2);
- п'ятиосьова;
- гібридні конфігурації.

Система 3+2 (три координати + дві осі позиціонування)

Верстат має три лінійні осі (X, Y, Z), доповнені двома поворотними (A, B або A, C).

Додаткові осі не працюють у режимі безперервного управління, а використовуються для орієнтації заготовки чи інструмента у просторі перед початком різання.

Основна характеристика — підвищена гнучкість у виборі положення заготовки, що дозволяє зменшити кількість переналагоджень, уникати колізій і покращувати доступ до важкодоступних поверхонь.

3+2 верстати часто застосовують для корпусних деталей, формотворних поверхонь, а також у випадках, коли важлива відносно невелика собівартість обладнання при збереженні технологічної універсальності.

П'ятиосьові верстати з безперервним керуванням

У цій кінематичній конфігурації усі п'ять координат (3 лінійні + 2 обертальні) можуть працювати одночасно. Забезпечується безперервне відпрацювання складних траєкторій, що особливо важливо при виготовленні: лопаток турбін, штампів і прес-форм, медичних імплантів, аерокосмічних елементів.

Основні кінематичні архітектури:

— Стіл-стіл (table-table) (Рис. 1.4) – обертання заготовки навколо двох осей.

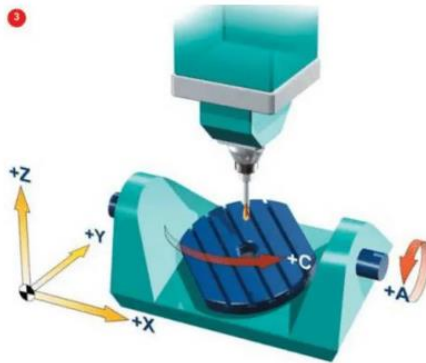


Рисунок 1.4 - Стіл-стіл (table-table) конфігурація

— Шпиндель-стіл (head-table) – одна поворотна вісь на столі, інша у шпиндельній голівці.

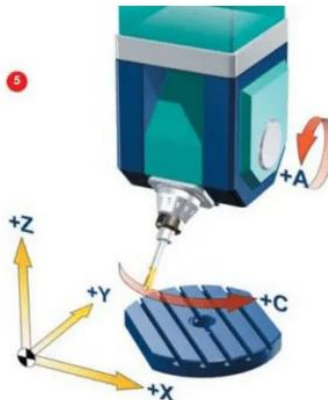


Рисунок 1.5 - Шпиндель-стіл (head-table) конфігурація

— Шпиндель - шпиндель (head-head) (Рис. 1.6)– обертальні осі інтегровані у шпиндель.

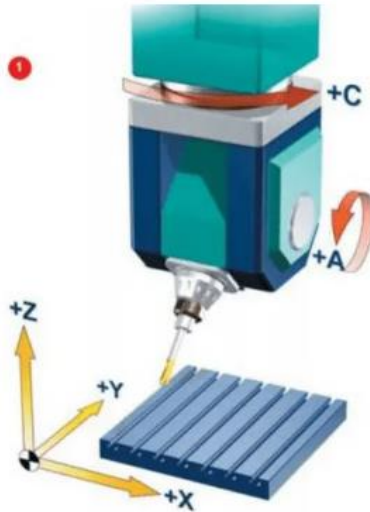


Рисунок 1.6 - Шпиндель - шпиндель (head-head) конфігурація

Вибір конфігурації залежить від розмірів деталі, вимог до точності та особливостей обробки (Табл. 1.2).

Таблиця 1.2 – Особливості вибору конфігурації багатокординатного верстату

Конфігурація	Принцип роботи	Оптимальний вибір за умовами	Обмеження
Table-Table (дві обертальні осі на столі)	Заготовка обертається відносно двох осей, шпиндель переміщається по лінійних осях.	Високоточна інструментальна обробка (прес-форми, лопатки).- Невеликі й середні заготовки. Коли потрібна жорсткість та стабільність.	Обмеження по масі та розміру заготовки. Низька динаміка через інерцію столу.

Кінець таблиці 1.2

Head–Table (оберт шпинделя + одна вісь на столі)	Частина рухів виконується заготовкою (стіл), частина інструментом (шпиндель).	Середні та великі корпусні деталі. Висока точність при відносно великому робочому просторі. Баланс між універсальністю та жорсткістю.	Складніше налаштування. Обмеження у швидкості та жорсткості порівняно з head–head.
Head–Head (дві обертальні осі у шпинделі)	Шпиндельна головка може нахилитися у двох площинах, заготовка залишається нерухомою.	Великогабаритні та важкі деталі. Високошвидкісна обробка (HSM). Деталі складної геометрії з важкодоступними поверхнями. Масове виробництво, де важлива автоматизація.	Похибки при великих вильотах інструмента. Вища вартість обладнання й ПЗ. Вимогливість до точності калібрування.

ТЕМА 2. КЛАСИФІКАЦІЯ СТРАТЕГІЙ ОБРОБКИ У БАГАТОКООРДИНАТНИХ СИСТЕМАХ ЧПУ

Ефективність функціонування багатокоординатних верстатів із ЧПУ значною мірою визначається не лише їх кінематичними можливостями, але й вибором оптимальної стратегії обробки. У багатокоординатних системах траєкторія інструмента, рух заготовки та кінцева якість поверхні формуються на основі алгоритмів, закладених у САМ-системи. Саме тому стратегія обробки розглядається як інтегральна складова технологічного процесу, що поєднує геометричні, кінематичні та режимні аспекти.

Вибір стратегії обробки є одним із ключових етапів розробки технологічного процесу при багатокоординатній обробці.

Під **стратегією** розуміють сукупність принципів і закономірностей організації траєкторії руху ріжучого інструмента у просторі, порядку здійснення робочих і допоміжних проходів, способів послідовного зняття припуску, а також методів узгодження кінематичних рухів верстата із

фізико-механічними властивостями матеріалу та конструктивними особливостями інструмента.

Раціональний вибір стратегії обробки визначає не лише продуктивність виробничого процесу, але й впливає на точність, параметри мікрогеометрії обробленої поверхні та стійкість інструменту. З іншого боку, невдале узгодження стратегії із реальними умовами обробки може призвести до перевантаження системи приводу, виникнення вібрацій, прискореного зношування інструмента та погіршення якісних характеристик поверхні.

При багатокоординатній обробці особливе значення має взаємозв'язок між стратегією обробки та кінематикою верстата. Геометрична конфігурація розташування осей, їх інтерполяційні можливості та динамічні характеристики визначають допустимі типи траєкторій, максимальні швидкості переміщення та точність відтворення складних контурів. Таким чином, стратегія обробки постає як багатофакторна оптимізаційна задача, де необхідно враховувати одночасно:

- геометричну складність поверхні,
- об'єм припуску, що підлягає видаленню,
- вимоги до шорсткості та точності,
- ресурсні характеристики інструменту,
- різноманітність кінематичних схем (3-осьові, 3+2-осьові, 5-осьові та гібридні верстати), в яких по-різному реалізуються траєкторії;
- технологічні обмеження конкретного обладнання.

З огляду на зазначене, вибір стратегії обробки у сучасних умовах розглядається не лише як технологічне рішення, а й як інтелектуальний елемент системи автоматизованого проектування (САМ), що безпосередньо впливає на якість готової продукції, економічність виробництва та конкурентоспроможність підприємства.

Загальна класифікація стратегій обробки у багатокоординатних системах наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 - Загальна класифікація стратегій обробки у багатокоординатних системах

Критерій класифікації	Види стратегій	Характеристика
За технологічною функцією	Чернова (Roughing)	Максимальне видалення припуску, підготовка базової форми.
	Напівчистова (Semi-finishing)	Формування проміжної геометрії, зменшення залишкового припуску.

Продовження таблиці 2.1

	Чистова (Finishing)	Досягнення кінцевої точності та якості поверхні.
	Доведення та суперфініш (Polishing / Superfinishing)	Досягнення мікронних допусків, низької шорсткості.
За геометричною логікою траєкторії	Контурні (Profile / Contour)	2D-контурне фрезерування (зовнішні/внутрішні контури, пази); 3D-контурне формоутворення (лопатки, матриці).
	Об'ємні (Volumetric / Area)	Заповнення площин паралельними/спіральними проходами; вибірка кишень і порожнин.
	Адаптивні (Adaptive clearing)	Трохоїдальні та плавно-спіральні траєкторії.
	Спеціалізовані стратегії	Обробка каналів (Slot), змінної кривизни (Swarf), лопаток/турбін/крильчаток (Blade/Impeller), гвинтових поверхонь (Helical/Screw).
За кількістю проходів	Однопрохідні	Формування поверхні за один цикл (тонкі стінки, делікатні деталі).
	Багатопохідні	Послідовне зняття шару за шаром (типово для roughing, area machining).
За кінематичними особливостями	3-осьові	Класичні XY + Z.
	3+2-осьові (positional)	Фіксація поворотних осей, обробка складних ділянок.
	5-осьові одночасні (simultaneous)	Плавна координація всіх осей.
	Гібридні	Поєднання ЧПК і адитивних / лазерних технологій.
За швидкісними режимами	Традиційні	Стандартні швидкості та подачі.
	HSM (High-Speed Machining)	Високі швидкості, малі глибини, мінімізація теплових деформацій.
	HPC (High-Performance Cutting)	Великі подачі та глибини різання, підвищена жорсткість.
	HEM (High-Efficiency Machining)	Адаптивні САМ-алгоритми для рівномірного зняття матеріалу.

Кінець таблиці 2.1

За типом поверхні	Площинні	Торцеве фрезерування, паралельні проходи.
	Криволінійні	Контурно-об'ємні траєкторії з плавною інтерполяцією.
	Комбіновані	Поєднання кількох стратегій (наприклад, <i>roughing</i> + <i>swarf</i>).

