

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Машинобудівний факультет

(повне найменування факультету)

Металорізальні верстати та інструменти

(повне найменування кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проєкту

Магістр

(ступінь вищої освіти)

на тему: Аналіз особливостей високошвидкісного фрезерування в контексті формування технічних умов та завдання на проектування верстата для його реалізації

Виконав(ла): студент(ка) 2 курсу, групи М-212м

Спеціальності 133 Галузеве машинобудування

(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)

Металорізальні верстати та системи

НАЙМАНОВА Л.М.

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

Керівник ОГЛУЗДИНА Л.С.

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

Рецензент ДЯДЯ С.І.

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Факультет Машинобудівний
 Кафедра Металорізальні верстати та інструменти
 Ступінь вищої освіти магістр
 Спеціальність 133 Галузеве машинобудування
(код і найменування)
 Освітня програма (спеціалізація) Металорізальні верстати та системи
(назва освітньої програми (спеціалізації))

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ФРОЛОВ М.В.

« _____ » _____ 20__ року

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА(КИ)

НАЙМАНОВІЙ Людмилі Миколаївні

(ПРИЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи) Аналіз особливостей високошвидкісного фрезерування в контексті формування технічних умов та завдання на проектування верстата для його реалізації

керівник проєкту (роботи) ст. викладач ОГЛУЗДІНА Любов Сергіївна,
(науковий ступінь, вчене звання, ПРИЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

затверджені наказом закладу вищої освіти від « 10 » листопада 2023 року № 430

2. Строк подання студентом проєкту (роботи) 13.12.2023

3. Вихідні дані до проєкту (роботи) матеріал, що оброблюється: алюміній, конструкційна сталь, загартована сталь, максимальні габарити деталі 250x240x100, максимальний діаметр фрези D=16 мм

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Зробити аналіз літературних джерел з питань теорії високошвидкісної обробки. Визначити різальний інструмент, матеріал різального інструмента, покриття та геометрію. Виконати розрахунок вихідних даних для проектування високошвидкісного фрезерного верстата. Визначити вимоги до основних вузлів верстата, допоміжного інструмента, системи ЧПК. Розглянути стратегії високошвидкісної обробки та дати рекомендації щодо їх використання на верстаті, що проектується. Виконати дослідження впливу геометрії, режимів різання, на ефективність обробки для інструментів, що рекомендуються передовими світовими виробниками

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, кількість слайдів, плакатів)

презентація

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	ПРИЗВИЩЕ, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
1	Ст. викладач ОГЛУЗДІНА Л.С		
2	Ст. викладач ОГЛУЗДІНА Л.С		
3	Ст. викладач ОГЛУЗДІНА Л.С		
Нормоконтроль	Ст. викладач ОГЛУЗДІНА Л.С		

7. Дата видачі завдання «_6_» _вересня_2023_року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1.	Аналіз літературних джерел		
2.	Розгляд теорії високошвидкісної обробки		
3.	Розгляд сучасних високошвидкісних верстатів		
4.	Розгляд різального інструмента та різального матеріала		
5.	Розгляд факторів, що впливають на процес обробки		
6.	Виконання розрахунків вихідних даних для проектування верстата		
7.	Визначення вимог до головних вузлів верстата, допоміжного інструмента, системи ЧПК.		
8.	Аналіз стратегій обробки та режимів різання для обробки на верстаті, що проектується..		
9.	Оформлення пояснювальної записки		
10.	Оформлення графічного матеріалу		

Студент(ка)

_____ **Людмила НАЙМАНОВА**
 (підпис) (Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

Керівник проєкту (роботи)

_____ **Любов ОГЛУЗДІНА**
 (підпис) (Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

ПЗ: 111 с, 52 рисунки, 4 таблиці, 30 джерел.

Мета роботи – дослідження особливостей високошвидкісної обробки проектування фрезерного верстата.

Високошвидкісна обробка є передовою технологією обробки. В даний час високошвидкісна обробка набула широкого поширення в авіакосмічній промисловості, при виготовленні комп'ютерних комплектуючих та виробництві прес – форм та штампів. Застосування високошвидкісної обробки тягне у себе скорочення машинного часу, підвищення якості обробленої поверхні, зміна технології обробки.

У роботі розглянуто параметри, що визначають високошвидкісну обробку. Досліджено вплив підвищення швидкості різання на основні параметри процесу. Визначено вихідні дані для проектування високошвидкісного фрезерного верстата. Розглянуто фактори, що впливають на процес обробки. Досліджено режими різання, рекомендовані виробниками інструменту, та надано рекомендації щодо вибору стратегій фрезерування для високошвидкісної обробки на проектованому верстаті.

ВИСОКОШВИДКІСНА ОБРОБКА, ФРЕЗУВАННЯ, ПОДАЧА, ЧАСТОТА ОБЕРТАННЯ ШПИНДЕЛЯ, ШВИДКІСТЬ РІЗАННЯ, СТРАТЕГІЯ, КІНЦЕВА ФРЕЗА, ЧПК, ПРЕС – ФОРМА

THE ABSTRACT

Notes: 111 p., 52 figures, 4 tables, 30 sources.

The aim of activity is a research of factors, which differ high speed cutting from traditional, for .constructing a high speed milling machine with DNC.

A high speed cutting is a advance machining technology. In this time, high speed cutting is used in aerospace industry and in mold industry. The application of a high-speed cutting entails a reducing of machining time, increasing quality and changing of machining technology.

In the degree project is considered factors, which influence on cutting process. Researched an influence of increase cutting speed to main parameters of cutting process. In degree were calculate main parameters of a high-speed milling machine for processing of hardened steel, the factor which involves the ability of cutting, strategies of milling which recommended of tool provider. Was given a recommendations for right choice of a milling strategy for high speed milling machine with DNC

HIGH SPEED CUTTINGT, MILLING, FEED, ROTATION SPEED, ENDMILL, CUTTING SPEED, DNC, MOLD.

ЗМІСТ

Реферат.....	4
Вступ.....	8
1. Літературний огляд.....	10
1.1 Нові технології та їх застосування у промисловості.....	10
1.2 Основні теорії високошвидкісної обробки.....	13
1.3 Умови застосування високошвидкісної обробки.....	23
1.4 CAD/CAM системи для високошвидкісного фрезерування.....	35
2. Визначення параметрів високошвидкісної обробки для проектування високошвидкісного фрезерного верстата з ЧПК.....	43
2.1. Інструменти для високошвидкісного фрезерування та режими обробки.....	43
2.1.1. Типи фрез використовуються для ВШО та схеми фрезерування.....	43
2.1.2. Матеріали різального інструменту.....	45
2.1.2.1. Тверді сплави на основі карбіду та вольфраму.....	50
2.1.2.2. Металокерамічні матеріали.....	51
2.1.2.3. Керамічні матеріали.....	53
2.1.2.4. Кубічний нітрид бору.....	54
2.1.2.5. Полікристалічні алмази.....	55
2.1.3. Покриття ріжучого інструменту.....	56
2.1.4. Геометрія ріжучого інструменту.....	60
2.1.5. Розрахунок різання при високошвидкісній обробці для верстата, що проектується.....	63
2.2 Визначення вимог до основних вузлів проектного верстата для здійснення ВШО.....	68
3. Дослідження стратегій фрезерування для забезпечення ВШО на верстаті, що проектується.....	85

	7
3.1. Аналіз режимів різання, рекомендованих виробниками різального інструменту та рекомендації щодо підвищення ефективності обробки.....	85
3.2. Дослідження стратегій фрезерування у сучасних САМ – системах.....	95
3.3. Рекомендації щодо вибору стратегій фрезерування на проєктованому верстаті.....	104
Висновки.....	109
Перелік посилань.....	108

ВСТУП

Високошвидкісне фрезерування - це принцип обробки матеріалів на фрезерних верстатах з ЧПК, в якому за основу взято швидкі, але легкі режими видалення різання металу з низьким тиском. Як наслідок, зростає швидкість фрезерування. Ціль високошвидкісного фрезерування на верстаті з ЧПК є використання високих швидкостей для досягнення високої швидкості видалення матеріалу.

Високошвидкісна обробка (High Speed Machining, HSM) в останні роки стала одним з напрямків, що швидко розвиваються в механообробці. Пов'язано це насамперед з її високою продуктивністю. Другою важливою особливістю HSM є висока чистота обробленої поверхні, що дозволяє у ряді випадків відмовитися від фінішного шліфування та електроерозійної обробки.

З погляду руху фрези, найголовнішою вимогою до високошвидкісного фрезерування є забезпечення плавної, без різких змін напрямку, траєкторії руху інструменту. Траєкторія такого виду покликана забезпечити постійний переріз стружки та постійне навантаження на фрезу. З'ясувалося, що гладкі траєкторії, притаманні HSM-обробці, можуть істотно (у кілька разів) збільшувати стійкість інструменту і при обробці з традиційними режимами різання. На жаль, такий ефект досягається не завжди, більше того, в деяких випадках стійкість інструменту під час високошвидкісного фрезерування під час руху заданою траєкторією може навіть впасти. Особливо часто падіння стійкості спостерігається при обробці алюмінію та алюмінієвих сплавів.

Традиційно причини подібних невдач пов'язують із характеристиками обладнання, наприклад, із низькою жорсткістю фрезерного верстата із ЧПК. На жаль, відсутні конкретні рекомендації, яка мінімальна жорсткість верстата необхідна при заданій траєкторії руху фрези або як змінити параметри траєкторії при заданих параметрах жорсткості верстата.

Для забезпечення високошвидкісної обробки необхідні також система управління, що забезпечує необхідну швидкість управління органами верстата, адекватна САМ-система підготовки програм, що керують, і так далі. Але все ж таки, визначальним критерієм оцінки принципової можливості обробки заданої траєкторії для високошвидкісного фрезерування є динамічна характеристика приводів подачі.

Таким чином, високошвидкісна обробка може зробити цикл виробництва швидше та отримати високу якість обробки. Однак високошвидкісна обробка серйозно відрізняється від традиційної механічної обробки переважанням швидкоплинних динамічних процесів та яскраво вираженою не лінійністю законів розвитку цих процесів. Внаслідок чого потрібно проведення додаткових досліджень цього виду механічної обробки. Для успішного переходу до високошвидкісної обробки необхідно дуже серйозно поставитися до трьох складових: верстата, інструменту та САМ-системи. Правильна комбінація цих складових та облік вищевикладених вимог до них забезпечать високу продуктивність, точність та ефективність обробки.

1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

1.1 Нові технології на базі високошвидкісної обробки

Високошвидкісне фрезерування в даний час є найбільш обговорюваним і найбільш використовуваною технологією обробки матеріалів. У цю технологію вже зараз вкладено значні капіталовкладення. Основна мета – скоротити витрати на обробку, обслуговування, покращити якість.

Можна виділити три галузі промисловості, де найефективніше застосовується високошвидкісна обробка. Такий поділ пов'язаний зі специфічними вимогами, що висувуються цими галузями до процесу обробки.

Перша галузь – це авіакосмічна промисловість, де обробляються довгомірні деталі з алюмінію, що часто містять тонкі стінки.

Друга галузь включає виробництво ливарних форм, прес-форм і штампів. У цій галузі промисловості здійснюється обробка виробів із твердих та важкооброблюваних матеріалів з високою швидкістю та точністю. Вона орієнтована на обробку деталей високої складності.

Третя галузь пов'язана із виробництвом, яке спеціалізується на обробці алюмінію для виготовлення компонентів для автомобілів, комп'ютерних деталей невеликих розмірів та медичних інструментів. Процес виробництва вимагає швидкого видалення металу через багатоопераційний технологічний процес.

Спочатку високошвидкісна обробка знаходила застосування в аерокосмічній промисловості, але завдяки розвитку нових верстатів та інструментів цей процес став більш доступним у різних галузях промисловості. Зараз виробництво прес-форм і штампів є основним напрямком високошвидкісної обробки.

Розглянемо структуру виробничого процесу виготовлення формотворчих елементів прес - форм і штампів за традиційною технологією та із застосуванням ВШО (рис.1.1) [1].

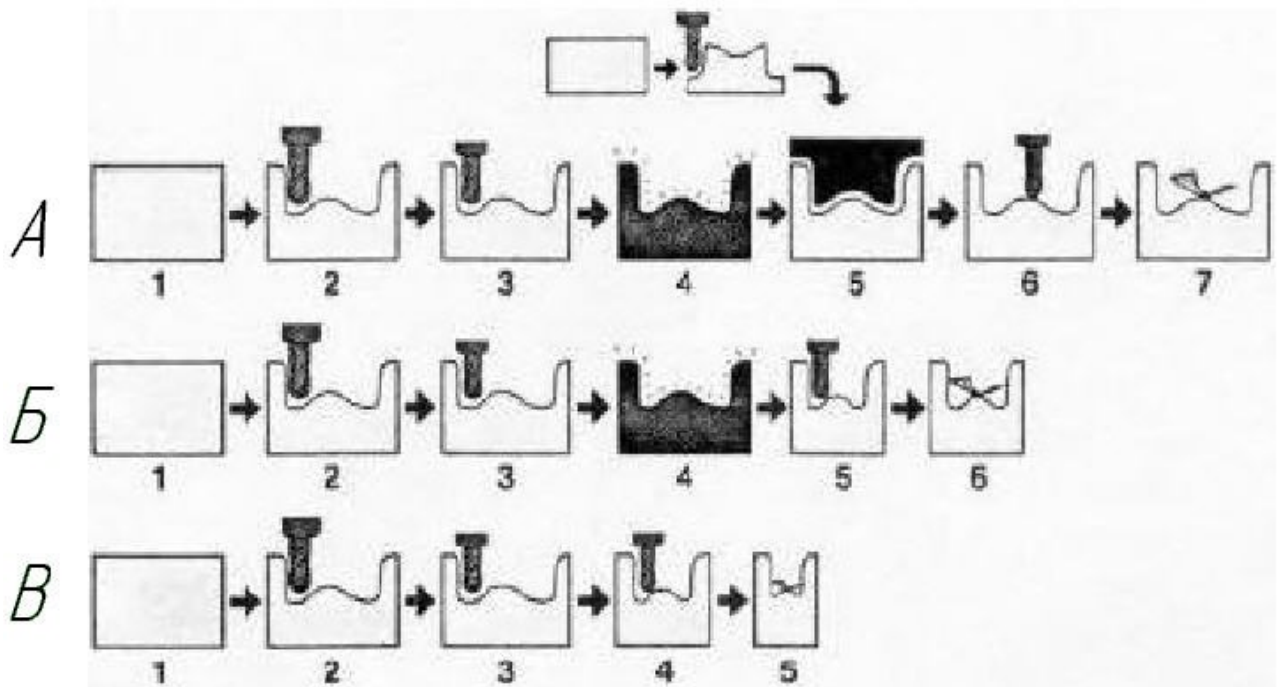


Рисунок 1.1 – Схема процесу виготовлення формоутворюючих елементів оснащення (прес – форми, штампви) за традиційною технологією та з використанням ВШО

Технологія А – це традиційна технологія обробки штампів та прес – форм:

- 1) заготовка (незагартована);
- 2) чорнова лезова обробка;
- 3) напівчистова лезова обробка;
- 4) термічна обробка;
- 5) ерозійна обробка;
- 6) чистова лезова обробка;
- 7) полірування.

Також не слід забувати про операцію, яка безпосередньо не стоїть у ланцюгу, але впливає на технологічний процес – це виготовлення електрода для електроерозійної обробки.

Технологія Б початковими операціями подібна до технології А, але електроерозійна обробка відсутня, а чистова лезова обробка традиційним методом замінена на передову технологію високошвидкісної обробки і слідує відразу після операції термічної обробки. Ось як виглядатиме технологічний процес за комбінованою технологією:

- 1) заготовка (незагартована);
- 2) чорнова лезова обробка;
- 3) напівчистова лезова обробка;
- 4) термічна обробка;
- 5) високошвидкісна обробка;
- 6) полірування.

Як бачимо, технологічний процес виробництва за комбінованою технологією скоротився. З послідовності була прибрана електроерозійна обробка, а разом з нею відпала необхідність ще однієї «допоміжної» операції – виготовлення електрода.

Технологія - це технологія, де на всіх операціях лезової обробки застосовується високошвидкісна обробка. Технологія високошвидкісної обробки дозволяє одразу вести обробку загартованої заготовки. Послідовність операцій наступна:

- 1) заготовка (після термічної обробки);
- 2) чорнова лезова обробка (ВШО);
- 3) напівчистова лезова обробка (ВШО);
- 4) чистова лезова обробка (ВШО);
- 5) полірування.

При використанні цієї технології послідовність операцій менша на дві операції порівняно з технологією А, а час до одержання готового виробу на 30 – 40 % менше.

Використання високошвидкісної обробки призведе до підвищення продуктивності процесу виготовлення виробу за рахунок відмови від застосування електроерозійної обробки та виготовлення електродів, а також за рахунок скорочення машинного часу. Високошвидкісна обробка забезпечує шорсткість поверхні $Ra < 0,07$ мкм і точність форми поверхні, що обробляється в межах 0,02 мм, в той час як при електроерозійній обробці точність, яка досягається становить 0,1 - 0,2 мм. Також при заміні електроерозійної обробки на високошвидкісну помітно збільшується міцність та довговічність штампів та прес – форм [2].

Можна стверджувати, що в основі високошвидкісної обробки лежить не лише скорочення часу обробки за рахунок інтенсифікації режимів різання, але й загальне спрощення виробничого процесу та підвищення якості обробки.

1.2 Основні теорії високошвидкісної обробки

Основні теорії високошвидкісної обробки почали вивчати наприкінці 20-х років ХХ століття К. Саломон та інші дослідники. К. Саломон проводив експерименти з високошвидкісним фрезеруванням і досягав швидкостей до 16500 м/хв за обертовим полотном пилки. З його досліджень випливає, що при переході певної швидкості різання і подальшому збільшенні температура різального леза не підвищується, а навпаки, знижується (див. рисунок 1.2). Гранична швидкість, від якої відбувається зниження температури, залежить від різних факторів, перш за все, властивостей матеріалу, який обробляється.

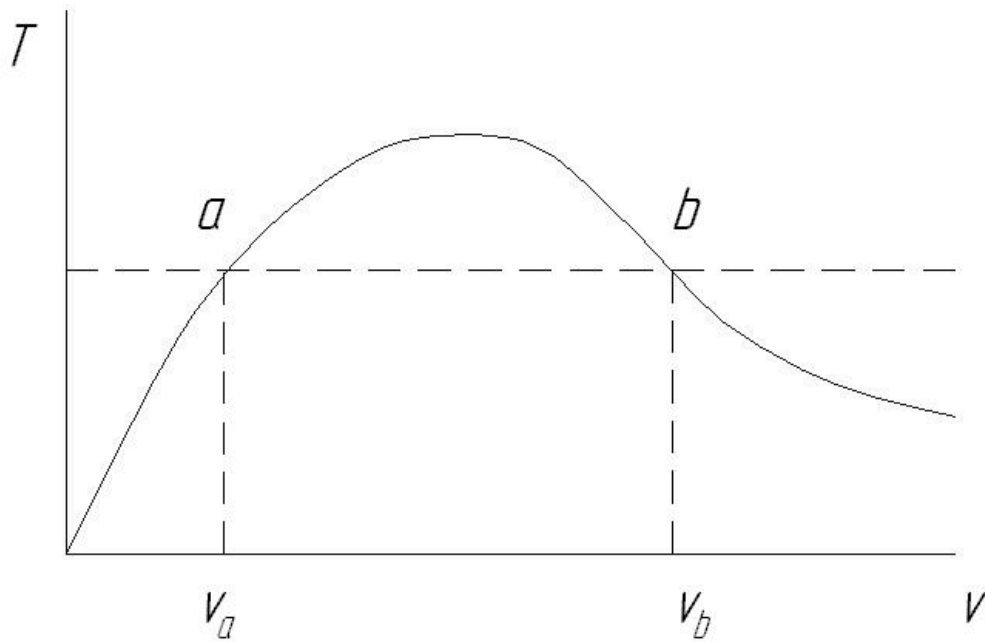


Рисунок 1.2 – Графік залежності температури різального леза від швидкості різання (К.Саломон)

Точці a відповідає критична швидкість v_a , вище за яку робота неможлива. Ця неможливість поширюється на всю область швидкостей від v_a до v_b , відповідної точки b . За другою критичною швидкістю v_b обробка стає можливим внаслідок зниження температури леза [3].