Класифікація за кількістю проходів є допоміжною, оскільки сама по собі не визначає якість або методику формоутворення, а лише описує організацію процесу.

Класифікація кінематичними особливостями — це більше характеристика верстата, ніж стратегії. Вибір кінематики впливає на можливості виконання тієї чи іншої траєкторії, але не визначає методику формоутворення.

Класифікація швидкісними режимами відображає режимні параметри, але не саму логіку траєкторії. Вона буде розглядатися у темах оптимізації параметрів обробки.

Класифікація типом поверхні фактично є наслідком геометричної логіки траєкторії та не потребує окремого поглибленого аналізу, бо описується як частина контурних чи об'ємних стратегій.

Класифікація за технологічною функцією є відомою з основ різання металів. Вона застосовується незалежно від кількості координат верстата, тому її деталізація у контексті багатокоординатної обробки не додає принципово нової інформації.

Класифікація за геометричною логікою є найбільш суттєвою у багатокоординатній обробці. Саме геометрія траєкторії визначає спосіб формоутворення поверхні, плавність інтерполяції, навантаження на інструмент, можливість уникнення колізій та ефективність використання кінематики верстата.

2.1 Контурна (profile / contour machining)

Контурна обробка (Рис. 2.1) — це стратегія, за якої переміщення інструмента здійснюється уздовж заздалегідь заданої траєкторії, що чітко повторює контур деталі або її профіль. Такий метод спрямований на точне відтворення геометричних контурів (ліній, кривих, відрізків) як у двовимірному, так і тривимірному просторі, з мінімальним відхиленням від теоретичного креслення.

Контурна траєкторія будується або на основі геометрії CAD-моделі (контурні криві, сплайни, NURBS), або формалізується у CAM-системі як

проекція заданого профілю на задану площину або поверхню.

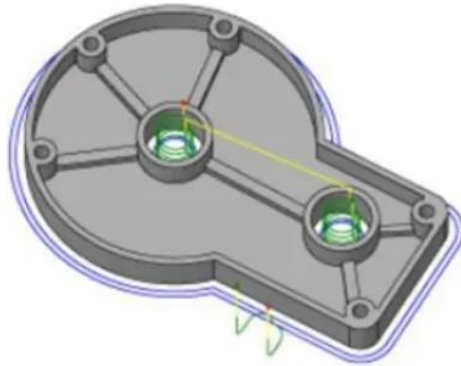


Рисунок 2.1 – Приклад контурної стратегії обробки

Цей метод може бути застосований як для чистової обробки профілів, так і для проміжних шарів припуску з метою збереження контурної точності.

Важливим параметром є інтерполяція — відтворення кривих з достатньою щільністю точок керування так, щоб кутові та криволінійні зміни траєкторії були плавними й не призводили до різких змін в орієнтації та напрямку руху інструменту чи обертових осей.

Приклади застосування:

— Формоутворючі поверхні штампів чи матриць — край контуру обробки задає межу готової форми, тому відхилення на контурі призведе до невідповідності деталі кресленню.

— Лопатки турбін — профіль лопатки має складну криволінійну форму, котра переходить між різними поверхнями; контурна обробка дозволяє зберегти геометрію на перетині профілю та поверхні.

— Кузовні чи дизайнерські елементи — бокові обводи автомобільних елементів, декоративні стилі, місця переходів між панелями, де важлива плавність і точність.

Контурна стратегія одна з найбільш чутливих до геометричних і кінематичних похибок при обробці.

Основні типи похибок:

1. Інтерполяційні похибки:

— некоректність апроксимація кривої невеликою кількістю сегментів або лінійних відрізків замість кривих елементів (сплайнів, дуг);

— похибки округлення або квантування у контролерах чи САМ-системах.

2. Кінематичні похибки обертальних осей:

— у 5-осьових конфігураціях обертальні осі підкреслюють значення точності, оскільки зміна нахилу або неправильна орієнтації може змінити точку контакту інструмента та деталі та призвести до відхилення профілю.

— похибка pivot-точки (встановленої осі обертання) або невірна геометрична модель кінематики верстата.

3. Динамічні похибки:

— коливання при високих прискореннях чи змінах швидкості руху, особливо на вигнутій траєкторії.

— відставання приводів або недостатня компенсація деформацій від інерційних сил.

4. Похибки через інструмент і контакт:

— Невірно заданий радіус або форма інструмента; в разі використання торцевих, конічних або сферичних інструментів, точність контурів залежить від коректної компенсації радіуса.

— Зношування інструмента / зміна геометрії під час обробки.

Методи зменшення похибок та забезпечення точності:

— Застосування кривих типу NURBS або сплайнів, які точніше відтворюють криві, ніж лінійні інтервали.

— Використання фільтрів і алгоритмів згладжування (smoothing) у САМ, а також передбачення контролем траєкторії (look-ahead) у контролері.

— Калібрування обертальних осей, перевірка pivot-точок, калібрування інструмента (tool calibration) перед обробкою.

— Контроль швидкості на кривинах: зниження подачі на крутих переходах, щоб уникнути коливань або відхилень.

— Використання цифрових двійників (digital twin) і онлайн-компенсацій (контурних помилок), що дозволяє прогнозувати і коригувати помилки до або під час обробки.

2.2 Об'ємна (volumetric / area machining)

Об'ємна стратегія передбачає формування траєкторій, що охоплюють площу або об'єм, а не лише окремих контур. У такому випадку інструмент послідовно переміщується по внутрішньому полю заготовки, знімаючи матеріал шарами, зазвичай за допомогою паралельних ліній, концентричних або спіральних траєкторій. Це дозволяє рівномірно охоплювати велику область і знімати значні обсяги матеріалу без залишків необроблених зон.

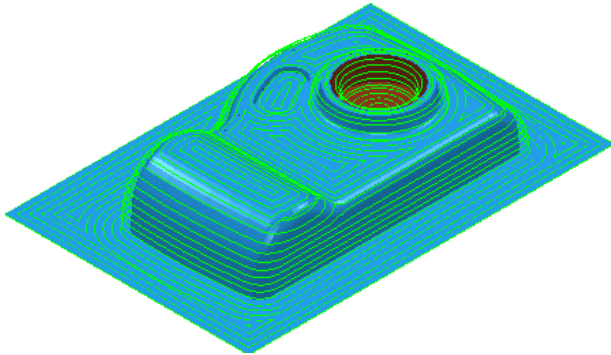


Рисунок 2.2 – Приклад об'ємної стратегії обробки

Основна мета об'ємної обробки — чорнове видалення припуску, швидке наближення форми заготовки до кінцевої геометрії. На відміну від контурної стратегії, що відтворює лише зовнішню чи внутрішню форму деталі, об'ємна орієнтована на повноцінне покриття всього робочого простору, що особливо актуально для складних тривимірних моделей.

Ключові особливості:

- використовує паралельні проходи, радіальні, спіральні або адаптивні траєкторії (adaptive clearing);

- забезпечує рівномірний розподіл навантаження на інструмент, що зменшує ризик поломки та підвищує стійкість ріжучої кромки;

- підходить для багатокоординатних систем, де площинна або об'ємна стратегія може виконуватись під різними кутами без додаткових переналагоджень;

- формує базові геометричні поверхні (кишені, порожнини, виступи), які згодом доопрацьовуються чистовими стратегіями.

Приклади застосування:

- створення порожнин у штампах та прес-формах;

- первинне формування об'ємних деталей із припуском;

- підготовка масивних базових поверхонь у авіаційних і транспортних конструкціях;

- чорнова обробка у високошвидкісному фрезеруванні (HSM), де особливо важливим є контроль відведення стружки та плавність траєкторій.

Інженерний аспект:

Сучасні САМ-системи (наприклад, Siemens NX, Mastercam, Fusion 360) реалізують алгоритми об'ємної обробки з оптимізацією кутів входу/виходу інструмента та підтримкою адаптивних траєкторій, що

автоматично підлаштовуються під змінний припуск. Це дозволяє уникати різких змін навантаження, скорочувати час обробки та підвищувати довговічність інструменту.

Джерела похибок і методи їх зменшення при використанні об'ємної стратегії обробки наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 - Джерела похибок і методи їх зменшення при об'ємній стратегії обробки