Саломон вважав, що функція $T = f(v)$ (T - температура на кінці різця) та v (швидкість різання) має особливості: при збільшенні v температура T спочатку підвищується, але потім це збільшення стає менш інтенсивним, T досягає максимуму, і при подальшому збільшенні v температура зменшується. Якщо провести пряму ab , паралельну осі v , так щоб точка a відповідала припустимій температурі на кінчику різця, то така температура, за думкою Саломона, може бути досягнута при двох різних швидкостях: v_a і v_b . Швидкість v_a досягалася у дослідів із різанням, але швидкість v_b , яка є дуже великою, практично не було досягнуто.

Після того, як В.Д. Кузнєцов опублікував теоретичні засади можливості використання надшвидкісного різання металів, була проведена серія експериментів з обробки сталі різцем на великих швидкостях в різних лабораторіях. Згідно з теоретичними передумовами Кузнєцова, зі збільшенням швидкості різання, тобто зі збільшенням швидкості навантаження, межа плинності металу наближається до межі міцності, що робить метал більш крихким. Однак обробка крихкого металу супроводжується зменшенням відносної величини роботи пластичної деформації, що в свою чергу призводить до зниження виділення тепла і зменшення температури на різці.

В.Н. Швецов [4] провів експериментальну перевірку цих теоретичних положень на швидкостях до 2200 м/хв, в результаті якої виявилось, що очікуваного безперервного зниження пластичної деформації при збільшенні швидкості не спостерігається. При швидкості близько 2000 м/хв різці швидко виходили з ладу, і процес різання припинявся.

Досліди А.М. Розенберга, Калашнікова і Судовцева [5], проведені при швидкостях до 6000 м/хв, вказали на те, що при обробці сталі усадка стружки різко зменшується до швидкості 300 м/хв, а потім майже залишається стабільною до швидкості 6000 м/хв.

Таким чином, прийшли до висновку, що зі збільшенням швидкості різання коефіцієнт усадки стружки зменшується (див. рисунок 1.3).

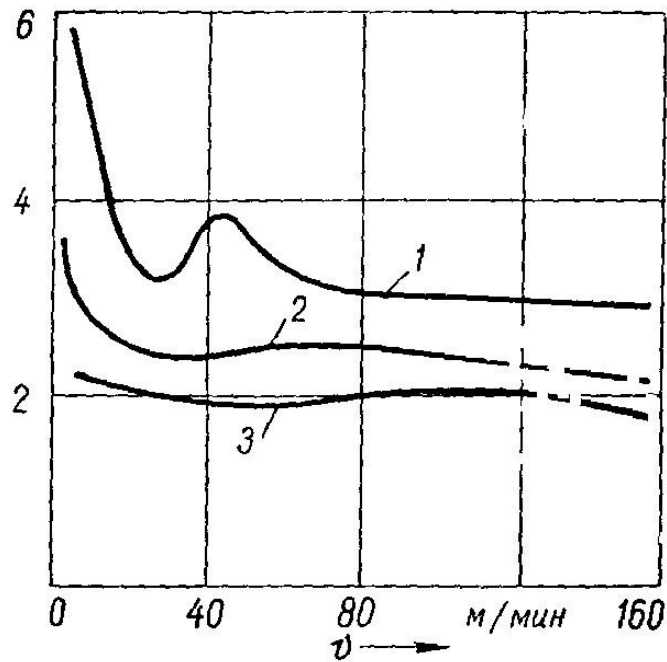


Рисунок 1.3 – Залежність коефіцієнти усадки стружки від швидкості різання

Це пов'язано із тим, що при збільшенні швидкості різання (понад 100 м/хв) у прирізцевій зоні під впливом високої температури граничний шар металу значно розм'якшується і виконує функцію мастила. В таких умовах коефіцієнт тертя на передній поверхні зменшується (див. рисунок 1.4).

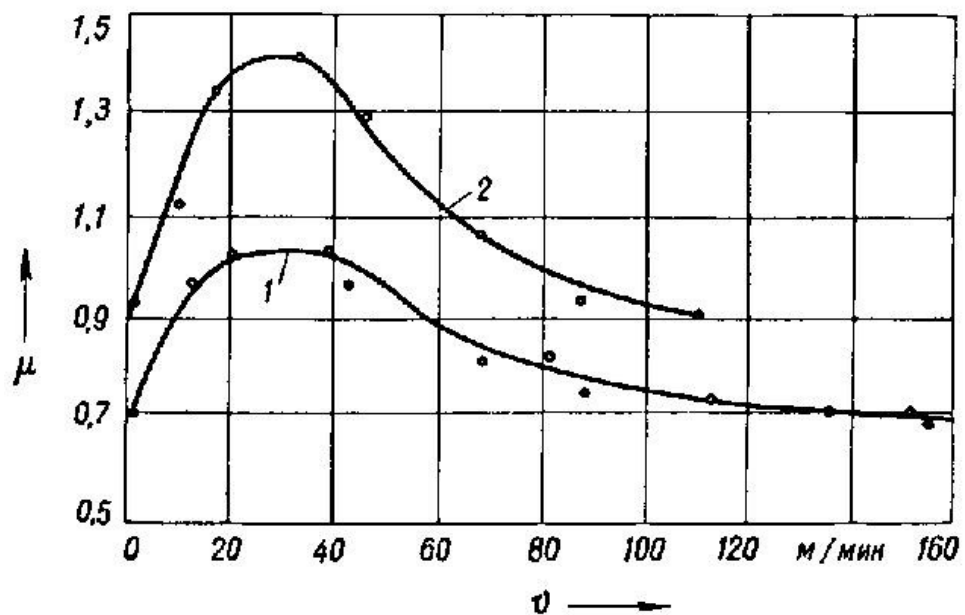


Рисунок 1.4 – Залежність коефіцієнта тертя передньої поверхні від швидкості різання

Зниження сил тертя призводить до зниження сил різання (рис.1.5). Складний характер кривих $P_z = f(v)$ пояснюється появою наросту передньої поверхні леза інструмента. Мінімальні значення сили на кривих $P_z = f(v)$ відповідає максимально можливому наросту. При малій швидкості різання, коли нарост не утворюється, сила різання максимальна. У діапазоні швидкостей, де є максимальне наростоутворення, сила різання та укорочення стружки зменшуються, оскільки зі збільшенням розмірів наросту зростає дійсний передній кут інструменту. У міру подальшого підвищення швидкості різання висота наросту, отже, і дійсний передній кут зменшуються. Одночасно з цим зростають коефіцієнт укорочення стружки та сили різання. Як зазначалося, робота на високих швидкостях різання призводить до значного підвищення температури різання, у результаті зменшується коефіцієнт тертя, отже, і сила різання.

Зменшення сил тертя призводить до зниження сил різання, як показано на рисунку 1.5. Складність форми кривих $P_z = f(v)$ пояснюється виникненням наросту на передній поверхні ріжучого інструмента. Мінімальні значення сил на кривих $P_z = f(v)$ відповідають максимально можливому наросту. При низькій швидкості різання, коли нарост не утворюється, сила різання максимальна. У діапазоні швидкостей, де спостерігається максимальне утворення наростів, сила різання та укорочення стружки зменшуються, оскільки зі збільшенням розмірів наросту зростає дійсний передній кут інструмента. При подальшому збільшенні швидкості різання висота наросту і, відповідно, дійсний передній кут зменшуються. Одночасно з цим коефіцієнт укорочення стружки та сила різання зростають. Як було зазначено, робота при великих швидкостях різання призводить до значного підвищення температури різання, що призводить до зменшення коефіцієнта тертя і, отже, сили різання.

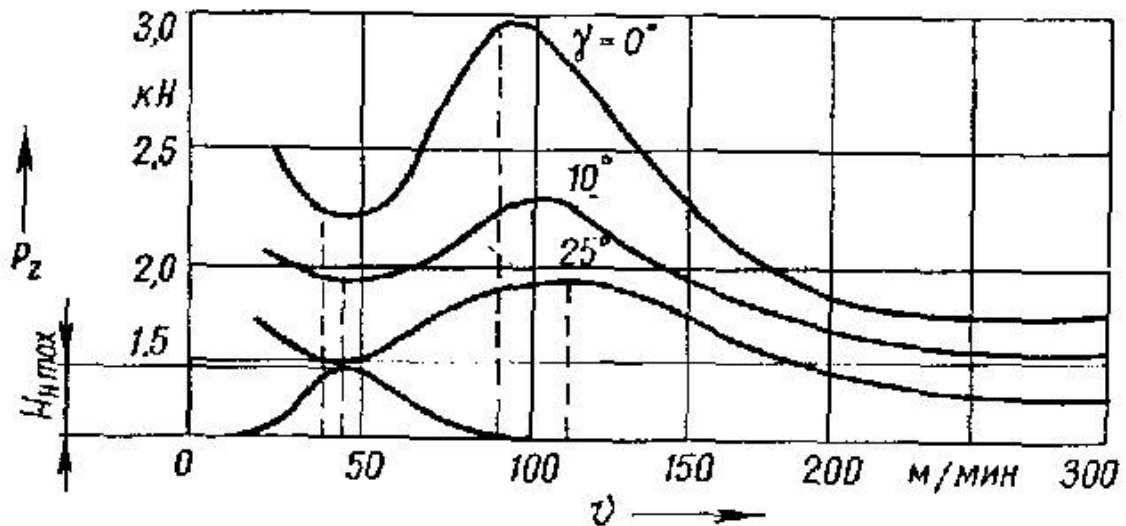


Рисунок 1.5 – Залежність сили різання від швидкості різання та переднього кута інструменту

Мінімуми та максимуми кривих $P_z = f(v)$ стають більш вираженими зі зменшенням переднього кута. Це пов'язано з тим, що більший наріст може утворитися (і утворення його інтенсивніше) при менших передніх кутах інструмента.

Пониження сил різання пов'язане із формуванням та видаленням стружки. Умови різання різним чином впливають на деформаційні та контактні процеси у зоні різання, і цей вплив може бути безпосереднім або опосередкованим. Наприклад, зміна переднього кута інструмента веде до збільшення або зменшення середньої контактної напруги на передній поверхні інструмента, що викликає зміну середнього коефіцієнта тертя та кута тертя. Це впливає на кут дії, зміну кута зсуву та роботу утворення стружки.

Параметри різання можна класифікувати на внутрішні та зовнішні, як показано на рисунку 1.6.

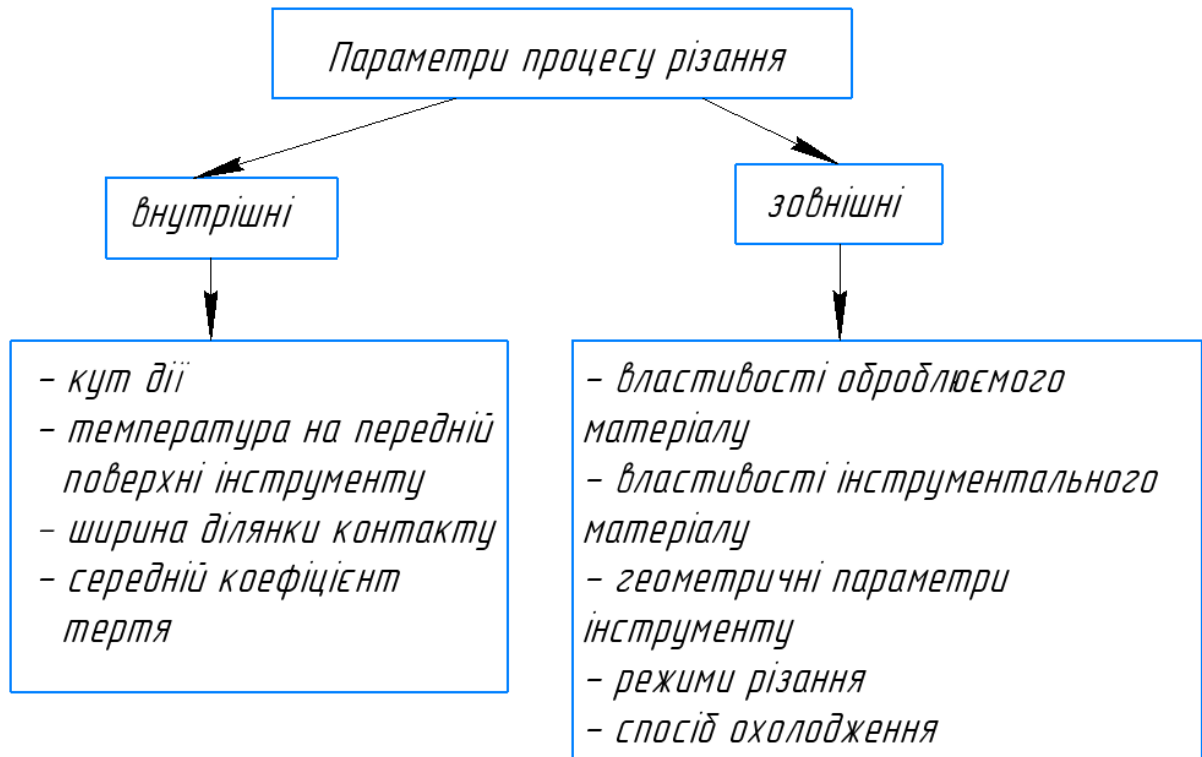


Рисунок 1.6 – Параметри процесу різання

Безпосередній і найбільш сильний вплив на процес різання робить кут дії, передній кут інструменту, швидкість різання та властивості інструменту, що обробляється. Вплив інших чинників процес різання непряме.

Від кута зсуву β (рис 1.6) залежить коефіцієнт укорочення стружки, відносний зсув і робота стружкоутворення.

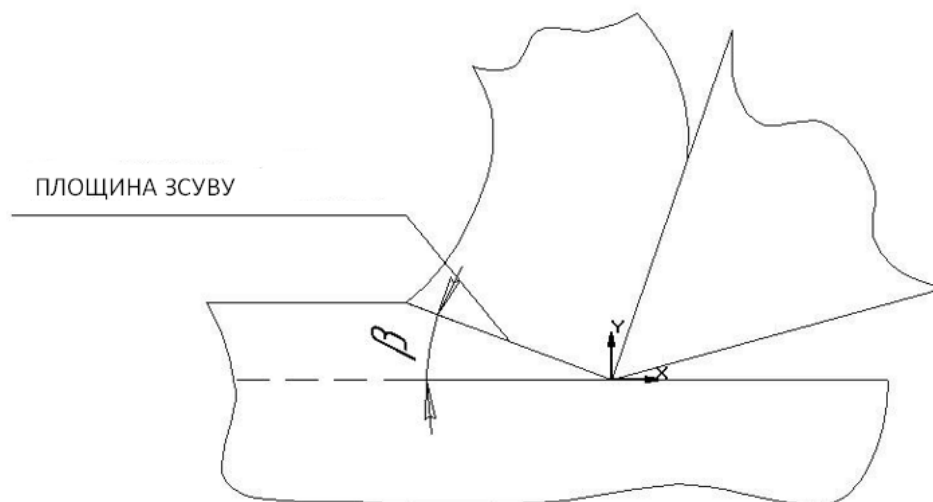


Рисунок 1.6 – Схема стружкоутворення при різанні

Кут γ безпосередньо впливає на процес стружкоутворення. Зі зменшенням переднього кута збільшується кут між векторами швидкостей різання v та стружки v_s . при цьому змінюється напрям руху шару, що зрізається (рис 1.7), зменшується кут зсуву і збільшується ступінь деформації шару, що зрізається (рис 1.8).

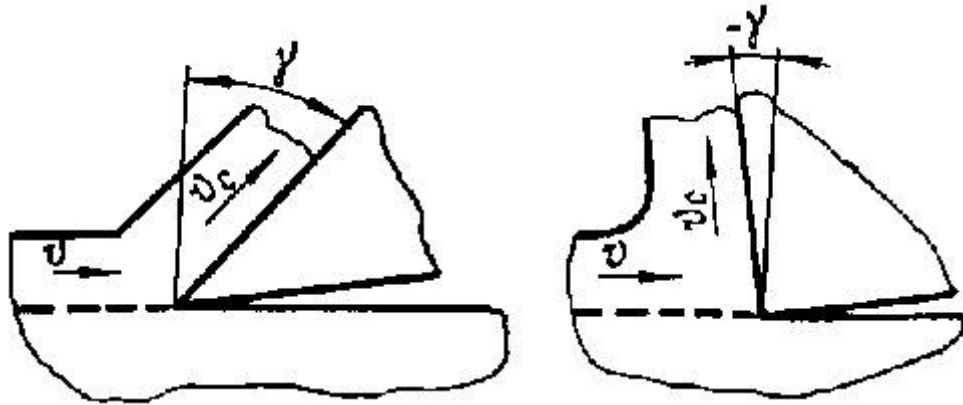


Рисунок 1.7 – Напрямок сходу стружки залежно від переднього кута

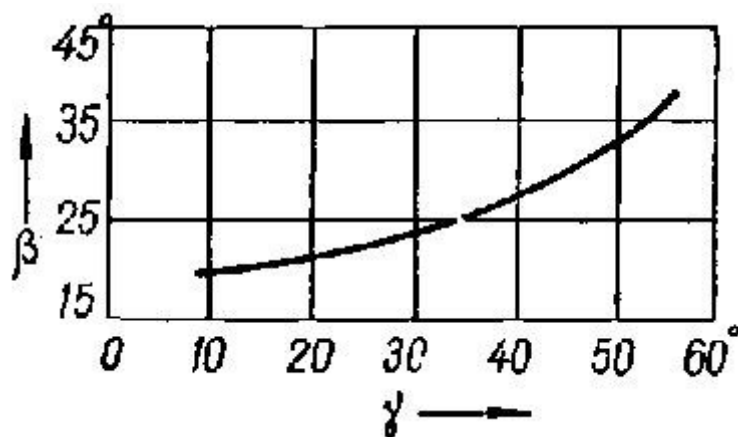


Рисунок 1.8 – Залежність кута зсуву від переднього кута

При обробці металів без утворення наросту, безпосередній вплив переднього кута інструменту на процес формування стружки пов'язаний виключно із зміною кута дії, обумовленої зміною орієнтації передньої поверхні та середнього коефіцієнта тертя. Зі зменшенням γ кута дії кут зсуву

збільшується внаслідок зміни положення передньої поверхні та зменшується через зменшення середнього коефіцієнта тертя.

Безпосередній вплив швидкості різання на процес стружкоутворення виявляється у зміні кута зсуву. При низьких швидкостях зона первинної деформації OAB (рисунок 1.9) має відносно більші розміри.

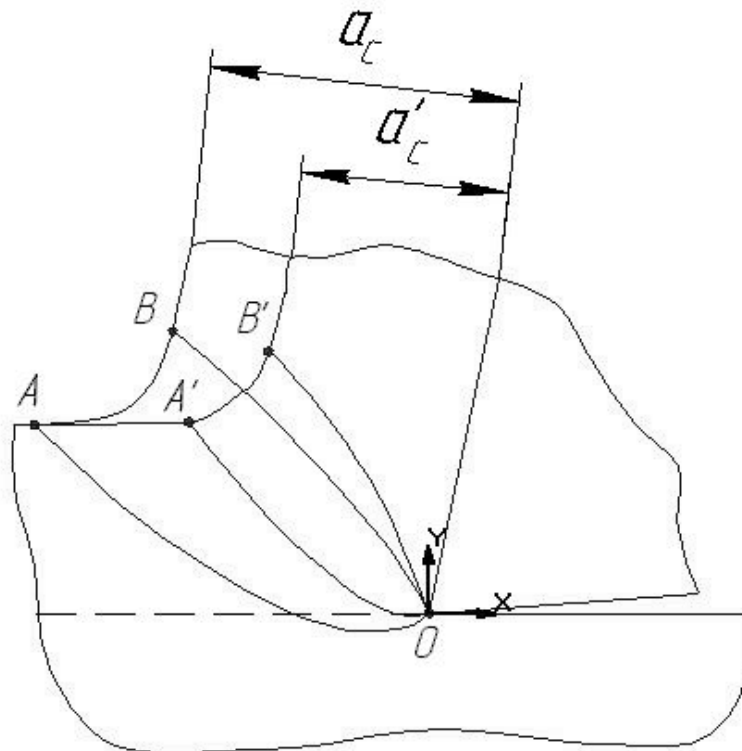


Рисунок 1.8 – Вплив швидкості різання на положення зони первинних деформацій

Зі збільшенням швидкості різання шар, що зрізається, дуже швидко проходить через поле напруг, і пластичні деформації не встигають відбутися на нижній межі OA зони деформації. У результаті зона деформації зміщується у становище OA' , а верхня – у становище OB' , тобто зона первинної деформації OAB стає вже і зміщується за годинниковою стрілкою. Це призводить до збільшення кута і зменшення ступеня деформації шару, що зрізається (рис 1.9).

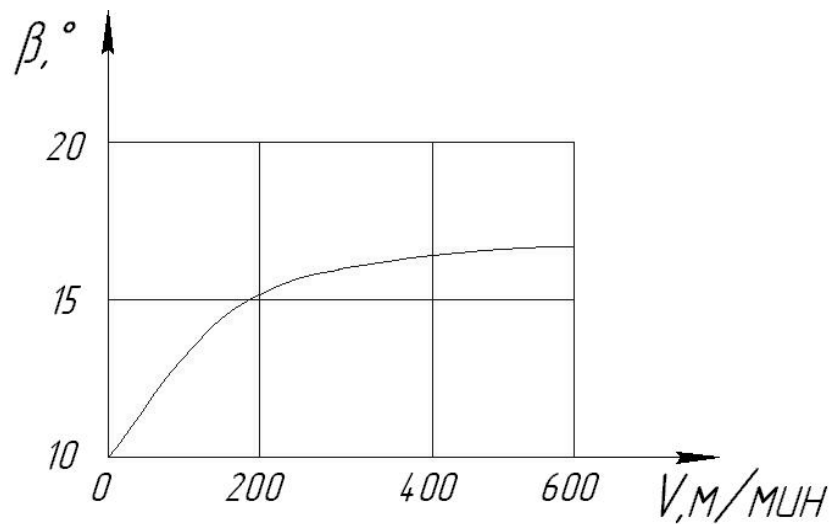


Рисунок 1.9 – Вплив швидкості різання на кут зсуву

Непрямої вплив швидкості на процес стружкоутворення виявляється у його впливі на кут дії, що обумовлено зміною середнього коефіцієнта тертя та дійсного переднього кута у випадку утворення наросту. Зміна швидкості різання призводить до зміни середніх нормальних контактних напруг і температури різання, що впливає на опір зсуву в контактному шарі стружки. Таким чином, при роботі без утворення наросту підвищення швидкості різання полегшує процес стружкоутворення, зменшує відносний зсув та специфічну роботу стружкоутворення.

При обробці металу з утворенням наросту вплив швидкості різання на процес стружкоутворення значною мірою визначається температурою різання. Наприклад, дослідженнями встановлено, що при обробці сталей наріст досягає максимальних розмірів при $\theta = 300^\circ\text{C}$ і зникає при $\theta = 600^\circ\text{C}$. зміна температури тягне за собою відповідні зміни величини дійсного переднього кута, наросту, коефіцієнта укорочення стружки та інших (рис 1.10) лише на таких швидкостях різання, коли температура у зоні різання вище 600°C , збільшення швидкості різання покращує всі показники стружкоутворення.

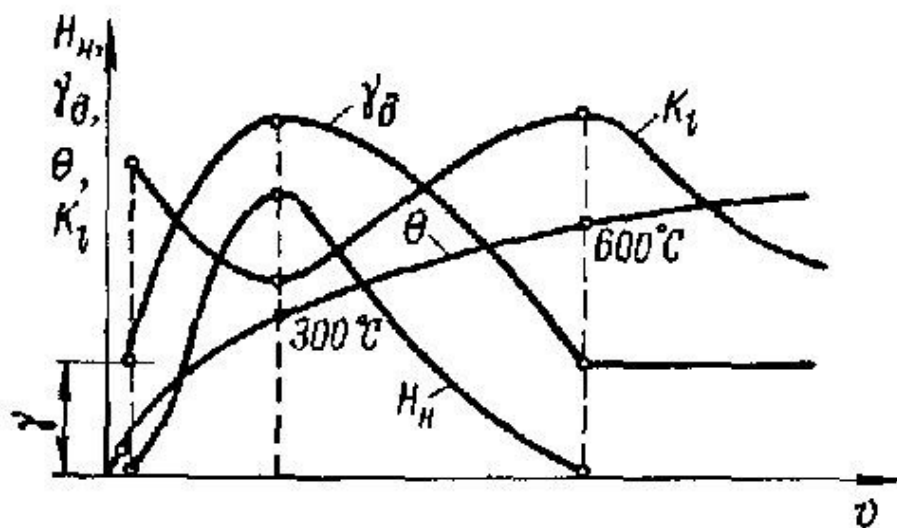


Рисунок 1.10 – Взаємозв'язок між швидкістю різання, температурою, висотою наросту, дійсним переднім кутом, коефіцієнтом укорочення стружки

На рисунку 1.11 показано вплив підвищення швидкості різання основні параметри процесу.

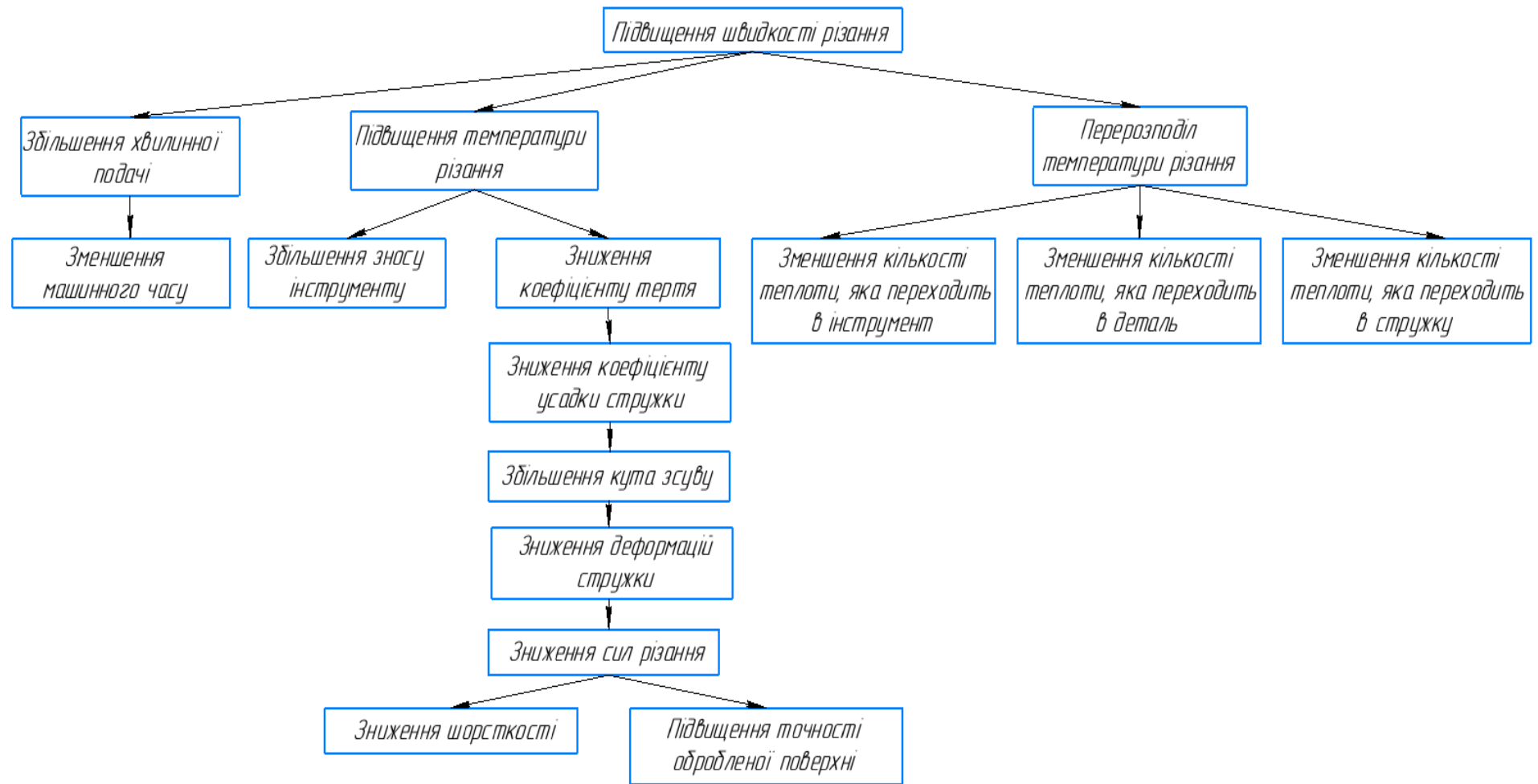


Рисунок 1.11 – Вплив підвищення швидкості різання на основні параметри процесу

Оскільки опір деформації зростає зі збільшенням швидкості різання, особливо в високоміцних матеріалах, механічна сила тиску на ріжучу кромку може бути зменшена шляхом скорочення величини подачі (на зуб). Крім того, із збільшенням радіальної подачі, ріжуча кромка інструменту контактує з оброблюваною поверхнею триваліше, що може викликати значні термічні навантаження на інструмент. Таким чином, для забезпечення довговічності інструменту у високошвидкісному фрезеруванні сталі подачі не повинні перевищувати 5-10% від діаметра інструменту.

Загалом, для високошвидкісної обробки сталі справедливо таке правило: чим вища швидкість різання, тим менше має бути подача. Підсумовуючи вищезазначене, слід відзначити, що зміни в процесі стружкоутворення та її видалення є ключовим аспектом високошвидкісного фрезерування. Діапазон характерного стружкоутворення залежить від матеріалів, виду інструменту, термообробки деталі, матеріалу різального інструменту, якості різання і можливо, покриття інструменту. Рисунок 1.12 представляє порівняльну характеристику швидкостей різання, для різних видів матеріалу, при звичайній та високошвидкісній обробці.

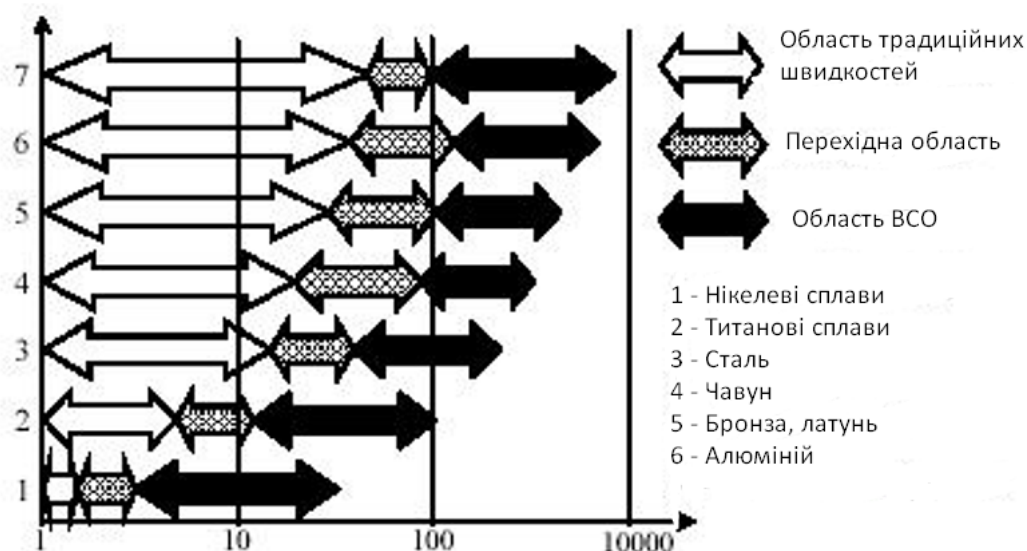


Рисунок 1.12 – Швидкість різання для різних матеріалів під час швидкісної обробки

Високошвидкісна обробка відрізняється від обробки на високих швидкостях, і її не можна сприймати як просту техніку. Вирішальним чинником є той факт, що у цьому варіанті обробки швидкості різання перевищують звичайні швидкості на 5-10 разів, і це суттєво змінює умови утворення стружки. Попри позитивні аспекти, такі як підвищені швидкості різання та зниження нагріву робочої поверхні, слід враховувати й негативні фактори, такі як високий рівень зносу інструменту. Найважливіше полягає в тому, що високошвидкісна обробка – це комплексний, залежний від багатьох факторів процес.

Головним аспектом є високі вимоги до якості обробки, які визначають ефективність використання високошвидкісної обробки. Залежно від конкретних завдань пріоритети можуть варіюватися: в обробці легких металів (або з нескладними матеріалами) збільшення часу різання може призвести до значного зниження продуктивності. З іншого боку, у виробництві інструментів та штамів, точність розмірів та якість поверхні може покращитися за тієї ж самої продуктивності, що в кінцевому рахунку призводить до економії за рахунок зменшення витрат на післяопераційну обробку. Технологія високошвидкісного фрезерування також дозволяє обробляти складні деталі, такі як філігранні частини з тонкими стінками або крихкі елементи, які чутливі до вібрацій. В обробці проблематичних матеріалів, таких як тверді сплави, термооброблені сталі, сплави на основі титану та нікелю, високошвидкісне фрезерування може покращити економічні показники, зменшуючи витрати на інструмент, що компенсується збільшенням продуктивності.

Рисунок 1.13 демонструє найважливіші характеристики високошвидкісної обробки.

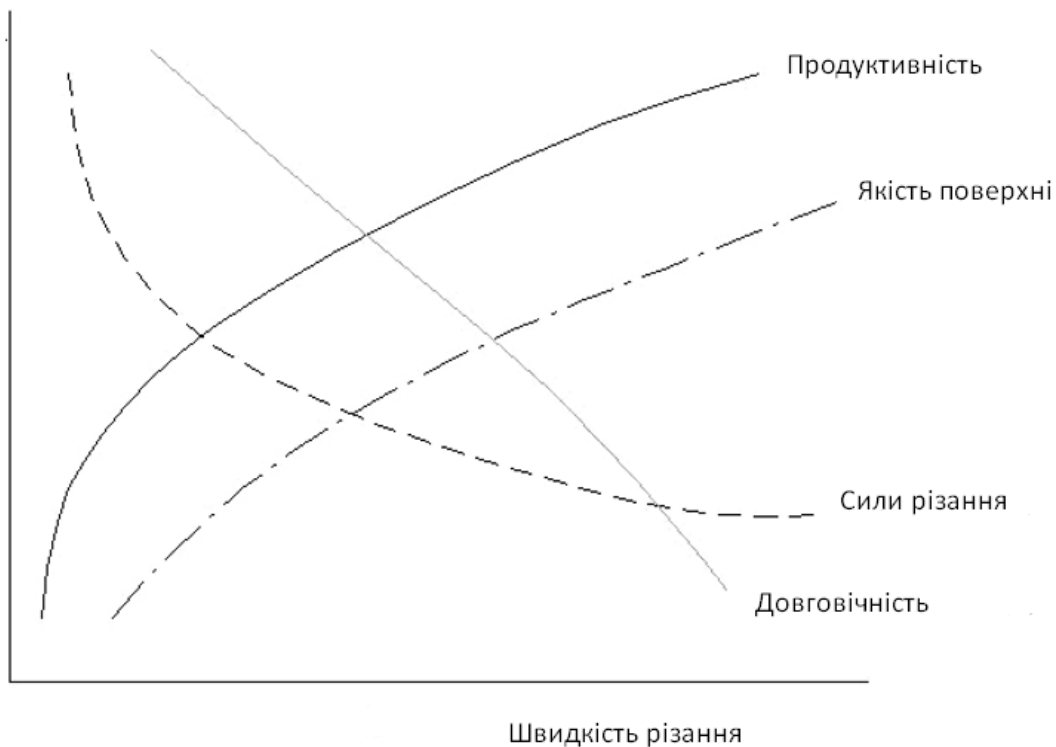


Рисунок 1.13 – Характеристики високошвидкісної обробки

1.3. Умови ефективного застосування високошвидкісної обробки

Високошвидкісна обробка передбачає правильний підбір всіх ключових компонентів, що беруть участь у процесі, таких як верстат, система ЧПК, різальний інструмент, режими різання, допоміжний інструмент із системою закріплення, система програмування, а також кваліфікацію технолога програміста та оператора верстата з ЧПК. Ігнорування хоча б одного з цих чинників може призвести до скасування усіх переваг даної технології.

Високошвидкісне різання передбачає використання високих обертових швидкостей шпинделя та аналогічних швидкостей подач, оскільки зміна швидкості подачі на один зуб повинна бути мінімальною. Шпиндель повинен мати високі обертові швидкості та широкий регульований діапазон швидкостей з великим крутним моментом на всьому діапазоні. Важливо, щоб

шпиндель був оснащений спеціальними підшипниками, призначеними для високих обертових швидкостей, такими як керамічні або електромагнітні підшипники. Електрошпинделі для високошвидкісного фрезерування можна розділити на три групи в залежності від матеріалів, які обробляються і виконуваних операцій.

1. Електрошпиндлі надвисоких обертань зі швидкістю від 40 000 до 60 000 (іноді до 90 000) обертів за хвилину та радіальним зусиллям обробки від 200 до 300 Н призначені для використання з фрезами діаметром від 25 до 35 мм. Ці електрошпиндлі зазвичай використовуються для установки цілісних фрез малих діаметрів. Основні галузі їх використання включають аерокосмічну промисловість та оборонний комплекс, зокрема авіаційну та ракетобудівну галузі. Легкі алюмінієві сплави часто виступають у ролі оброблюваного матеріалу. В якості підшипників можуть використовуватися радіоупорні кулькові підшипники, електромагнітні підшипники та аеростатичні підшипники.

2. Високошвидкісні електрошпинделі з частотою обертання 20 000 - 40 000 об/хв, радіальним зусиллям обробки 500-800 Н для фрез діаметром до 120 мм.

3. Електрошпинделі підвищеної частоти обертання 6 000 -10 000 об/хв, радіальним зусиллям обробки 1000 - 1500 Н для фрез діаметром до 200 мм. На електрошпинделі даного типу зазвичай встановлюють фрези зі змінними робочими пластинами, в тому числі керамічними. Галузь призначення є обробка чавуну та сталі. Можна використовувати радіально-упорні кулькові підшипники, конічні роликові підшипники та гідростатичні підшипники як опору.

Основні виробники електрошпинделів для високошвидкісного фрезерування включають GMN (Німеччина), FAG (Німеччина), Fortuna (Німеччина), Gamfior (Італія), Omlat (Італія), Kikinda (Югославія).