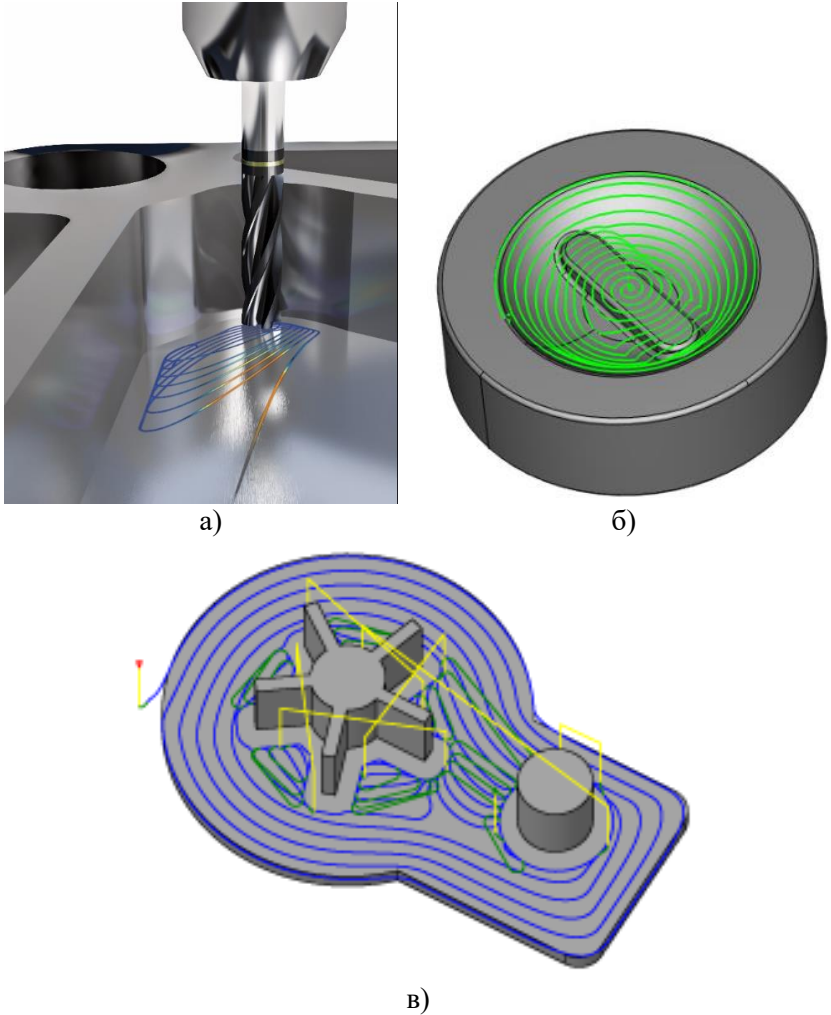
Джерело похибок	Сутність проблеми	Методи зменшення похибок та забезпечення точності
Нерівномірне знімання припуску	При чорновому видаленні матеріалу залишаються «острівці» чи нерівномірні стінки, що призводить до виникнення локальних навантажень	Використання адаптивних стратегій обробки (Adaptive Clearing); рівномірний розподіл траєкторій; САМ-аналіз залишкового припуску
Динамічні похибки через великі глибини різання	Виникають вібрації, особливо при обробці глибоких порожнин чи кишень	Зменшення подачі на глибоких ділянках; використання багатопрхідної обробки з поділом глибини на шари; застосування інструментів зі збільшеною жорсткістю
Деформації заготовки	При знятті великих об'ємів матеріалу змінюється напружений стан заготовки, що викликає викривлення	Попередня термообробка (зняття внутрішніх напружень); симетричне видалення матеріалу; чергування сторін обробки
Теплові похибки	Високе тепловиділення при великій площі контакту інструмента та заготовки	Використання системи СОЖ (мастильно-охолоджувальних рідин); застосування HSM (високошвидкісної обробки) із малим припуском; інтервальне охолодження
Неточність інтерполяції площин і об'ємів	Помилки у САМ-генерації траєкторій для кишень чи порожнин (наприклад, недостатня щільність точок)	Використання NURBS-інтерполяції або збільшення «щільності» траєкторій у САМ; перевірка G-коду у симуляторі

Кінець таблиці 2.2

Зношення інструмента при тривалих проходах	При обробці великих об'ємів інструмент нерівномірно зношується, що викликає відхилення у глибині різання	Введення автоматичного контролю довжини інструмента; регулярна заміна або перевстановлення; оптимізація режимів різання
Проблеми видалення стружки	У глибоких кишнях накопичується стружка, яка пошкоджує поверхню та створює додаткове навантаження	Використання високонапірного охолодження; проєктування траєкторій зі спіральними виходами для евакуації стружки; застосування інструментів із внутрішнім охолодженням

2.3 Адаптивні стратегії (Adaptive clearing / Trochoidal milling / Spiral toolpaths)

Адаптивні стратегії обробки (рис. 2.3) є розвитком класичних контурних та об'ємних методик і виникли у зв'язку з потребою рівномірного розподілу навантаження на інструмент при високошвидкісній (HSM) та високоефективній (HEM) обробці. Їх суть полягає у тому, що траєкторії інструмента формуються не як прості паралельні або замкнені контури, а за спеціальними законами (трохоїдальні, плавно-спіральні), що дозволяють уникати локальних перевантажень, зберігати постійну товщину зрізу та зменшувати сили різання.



а – трохоїдальне фрезерування (Trochoidal milling); б – спіральна траєкторія (Spiral toolpaths); в – адаптивне зміщення (Adaptive clearing)

Рисунок 2.3 - Адаптивні стратегії

Основні принципи адаптивних стратегій:

- постійне навантаження на ріжучу кромку: інструмент не заходить у матеріал різко, а поступово, підтримуючи стабільну товщину стружки;
- трохоїдальні траєкторії: інструмент рухається за складною кривою, що поєднує поступальний і обертальний рух, забезпечуючи малий

контакт з матеріалом та ефективно відведення тепла;

— спіральні-плавні траєкторії: замість традиційних “ступінчастих” або паралельних ходів застосовується безперервний рух по спіралі, що мінімізує раптові зміни напрямку;

— оптимізація для HSM та HPC: стратегія враховує високі швидкості обертання шпинделя і значні подачі, забезпечуючи одночасно зниження зносу інструмента.

Переваги:

— зменшення вібрацій завдяки плавним траєкторіям і відсутності різких змін напрямку;

— зниження теплових деформацій за рахунок рівномірного тепловиділення;

— значне подовження ресурсу інструмента, оскільки ріжуча кромка працює в стабільних умовах;

— підвищення продуктивності: можливо використовувати більші швидкості обертання при одночасно зниженому ризику поломки інструмента;

— можливість глибокого фрезерування вузьких кишень та каналів без перевантажень.

Недоліки:

— підвищені вимоги до САМ-системи, оскільки генерація таких траєкторій є обчислювально складною.

— вища складність у налагодженні параметрів (кут заходу, крок трохоїди, кут нахилу траєкторії).

— потреба у сучасному обладнанні з високою динамікою приводів.

Приклади застосування:

— обробка кишень та порожнин з високим співвідношенням глибини до ширини;

— вибірка матеріалу у жорстких сплавах (титанові, нікелеві), де традиційні методи швидко зношують інструмент;

— виробництво авіаційних та медичних деталей, що потребують високої точності та мінімальних залишкових напружень.

Джерела похибок і методи їх зменшення при використанні адаптивних стратегій обробки наведено в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 - Джерела похибок і методи їх зменшення при адаптивних стратегіях

Джерело похибок	Сутність проблеми	Методи зменшення похибок та забезпечення точності
Неточність генерації трохоїдальних траєкторій у САМ	Неправильний розрахунок кроку траєкторії або радіуса дуг призводить до нерівномірної товщини стружки.	Використання сучасних САМ-систем з адаптивними алгоритмами; перевірка траєкторій у віртуальному симуляторі перед запуском.
Обмежена динаміка приводів верстата	При різких змінах напрямку або високій частоті коливань осей можливе відставання або коливання інструмента.	Використання верстатів з ЧПК високої динаміки; оптимізація параметрів прискорення та уповільнення; застосування функцій згладжування.
Теплові деформації інструмента	Тривале різання на високих обертах викликає перегрів і збільшення геометричних відхилень.	Використання охолодження (емульсії, криогенне); обмеження часу безперервного різання; інструменти з покриттям (TiAlN, AlCrN).
Неправильний вибір параметрів траєкторії	Занадто малий крок трохоїди → надлишковий час; занадто великий → перевантаження інструмента.	САМ-оптимізація: баланс між кутом різання, глибиною та кроком; використання рекомендацій виробників інструмента.
Резонансні вібрації при HSM	Частоти власних коливань інструмента та шпинделя збігаються з частотою збудження при високих швидкостях.	Використання коротких інструментів з оптимальною жорсткістю; адаптивне регулювання швидкості (spindle speed variation).
Неточність позиціонування при обробці глибоких кишень	Довгий виліт фрези призводить до пружних деформацій і відхилень від заданої траєкторії.	Використання спеціалізованих інструментів (довгі твердосплавні, ступінчасті); багатопрохідна стратегія з контрольними різаними; контроль кута атаки.

2.4 Спеціалізовані стратегії обробки

Розвиток авіаційного, енергетичного та медичного машинобудування зумовив появу стратегій, орієнтованих на складні поверхні, що не можуть бути якісно відтворені класичними методами (контурними, об'ємними чи адаптивними). Спеціалізовані стратегії відрізняються високим ступенем геометричної адаптації та тісною інтеграцією з кінематикою 5-осьових верстатів.

Обробка каналів (Slot milling)

Обробка каналів (Рис. 2.4) є однією з класичних і водночас специфічних стратегій у багатокоординатній обробці на верстатах з ЧПУ. Основне її призначення полягає у формуванні вузьких та протяжних пазів (каналів), які можуть мати як прямолінійну, так і криволінійну конфігурацію. Такі канали широко застосовуються у корпусних деталях, елементах прес-форм, гідравлічних та пневматичних системах, у конструкціях турбін, крильчаток та інших агрегатів, де необхідне точне відтворення заданої геометрії.

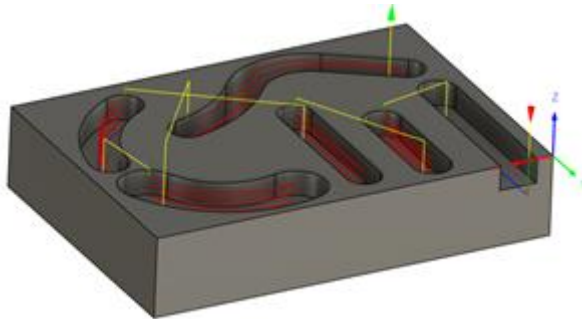


Рисунок 2.4 – Стратегія обробки каналів

Особливості:

1. Контроль орієнтації інструмента

У багатокоординатних системах ЧПУ важливо забезпечувати правильний нахил та позицію інструмента відносно стінок каналу. Це дозволяє: уникати підрізів; підвищувати якість обробленої поверхні; забезпечувати рівномірний розподіл сил різання.

2. Рівномірне завантаження фрези

При обробці глибоких та довгих каналів існує ризик нерівномірного контакту інструмента з матеріалом, що може призвести до локальних

перегрівів, швидкого зношування або навіть поломки фрези.