Декілька виробників верстатів виготовляє такі електрошпинделі для своїх потреб. Наприклад, фірма Deckel (Німеччина) виробляє

електрошпинделі типу PA100A для фрезерно-свердлильної обробки алюмінієвих та інших матеріалів, чавуну і сталей, з максимальною частотою обертання 24 000 обертів за хвилину, потужністю 4-6 кВт та діаметром 100 мм. В цих електрошпинделях застосовується мастило "вприскування з охолодженням" для підшипникових опор, що дозволяє підвищити значення параметра швидкохідності до 1.8-2 млн. Примусове охолодження, як правило, використовується для передньої підшипникової опори та обмоток статора.

Задні опори представляють собою гідростатичну систему, яка має можливість осьового руху, що дозволяє налаштовувати осьовий попередній натяг кочення підшипників. У шпиндельних вузлах для опор часто використовують радіально-упорні кулькові підшипники із кутом контакту від 12° до 15° . Шпиндельні вузли також включають системи датчиків для контролю різних параметрів, таких як температура (наприклад, температура зовнішніх кілець підшипників передньої опори), частота обертання (для зворотного зв'язку щодо швидкості), вібрації та радіальне навантаження на шпиндель від сил різання.

Конструкція електрошпинделів зазвичай дозволяє уникнути передачі зусилля при розтиску цанг (при зміні інструменту) на підшипники опор. Сучасні фрезерні та свердлильно-розточні електрошпинделі забезпечують автоматичну зміну інструменту.

Має бути оснащений високоточним тримачем інструменту з мінімальним допуском на биття. Нині шпиндель із конусним отвором став стандартним. Для закріплення кінцевих фрез найкращими вважаються два види патронів: гідравлічний патрон і затискний (патрон, що затискає деталь за рахунок сил тертя). Обидва ці види патронів гарантують повну відсутність дисбалансу та малі биття. Крім високих швидкостей подачі приводи повинні також володіти високою здатністю до прискорення і гальмування без зниження точності, яка у свою чергу повинна мати високу стійкість до вібрації.

Нестача динамічності та приводів може бути компенсована ЧПК. У верстатах високошвидкісного різання такий аспект, як безпека, має бути

поставлений на більш високий рівень, ніж у звичайних фрезерних верстатах. Зона різання повинна бути повністю відокремлена захисним екраном, який повинен попередити випадки вильоту будь-яких частинок, що відокремилися при поломці інструменту. Через високі швидкості обертання, ці частинки піддаються неминучій дії відцентрових сил, і тому у разі відриву від інструменту набувають величезної кінетичної енергії.

Оскільки виникнення шуму (шпиндель, привід, процес різання, стиснене повітря), так само, як і утворення пилю або задимленість, повинні бути прийняті до уваги, то і машини повинні бути забезпечені відповідними захисними пристроями.

Швидкість подачі коливається від 40 до 60 м/хв, а швидкість швидких переміщень може досягати 90 м/хв. Верстати виконують невеликі переміщення у межах від 5 до 20 мікрометрів і мають підвищену жорсткість та температурну компенсацію. Розвиток верстатобудування дозволив здійснити високошвидкісну обробку. Однак обмеженням у високошвидкісній обробки може стати система управління числовим програмним керуванням (ЧПК), особливо якщо вона не забезпечує високу швидкість обробки кадрів. Для досягнення високої якості обробленої поверхні програма для верстатного шліфування включає дуже малі переміщення. Максимальну подачу, яку може забезпечити система ЧПК, можна розрахувати за формулою:

$$F_{\max} = (\text{Довжина переміщення в кадрі}) : (\text{час обробки кадру}) * 60, \text{ мм / хв}$$

З даного співвідношення можна вивести, що при переміщеннях на рівні 0,01 мм і часі обробки кадру, який становить 2 мс, максимальна подача обмежується значенням 0,3 м/хв. Сучасна система ЧПК повинна мати здатність "переглядати" вперед зі швидкістю від 100 до 200 кадрів на секунду для вчасного проведення розрахунків щодо гальмування перед кутом та розгону після повороту.

Щодо ріжучого та допоміжного інструменту, інструменти для високошвидкісної обробки суттєво відрізняються від звичайних ріжучих інструментів, і до них пред'являються певні вимоги. Вони повинні бути спроектовані для дуже високих швидкостей, а саме повністю симетричними з мінімальним зносом. Геометрія ріжучої дії повинна враховувати відмінності в умовах утворення стружки, особливо при обробці легких металів. Для поліпшення плавності процесу обробки ріжучі кромки повинні перекриватися, що можливо забезпечити збільшенням кількості ріжучих кромок або зміною кута врізання.

Однією з основних вимог до інструментів для високошвидкісного фрезерування є їх висока зносостійкість, необхідна для ефективного використання при високих швидкостях різання. Ця властивість, особливо важлива при обробці сталі, грає ключову роль у рішенні питань економічної вигідності використання інструментів для високошвидкісного фрезерування.

Зазвичай, при звичайній обробці, основу механічного навантаження на інструмент складають сили різання. Однак при високошвидкісному фрезеруванні виникають додаткові відцентрові сили, що покладає ще вищі вимоги до збалансування маси, зокрема, за допомогою повної симетричності конструкції інструменту та забезпечення його безпеки, особливо для інструментів зі змінними ріжучими вставками.

У разі цілісних інструментів подача на один зуб повинна бути приблизно рівною. Це вимагає встановлення мінімального допуску на радіальне зношування, щоб забезпечити рівномірне навантаження на всі ріжучі кромки, що сприяє зменшенню неврівноваженості напрямку сил різання. Напрямок різальної сили значно впливає на ефективність роботи ріжучих кромок. Для забезпечення постійного напрямку сили, наступна ріжуча кромка повинна вже увійти в контакт, коли попередня ріжуча кромка залишає поверхню, яку обробляють. Це можна забезпечити за рахунок гострого кута між зубами або за рахунок великої кількості ріжучих кромок.

Вимоги до невеликої кількості ріжучих кромок, як правило, суперечать потребі великої зони виведення стружки. Розміри зони виведення стружки переважно залежать від швидкості радіальної подачі. Ці протилежності вимоги призводять до потреби застосування різних стратегій вибору інструментів, які, в основному, базуються на виборі матеріалу та налаштуванні швидкості радіальної подачі. На сьогоднішній день ми маємо значний асортимент унікальних геометрій для ріжучих інструментів, призначених для обробки металокераміки та твердих сплавів на основі карбїду і вольфраму.

Додаткові вимоги до інструментів для високошвидкісного фрезерування включають високу міцність та мінімізацію концентрації напруг. Міцність інструменту досягається оптимізацією конструкції його основної частини. Концентрацію напруг можна зменшити, оптимізуючи форму шліфувальних дисків в пазах відведення стружки у пальцевих типах фрез.

У збірних інструментах особливо необхідно враховувати їх механічні властивості. Ріжучі пластини, основи та гвинти, повинні забезпечувати надійне кріплення навіть під дією дуже високих відцентрових сил. Високі швидкості обертання диктують високі вимоги, ніж вимоги до звичайних інструментів. Концентрація напруг, надто маленькі зони створення стружки, а також надто великі обертальні та радіальні зноси - ось ті проблеми, які потрібно вирішувати при роботі інструменту.

Провідні інструментальні фірми пропонують сьогодні широку гаму фрез для ВСО з докладними рекомендаціями щодо областей їх застосування та режимів різання. Розробляються нові дрібнодисперсні метали, здатні працювати надійно на високих швидкостях. Надзвичайно важливо звернути увагу на системи допоміжного інструменту, які забезпечують кріплення фрез. У зв'язку зі зниженням сил різання у процесі ВСО на першому плані виходить інші чинники, такі як величина биття фрези, вібрації. Наприклад, подвоєння швидкості різання збільшує відцентрові сили більш ніж у 4 рази, і ці сили стають порівнянними з силами різання. Биття інструменту сильно впливає на зношування. Це підтверджують дані експериментів (рис 1.14), де визначено

практично лінійну залежність зносу від биття при високих швидкостях різання.

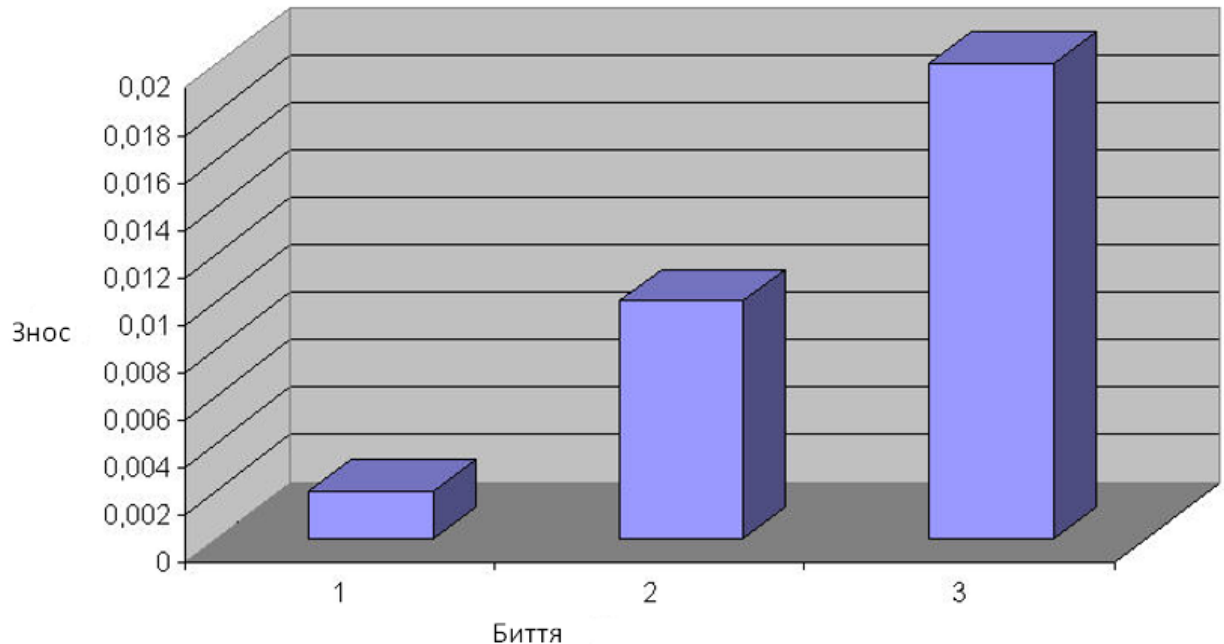


Рисунок 1.14 – Вплив биття на зношування інструменту

Отже, важливо надавати особливу увагу балансуванню інструменту при високошвидкісному обробленні (ВСО). Для досягнення цього можуть використовуватися спеціальні патрони з можливістю балансування або збалансовані оправки для термозатиску.

В останні роки швидко зростає виробництво та застосування лезових різальних інструментів із синтетичних надтвердих матеріалів: полікристалічних алмазів (PCD) та кубічного нітриду бору (PCBN). Це пояснюється суттєвим розширенням областей використання таких інструментів за рахунок таких факторів:

Останнім часом значно зросло виробництво та використання різальних інструментів із синтетичних надтвердих матеріалів, таких як полікристалічні алмази (PCD) та кубічний нітрид бору (PCBN). Це пояснюється значним

розширенням областей застосування таких інструментів завдяки таким факторам:

а) автоматизація процесів різання та впровадження високошвидкісного та надшвидкісного різання зі швидкостями до 10 000 м/хв;

б) збільшення обсягів використання нових важкооброблюваних неметалевих композиційних матеріалів, і навіть спеціальних сплавів в автомобільній та інших галузях;

в) впровадження екологічно чистих процесів обробки без застосування змащувально-охолоджуючих рідин (ЗОР).

Обробка чорних та кольорових металів з використанням швидкостей різання в межах 5000 м/хв і вище стає можливою на сучасних високошвидкісних верстатах завдяки створенню спеціального інструменту та нових інструментальних матеріалів. Ці нові матеріали перевершують традиційні тверді сплави та швидкорізальні сталі за своїми характеристиками. До числа таких інноваційних інструментальних матеріалів, які володіють відповідними тепло- і фізико-механічними характеристиками, належать синтетичні надтверді матеріали (СНМ) на основі полікристалічних алмазів (PCD), кубічного нітриду бору (PCBN) та керамічні матеріали на основі Al_2O_3 та Si_3N_4 .

Висока твердість і стійкість до зношування СНМ при температурі 1000 - 1200 °С дозволяє досягати швидкостей різання, які на порядок перевищують допустимі для твердого сплаву. Однак нижчі, порівняно з останніми, характеристики міцності обмежували застосування СНМ при напівчистовій і чистовій обробці чавуну і сталі, особливо при безперервному точінні.

Сучасні покращені технології виробництва СНМ дозволяють їх використання не лише для напівчистої, але в деяких випадках і для чорнової обробки. Полікристалічні СНМ, які виробляються на сьогоднішній день, а також СНМ на основі Al_2O_3 , з армуванням ниткоподібними кристалами SiC в кількості до 30-40%, мають досить високі характеристики міцності.

Використання інструменту, що має полікристалічні надтверді матеріали (СНМ) на основі РСВН, спрямоване на проведення чистової та напівчистової обробки сірих, високоміцних та вибілених чавунів, а також загартованих сталей у виробничих умовах автоматизованого виробництва. Дослідження показали, що інтенсивність зношування цього інструменту залишається незначною навіть при фрезеруванні сірого чавуну із швидкістю різання $V=1000$ м/хв. Однак область застосування цих матеріалів для високошвидкісної обробки обмежена їхньою низькою стійкістю до термоудару. Оскільки високошвидкісна обробка покликана забезпечити високу якість оброблюваної поверхні, велика увага має бути приділена вибору режимів різання з точки зору уникнення зон, де спостерігається вібрація (див. рис. 1.15).

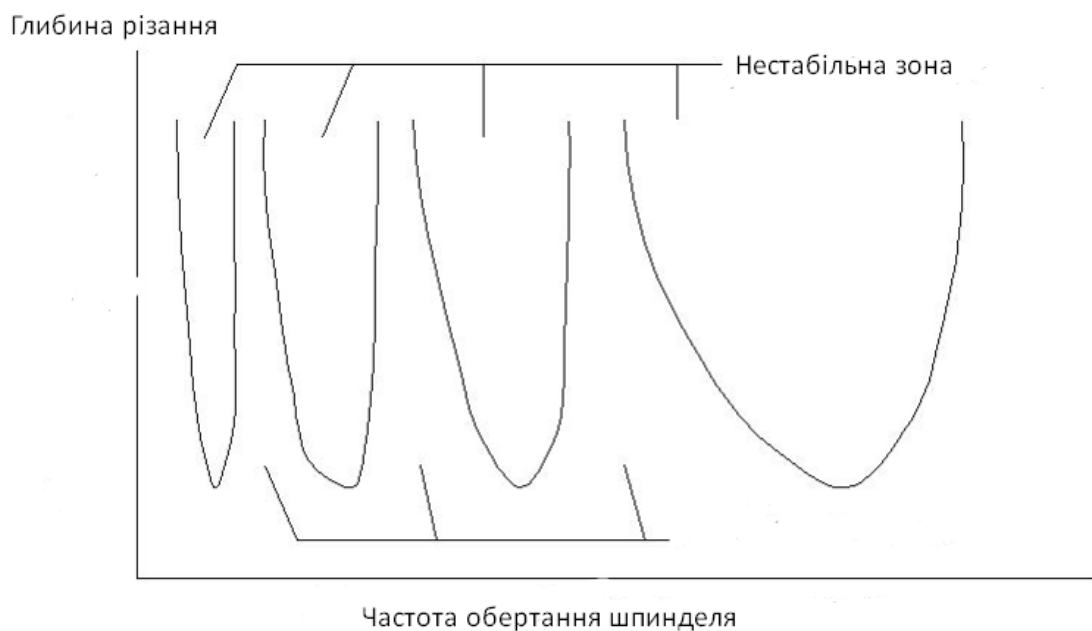


Рисунок 1.15 – Зони вібрацій при фрезеруванні залежно від глибини та частоти обертання шпинделя

Необхідно експериментально визначати стабільні зони для кожної комбінації системи ВПД (верстат - пристосування - інструмент - деталь), оскільки відпрацьованих рекомендацій немає. Фрези з нульовим радіусом

заокруглення виявляються особливо схильними до вібрацій, і для зменшення цього явища рекомендується використовувати фрези з заокругленою ріжучою кромкою. Ефективність охолодження також впливає на стійкість інструменту під час високошвидкісного оброблення. Дослідження показали, що найбільша стійкість досягається при використанні обдування. Так як тепло концентрується в стружці, важливо швидко видаляти її з зони різання. Низька стійкість інструменту при охолодженні може бути пояснена, передусім, фарбуванням, що виникає внаслідок циклічних термічних навантажень на крайку інструменту. Постійне теплове навантаження, навіть при високих температурах, виявляється більш перевагою, ніж циклічне навантаження, яке змінюється.

1.4 CAD/CAM система для високошвидкісної обробки

Правильне виконання високошвидкісної обробки (ВШО) залежить одночасно від багатьох чинників. Характер обробки такий, що щось починає працювати неправильно, то надалі ситуація дуже швидко посилюється.

Деякі критичні моменти можна легко визначити: високошвидкісний верстат, оснащений потужним CNC та високоточним шпинделем; точно підігнані та збалансовані різцетримачі; високоточні різці. Кожен із цих факторів може бути заданий досить точно. Інші чинники точно визначити важче, і це, зазвичай, пояснює, чому деякі спроби ВШО закінчуються невдачею, хоча фізичне устаткування задовольняє тим самим вимогам, як і за вдалих спробах.

Якість і правильність CAD- і CAM-операцій - два основних фактори такого роду. Це очевидно: оскільки CAD/CAM-система генерує програму для ЧПК, отже вона безпосередньо визначає умови обробки. Однак точно визначити, що саме потрібно для отримання хорошого результату від ВШО, дуже важко.

CAD-модель просто визначає форму деталі, після чого модель передається технологу ЧПК та робітнику, який робить обробку. Теоретично все правильно, але в багатьох випадках CAD-модель зовсім не може визначати форму, що обробляється. Відомо кілька причин чому модель не може ідеально підійти для високошвидкісної обробки. Більшість із цих причин впливатиме також і на стандартну обробку, проте там ефект буде значно меншим. Це може здаватися не настільки очевидним, проте CAD-модель має безпосереднє відношення до високошвидкісної обробки.

Головна перевага високошвидкісної обробки – здатність точно обробляти деталі з мінімальними температурними змінами та гарною чистотою поверхні. Як це не дивно, але часто допуски, що використовуються при створенні моделі деталі, грубіше, ніж допуски при чистовій обробці.

Потенційне джерело проблем із точністю – це обмін даними. Деталі, що проектувалися в одній CAD-системі, потім передаються в іншу систему для додаткової роботи та обробки на верстаті. Кожна така передача вимагає, щоб геометрія була конвертована з одного формату в інший, а деякі перетворення робляться з наближенням до певного кінцевого допуску. Ефекти від цих допусків є кумулятивними, тому необхідно бути впевненим, що вони встановлені істотно меншими (принаймні в 10 разів), ніж допуск чистової обробки.

Нейтральні формати обміну даними, такі як IGES, часто змушують систему конвертувати різні геометричні уявлення. Якщо це можливо, найкраще покладатися на систему відправлення, оскільки вона має доступ до початкових даних. Це може бути досягнуто шляхом коригування IGES у відправній системі. Коригування встановлює, які з усіх можливих типів даних повинні використовуватися в IGES-файлі. Деякі системи мають готові набори IGES-налаштувань для роботи з популярними системами.

Ще один шлях мінімізувати втрати при конвертації – використання прямих інтерфейсів. Прямий інтерфейс дозволяє одній системі безпосередньо читати файли іншою. Наприклад, коли PowerMILL (Delcam plc) має прямий

інтерфейс для CATIA, Pro/ENGINEER, Unigraphics та інших широко поширених систем.