3. Уникнення резонансних вібрацій

При глибокому прорізання каналів збільшується довжина контакту ріжучої кромки з матеріалом, що створює ризик виникнення коливань та резонансних явищ. У багатокоординатних системах застосовуються: змінні кути атаки; керування швидкістю обертання; використання спеціальних інструментів з підвищеною жорсткістю.

4. Відведення стружки

При глибоких пазах відведення стружки ускладнене. Це особливо актуально для важкооброблюваних матеріалів (титанові сплави, нержавіюча сталь). У таких випадках застосовують: інструменти з внутрішніми каналами подачі СОЖ (системи MQL, НРС – High Pressure Coolant); траєкторії з проміжними підйомами інструмента для евакуації стружки.

Приклад застосування:

- пази для циркуляції охолоджувальної рідини у прес-формах;
- канали у корпусних деталях авіаційних двигунів;
- шпонкові та напрямні пази у механічних системах.

Обробка поверхонь змінної кривизни (Swarf cutting)

Swarf cutting (Рис. 2.5) – це стратегія, яка застосовується для обробки поверхонь зі змінною кривизною, таких як похилі або косозрізані площини, лопатки турбін, крильчатки або об'єми з тангенціальним нахилом. Основна особливість цієї стратегії полягає в тому, що ріжуча кромка інструмента завжди підтримує оптимальний контакт із поверхнею, що дозволяє ефективно знімати матеріал без утворення пропусків чи перевищення припуску.

Особливості:

1. Оптимальна орієнтація інструмента

Інструмент постійно орієнтується під кутом до поверхні, забезпечуючи рівномірне навантаження на кромку; зменшується ризик виникнення вібрацій та зносу інструмента.

2. Плавні траєкторії руху

Траєкторії будуються з урахуванням зміни кривизни, зазвичай у вигляді спіральних або криволінійних проходів; забезпечується висока точність та якість поверхні, особливо у місцях зі складною геометрією.

3. Застосування у багатокоординатних системах

Дозволяє одночасно керувати обертальними та лінійними осями для досягнення плавної орієнтації інструмента; ефективно зменшує кількість

переналагоджень, особливо для складних заготовок.

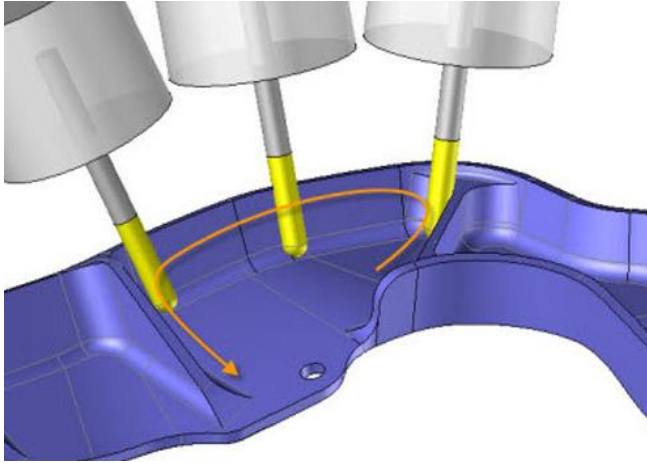


Рисунок 2.5 – Стратегія обробки поверхонь змінної кривизни

Обробка лопаток, турбін і крильчаток (Blade / Impeller machining)

Ця стратегія (Рис.2.6) призначена для формування складних об'ємних деталей, таких як лопатки турбін, компресорних або вентиляторних крильчаток. Вона поєднує елементи контурної, об'ємної та swarf-обробки.

Особливості:

1. Складна геометрія деталі

Лопатки мають змінну товщину та кривизну, що вимагає високої точності орієнтації інструмента; використовуються 5-осьові та гібридні стратегії для одночасного управління обертальними осями.

2. Параметри обробки

Контроль кута атаки і довжини контакту інструмента з поверхнею; підбір оптимальної швидкості подачі для уникнення термічного розширення та вібрацій.

3. Переваги багатокординатних верстатів

Зменшення кількості позиційних налаштувань; підвищення якості обробки криволінійних поверхонь; можливість застосування HSM та адаптивних стратегій для рівномірного зняття матеріалу.

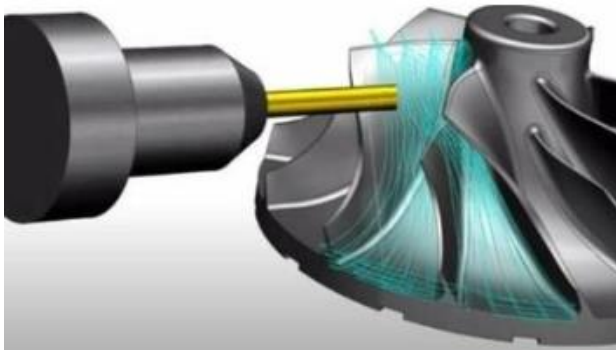


Рисунок 2.6 – Стратегія обробки лопаток, турбін і крильчаток

Обробка гвинтових поверхонь (Helical / Screw machining)

Helical/Screw machining (Рис.2.7) застосовується для виготовлення гвинтових канавок, шнеків, різьб та інших поверхонь з гвинтовою формою. Це один із найбільш точних та технічно складних методів.

Особливості:

1. Точне керування траєкторією

Траєкторії будуються у вигляді спіралі, що повторює форму гвинтової поверхні; у багатокоординатних системах забезпечується синхронізація обертальної та поступальної осі.

2. Контроль зносу інструмента та теплових деформацій

Рівномірне навантаження на інструмент; використання охолодження під високим тиском (HPC) для стабілізації процесу.

3. Переваги багатокоординатних систем

Можливість виготовлення складних гвинтових профілів без переналагоджень; підвищена продуктивність за рахунок одночасного керування всіма осями; висока точність повторюваності та чистота поверхні.

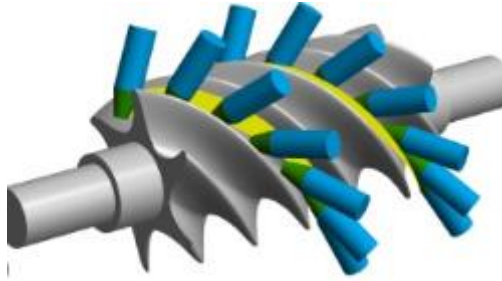


Рисунок 2.7 – Стратегія обробки гвинтових поверхонь

ТЕМА 3. ОСОБЛИВОСТІ ПРОЦЕСУ РІЗАННЯ ПРИ БАГАТОКОРДИНАТНІЙ ОБРОБЦІ

У багатокординатній обробці процес різання набуває складнішої динамічної природи порівняно з традиційною трьохосьовою схемою. Зміна орієнтації інструмента у просторі, варіації кута нахилу та напрямку подачі впливають на геометрію контакту між ріжучою кромкою й заготовкою, а отже — на сили різання, температуру в зоні різання, знос і якість поверхні. Взаємодія кінематики верстата з умовами різання вимагає точного моделювання траєкторій, вибору інструментів зі спеціальною геометрією та застосування адаптивних стратегій керування, що забезпечують стабільність процесу, мінімізацію вібрацій і рівномірний розподіл навантаження на ріжучі елементи.

3.1 Вибір інструменту для багатокординатної обробки

Вибір ріжучого інструменту у багатокординатній обробці є критичним елементом забезпечення точності, стабільності процесу та якості поверхні. На відміну від традиційних трьохосьових систем, тут інструмент постійно змінює орієнтацію у просторі, тому вимоги до його геометрії, жорсткості та здатності працювати при змінних кутах різання значно підвищуються.

Критерії вибору інструмента при багатокординатній обробці:

- Геометричні параметри інструмента.

Вибір геометрії ріжучої частини визначається типом поверхні, що формується, і умовами контакту з матеріалом. Кут нахилу ріжучої кромки, форма торця (плоска, сферична, конічна), кількість зубців і напрямок спіралі повинні забезпечувати ефективне видалення стружки, стабільне

різання та мінімальні сили опору. При обробці складних криволінійних поверхонь перевагу надають сферичним або конічним фрезам, що дозволяють підтримувати постійну відстань між ріжучою кромкою та поверхнею деталі.

Таблиця 3.1 – Вплив геометричних параметрів інструмента на обробку.

Параметр	Варіанти / Типи	Призначення та вплив на обробку
Форма ріжучого торця	Плоска (Flat End Mill)	Для площинних та контурних поверхонь, чіткі кромки; можливе утворення «зубчастості» на криволінійних поверхнях.
	Сферична (Ball Nose / Radius End Mill)	Для криволінійних поверхонь, матриць, лопаток турбін; забезпечує плавну траєкторію та запобігає виступам.
	Конічна (Tapered End Mill)	Для глибоких форм і порожнин; зменшує контактний тиск при великих вильотах.
Кут нахилу ріжучої кромки (Helix / Lead angle)	Малі кути	Підвищене тертя, локальний нагрів, нерівномірне навантаження.
	Великі кути	Знижене різальне зусилля, рівномірний розподіл навантажень, оптимізація для багатокординатної обробки.
Кут торця (End cutting edge angle)	—	Регулює контакт в точках входу/виходу; впливає на формування поверхні та стружкоутворення, запобігає зазубринам.
Кількість зубів (Flutes / Teeth)	Більше зубів	Вища якість поверхні; менше місця для відведення стружки.
	Менше зубів	Кращий відвід стружки, ефективне глибоке фрезерування.
Розміри канавок і глибина ріжучої частини	—	Визначають об'єм відведеної стружки, термостійкість і жорсткість інструмента; важливо для складних порожнин та глибоких контурів.
Форма хвостовика	Циліндричний	Універсальний, надійне кріплення у цанговому патроні.
	Конічний (Tapered shank)	Висока жорсткість при великих вильотах; зменшення віброзв'язку.

- **Довжина та жорсткість інструмента.**

Довжина вильоту фрези має бути мінімальною для забезпечення високої жорсткості системи «інструмент–шпиндель». Надмірна довжина призводить до збільшення прогину, виникнення вібрацій та похибок форми. У разі необхідності роботи з великим вильотом застосовують посилені або конічні хвостовики, що підвищують жорсткість без втрати точності позиціонування.

- **Кінематична сумісність з траєкторією обробки.**

Інструмент повинен бути сумісним з характером траєкторії — особливо при п'ятикоординатному керуванні, де одночасно змінюються кути нахилу та орієнтація осей. Геометрія інструмента має дозволяти уникати колізій, зберігати оптимальний контакт із поверхнею та забезпечувати безпечні кути атаки при змінних положеннях.

- **Кут нахилу інструмента – кут атаки (Tilt angle).**

Оптимальний нахил забезпечує збалансоване навантаження на ріжучу кромку, стабільне відведення стружки та рівномірне зношування. Надто малий кут може призвести до налипання матеріалу або перегріву, а надмірний — до підвищеного тертя та прискореного зносу. САМ-системи використовують адаптивні алгоритми для автоматичного підбору кута нахилу залежно від локальної кривизни поверхні.

- **Матеріал ріжучої частини.**

Матеріал інструмента визначає його зносостійкість, теплопровідність і здатність працювати при високих швидкостях. Твердосплавні фрези є універсальними для більшості операцій; твердосплавні та керамічні застосовують для обробки жароміцних сплавів та твердих сталей при високих швидкостях; інструменти з кубічного нітриду бору (CBN) — для фінішних і надточних операцій, де потрібна мінімальна шорсткість поверхні.

- **Покриття інструмента.**

Сучасні покриття (TiAlN, AlCrN, TiSiN, nAlCo) зменшують коефіцієнт тертя, підвищують термостійкість і запобігають налипанню стружки. Вибір покриття залежить від матеріалу заготовки та режимів різання: при сухій або високошвидкісній обробці рекомендуються багат шарові наноккомпозитні покриття з високою твердістю (понад 35 ГПа).

- **Вібраційна та термостійкість системи.**

При багатокоординатній обробці сили різання змінюють напрям у просторі, що підвищує ризик резонансних коливань. Інструмент має мати достатню масу та жорсткість для демпфування коливань, а матеріал — стабільні властивості при змінних теплових навантаженнях.

- **Контроль колізій та обмежень у САМ-системі.**

Інструмент повинен бути описаний у САМ-бібліотеці з повною геометрією для автоматичного аналізу можливих зіткнень. Системи Siemens NX, PowerMill або Tebis забезпечують динамічну перевірку колізій між корпусом фрези, хвостовиком і заготовкою, що дозволяє уникати аварійних ситуацій при обробці порожнин або складних профілів.

- **Умови видалення стружки та охолодження.**

Геометрія канавок має забезпечувати безперешкодне видалення стружки, особливо при глибокому фрезеруванні. Для складних просторових поверхонь рекомендується застосування внутрішнього підведення охолоджувальної рідини, що стабілізує температуру різальної зони та запобігає термічним деформаціям.

- **Економічна ефективність і стійкість до зносу.**

При виборі інструмента враховується не лише вартість, а й ресурс роботи, можливість відновлення, стабільність процесу та загальний вплив на собівартість обробки. У високотехнологічних виробництвах пріоритет віддається інструментам зі стабільною продуктивністю в межах усього життєвого циклу.

Розглянемо більш детально критерії які мають найбільший вплив на якість процесу багатокоординатної обробки. Одним із ключових факторів, що визначають ефективність різання, є **кут атаки (tilt angle) та довжина контакту** інструмента з матеріалом. Вони впливають на теплові процеси, силу різання, стійкість інструмента та якість поверхні.

Кут атаки визначає нахил осі фрези відносно нормалі до поверхні різання (Рис. 3.1). Його регулювання дозволяє керувати напрямом сили різання, відведенням стружки та умовами навантаження на ріжучу кромку.

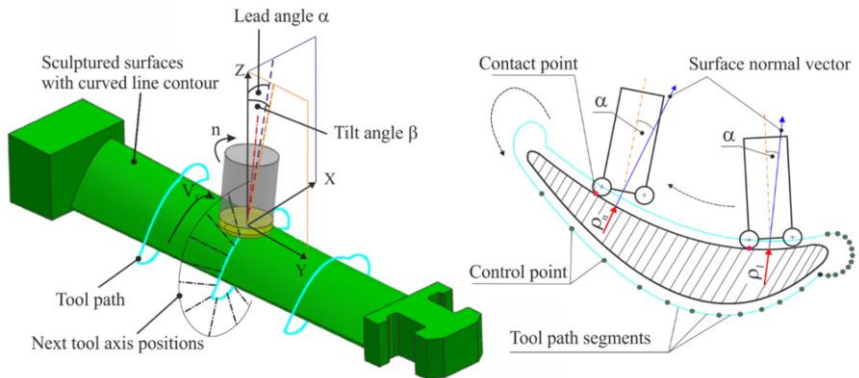


Рисунок 3.1 – Переміщення фрези по складнопрофільній поверхні різання та параметри геометрії

- Невеликий нахил ($0-5^\circ$) — забезпечує максимальну точність обробки, але сприяє накопиченню тепла в зоні різання. Застосовується для чистового фрезерування плоских або слабо криволінійних поверхонь.

- Середній нахил ($5-15^\circ$) — покращує відведення стружки, зменшує силу різання і контактну зону. Оптимальний при обробці 3D-поверхонь та похилих елементів (наприклад, лопаток або криволінійних матриць).

- Великий нахил ($>15^\circ$) — суттєво знижує контактну довжину, але може призвести до нерівномірного навантаження ріжучої кромки. Використовується переважно при високошвидкісній обробці або адаптивному фрезеруванні для зменшення теплового впливу.

Довжина контакту ріжучої кромки з матеріалом (Contact Length / Engagement Arc) описує протяжність ділянки ріжучої кромки, що одночасно взаємодіє з матеріалом. Занадто велика довжина контакту призводить до перегріву, підвищеного зносу та вібрацій, а надто мала — до нестабільності різання і погіршення якості поверхні.

Основні закономірності:

– При збільшенні кута атаки довжина контакту зменшується, що знижує температуру в зоні різання.

– Для сферичних фрез контакт відбувається у вигляді дуги, довжина якої залежить від кута нахилу та радіуса сферичної частини.

– Для конічних фрез контактна зона зміщується уздовж ріжучої кромки, забезпечуючи плавнішу взаємодію з матеріалом.

Наприклад при обробці криволінійної поверхні сферичною фрезою під кутом 10° зона контакту скорочується приблизно на 25–30% порівняно з нульовим нахилом, що підвищує стійкість інструмента та зменшує температуру різання.

Ще один критерій який є ключовим у багатокоординатних системах це **напрямок подачі інструмента**, оскільки траєкторія інструмента може змінюватись у просторі, а зміна напрямку подачі залежить від зміни орієнтації інструменту.

Коли інструмент подається у певному напрямку відносно поверхні заготовки, напрямок відносного руху між ріжучою кромкою й оброблюваним матеріалом змінюється. Це визначає, які ділянки інструмента входять у роботу першими, якою буде початкова товщина стружки і як буде зміщуватись зона контакту під час руху.

В багатокоординатній обробці може використовуватись комбінація бокового нахилу, нахилу вперед/назад і зсуву інструмента, щоб оптимізувати напрямок подачі на кожному сегменті траєкторії. Це дозволяє уникати небажаних умов різання, наприклад:

- коли інструмент різко вривається у матеріал (що викликає пікові

навантаження),

- коли стружка накручується назад на інструмент,
- коли змінюється кут контакту різальної кромки з поверхнею.

Суть полягає в тому, щоб узгодити напрямок подачі з орієнтацією інструмента, геометрією деталі і напрямком найбільш сприятливого зрізу, щоб максимізувати стабільність, зменшити теплове навантаження і покращити якість поверхні.

Вплив напрямку подачі на динаміку процесу різання при багатокординатній обробці

- Зміна сили різання

У процесах багатокординатної обробки напрямок подачі безпосередньо визначає розподіл компонент сили різання, які утворюються в зоні контакту ріжучої кромки з матеріалом. Традиційно виділяють три основні складові сили різання: тангенціальну, радіальну та осьову. Залежно від орієнтації вектора подачі відносно вектора обертання інструмента, співвідношення між цими складовими змінюється, що впливає як на ефективність зрізання матеріалу, так і на механічне навантаження на систему "інструмент–заготовка–верстат".

При подачі, спрямованій у напрямку обертання інструмента (аналогічно до режиму climb milling), товщина стружки на початку контакту є максимальною та поступово зменшується до нуля. Це забезпечує плавне відведення стружки, зниження температурного навантаження на ріжучу кромку і, відповідно, зменшення нормальної складової сили різання. Таке співвідношення сприяє зменшенню пружних деформацій системи та покращенню чистоти поверхні.

Натомість при подачі проти напрямку обертання (conventional milling) товщина стружки збільшується в процесі контакту, що викликає підвищені динамічні навантаження, а також зростання нормальної складової сили різання. У випадку просторової (5-координатної) обробки ці ефекти можуть комбінуватися в межах однієї траєкторії, оскільки напрямок подачі може змінюватися не лише в площині, а й у просторі. Тому сучасні САМ-системи передбачають адаптивне коригування вектора подачі з урахуванням локальної геометрії поверхні, щоб підтримувати "сприятливий" напрямок різання, мінімізуючи контактне навантаження.