Деякі компанії-розробники через простоту віддають перевагу формату даних STL, що є наближеною тріангуляцією математичної поверхні моделі. Багато САМ-систем, включаючи PowerMILL, можуть безпосередньо працювати з STL-файлами. Однак при створенні файлу STL трикутники генеруються з певними допусками і це може призвести до помітного «граніння» оброблюваної поверхні. У багатьох популярних конструкторських системах допуск STL на тріангуляцію за умовчанням цілком суттєвий (0.1 мм) і прихований у масі параметрів, де його легко не помітити. Зменшення допуску обробки на грубому STL-файлі просто призводить до того, що кожен трикутний осередок обробляється більш точно.

Більшість моделей представлені у CAD-системах у вигляді набору з обрізаних поверхонь. Точність, з якою ці поверхні стикаються між собою, може сильно вплинути на правильність траєкторії інструменту.

Деякі САМ – системи мають функції, що дозволяють позбавитися цієї проблеми, але найкращий спосіб уникнути цього – гарантувати, що CAD - модель точно представляє форму, що підлягає обробці. Внутрішні закруглення найкраще формувати, використовуючи фрезу меншого радіусу, тому що при цьому траєкторія йтиме більш гладко. Інструмент з радіусом 70% від радіусу закруглення або менше цілком підійде, а навантаження на інструмент зменшиться приблизно втричі порівняно з гострим кутом.

Хоча ВШО розширює спектр характерних рис, які можуть бути безпосередньо оброблені, складні частини зазвичай включають деталі, які повинні оброблятися електроерозійною обробкою. Більшість деталей має отвори, які можна просто просвердлити. Якщо CAD – модель включає такі особливості, більшість САМ – систем намагається обробити їх. В результаті з'являються небажані області, де інструмент «пірнає» у отвори або йде під гострим кутом. САМ - оператори можуть витратити досить багато часу, намагаючись виправити ці дефекти.

По можливості слід виключати з САД моделі ті елементи, які не потрібно обробляти. Залежно від типу використовуваної САД – системи це можна зробити або вилучивши їх, або закривши додатковими поверхнями.

Погана стратегія зазвичай призводить до неприйнятно короткого терміну служби інструменту або до катастрофічних помилок. Дуже важливо пам'ятати, що для ВШО мало лише запустити готову траєкторію обробки та збільшити швидкість обертання шпинделя та подачі.

Траєкторія інструменту для високошвидкісного фрезерування повинна задовольняти низку вимог:

- інструмент не повинен довбати деталь;
- ріжуче навантаження на інструмент має бути в допустимих для нього межах;
- траєкторія інструменту не повинна робити гострих виступів (піків), що перевищують певну межу;
- необхідно уникати різкої зміни швидкості видалення матеріалу;
- швидкості та прискорення повинні бути у допустимих для верстата межах;
- має підтримуватися зустрічний шлях різання;
- потрібно уникати різких змін напрямку різання;
- холості ходи повинні бути мінімізовані;
- час проходження все і траєкторії має бути зведений до мінімуму.

Існує ряд простих правил, які технолог повинен виконувати при складанні програм обробки, і головне тут – наявність САМ – системи, яка б ці правила підтримувала.

Необхідно різати тонко, але швидко, тобто. знімати малі перерізи із високою швидкістю. Про це вже згадувалося, і це є основою ВЗГ. Це реалізується завданням малих кроків між проходами, крім випадків врзання, коли йде прохід повної шириною фрези. Такі випадки треба виключати, що досягається шляхом використання триоїдальної обробки, коли в процесі врзування фреза рухається по колу (рис. 1.16)

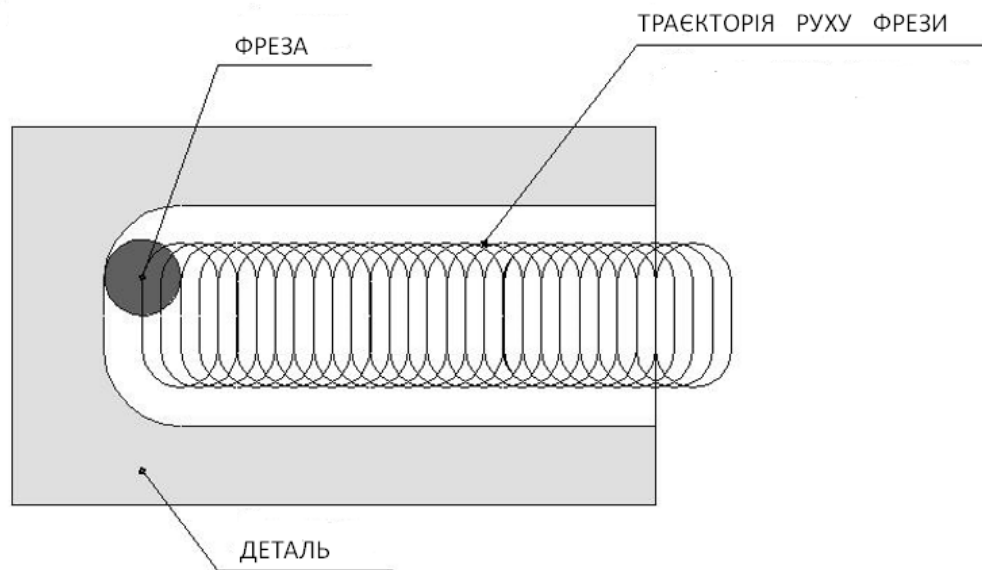


Рисунок 1.16 – Трохоїдальна обробка

Ідеально, коли САМ – система сама будує триоїду у місцях, де необхідно здійснити врізання (рис. 1.17).

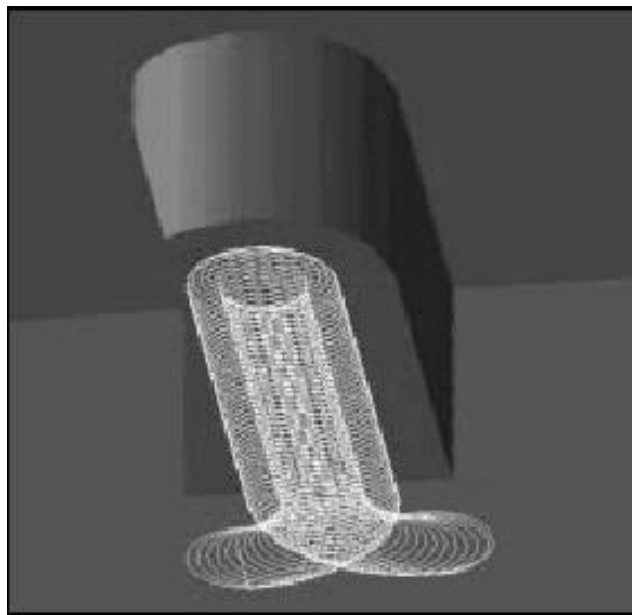


Рисунок 1.17 – Трохоїдальна обробка паза згенерована САМ – системою Power Mill 4.0

Ця стратегія використовується для формування пазів, які раніше оброблялися фрезою того ж діаметра, що і ширина паза. При використанні високошвидкісного оброблення (ВСО) для обробки загартованих деталей з отворами, де свердління стає неефективним через низьку стійкість свердла, можна ефективно використовувати метод спірального розфрезерування отворів. Практика показує, що цей метод перевершує свердління як за продуктивністю, так і за стійкістю інструменту.

Внаслідок використання цього підходу важливо приготуватися до того, що програма для ВСО буде значно обширнішою, ніж традиційні програми для силового різання. Як було вказано вище, системи ЧПК повинні бути здатні ефективно обробляти програми об'ємом в десятки мегабайт. Великі обсяги програм вимагають відповідно значних зусиль для розрахунку траєкторій, і тут швидкість розрахунку, яку забезпечить система САМ, стає критичною.

Наступним етапом, який потрібно забезпечити, є плавність траєкторії руху інструменту. Це необхідно для зниження динамічних навантажень при різкій зміні напрямку руху інструменту. Ми повинні уникати кутів на траєкторії руху, оскільки при різкій зміні напрямку інструмент повинен зупинятися, і це може викликати удар фрези в деталь через зниження навантаження в цей момент.

Також важливо домагатися рівномірного навантаження на інструмент. Традиційний метод обробки, який включає численні входи та виходи інструменту (навіть якщо вони згладжені), не є оптимальним для високошвидкісного оброблення (ВСО). Слід надавати перевагу стратегіям зі спіральним рухом, де інструмент, одноразово врізавшись, утримує постійний і рівномірний контакт з заготовкою, або стратегіям еквідистантного зміщення контуру, які довгий час утримують контакт інструменту з заготовкою, з одним входом та виходом.

Це правило рівномірних навантажень визначає метод обробки внутрішніх округлень. При ВСО слід уникати обробки фрезами з радіусами заокруглення деталі, оскільки це може призвести до різкого збільшення

перерізу зрізу та відповідно до підвищення навантаження на інструмент. Отже, однією з вимог, що висуваються до систем моделювання, має стати можливість легкого та надійного моделювання радіусів заокруглень.

Чистова обробка ставить особливе завдання для ВШО. Так як форма деталі - це обмеження, яке не можна обійти, і недоліки та умови різання часто виявляються у видимих відмітках на закінченій поверхні. Чорнову або напівчистову обробку легко оптимізувати оскільки САМ - оператор може підкоригувати форму деталі після операції та видалити зазначені особливості при чистовій обробці.

Для того, щоб отримати найкращий результат від ВШО, дуже важливо забезпечити адекватний обсяг САМ, щоб верстат був повністю завантажений високоякісними програмами:

- необхідно програмне забезпечення САМ, яке має необхідні можливості для високошвидкісної обробки. Це дозволить зменшити навантаження на операторів, які мають оптимізувати свої програми;
- необхідно програмне забезпечення САМ, яке швидко обчислює траєкторії без зарізів. Пакетне вирахування дозволяє розраховувати складні програми в нічний час;
- необхідні потужні комп'ютери та їх регулярне оновлення;
- необхідний достатній досвід та кваліфікація САМ-операторів;

Для будь-яких деталей, крім найпростіших ВШО розбивається кілька кроків. Вибір правильної послідовності кроків — найважливіша стадія програмування ВШО, і саме тут досвід найцінніший. Переважна більшість проблем користувачів, які спостерігаються при використанні продуктів фірми Delcam, відбувалася через неправильне використання стратегії обробки, а не через помилки у самій стратегії як такій.

ВШО пред'являє суворі вимоги до всіх елементів процесу. Дуже важливо дотримуватись вимог до обладнання, і їх досить просто сформулювати. Набагато важче визначити, що конкретно потрібно від САД- і САМ-програм, які істотно впливають на якість і стабільність процесу ВШО.

Важливо, щоб CAD-моделі для високошвидкісної обробки точно передали форму, яка оброблятиметься. Це означає точність допусків обробки моделі; в той же час елементи, які не будуть оброблятися, повинні бути, по можливості, виключені з моделі.

Внесок у обладнання для високошвидкісної обробки повинен підтримуватись відповідними можливостями програмного забезпечення, щоб машини завантажувалися високоякісними програмами. Можливість виконувати елементи програмування на робочому місці може стати для операторів ефективним способом підвищення можливостей програмування.

CAM - оператори та робітники повинні бути належним чином навчені, і добре розуміти особливості ВШО.

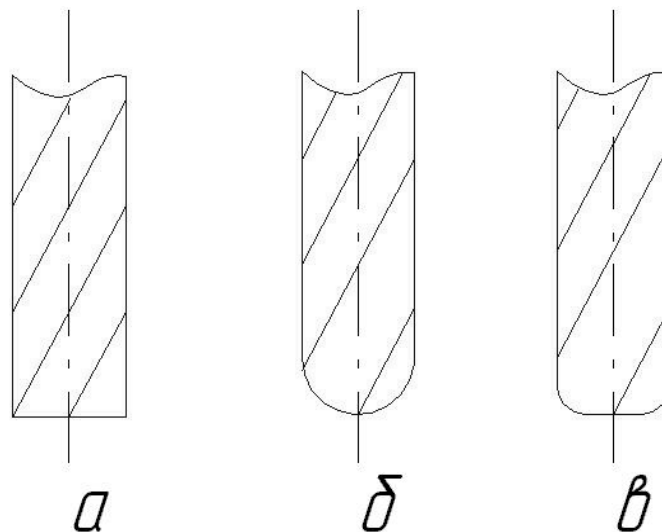
Акуратне планування послідовності обробки дуже важливе. Забезпечення належного використання стратегій, що надаються CAM – системами, дає найкращий результат.

2 ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ВИСКОШВИДКОВОЇ ОБРОБКИ ДЛЯ ПРОЕКТУВАННЯ ВИСКОШВИДКОГО ФРЕЗЕРНОГО ВЕРСТАТУ З ЧПК

2.1 Інструменти для високошвидкісного фрезерування та режими обробки

2.1.1 Типи фрез, що використовуються для ВШО та схеми фрезерування

Для високошвидкісного фрезерування на верстаті, що проектується, застосовуються кінцеві фрези: кінцеві фрези, кінцеві сферичні фрези, кінцеві округлені фрези (рис 2.1).



а)кінцева фреза; б)кінцева сферична фреза; в) кінцева закруглена фреза

Рисунок 2.1 – Типи кінцевих фрез

Залежно від застосовуваного типу фрез схема фрезерування відрізнятиметься (рис 2.2).

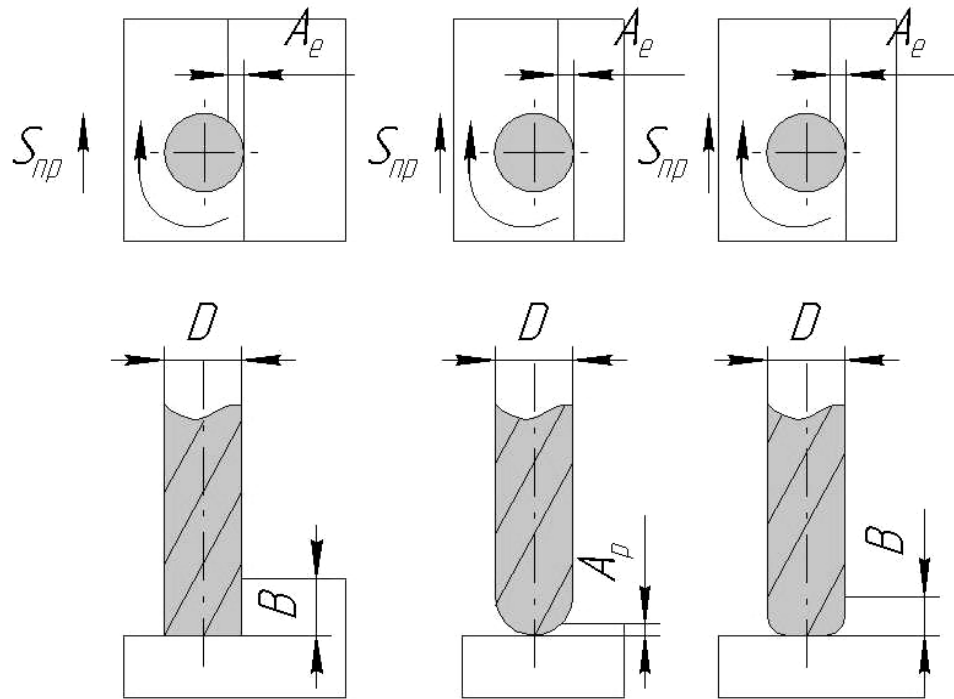


Рисунок 2.2 – Схеми фрезерування

На схемі позначено:

$S_{пр}$ - поздовжня подача, мм/хв;

D – діаметр інструмента, мм;

B – ширина фрезерування, мм;

A_e - радіальна подача, мм;

A_p - осьова подача, мм.

Фрезерування можна виконати двома способами: зустрічним і попутним. У зустрічному фрезеруванні переріз зрізу та навантаження на зуб поступово збільшуються від нуля при врізанні зуба до максимального значення при виході зуба з контакту із заготовкою. Виходячи з контакту, відбувається різке зниження навантаження, що викликає вібрації під час різання. У попутному фрезеруванні зуб фрези спочатку працює з найбільшою товщиною зрізу, яка поступово зменшується до нуля, не викликаючи різкої зміни навантаження на інструмент. Високошвидкісна обробка вимагає виключно попутного фрезерування для зменшення вібрацій.

Для чорнової обробки використовують кінцеві та заокруглені фрези, які можуть також застосовуватися для чистового контурного фрезерування, де обробка ведеться шарами. Товщина шару, що знімається, дорівнює ширині фрезерування B , а радіальна подача визначає глибину різання.

Для чистової обробки використовують сферичні кінцеві фрези. У цьому випадку товщина шару, що знімається, дорівнює глибині фрезерування, а ширина фрезерування визначається ефективним діаметром різання, який залежить від глибини різання.

2.1.2 Матеріали різального інструмента

У зв'язку з особливо високими навантаженнями при високошвидкісній обробці, вимоги стають значно вищими, ніж при звичайних методах обробки. Ці вимоги можна задовольнити виключно за допомогою відповідних ріжучих матеріалів. Зміна геометрії інструменту має обмежений вплив на його стійкість, тому визначальну роль відіграє вибір відповідного різального матеріалу. Перш за все, різальні матеріали для високошвидкісної обробки повинні витримувати високі температури і мати високий рівень твердості.

Температура в зоні різання безперервно зростає зі збільшенням швидкості різання. Наприклад, при обробці із швидкістю 800 м/хв, поверхня стружки нагрівається приблизно до 750°C, а при швидкості 1600 м/хв температура вже сягає 1150°C. Однак тенденція використання жорсткої обробки матеріалів зі зростанням сил різання також ставить високі вимоги до твердості матеріалів. Чим більше відмінність у твердості між матеріалом і ріжучим матеріалом, тим довший термін служби інструменту (залежно від абразивного зносу).

При цьому залишаються також вимоги до міцності матеріалу, особливо при фрезеруванні (різанні, що переривається), але вони висуваються вже на тлі

вищезгаданих вимог, особливо коли підвищується стійкість до деформації при більш високих швидкостях вимагає особливої стратегії для високошвидкісної обробки з більш низькими швидкостями подач.

У контексті цих вимог очевидно, що для високошвидкісної обробки не можна використовувати швидкорізальні сталі. Замість них використовуються тверді дрібнозернисті сплави на основі вольфраму і металокераміки, а також передові різальні матеріали, такі як кераміка CBN (кубічний нітрид бору) та PCD (полікристалічні алмази) (див. рисунок 2.3).

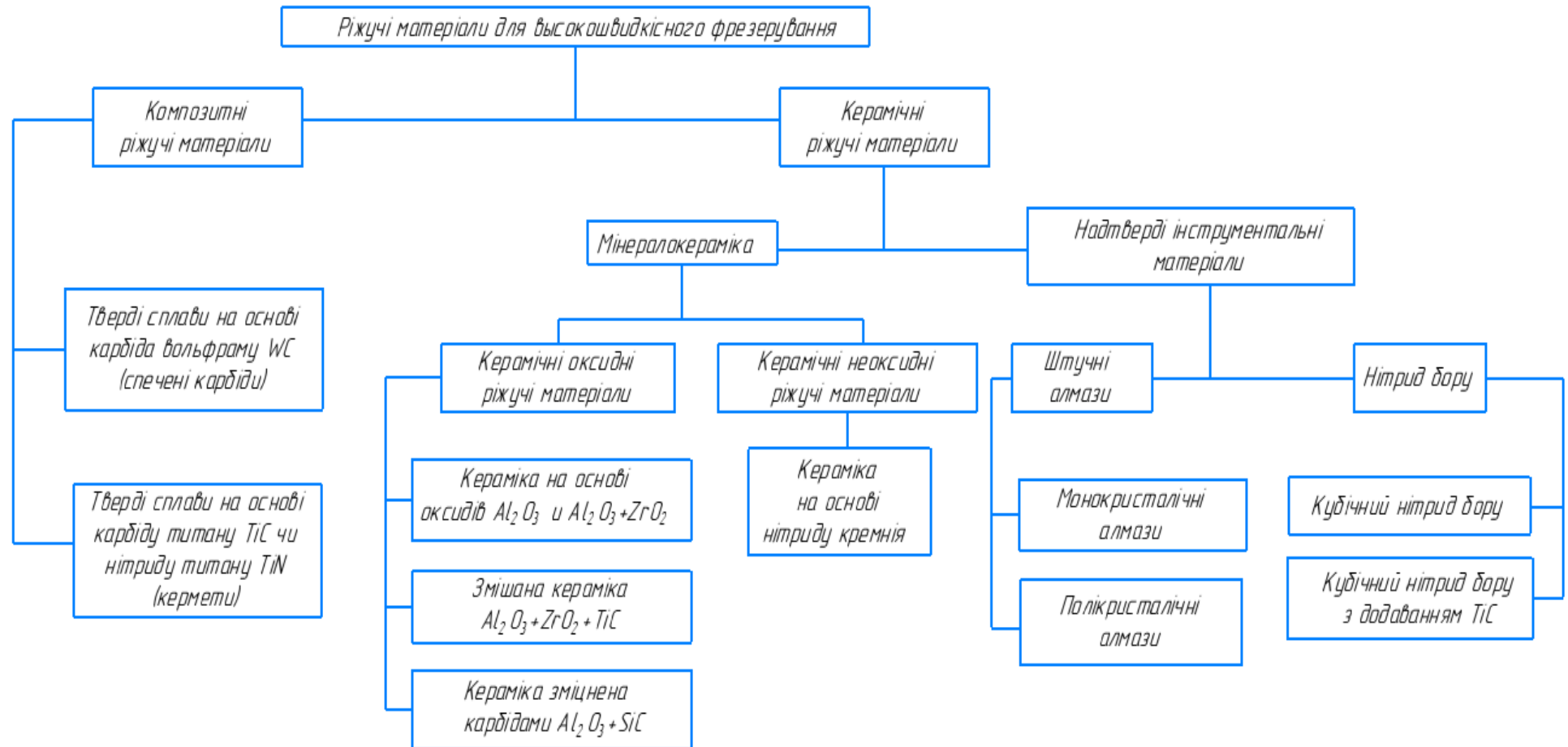


Рисунок 2.3 – Класифікація різальних матеріалів для високошвидкісного фрезерування

2.1.2.1 Тверді сплави на основі карбіду вольфраму

Карбід вольфраму та композитні матеріали, які на ньому базуються, представляють собою структури, сформовані за допомогою порошкової металургії. Вони включають в себе тверді карбіди, які вбудовані у металеву сполучну фазу. Завдання цієї сполучної фази полягає в об'єднанні крихких карбідів у єдине тіло, в той час як самі карбіди надають матеріалу властивостей жароміцності та стійкості до зношування. Кобальт переважно використовується як металева сполучна фаза, тоді як карбід вольфраму використовується як карбідна частка (включення). Крім того, можуть використовуватися також карбіди титану, танталу та ніобію.

Спочатку використовувалися двофазні спечені карбіди, які склалися з карбіду вольфраму та кобальту. Оскільки карбід вольфраму ефективно розчиняється в кобальті, це призводило до високого внутрішнього зчеплення та міцності ріжучої кромки. Таке сполучення сприяло силі зчеплення у спеченому карбіді, базованому на зчепленні чистого карбіду вольфраму та кобальту. Але близькість цих спечених карбідів до сталі мала свої недоліки, оскільки при температурі вище 700°C карбід вольфраму розпадався на вольфрам та вуглець у зоні контакту стружки з поверхнею інструменту, що спричиняло сильний знос у формі воронки. Це призвело до швидкого внесення інших карбідів як твердих частинок, що в результаті створило трифазні (трикомпонентні) спечені карбіди. Особливо ефективними виявилися карбід титану, який, хоча менш в'язкий, має вищу жароміцність і твердість, а також карбіди танталу і ніобію, які виявилися більш стійкими до впливу температури, ніж карбід вольфраму, що значно покращило показники при обробці сталі.

Зміною розміру карбідних включень у загальному сполучному металі можна максимізувати лише один із двох параметрів - в'язкість або твердість.

Зменшення зерна до 0.6-0.9 мкм може одночасно підвищити як в'язкість, так і твердість. В порівнянні зі звичайними видами, дрібнозернисті спечені карбіди забезпечують вищу зносостійкість та стійкість до руйнування, ідеально підходячи для використання в суцільному тілі кінцевої фрези. Отже, завдяки ефекту зміни розміру зерна, інструмент із дрібнозернистого спеченого карбіду володіє особливою міцністю ріжучої кромки та низькою тенденцією до стирання. З цієї причини, дрібнозернисті спечені карбіди відповідають вимогам до різальних матеріалів, які використовуються при високошвидкісній обробці у поєднанні з максимальною безпекою та необхідним рівнем в'язкості. Подальше зменшення розміру зерна карбіду до понад дрібних (0,5 до 0.6 мкм) вже не має такого вираженого ефекту, призводячи лише до невеликого поліпшення цих характеристик.

2.1.2.2 Металокерамічні матеріали

За своєю структурою, кермет представляє собою спечений карбід, включаючи частинки твердого матеріалу на основі титану і сполучний метал на основі нікелю. Класифікація твердого матеріалу на основі титану, що входить до складу керамічних матеріалів, є основою для введення терміну "кермет" (металокераміка), що відображає поєднання кераміки та металу. У порівнянні з класичними твердими матеріалами на основі вольфраму, карбіду та кобальту, в металокераміці використовуються такі тверді матеріали, як карбід титану, карбон-нітрид титану (Ti(C,N)), нітрид титану (TiN) і карбід молібдену. Сполучний метал представлений сумішшю нікелю та кобальту.

Металокераміка володіє меншою в'язкістю, порівняно з дрібнозернистими спеченими карбідами, але завдяки високій жароміцності краще витримує високі швидкості різання при обробці сталі та чавунів, ніж спечені карбіди. У той же час, хоча в'язкість металокераміки дозволяє

використовувати її для чорнового точіння матеріалів при низьких силах різання, обмеження використання її для чистового фрезерування, як матеріалу для монолітних інструментів, є значним.

Тверді матеріали, що входять до металокераміки, мають ядряну структуру. Тверде ядро, яке складається з $Ti(C,N)$, захищене шаром сполучної фази, насиченим молібденом. Таким чином, ці сплави є нечутливими до зростання зерна під час процесу спікання, створюючи високостабільну дрібнозернисту структуру.

Поміж основних складових TiC , TiN і Mo_2C , металокераміка також включає карбід вольфраму та, зазвичай, карбід ванадію. Завдяки такому багатокомпонентному складу можна варіювати (оптимізувати) властивості металокераміки для конкретних ситуацій. Додаткові компоненти, такі як карбіди вольфраму, ванадію і молібдену, не впливають на мікроструктуру компонентів. Однак іноді карбіди вольфраму, ванадію і молібдену можуть виходити за межі області твердого матеріалу, в результаті чого частка вольфраму та молібдену взаємодіє з сполучним матеріалом. Висока хімічна стійкість TiC і, відповідно, $TiCN$, дозволяє використовувати різноманітні сплави в сполучній фазі. Створення змішаних кристалів (полікристалів) з металами, які мають високу температуру плавлення, такими як Mo , W і Ti , може підвищити жароміцність сполучної фази.

Металокераміка вирізняється високою стійкістю до абразивного зносу та низькою схильністю до стирання. Крім того, вона володіє високою стійкістю до окислення і має низьку схильність до дифузії. У порівнянні із спеченими карбідами, ці якості забезпечують низький знос інструменту. Висока міцність кромки дозволяє ефективно вточувати інструмент та забезпечує високу якість обробленої поверхні протягом тривалого періоду експлуатації інструменту.

Головним чином, металокераміка застосовується при обробці литих чавунів та сталей, включаючи загартовані та високолеговані матеріали.

2.1.2.3 Керамічні різальні матеріали

Керамічні різальні матеріали представляють собою спечені композитні матеріали, які можна розділити на два основні типи: кераміку на основі оксиду алюмінію та кераміку на основі силікону-нітриду. Кераміка на основі оксиду алюмінію (Al_2O_3) поділяється на три групи: чисту, змішану і зміцнену оксидну кераміку.

Спочатку різальні матеріали були виготовлені з чистого оксиду алюмінію, який, маючи високу твердість, був водночас крихкий і практично непридатний для практичного використання. З подальшим розвитком, в основному, були створені оксиди алюмінію з невеликою домішкою оксиду цирконію, що значно покращило їх властивості.

Змішана кераміка, крім оксиду алюмінію, містить металеву фазу, яка включає карбід титану та нітрид титану. Це призводить до поліпшення теплопровідності та міцності на згин.

Зміцнена кераміка включає оксиди алюмінію з включенням кристалічних волокон діаметром 1 мкм та довжиною 20 мкм, що значно підвищує міцність, жароміцність та зносостійкість.

У кераміці на основі нітриду силіцію, початковим матеріалом є Si_3N_4 , який завдяки голчастій формі структури вирізняється вищою в'язкістю та кращою стійкістю до різких змін температури порівняно з керамікою на основі оксиду алюмінію.

Загалом, керамічні різальні матеріали вирізняються вищою твердістю і термічною стійкістю порівняно зі спеченими карбідами, але одночасно вони є більш крихкими і виявляють невисоку хімічну стійкість компонентів. Завдяки обмеженій в'язкості, керамічні різальні матеріали не можуть бути застосовані для обробки різанням, як от фрезерування. Проте останні дослідження зміцненої волокнами кераміки на основі Al_2O_3 і Si_3N_4 показують можливість її успішного використання у фрезеруванні в різних випадках.

Керамічні різальні матеріали особливо ефективно використовуються в обробці сірого ковкого чавуну, жароміцних сплавів, а також сталей, які пройшли термічну обробку, і зернистих ливарних чавунів.

2.1.2.4 Кубічний нітрид бору

Кубічний нітрид бору (PCBN) представляє собою надзвичайно твердий матеріал для різання, перевершуючи в твердості навіть алмаз. Структури цих двох різальних матеріалів схожі, оскільки вони складаються з фази твердого матеріалу з монокристалічними (монокристалічний кубічний нітрид бору та полікристалічний алмаз) і керамічної або металевої сполучної фази. У випадку кубічного нітриду бору, сполучна фаза складається з алюмінієвих та титанових нітридів та боридів. Металевою сполучною фазою використовують вольфрам, нікель і залізо.

Кубічний нітрид бору володіє вражаючими характеристиками, такими як висока твердість та стійкість до високих температур (до 2000°C), відмінна абразивна стійкість і загальна хімічна стабільність. Він виявляється крихким, але, тим не менш, має більшу в'язкість, ніж керамічні матеріали. Властивості кубічного нітриду бору можна контролювати, змінюючи розмір зерна, тип і склад сполучної фази. Кубічний нітрид бору ефективно використовується для обробки загартованих сталей, жароміцних сплавів та чавунів. Важливо, щоб оброблювані матеріали мали певну твердість (приблизно 48 HRC), оскільки кубічний нітрид бору швидко зношується при обробці м'яких матеріалів.

2.1.2.5 Полікристалічні алмази (PCD)

У цілому, полікристалічні алмази мають структуру, схожу на кубічний нітрид бору, і формуються шляхом спікання великої кількості штучно вирощених кристалів із сполучним матеріалом під високим тиском і температурою. Як сполучна фаза використовується карбід кремнію (керамічна) або вольфрам чи кобальт.

Алмаз - це найтвердіший з усіх відомих матеріалів і в той же час має чудову стійкість до абразивного зносу. Але через свою близькість до заліза, полікристалічні алмази не можуть бути використані для обробки сталі. Крім того, температура в зоні відведення стружки не повинна перевищувати 600°C, інакше, вуглець окислюється. У поєднанні з їх високою крихкістю область застосування полікристалічних алмазів дуже обмежена.

Полікристалічні алмази представляють собою відмінний матеріал для різання абразивних неметалевих сплавів (таких як AlSi сплави та інші) і також для обробки абразивних неметалевих матеріалів, таких як зміцнені волокном пластмаси, синтетичні смоли, графіт та частково деревина.

Нижче подано таблицю, яка порівнює основні характеристики надтвердих матеріалів та вольфрамовокобальтового сплаву.

Таблиця 2.1 – Основні характеристики різальних матеріалів для високошвидкісного фрезерування

Матеріал	Полікристалічний СНМ на основі		Вольфрамо-кобальтовий твердий сплав
	PCBN	PCD	
Твердість HV, ГПА	40 – 45	70 - 100	17 - 19
Модуль Юнга, ДПа	700 -800	800 – 900	400 – 600

Кінець таблиці 2.1

Межа міцності при згинанні, МПа	600 – 800	800 – 1100	1400 – 2000
Межа міцності при розтягуванні, Мпа	400 – 500	1000 – 1300	1400 – 1700
Межа міцності при стисканні, ДПа	2,5 – 5,0	7 – 8	4 – 5
Коефіцієнт тріщиностійкості, МПа*м	6,5 - 8,5	-	10 - 17
Робота при зламі, Дж/м ²	130 - 160	-	220
Коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м*К)	50 - 100	70 - 150	100
Коефіцієнт лінійного подовження, 10 ⁻⁶ /К	5 – 7	3,5 – 5,0	5 – 6
Матеріал	Полікристалічний СНМ на основі		Вольфрамо-кобальтовий твердий сплав
	PCBN	PCD	
Середній коефіцієнт стійкості до термоудару	15	25	65
Жароміцність, °С	1000-1200	700-750	800-900

2.1.3 Покриття різального інструменту

Тривалість служби різальних матеріалів суттєво залежить від їхньої твердості. Завдяки різним технологічним процесам вакуумного покриття, навіть тонкий шар може забезпечити необхідну твердість інструментів зі складною геометрією.

Взагалі технологічні процеси покриття розділяються на фізичні методи напилення і хімічні методи напилення. У фізичних методах напилення

міцність запиленого шару забезпечують металеві компоненти, тоді як у хімічних методах основу становлять хімічні реакції різних газів. Крім того, ці процеси різняться за температурними режимами: при хімічних методах напилення використовуються температури близько 1000°C , тоді як фізичні методи напилення вимагають температур від 450°C до 500°C . На додаток, хімічні методи напилення застосовуються для нанесення товстіших шарів покриття (від 3 до 15 мкм), ніж фізичні методи напилення (від 1,5 до 4 мкм).

Зазвичай для нанесення покриття на ріжучі вставки, що виготовлені із спеченого карбїду та металокераміки, використовують хімічні методи напилення. За допомогою цих методів покривають інструменти, виготовлені з високошвидкісних різальних сталей, інструменти зі складним профілем, а також ті, що мають дуже гострі кромки, наприклад, кінцеві фрези. Це пов'язано з тим, що високі температури при хімічних методах напилення можуть пошкодити основний (нижній) шар, тоді як запилення товстого шару, може спричинити неприпустиме закруглення ріжучої кромки.

В зоні контакту між інструментом та матеріалом відбуваються різні процеси, що призводять до різних видів зносу. Найбільш важливими з них є абразивний знос, стирання, окиснення та дифузія.

Ступінь зносу інструменту визначається типом різального процесу, умовами різання та властивостями оброблюваного матеріалу. Варіації виникають залежно від того, чи ріжуча кромка піддається механічним, термічним чи комбінованим навантаженням. До механічних механізмів зносу відносять абразивний знос, стирання і поломку ріжучої кромки. Знос, викликаний термічними навантаженнями, включає процеси дифузії, утворення малих тріщин і пластичну деформацію.

Вищезазначені механізми зносу можуть бути розкласифіковані залежно від їх впливу на поверхню інструменту та сам інструмент. Процеси, спричинені абразивним зносом, стиранням або дифузією, майже не залежать від характеристик поверхні, у той час як пластична деформація ріжучої кромки та утворення тріщин в основному залежать від властивостей різального

матеріалу. Ця система класифікації є ключовою для оцінки ефективності заходів з захисту від зносу.

Задача полягає в обранні відповідного матеріалу для твердого покриття з метою зменшення особливостей цього типу зносу. Крім впливу на поверхню, шар твердого матеріалу сприяє зменшенню сил різання та температурних навантажень, що також позитивно впливає на стійкість до утворення тріщин і зносу, пов'язаного з процесами дифузії.

Абразивний знос виникає через процеси мікрорізання, коли тверді частки (наприклад, цементит, карбід хрому) або домішки оксидів (такі як оксид алюмінію) оброблюваного матеріалу проникають у поверхню інструменту (здійснюють дряпання). Для зменшення абразивного зносу важливо забезпечити максимально можливу різницю у твердості між поверхнею інструменту та абразивно-активними частинками оброблюваного матеріалу.

При наявності сполучного матеріалу, важливою роллю у відмінності стійкості до зносу відіграє твердість шару та процес стирання. Якщо сили тертя перевищують сполучні сили, частинки шару можуть відокремитися. Зниження коефіцієнта тертя між покриттям і оброблюваним матеріалом також може суттєво зменшити стирання.

При низькій теплопровідності покриття велика частина теплоти, що виникає під час обробки, видаляється разом із стружкою, що допомагає ефективно захищати різальний матеріал від передчасного виходу за межі температур окислення (особливо важливо для спечених різальних матеріалів). Теплопровідність грає вирішальну роль, коли виникають високі температури під час процесу різання.

На основі перерахованих вище показників можна скласти вимоги до покриття різального інструменту:

- висока твердість
- низька теплопровідність
- висока стійкість до окислення

- висока жароміцність
- низька схильність до адгезії (схоплювання)
- висока стійкість до абразивного зносу

Покриття з твердих матеріалів на основі TiN, TiCN, а також TiAlN зарекомендували себе як зносостійкі покриття на інструментах.

Крім цих трикомпонентних покриттів вже розроблено нове чотири компонентне твердосплавне покриття TiAlCN на основі двох та трикомпонентних покриттів TiCN та TiAlN. Це дозволило поєднати кращі якості покриття TiCN (твердість) і TiAlN (стійкість до окислення) (рис 2.4).

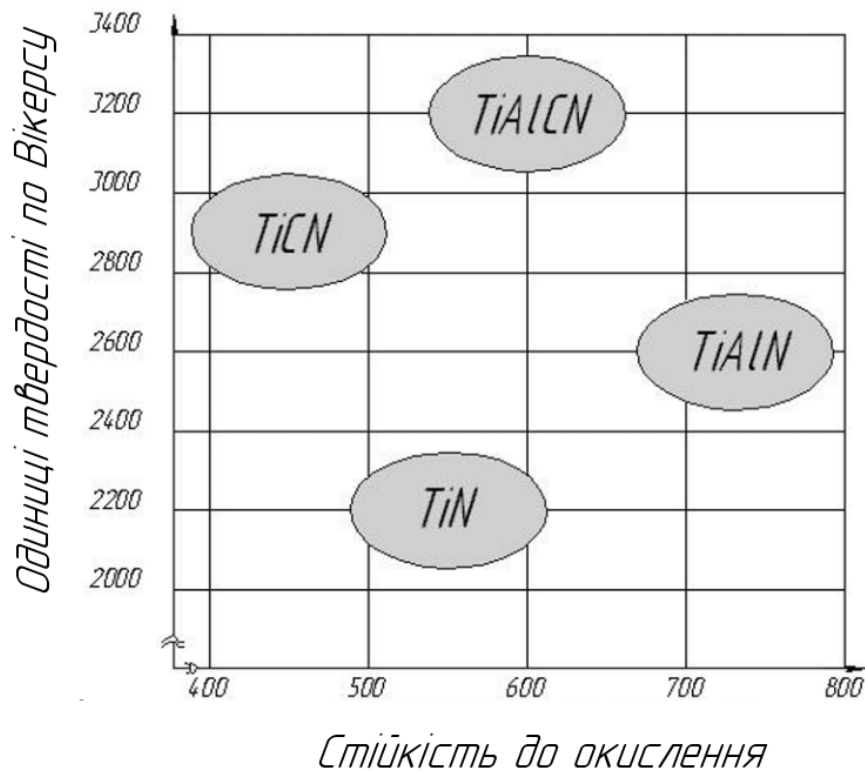


Рисунок 2.4 – Порівняння твердості та стійкості до окислення покриттів ріжучого інструменту

Завдяки цим характеристикам, покриття TiAlCN є універсальним у використанні (незалежно від того, чи проводиться обробка твердих матеріалів з використанням МОТС чи без нього) і дозволяє максимально

використовувати властивості стійкості до зносу при високих температурах та значних навантаженнях.