- Стабільність процесу та виникнення вібрацій

Динамічна стабільність процесу різання у багатокординатних системах є критичним фактором, який визначає як точність, так і довговічність інструмента. Зміна напрямку подачі змінює розподіл силових складових, що діють на шпиндель і деталь, викликаючи зміну

умов збудження коливальних. Якщо подача здійснюється у напрямках, де жорсткість системи є мінімальною (наприклад, при поперечному зміщенні інструмента на значну відстань від осі шпинделя), це може спричинити самозбуджені коливання.

Особливо вираженим цей ефект стає при переході між ділянками траєкторії з різними просторовими орієнтаціями, коли різко змінюється напрямок результуючої сили різання. У таких зонах можуть виникати короточасні "пікові" навантаження, які призводять до появи вібрацій або мікроударів, що негативно впливають на точність обробки. Зменшення цих ефектів досягається шляхом плавного узгодження векторів подачі між сусідніми ділянками поверхні, використанням інтерполяції орієнтацій інструмента, а також регулюванням швидкості подачі залежно від локального кута нахилу поверхні.

- Якість поверхні та геометричні відхилення

Напрямок подачі визначає орієнтацію сліду ріжучої кромки на поверхні деталі, що безпосередньо впливає на топографію сформованої поверхні. При обробці плоских поверхонь цей вплив проявляється у вигляді періодичної структури слідів різання, проте при обробці скульптурних або криволінійних поверхонь багатокоординатними методами ситуація значно ускладнюється.

Зміна просторового напрямку подачі призводить до варіації кута атаки та довжини контакту ріжучої кромки з матеріалом. Це, у свою чергу, впливає на локальну шорсткість і мікрогеометрію поверхні. У дослідженнях Gdula (MDPI, 2022) було показано, що при зміні кута lead (нахилу у напрямку подачі) навіть на кілька градусів спостерігається суттєва зміна параметрів шорсткості, особливо у зонах змінної кривизни. Таким чином, узгодження напрямку подачі з головними напрямками кривизни поверхні дозволяє досягати стабільної якості поверхні навіть при складних траєкторіях обробки.

- Повторне різання стружки та ефективність її евакуації

Неправильно вибраний напрямок подачі може призвести до того, що стружка не виводиться ефективно із зони різання, а повертається під дію відцентрових сил або потоку охолоджувальної рідини назад у зону контакту. Це явище особливо небезпечне при обробці глибоких порожнин, коли стружка накопичується на поверхні, викликаючи її повторне зрізання. Наслідком є підвищення температури, виникнення мікропошкоджень та прискорене зношування ріжучої кромки.

У системах багатокоординатної обробки цей ефект посилюється через зміну просторової орієнтації інструмента — при певних комбінаціях нахилів і напрямків подачі траєкторія сходу стружки може перетинатися із зоною подальшого різання. Для уникнення цього сучасні САМ-системи

використовують алгоритми автоматичного контролю напрямку подачі з урахуванням напрямку сходу стружки (chip flow direction). Оптимальним вважається такий напрямок подачі, за якого траєкторія евакуації стружки спрямована від поверхні заготовки, а не вздовж неї.

ТЕМА 4. РОБОТА В TEBIS

Tebis - це сучасна CAD/CAM/CAE-система, призначена для комплексної автоматизації процесів проектування, підготовки виробництва та програмування обробки на верстатах ЧПУ. Програмне забезпечення розроблене німецькою компанією Tebis AG і активно використовується у галузях, де потрібна висока точність виготовлення складних просторових форм:

- машинобудування;
- авіаційна та автомобільна промисловість;
- виготовлення прес-форм, штампів, прототипів, моделей і формоутворюючих поверхонь.

Основна напрямки використання Tebis — забезпечення безперервного цифрового ланцюга від етапу конструювання деталі до її фактичного виготовлення на верстаті з ЧПУ.

Система дозволяє:

- створювати та редагувати 3D-моделі деталей, вузлів і оснащення;
- виконувати інженерний аналіз і підготовку моделей до виготовлення;
- розробляти технологічні процеси обробки з урахуванням параметрів верстатів, інструментів та заготовок;
- генерувати та оптимізувати NC-програми для фрезерних, токарних, електроерозійних та інших типів верстатів;
- здійснювати віртуальне моделювання процесів для перевірки колізій, точності та ефективності.

Особливістю системи Tebis є її побудова за модульним принципом, що дає змогу гнучко адаптувати систему під потреби підприємства.

Основні модулі які входять в систему:

– **CAD (Computer-Aided Design)**. Він призначений для створення та редагування тривимірних моделей деталей, вузлів та складних поверхонь. Модуль CAD дозволяє формувати моделі як твердотільні, так і поверхневі, а також здійснювати аналіз їхньої якості та кривизни, що є критично важливим при виготовленні високоточних деталей і складних опукло-

викривлених поверхонь.

–**CAM (Computer-Aided Manufacturing)**. Відповідає за розробку технологічних процесів та програмування верстатів із числовим програмним керуванням. Він надає інструменти для генерації траєкторій інструмента, оптимізації обробки та підбору параметрів різання. САМ-модуль забезпечує підтримку різних стратегій обробки, включно з чорною, чистою та контурною обробкою, а також багатокоординатною обробкою, що дозволяє ефективно працювати зі складними формами та поверхнями, уникаючи колізій та забезпечуючи максимальну точність.

–**Reverse Engineering**. Дає змогу створювати цифрові моделі на основі реальних фізичних об'єктів. Він забезпечує обробку хмар точок, отриманих за допомогою 3D-сканування або контактних вимірвальних систем, і перетворює їх у твердотільні або поверхневі моделі. Цей модуль особливо важливий при відновленні деталей без наявних креслень, при виготовленні прототипів або модернізації існуючих виробів.

–**Simulation & Verification**. Дозволяє виконувати віртуальне моделювання обробки та перевірку траєкторій інструментів. За допомогою цього модуля можна контролювати можливі колізії, оцінювати продуктивність процесу та аналізувати кінематику верстата до початку фактичної обробки. Це значно знижує ризик пошкодження верстата або деталей та дозволяє скоротити час на налагодження виробництва.

–**Process Management**. Присвячений управлінню проектами та даними, забезпечує організацію роботи з великою кількістю моделей, NC-програм, бібліотек інструментів та шаблонів. Він дозволяє зберігати всі версії проекту, вести контроль змін та створювати документацію, необхідну для виробництва та передачі технологічних процесів на верстат.

4.1 Інтерфейс і структура проекту у Tebis

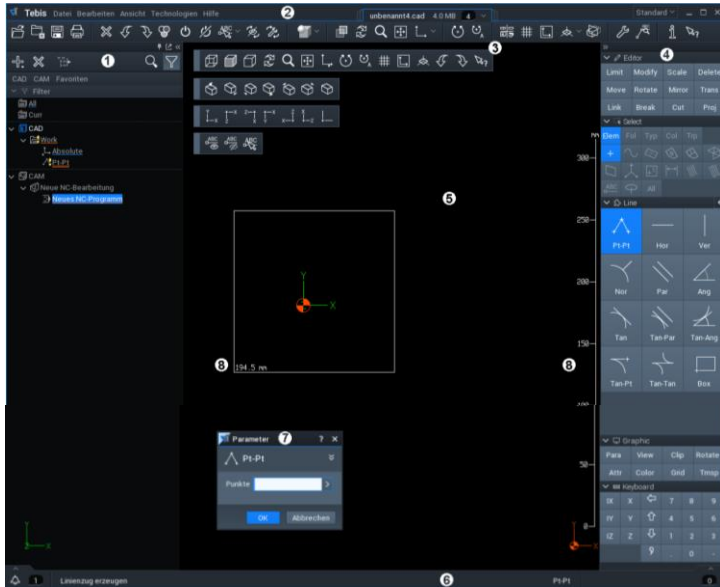


Рисунок 4.1 – Інтерфейс програмного забезпечення Tebis

1) CAD-файли можна структурувати та організувати за допомогою **дерева структури проекту (Structure tree)**. Окремі елементи, такі як компоненти, заготовки, траєкторії інструментів, системи осей і обмеження, відображаються або приховуються, управляються і редагуються за допомогою дерева структури. Структурування досягається шляхом створення взаємопов'язаних рівнів з папками, продуктами і компонентами. Дерево структури також може бути організовано за допомогою фільтрів, функції пошуку і сортування.

2) **Панель меню (menu bar)** містить випадаюче меню з основними командами для центральних функцій системи, управління вікнами відображення, функціями робочої області та кнопками для роботи з вікном програми.

3) **Панелі інструментів та панель стандартних функцій (Toolbars and standard function bar)** дозволяють отримувати швидкий доступ до функцій керування проектом які використовуються найчастіше або які обов'язково використовуються при роботі з будь-яким проектом.

4) **Головне меню (main menu)** можна використовувати для вибору функцій і керування всіма основними функціями системи.

5) **Вікно проекту (View window)** необхідне для роботи з

елементами геометрії. Вікно проекту можна використовувати для відображення до чотирьох різних видів компонента. Функція «Макет» (**Layout**), дозволяє розділити екран.

6) **Панель стану проекту (Status bar)** містить інформаційну область для повідомлень, нотаток про поточну діючу функцію та активні процеси.

7) Для багатьох функцій у вікні перегляду відкриваються **діалогові вікна**. Діалогові вікна можна розташувати в будь-якому місці, перетягнувши їх лівою кнопкою миші. Курсор миші повинен знаходитися у рядку заголовка. Діалогові вікна зазвичай містять рядок заголовка з назвою, а також кнопки виклику відповідної довідки та закриття, панель інструментів діалогу зі спеціальними кнопками, область з полями параметрів (наприклад, поля введення, опції, поля вибору) та область з кнопками для підтвердження або переривання функції.