2.1.4 Геометрія різального інструменту

Як і в звичайних інструментах, геометрія інструментів для високошвидкісного фрезерування визначається матеріалом, який обробляється.

Існує основне правило в цьому відношенні. Залежно від міцності оброблюваного матеріалу і крихкості різального матеріалу, ріжучий клин інструмента повинен бути відповідно міцніший. При високошвидкісній обробці температурне навантаження на інструмент вкрай високе, особливо при обробці деталей з термообробленої сталі. Тому використовуються тверді, жароміцні та, відповідно, більш крихкі різальні матеріали.

Зокрема, інструменти для високошвидкісного фрезерування сталі мають масивніший ріжучий клин. Проте, не зменшуючи задній кут, який важливий при високих швидкостях різання, міцність клину досягається за рахунок зменшення переднього кута різання. В інструментах із високоміцних різальних матеріалів це може призводити до використання негативних передніх кутів різання. У формі інструментів для високошвидкісного фрезерування висуваються особливі вимоги. Спочатку, для оптимального збалансування маси необхідна повна симетрія конструкції відносно осі обертання. Це стосується не лише ріжучої частини, але й хвостової.

У кінцевих фрезах хвостовик роблять циліндричним, без поверхні закріплення (див. рис. 2.5).

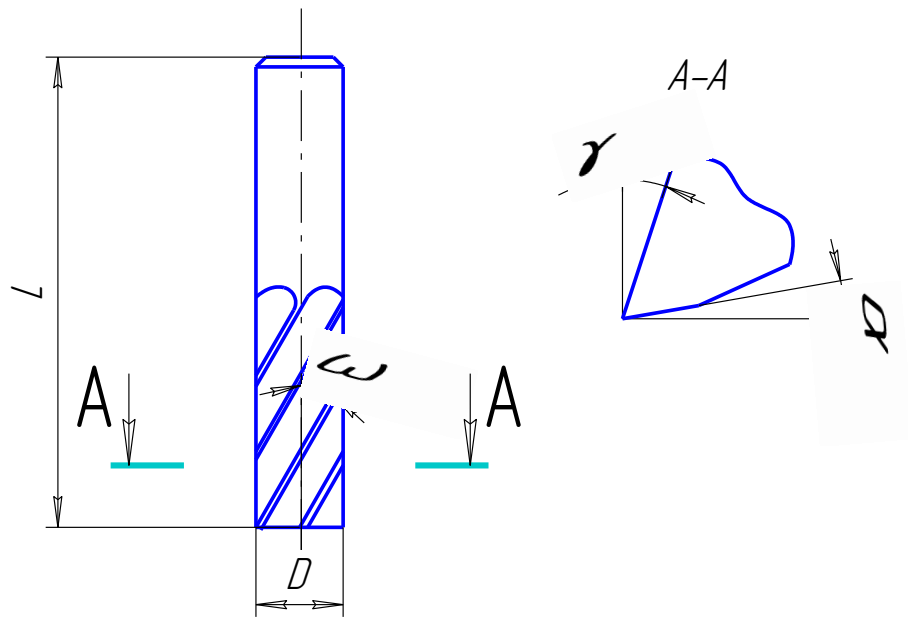


Рисунок 2.5 – Геометрії кінцевої фрези

Також важливо забезпечити найвищу міцність фрези. З урахуванням того, що високошвидкісна обробка використовує невеликі подачі, можна зменшити довжину різальних кромок, що значно підвищує міцність фрези. У випадку обробки глибоких пазів, шийку дещо зменшують у діаметрі. Також передня частина різальних кромок піддавалася значному впливу. Для того, щоб уникнути миттєвого напруження, застосовують різальні кромки з певним радіусом або просто закруглені.

Для обробки сталі, використовуються кінцеві циліндричні фрези з дрібнозернистого спеченого карбїду з кутом підйому гвинтової канавки від 38° до 45° . Залежно від діаметра, вони можуть мати 4, 6, 8 або навіть 10 ріжучих кромок. Залежно від конструкції та ріжучого матеріалу вони виконуються з переднім кутом різання від 8° до 25° , задній кут - 6° - 10° .

Також були розроблені кінцеві фрези зі спеченого карбїду з укороченою ріжучою частиною, відокремленою шийкою, та з радіусом закруглення передньої частини. Кут підйому гвинтової канавки 30° , передній кут різання 12° , задній кут 10° . За рахунок торцевої форми, ця фреза ідеально підходить

як для чорнової, так і напівчистої обробки, так як при цьому можливе найбільше наближення до кінцевого контуру. До того ж чистова обробка плоских поверхонь може бути проведена значно швидше.

У ливарному та штамповому виробництві широке застосування отримали фрези із закругленою передньою частиною (рис.2.6).

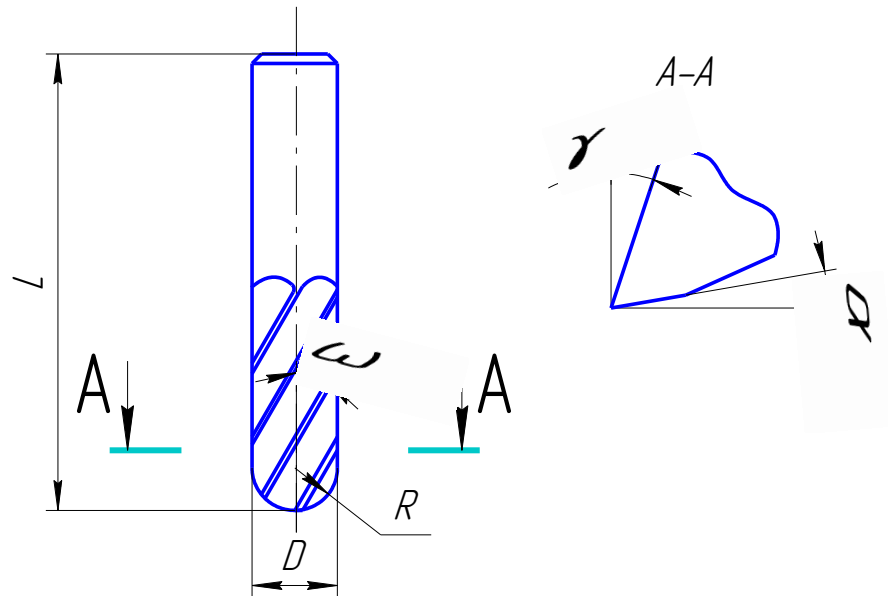


Рисунок 2.6 - Геометрія сферичної фрези

При високих швидкостях переміщення використовуються фрези з дрібнозернистого спеченого карбіду (твердого сплаву на основі карбіду вольфраму) з покриттям. При чистовій обробці використовують фрези з металокераміки, як з покриттям так і без нього. Ці інструменти виконані з кутом підйому гвинтової канавки 20° переднім кутом різання 12° . Ці фрези були виконані з конусним звуженням між хвостовою і ріжучою частинами. Закруглені фрези з особливо потужним різальним клином були спеціально розроблені для обробки сталей, що пройшли термічну обробку. Кут підйому гвинтової канавки у таких фрез дорівнює 0 а передній кут різання 4° .

Обробка м'яких матеріалів потребує більше простору для стружки та менших кутів різання, ніж при обробці сталі. Головним чином тут використовуються інструменти з двома ріжучими кромками. Поперечний переріз інструменту виконуються таким чином, щоб з одного боку забезпечити достатній простір для розміщення стружки і з іншого гарантувати найбільшу міцність. Передній кут різання таких фрез 15° , задній кут 13° і кут підйому гвинтової канавки 13° .

2.1.5 Визначення вихідних даних для проектування високошвидкісного фрезерного верстата

Керуючись порівняльною характеристикою швидкостей різання різних матеріалів розглянутої в пункті 1.2 (рис 1.12), визначимо діапазони швидкостей для алюмінію. Швидкість у межах 1200 – 6000 м/хв. Визначаємо максимальну та мінімальну частоти обертання шпинделя за формулою:

$$n = \frac{1000 \cdot V}{\pi \cdot D} \quad (2.1)$$

Де V - швидкість різання, м/хв;

D - діаметр фрези, для проектованого верстата становить 16 мм.

$$n_{\min} = \frac{1000 \cdot V_{\min}}{\pi \cdot D} = \frac{1000 \cdot 1200}{3.14 \cdot 16} = 23885 \text{ об/хв},$$

$$n_{\max} = \frac{1000 \cdot V_{\max}}{\pi \cdot D} = \frac{1000 \cdot 6000}{3.14 \cdot 16} = 119426 \text{ об/хв}$$

Приймаємо частоту обертання шпинделя $n = 30000$ об/хв.

Для розрахунку приводів верстата необхідно визначити сили різання, потужність різання та момент на шпинделі. Максимальні сили різання виникатимуть під час обробки сталі з твердістю 58 HRC. Діапазон швидкостей знаходиться в межах 250 – 600 м/хв.

Схема фрезерування та розташування сил різання наведено на рис. 2.5.

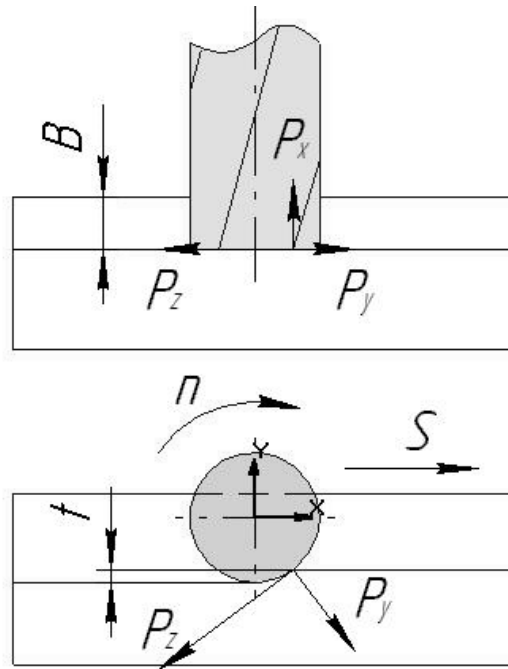


Рисунок 2.5 – Схема фрезерування та розташування сил різання

Сила різання визначається за такою формулою:

$$P_z = \frac{10 \cdot C_p \cdot t^x \cdot S_z^y \cdot B^n \cdot z}{D^q \cdot n^w} \cdot K_{mp} \quad (2.2)$$

де P_z - головна складова сили різання, Н;

t - Глибина різання, мм;

S_z - подача, мм/зуб;

B - ширина фрезерування, мм;

z - число зубів фрези;

D - діаметр інструменту;

n - частота обертання шпинделя, об/хв.

K_{mp} - поправочний коефіцієнт, що враховує якість оброблюваного матеріалу (вибирається за табл.9 [10]).

Потужність різання визначається за такою формулою:

$$N_e = \frac{P_z \cdot v}{1020 \cdot 60} \quad (2.3)$$

Розраховуємо максимальну та мінімальну частоту обертання шпинделя за формулою (1):

$$n_{\min} = \frac{1000 \cdot V_{\min}}{\pi \cdot D} = \frac{1000 \cdot 250}{3.14 \cdot 16} = 4976 \text{ об/хв,}$$

$$n_{\max} = \frac{1000 \cdot V_{\max}}{\pi \cdot D} = \frac{1000 \cdot 600}{3.14 \cdot 16} = 11942 \text{ об/хв}$$

Ріжучий інструмент – кінцеві твердосплавні фрези для високошвидкісної обробки.

Матеріал інструменту – твердий метал на основі карбіду вольфраму.

Покриття інструменту – TiAlN.

Передній кут різання $\gamma = 12^\circ$, задній кут $\alpha = 10^\circ$, кут підйому гвинтової канавки $\omega = 20^\circ$.

Глибина різання вибирається за рекомендаціями виробника інструменту: для чорнової обробки – $t = 6 - 8 \%$ від діаметра інструменту D .

$$t = 0.08 \cdot 16 = 1.2 \text{ мм}$$

Подача на один зуб фрези S_z (мм/зуб) – переміщення столу із заготовкою за час повороту фрези на один зуб або кутовий крок між зубами. Визначається відповідно до рекомендацій виробника інструменту: $S_z = 0.1$ мм.

При $D=16$ мм; $z = 4$; $T = 60$ хв; $B = 6$ мм; $K_v = 1,06$.

Визначимо максимальну складову сили різання при чорновому фрезеруванні при $t = 1$ мм; $S_z = 0.1$ мм; $B = 6,4$ мм; $z = 4$; $D = 16$ мм; $n = 4976$ об/хв; $K_{mp} = 1.06$.

Значення коефіцієнта C_p та показників ступеня у формулі визначення окружної сили при фрезеруванні визначаються за табл. 41 [10]:

$x = 0.85$; $y = 0.75$; $u = 1.0$; $q = 0.73$; $w = -0.13$.

Підставимо у формулу (2.2):

$$P_z = \frac{10 \cdot C_p \cdot t^x \cdot S_z^y \cdot B^n \cdot z}{D^q \cdot n^w} \cdot K_{mp} = \frac{10 \cdot 12.5 \cdot 1.2^{0.85} \cdot 0.1^{0.75} \cdot 5^{1.0} \cdot 4}{16^{0.73} \cdot 4976^{-0.13}} \cdot 1.06 = 208 \text{ Н}$$

Складові сили різання P_y і P_x розподіляються так:

$$P_y = 0.6 \cdot P_z = 0.6 \cdot 208 = 125 \text{ Н}$$

$$P_x = 0.4 \cdot P_z = 0.4 \cdot 208 = 84 \text{ Н}$$

Визначимо крутний момент, що виникає на шпинделі під дією сил різання:

$$M_{кр} = \frac{P_z \cdot D}{2 \cdot 100} \quad (2.4)$$

де $M_{кр}$ - обертаючий момент, $H \cdot м$;

P_z - окружна складова сили різання, Н;

D - діаметр фрези, мм;

$$M_{кр} = \frac{P_z \cdot D}{2 \cdot 100} = \frac{208 \cdot 16}{2 \cdot 100} = 16,64 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Визначимо ефективну потужність різання за формулою (3):

$$N_e = \frac{P_z \cdot v}{1020 \cdot 60} = \frac{208 \cdot 320}{1020 \cdot 60} = 1,08, \text{ кВт}$$

Певні параметри різання занесено до таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 - Основні характеристики різання для проектованого верстата

Параметр	Позначення	Значення
Максимальна частота обертання шпинделя, об/хв	n_{\max}	30000
Мінімальна частота обертання шпинделя, об/хв	n_{\min}	5000
Окружна сила різання, Н	P_z	208
Радіальна сила різання, Н	P_y	125
Осьова сила різання, Н	P_x	84
Крутний момент, Н·м	$M_{кр}$	16,64
Потужність різання, кВт	N_e	1,08

Отримані значення максимальної частоти обертання шпинделя, величина сил різання, що діє на шпиндель і потужність різання будуть вихідними даними для проектування основних вузлів і деталей високошвидкісного фрезерного верстата.

2.2 Визначення вимог до основних вузлів проектного верстата для здійснення ВШО

Як зазначалося в пункті 1.3, умовою ефективного застосування високошвидкісної обробки є правильний вибір всіх складових факторів, що беруть участь у процесі обробки: верстата, різального інструменту, режимів різання, допоміжного інструменту, системи ЧПК, системи охолодження.

Верстат.

Високошвидкісне різання вимагає високих швидкостей шпинделя та таких самих високих швидкостей подач, оскільки зміна швидкості подачі на один зуб має бути незначною. Отже, необхідно виконання таких вимог.

Шпиндель повинен не тільки досягти високої швидкості, але і мати великий регульований діапазон швидкостей з достатнім моментом, що крутить, у всьому діапазоні. До того ж він повинен бути встановлений у спеціальних підшипниках, призначених для особливо високих швидкостей обертання (керамічний або електромагнітний підшипник) з високоточним тримачем інструменту з мінімальним допуском на биття. За формою посадкового отвору приймається шпиндель з конусним отвором.

Для проектного верстата необхідно забезпечити частоту обертання $n \geq 24000$ об/хв і крутний момент на шпинделі $M_{кр} = 16.64 \text{ Н} \cdot \text{м}$, а також ефективну потужність різання $N_e = 1.08 \text{ кВт}$.

Для високошвидкісної обробки існує декілька видів систем закріплення інструменту: термозатискач і силове запресування. Далі розглянемо ці дві системи і виберемо систему, яка буде застосовуватися на верстаті, що проектується [8].

В даний час для закріплення інструменту на високошвидкісних верстатах почали застосовувати з'єднання по гарячій посадці (термозатиску), добре відомі як посадки з натягом типу H7/p6, H7/n6, що утворюються

з'єднанням нагрітих деталей. Дія системи термозатиску ґрунтується на тому, що при нагріванні посадковий отвір збільшується в діаметрі. Хвостовик інструменту, що закріплюється, вставляється в цей розширений отвір патрона. При охолодженні до кімнатної температури діаметр отвору патрона повертається до нормального розміру, при цьому виникають великі затискні зусилля. Якщо закріплення здійснюється в діапазоні пружних деформацій матеріалу патрона, воно може бути повторене багаторазово.

Головними факторами при такому закріпленні є: час нагрівання, ефективна температура та напрямок теплового потоку через патрон. Після встановлення або вилучення різального інструменту патрон охолоджується досить швидко, цьому сприяє відносно велика маса патрона. Поширення тепла в інструменті відбувається значно повільніше, ніж у тілі патрона, так що інструмент має температуру цілком застосовну для його вилучення.

Можна перерахувати головні переваги такої системи:

- швидке закріплення та розкріплення;
- великі значення сил закріплення;
- відсутність елементів, що провокують виникнення відцентрових сил за більших частот обертання;
- висока згинальна жорсткість та низька радіальна контактна піддатливість;
- малі габарити патрона;
- висока точність закріплення за рахунок виготовлення посадкового отвору з концентричністю 0,003 мм щодо осі хвостовика патрона;
- відповідність умовам високошвидкісної обробки та покращена динамічна збалансованість конструкції.

Одним з варіантів практичного використання «гарячих» посадок є нагрівання струмами високої частоти (СВЧ). Концентроване змінне магнітне поле створює вихрові струми у матеріалі патрона. Вибрана частота забезпечує короткий час нагріву вузької смуги по периметру зони затискача. Висока швидкість цього процесу знижує рівень передачі тепла хвостовика

інструменту. Це дає можливість витягувати твердосплавний інструмент з патрона так само добре, як і інструмент із сталі з коефіцієнтом теплового розширення однаковим із матеріалом патрона. Установка виконується як настільний прилад, у якому вбудовані високочастотний генератор та контрольні датчики. Діапазон затиску від 6 до 32 мм забезпечений трьома індукторами, які легко та швидко замінюються. Робоча зона виконана із спеціального теплостійкого матеріалу для забезпечення тривалого терміну експлуатації.