8) **Лінійка або розмірна рамка (Ruler and dimension frame)** відображає пропорції моделі. Видимість лінійки та/або розмірної рамки можна налаштувати у конфігураціях.

Налаштування інтерфейсу та персоналізація

Tebis дозволяє користувачу адаптувати інтерфейс під власний стиль роботи:

- Налаштовувати панелі інструментів, деякі команди можна винести в швидкий доступ
- Приховувати параметри, які не використовуються в поточному контексті (фільтрування інструментів/операцій)
- Зберігати конфігурації інтерфейсу як шаблони, щоб уніфікувати середовище для всієї організації
- Ця гнучкість дуже важлива у багатокоординатній обробці, де набір команд і налаштувань часто змінюється в залежності від складності геометрії.

4.2 САМ модуль

Модуль САМ у Tebis призначений для перетворення обробленої САД-геометрії в технологію, яка включає планування та генерування NC-програм для різних видів верстатів: фрезерних, токарних, комбінованих, з 3-, 5- осями, а також для свердління, обробки електродів, EDM-робіт та інших спеціалізованих виробничих операцій. Модуль поєднує в собі як інструменти автоматизації (наприклад, бібліотеки операцій, шаблони “NCSet”, автоматичне розпізнавання ознак геометрії), так і можливості гнучкого ручного налаштування кожної траєкторії інструмента.

При роботі з САМ-модулем користувач задає стратегії обробки: чорнова, чистова обробка, обробка кромки, підрізування фасок, свердління, токарно-фрезерні операції, тощо. Система забезпечує симуляцію обробки, віртуальне відтворення траєкторій, перевірку на колізії, управління інструментами й урахування технічного обладнання, осей, головок та інших пристроїв верстата (виробничих пристроїв) через “digital twins” (цифрові двійники).

САМ-модуль включає засоби для планування виробничого процесу (Job Manager), в якому можна керувати послідовністю операцій, налаштуваннями інструментів, позиціонуванням заготовки, змінами траєкторій у випадку неоднозначностей чи змін вимог, а також здійснювати перевірку на кілька установок (multi-setup), коли деталь обробляється частинами або перевстановлюється.

4.2.1 Job Manager і технологія NCJob

NCSet описує точну технічну послідовність для певного типу обробки (наприклад, чорнова, чистова, чистова обробка, обробка залишкового припуску і т.д.) з окремих пов'язаних функцій (наприклад, спочатку чорнова, потім напівчистова, потім чистова і т.д.) разом з усіма необхідними інструментами і параметрами різання.

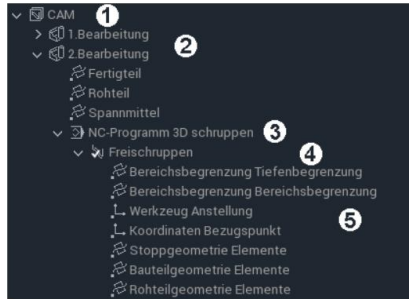
Користувач може визначити будь-яку кількість NCSet з будь-яким вмістом і керувати ними в бібліотеці NCSet. При необхідності можна створити окремі набори NCSet для матеріалів, що вимагають різних методів обробки.

Певні параметри, такі як заготовка, фрезерувальні елементи, обмежувальні елементи тощо, можуть бути змінними при визначенні набору NCSet. Це дозволяє використовувати один NCSet для різних, але пов'язаних між собою операцій обробки. Всі параметри, пов'язані з елементами обробки і зупинки, стратегіями різання, а також позиціонуванням і переходом, можуть бути визначені як змінні. Значення цих змінних повинні бути вказані оператором при застосуванні відповідного набору NCSet.

Job Manager використовується для управління та організації операцій обробки з ЧПК, необхідних для обробки деталі. Job Manager може бути структурований за допомогою деревоподібної структури з різними рівнями ієрархії (підгрупами). Це можна зробити, об'єднавши **NCJob** в **NC-програми** і організувавши їх в **NC-операції** обробки.

Цей структурований Job Manager можна використовувати для організації, перевірки та моделювання операцій обробки деталі з ЧПК, а також для виконання виводу даних з ЧПК.

Він може використовуватися для створення шаблонів для зберігання і повторного використання всіх функцій ЧПК, що містяться в них.



1 - CAM Node (Job Manager); 2 - NC обробка; 3 - NC програма; 4 - NCJob; 5 – дані внесені в NCJob

Рисунок 4.2 – Структура проекту в Job Manager

Tebis також має потужні можливості для багатокоординатного фрезерування, включно з 5-осьовою обробкою з униканням колізій, зокрема в режимі “**simultaneous milling**” та “**3-to-5 axis transitions**”. Це означає, що траєкторії інструмента можуть бути побудовані таким чином, щоб обидві обертові осі (наприклад, A/B або C) змінювалися під час руху інструмента для оптимального доступу до поверхні, і при цьому система виконує облік геометрії шпинделя, головок або інших компонентів верстата, щоб уникнути зіткнень.

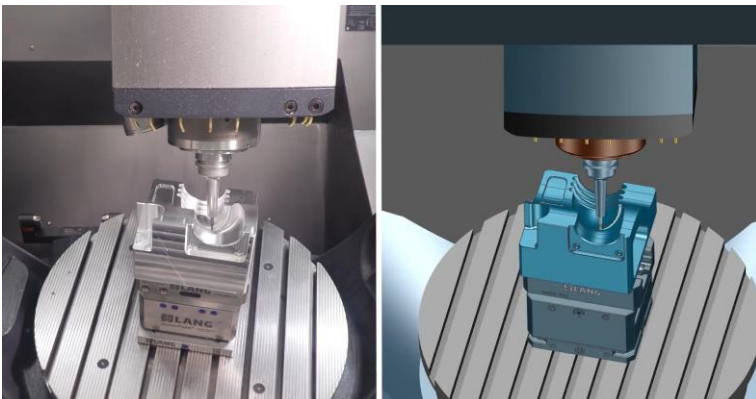


Рисунок 4.3 – Приклад багатокоординатної обробки в симуляції та на верстаті

4.2.2 Симуляція та аналіз траєкторій інструменту

Діалогове вікно **Симуляції (Simulation)** можна використовувати для графічної та інтерактивної симуляції та аналізу траєкторій інструменту, вимірювальних траєкторій або траєкторій різання відразу після розрахунку.

Залежно від технології, яка використовується для розрахунку траєкторій інструменту, можна виконати наступні дії:

- Графічна симуляція траєкторій;
- Чисельна перевірка траєкторій руху інструменту на зіткнення компонентів
- Візуальна перевірка рухів шпинделя верстата на зіткнення деталей;
- Відображення базових даних траєкторії, таких як позиція, кут і швидкість подачі, а також технологічні макроси;
- Відображення NC-наборів, пов'язаних з траєкторіями, у вікні параметрів;
- Відображення кутів повороту для обох осей у вигляді діаграми (тільки для траєкторій, створених за допомогою технології Trimming);
- Застосовувати кругову інтерполяцію до траєкторій різання (траєкторій інструменту) (тільки для траєкторій різання, створених за допомогою технології Лазерне різання).

Залежно від того, який тип віртуальної машини використовується і чи має користувач ліцензію на симулятор, для різних типів верстатів доступні лише частини повного обсягу симуляції.

Наступні типи віртуальних машин ЧПК можуть бути включені в бібліотеку верстатів:

- Демонстраційний верстат;
- Каталогний верстат;
- Верстат замовника (верстати замовника, верстати замовника з протоколом приймання, верстати замовника без протоколу приймання).

Без ліцензії на симулятор можна симулювати лише окремі NC-обробки на всіх типах верстатів. Моделювання повних ЧПК-програм неможливе. Макроси верстатів не перевіряються і не проходять. Не можна виконати перевірку на зіткнення. Симуляція забезпечує лише оптичну перевірку. Параметри на панелі керування верстатом відображаються лише для інформації і не можуть бути змінені.

За наявності ліцензії на симулятор обсяг функціональних можливостей залежить від типу машини: Верстати з каталогу та верстати замовника можна також використовувати для моделювання лише окремих NC-завдань. Моделювання повних ЧПК-програм неможливе. Макроси

верстатів не перевіряються і не проходять. Неможливо виконати перевірку на зіткнення верстатів. Симуляція забезпечує лише оптичну перевірку. Параметри на панелі керування верстатом відображаються лише для інформації і не можуть бути змінені.

Переваги САМ-модуля:

- По-перше, автоматизація зменшує час підготовки NC-програм і знижує кількість ручної роботи. Це також сприяє підвищенню стандартизації процесів на підприємстві.

- По-друге, високий рівень безпеки: завдяки симуляції і цифровим двійникам ймовірність пошкодження інструментів або верстатів через колізії зменшується, а якість кінцевого виробу підвищується.

- По-третє, можливість ефективної обробки складних геометрій і вільних поверхонь, особливо в режимі багатокординатної обробки, дозволяє виконувати роботи, які в інших системах вимагають значно більше часу або спеціальних хитрощів.

- По-четверте, функція “feature-library” та шаблонів NCSet дає змогу підприємству накопичувати і повторно використовувати виробничі знання, що зменшує навчальний час для нових деталей і збільшує ефективність.

Недоліки та обмеження:

- Незважаючи на потужність, САМ модуль Tebis має свої обмеження. Одне з основних — крива навчання. Для користувача, який вперше працює з Tebis, освоєння усіх можливостей: автоматичного розпізнавання ознак, багатокординатних стратегій, комбінованих NCJob, може займати значний час та вимагати навчань.

- Інша проблема — високі вимоги до обчислювальних ресурсів. При великих, складних моделях, з великою кількістю траєкторій, багатьма осями і численними перевірками на колізії, система може сповільнюватися, особливо на слабкому обладнанні.

- Ще одним недоліком може бути вартість ліцензії та витрати на придбання модулів, особливо спеціалізованих, таких як 5-осьове траєкування, інтерполяційне токарювання, EDM, глибоке свердління, якщо вони не входять у базову комплектацію.

- Також можливі обмеження при нестандартних або рідкісних верстатах чи спеціальних інструментах — якщо цифровий двійник верстата або інструменту не існує у бібліотеці, треба або створювати вручну, або адаптувати, що може бути складніше.

4.3 Менеджмент виробництва та управління виробництвом

Виробничий менеджмент або система управління виробництвом

(Manufacturing Execution System), скорочено MES, - це система управління та моніторингу. Виробничий менеджмент дозволяє керувати, контролювати і відстежувати загальний виробничий процес в режимі реального часу. Це включає в себе класичний збір і обробку даних, таких як збір даних про продукцію (**PDA**), збір даних про машини (**MDA**) і збір даних про персонал, а також всі інші процеси, які мають безпосередній вплив на виробництво/виробничий процес.

Управління виробничими даними (DM) - це система управління технічною інформацією, яка контролює управління даними, процесами та проектами за допомогою стандартизованого інтерфейсу користувача, одночасно контролюючи доступ до даних для кожного користувача. Отримані в результаті виробничі дані зберігаються в різних базах даних і управляються з урахуванням змін і конфігурацій. На додаток до управління призначенням магазинів інструментів, сервер також надає користувачеві прямий доступ до управління машиною і повний огляд машини, що дозволяє користувачеві по-різному реагувати в залежності від ситуації. Тому тема управління виробництвом стає все більш важливою, особливо в обробній промисловості.

4.4 CAD модуль

CAD-модуль у Tebis слугує як базова підсистема для створення, редагування і підготовки геометрії деталей до подальшої САМ-обробки. Його роль полягає в тому, щоб забезпечити надійну і гнучку основу, з якої технолог може перейти безпосередньо до генерації траєкторій інструмента, мінімізуючи потребу в зовнішніх САД-системах. Модуль підтримує як твердотільне, так і поверхневе моделювання, комбінуючи роботу з кривими, поверхнями та сканованими даними (хмарами точок), що робить його універсальним інструментом.

Під час імпорту геометрії з інших систем Tebis CAD дозволяє інтегрувати структуру збірок, інформацію про шари й атрибути, що зберігаються в зовнішніх форматах (наприклад, CATIA, NX, STEP тощо) — це важливо для коректного відтворення структури деталі та її логіки.

У САД-модулі передбачено параметричні шаблони, які дозволяють автоматизувати типові підготовчі операції: визначення заготовки, позиціонування плоских поверхонь, вставлення отворів для кріплень, визначення плоских чи нахилених площин та ін. Такий підхід значно скорочує час підготовки моделі до САМ-обробки.

Серед інших функцій — можливість коригування геометрії (додавання, вирізання, зміна поверхонь), оптимізація поверхонь (усунення артефактів, поліпшення властивостей кривизни), а також інтеграція

процесів реверсного інжинірингу — тобто створення CAD-моделі з даних сканування, поєднання хмар точок з поверхневим моделюванням прямо в одному інтерфейсі.

Оскільки CAD-модуль є інтегрованою частиною Tebis, усі зміни моделі відразу впливають на CAM-середовище: якщо змінити параметри в CAD (наприклад, змінити криву, площину, висоту поверхні), CAM-операції можуть бути оновлені асоційно – тобто автоматично адаптуватись під внесені зміни. Це забезпечує синхронність між конструктивом і технологією та пришвидшує створення загального проекту.

4.4.1 Особливості CAD-модуля Tebis

Однією з ключових особливостей модуля є підтримка **параметричного** та **асоціативного дизайну**. Параметричні шаблони дозволяють користувачу створювати стандартні блоки чи елементи, які можна змінювати через параметри, при цьому всі пов'язані елементи автоматично оновлюються (Рис. 4.4).

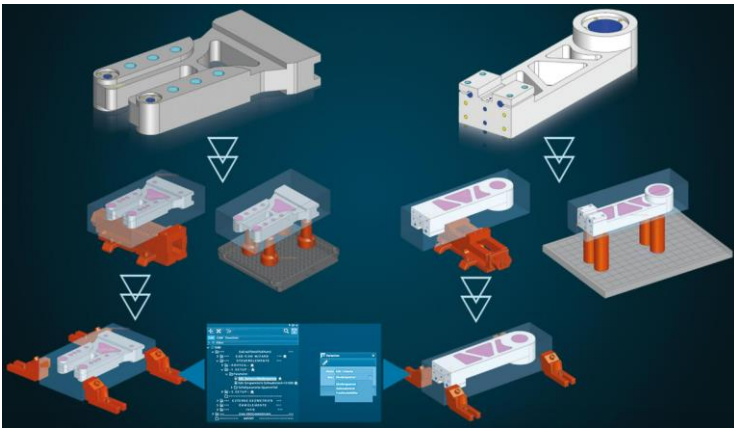


Рисунок 4.4 – Приклад адаптації моделі під різні пристосування

Ще одна особливість — бібліотека геометричних ознак (**Geometry Feature Library**) (Рис. 4.5), яка дозволяє автоматично розпізнавати в CAD-моделі характерні елементи, такі як отвори, фаски, кармани чи профільні елементи, та асоціювати до них заздалегідь налаштовані CAM-операції (NCSets). Це спрощує перехід від CAD до CAM, оскільки багато технологічних рішень можуть бути підставлені автоматично.



Рисунок 4.5 – Автоматичне розпізнавання геометричних елементів моделі

Tebis також має широкі інтерфейси для імпорту/експорту CAD-форматів — прямі та стандартні інтерфейси для CATIA, NX, STEP, Parasolid та ін. Це дозволяє без додаткових інструментів взаємодіяти з різними CAD-системами без втрати геометрії, структури збірок або інших важливих елементів.

CAD-модуль Tebis має призначення, яке можна описати як - «CAD, спеціалізований для виробництва» — тобто не просто для дизайну, але з акцентом на такі властивості, які мають значення для САМ-обробки: якість поверхні, підготовка до обробки, інтеграція з шаблонами для технічної обробки. Це є особливою перевагою в порівнянні з іншими CAD системами. Розглянемо більш детально всі переваги CAD-модуль Tebis:

- **Синхронність з САМ** — оскільки CAD-модуль інтегрований всередині Tebis, змін у моделі автоматично відображаються в САМ-частині без потреби експорту/імпорту. Це зменшує ризик розбіжностей між конструкцією та технологією.

- **Автоматизація рутинних операцій** — параметричні шаблони, бібліотеки ознак і налаштовані процедури дозволяють скоротити час на підготовку моделі до обробки.

- **Універсальний імпорт/експорт форматів** — можливість роботи з різними CAD-системами без втрати структури моделей або атрибутів.

- **Гнучкість у зміні геометрії та оптимізації поверхонь** — можливість виправляти і вдосконалювати моделі прямо в середовищі Tebis, без переходу в зовнішні CAD-інструменти.

– **Підтримка реверсного інжинірингу** — злиття сканованих даних із геометрією, створення поверхонь з хмари точок прямо в CAD-середовищі.

– **Простота налаштування інтерфейсу для інженера САМ** — користувач може адаптувати інтерфейс під свої завдання, приховати непотрібні елементи або налаштувати шаблони.

Недоліки та обмеження:

– **Обмеження глибокого проектування** — хоча CAD-модуль сильний з точки зору підготовки до обробки, він може бути менш зручним чи менш функціональним для інженерного проектування порівняно з спеціалізованими CAD-системами (наприклад, SolidWorks, CATIA) щодо складної логіки, аналізу, асоціативних зв'язків.

– **Крива навчання параметричних шаблонів** — користування шаблонами, бібліотеками ознак та усвідомлення їхньої логіки може вимагати додаткового навчання та досвіду.

– **Залежність від CAD-модуля в рамках Tebis** — якщо модель сильно змінюється або потребує дизайнерських елементів, які важко реалізувати у Tebis, може знадобитися повернутися до зовнішньої CAD-системи.

– **Ресурсоємність великих моделей** — при роботі з надзвичайно складними або великими збірками можуть виникати затримки або навантаження на систему, особливо при відтворенні асоціативних змін.

– **Обмежене розмаїття спеціальних CAD-функцій** — наприклад, специфічні інструменти аналізу чи симуляції, які є в деяких CAD-програмах, можуть бути відсутні або менш розвинені в модулі Tebis.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛІ

1. Groover M. *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems*. 7th Edition. Wiley, 2019. 872 p.
2. Krause D. *CNC Programming Handbook*. 3rd Edition. Industrial Press, 2017. 640 p.
3. Feng H., Guo Y. *Advanced Machining Technology for High-Performance Manufacturing*. Springer, 2020. 350 p.
4. Tebis AG. *CNC Programming with Tebis – User Manual*. 2025. URL: <https://www.tebis.com/en/software/cam-software/cnc-programming>
5. Tebis AG. *Tebis CAD/CAM Software – Technical Overview*. 2025. URL: <https://www.tebis.com/en/software/products/tebis-4.1-release-5>
6. Smith G.T. *Multi-Axis Milling: Principles and Practice*. ASM International, 2018. 400 p.
7. Denton J.D. *Advanced Machining Processes: Nontraditional and Hybrid Machining*. CRC Press, 2019. 420 p.
8. Kalpakjian S., Schmid S.R. *Manufacturing Engineering and Technology*. 7th Edition. Pearson, 2017. 960 p.
9. Tebis AG. *Simulation and Toolpath Analysis in Tebis*. 2025. URL: <https://www.tebis.com/en/software/cam-software/cnc-simulator>
10. Klocke F., Brecher C. *Manufacturing Processes 4: High-Performance and Multi-Axis Machining*. Springer, 2020. 410 p.