Для експлуатації генератора використовується трифазна напруга 380 В з максимальним значенням струму 16 А та стиснене повітря з тиском 6 бар. На передній стінці генератора розташована панель управління для вибору програм нагріву із застосуванням підказок із меню. При ручному керуванні всі параметри нагріву можуть бути введені з відображенням на дисплеї. За допомогою процесора можуть бути вибрані потужність та час нагріву залежно від введених параметрів інструменту.

Після пуску системи індуктор, що охолоджується повітрям, автоматично встановлюється на патроні. Як тільки індуктор стає на місце, включається нагрівання. Він продовжується від 5 до 10 секунд, залежно від діаметра інструменту. Після цього автоматично розпочинається процес охолодження.

Для нагрівання всієї маси патрона з хвостовиком HSK63 до температури 2000°C потрібна енергія близько 100 кДж. Якщо нагрівати тільки зону закріплення, потреба в енергії скорочується до 20 кДж, а час охолодження скорочується пропорційно.

Для скорочення часу охолодження використовуються алюмінієві радіатори. Ефект охолодження досягається шляхом контакту радіаторів із нагрітою зоною патрона. При цьому відбувається дуже швидка теплопередача на ребристу поверхню радіаторів, які додатково охолоджуються електричним вентилятором, що підвищує ефект охолодження в 10 разів.

Коли один патрон із встановленим інструментом охолоджується в адаптері, наступний інструмент може бути нагрітий і замінений. У цій

послідовності, можливо, замінити 3-4 інструменти на хвилину. При великій кількості закріплень, метод гарячих посадок, що розглядається, забезпечує зручне, безпечне і економічно ефективне обслуговування.

Утримуючі сили, що виникають в результаті закріплення по гарячій посадці значно більше, ніж в інших відомих системах закріплення, і настільки великі, що за рівнем вібрацій інструментальний блок, що утворюється, рівноцінний цільному інструменту тієї ж конфігурації. Точність установки за параметром концентричності за такого методу також аналогічна цільному інструменту. Переміщення закріпленого інструменту вздовж осі обертання при фрезеруванні, яке є добре відомою проблемою для інших патронів затискних, виключається при зачепленні по «гарячій» посадці.

Для цього використовуються одні й ті самі патрони. Для виготовлення затискних патронів застосовуються спеціальна жароміцна сталь та спеціальний процес термообробки, що дозволяє зберігати високу точність та пружні властивості патронів при практично необмеженій кількості перезакріплень (понад 5000). Температурний діапазон 300-340°C, необхідний для гарячих посадок, значно нижче температури, при якій можуть відбутися структурні зміни в матеріалі затискного патрона. Аналогічні системи розроблені іншими відомими інструментальними фірмами. Тепловий вплив за допомогою СВЧ застосовується в системі Schrumpfgerat, а за допомогою перегрітого повітря або газового пальника - в системі PYRO quart.

Метод силового запресування – це метод при якому кріплення інструменту відбувається виключно за рахунок зусиль повернення матеріалу у вихідне положення. Великою перевагою цього способу кріплення інструменту порівняно з термозатиском є швидкість виконання процесу кріплення (приблизно 50 секунд) у зв'язку з відсутністю необхідності часу на його нагрівання та охолодження. Крім того, він приблизно на 30% дешевший від системи термозатиску. Порівняння цих систем показує, що оптимальна серед них система силового затиску Tribos (рис 2.6).



Рисунок 2.6 – Система силового затиску Tribos

Існує два варіанти цієї системи - гнучкий (Tribos - S), що забезпечує оптимальні передумови для виконання обробки в важкодоступних місцях і жорсткий (Tribos - R), що є новою концепцією кріплення інструментів для отримання високої жорсткості кріплення з достатнім демпфуванням. Другий варіант найбільш прийнятний у тих випадках, коли інструментальна оправка повинна витримувати при обробці високі затискні зусилля та зусилля зрізу.

Обидва варіанти відповідають вимогам до систем високошвидкісної обробки. Варіант Tribos – S за максимально допустимих значень відцентрових сил витримує частоти обертання до 205000 хв^{-1} , а варіант Tribos – R – до 110000 хв^{-1} . З урахуванням вимог техніки безпеки допустимі частоти обертання варіанта Tribos – S становлять $85\,000 \text{ хв}^{-1}$, а варіанта Tribos – R до $55\,000 \text{ хв}^{-1}$.

У порівнянні з наявними системами затискання інструментів (табл. 2.4) обидва варіанти системи Tribos мають наступні переваги:

- простота та швидкість використання;
- мінімальні витрати на технічне обслуговування;
- відсутність зносу у зв'язку з відсутністю рухомих деталей;

- тривалий термін служби через відсутність теплового навантаження на матеріал;
- застосовується для чорнової та чистової обробки;
- простота принципу кріплення.

Функція кріплення інструменту полягає в використанні пружної деформації інструментальної оправки (рис 2.9)

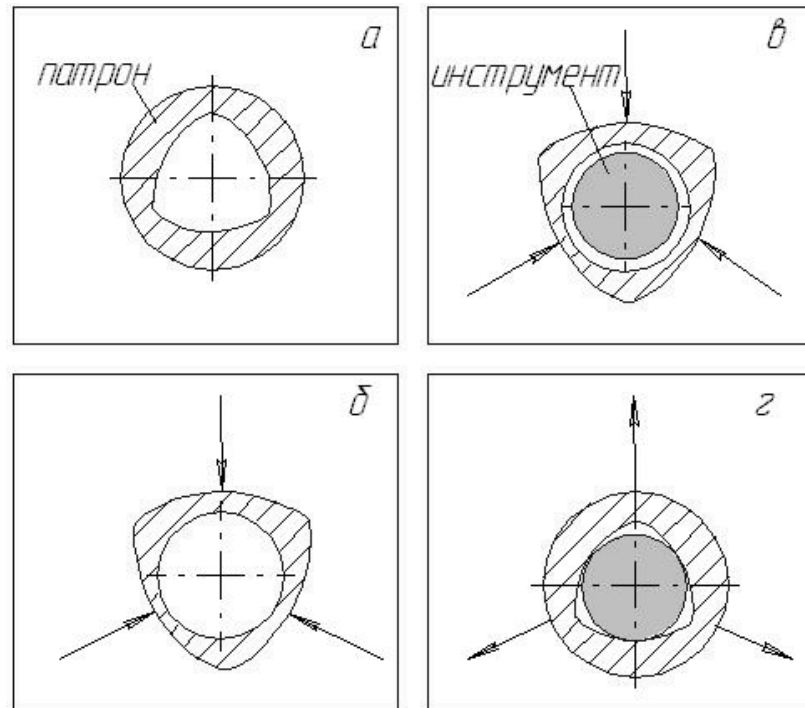


Рисунок 2.7 – Принцип закріплення інструменту у патроні Tribos [9]

Затискна система виконана таким чином, що в результаті деформації трикутник із заокругленими кутами (рис 2.7 а) виходить у вигляді кола, а основні зусилля затиску інструменту впливають на інструмент у трьох точках (рис 2.7 б). За цим принципом кріплення інструменту відбувається в основному за рахунок зусиль повернення матеріалу у вихідне положення (рис 2.7), які забезпечують силоне замикання хвостовика інструменту (рис 2.7 г).

Порівняно з існуючим в даний час термозатиском у методу силового запресування Tribos виключено процес нагрівання та охолодження, а ріжучий інструмент за допомогою гідравлічного затискного пристрою можна замінити

за кілька секунд. Не пізніше ніж через 50 секунд він знову готовий до роботи. Не створює проблем і застосування системи ідентифікації інструменту. Необхідний для здійснення кріплення затискний пристрій можна експлуатувати повністю автономно без підведення енергії (газ, електрична напруга) від зовнішнього джерела, а встановлювати його можна будь-де. Відпадає також необхідність в охолоджуючому пристрої та зовнішньому накопичувачі. В одному і тому ж інструментальному патроні можна закріплювати твердосплавні і швидкорізальні інструменти, а крутильні моменти, що передаються ними, значно перевершують необхідні для передачі. У системі силового запресування, на відміну від цангового патрона, відсутні рухливі деталі, що робить її механічно нечутливою, кріплення стає повністю безносним і вимагає проведення будь-яких операцій із підтримки цієї системи справності. Ще однією позитивною якістю системи є виконання затискних пристроїв у вигляді тіл обертання. Затискний пристрій виконаний цілісним і симетричним забезпечує оптимальне балансування інструментів, що затискаються, а разом з нею ідеальні передумови для отримання у них максимально високих частот обертання при мінімальних витратах на балансування. Мінімальне биття (не більше 3 мкм), крім поліпшення результатів обробки, призводить також до підвищення стійкості інструменту. Повторюваність теж виходить за ці межі, що забезпечує його надійну зміну.

При тривалих випробуваннях затискної системи Tribos (у межах кілька тисяч операцій із затискання – розтискання інструментів) не виявлено жодного погіршення щодо биття або крутного моменту. Деформація багатокутного профілю відбувається так само, як і у гідравлічного розтискного патрона в області пружної деформації сталі, тобто нижче за межу умовної межі плинності, що виключає появу небезпечних структурних змін.

Слід також зазначити, що і пов'язані з впровадженням системи Tribos витрати на 30-50% нижчі, ніж при впровадженні систем термозатиску, а в порівнянні з системами, що не потребують затискних пристроїв, система

силового запресування у зв'язку з невеликою ціною патрона окупається вже після впровадження кількох затискних патронів.

Поряд з дослідженнями стабільності частоти обертання інструменту, що закріплюється за допомогою різних систем, в одному з німецьких технічних університетів були проведені дослідження терміну служби різних затискних систем. Вони показали, що жорсткість інструментальної оправки значною мірою визначається товщиною стінки базового корпусу, а також довжиною вильоту зі шпинделя. При порівнянні затискних систем Tribos – R, патрона Weldon та системи термозатиску для чорнової обробки з усією очевидністю виявилася перевага системи Tribos – R (табл. 2.3). Порівняно з патроном Weldon система Tribos – R забезпечує майже вдвічі більшу стійкість інструменту, хоча патрон Weldon коротший на 20%.

Таблиця 2.3 - Порівняльні характеристики систем закріплення інструменту при високошвидкісному фрезеруванні

Приклади	Tribos - R	Патрон Weldon	Система термозатиску
Загальна довжина, %	100	77,7	102,8
Стійкість інструменту, виражена довжиною різання, %	100	55,0	17,7
Жорсткість (регресивна пряма)	100	88,2	75,8
Момент інерції площ (зворотний відлік), %	100	50,8	48,1

У порівнянні з системою термозатиску переваги ще більші. Це ще раз показує, що недостатнє демпфування коливань може вплинути на стійкість інструменту, виражену силою різання. Таким чином, сукупність переваг системи Tribos в порівнянні з іншими системами запресування дозволяє їй гідно з ними конкурувати. Також для застосування системи термозатискання необхідно розміщення системи нагрівання оправки. Це негативно позначиться, так як викличе додаткові теплові дії на шпиндель і верстат в цілому.

Існує велика різноманітність різних типів приводів подач для металорізальних верстатів. На даний момент високими темпами відбувається впровадження нових технологій у проектування та виробництво металорізальних верстатів. Тому важливим у виконанні цього завдання є вибір приводу з найбільш оптимальними характеристиками високошвидкісного фрезерування.

Привід подач.

До приводів подач високошвидкісних верстатів висуваються такі вимоги:

- висока точність позиціонування вузлів верстата;
- висока швидкість робочих переміщень;
- швидкість настановних переміщень;
- відсутність коливань та вібрацій вузлів та елементів верстата.

Крім точнісних та швидкісних характеристик до приводу подач високошвидкісного верстата висуваються додаткові вимоги:

- мінімальне тертя між вузлами верстата, що рухаються;
- плавність переміщень;
- мала інерційність;
- великі тягові зусилля;
- мінімальні габарити вузлів.

Привід подач повинен здійснювати переміщення робочих органів за трьома координатами: переміщення стола по осі X, вертикальне переміщення осі Z, горизонтальне переміщення шпиндельного вузла по осі Y. Виходячи з цього можна зробити висновок, що проєктований привід, крім всіх вище перерахованих характеристик повинен мати достатні тягові зусилля для переміщення столу і шпиндельного вузла.

Раціональний вибір приводу подач надзвичайно важливий, оскільки від цього залежить точність та швидкість обробки.

Основними характеристиками виступають точність позиціонування, мінімальний крок переміщень, високі швидкості робочих та встановлюючих

переміщень. Саме ці параметри, на сучасному етапі розвитку машинобудування, є найбільш актуальними та визначають якість майбутньої продукції, а також застосування даного верстата в різних галузях машинобудування.

Далі необхідно враховувати такі характеристики як плавність переміщень, відсутність коливань та вібрацій у вузлах верстата, інерційність, тертя у вузлах верстата. Ці параметри необхідні для повної реалізації основних вимог, тобто щоб отримати високу точність позиціонування, необхідно забезпечити максимальну вібростійкість; мінімальний крок багато в чому залежить від плавності переміщень. Для забезпечення високих робочих та встановлених швидкостей необхідно зменшувати тертя у вузлах та елементах верстата до мінімуму.

Система охолодження та видалення стружки.

У процесі різання теплові явища грають значну роль. Саме вони визначають температуру в зоні різання, яка надає прямий вплив на характер утворення стружки, наріст, усадку стружки, сили різання та мікроструктуру поверхневого шару. Ще більш суттєво впливає температура різання на інтенсивність затуплення інструменту та період його стійкості. При підвищенні швидкості різання зростає температура ріжучої кромки інструменту та зменшується його стійкість.

Встановлено, що чим нижче теплопровідність матеріалу, що обробляється, тим більше теплоти йде в інструмент.

У міру збільшення швидкості різання значно зростає відносна кількість теплоти, що йде у стружку. За дослідями С.С. Можаяєва при швидкості $V = 400 \dots 500$ м/хв теплота розподіляється так: $Q_c = 97 \dots 98\%$, а $Q_i = 1\%$.

М. П. Левицький та В. Клейн теоретично розглянули питання про температуру різальної кромки різця залежно від різних факторів [11]. Результати їх роботи наведені у таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Температура різання (°C) залежно від швидкості різання за різних коефіцієнтів різання k_s

Швидкість різання, м/хв	k_s , Н/мм ²			
	1000	1500	2000	2500
100	345	520	690	860
200	430	650	860	1080
500	520	780	1040	1300
800	575	860	1150	1440
1000	580	870	1160	1450

На основі своїх розрахунків М. Левицький збудував графік залежності температури різання від швидкості різання (рис 2.8)

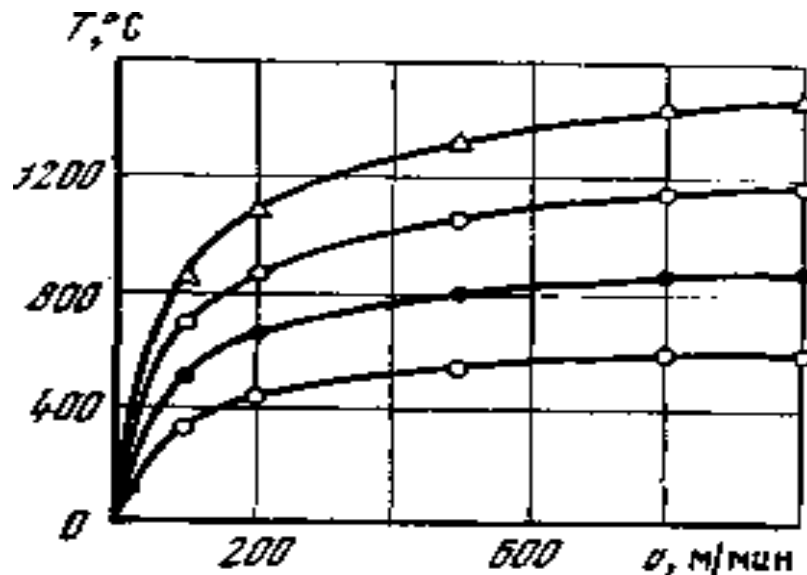


Рисунок 2.8 – Залежність температури різання від швидкості різання (М.Левицький)

Взявши за основу цю залежність, можна визначити, що при високошвидкісному фрезеруванні загартованої сталі зі швидкістю близько 1000 м/хв, температура, що виділилася при різанні досягне межі близько 850°C. Але ефект застосування високошвидкісної обробки полягає у перерозподілі температури різання. Більша частина температури (близько 95%

або 800 °С) відводиться разом із стружкою, близько 4% переходить у ріжучий інструмент і близько 1% передається в оброблювану деталь.

У зв'язку з тим, що температура різання виникає досить висока, вона майже вся концентрується в стружці і головна вимога – це забезпечити відведення стружки із зони різання. Тому що тепло, яке зосереджено в стружці, буде передаватися в деталь і робочі органи верстата, що може викликати теплові деформації деталі та органів верстата. Цього необхідно уникнути, тому що при високошвидкісному різанні висуваються особливо жорсткі вимоги до температури робочих органів.

Виробники інструменту рекомендують застосовувати такі види охолодження: обдування або застосування розпиленої МОТС. Деякі виробники інструменту в характеристиках інструменту вказують, що інструмент може застосовуватися для сухої обробки. Цей вид роботи інструменту виключається з розгляду згідно з описаними вище умовами.

Як зазначалося у пункті 1.3. було проведено дослідження порівняно способів охолодження інструменту. Результати показали, що найбільш оптимальним є обдування, так як при використанні цього способу охолодження має місце найменше зношування інструменту. При порівнянні охолодження МОТС та «сухої» обробки, знос інструменту знизився майже в 2 рази (0,12 та 0,06 мм на 100 мм довжині різання). Це пов'язано з тим, що при застосуванні МОТС різальний інструмент викришується через те, що зазнає циклічних термічних навантажень.

При проектуванні високошвидкісного фрезерного верстата застосовуватиметься комбінована система охолодження та відведення стружки. Принцип дії цієї системи полягає в тому, що зона різання обдувається повітрям. Це дозволить охолодити стружку та видалити її подальше із зони різання. Щоб не сталося переходу тепла зі стружки в інструмент чи деталь. Але залишається невирішеним питання повне видалення стружки межі верстата, так як тепло переходитиме до робочих органів верстата, викликаючи

теплові деформації та погіршення точності обробки. Для видалення стружки буде використано автоматичний фартух (рис. 2.9)

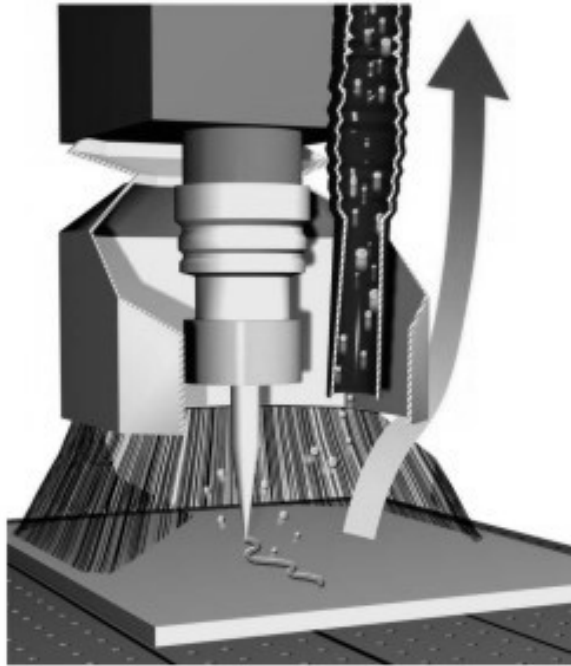


Рисунок 2.9 – Автоматичний фартух для видалення стружки

Фартух розкривається і закриває зону різання, коли починається обробка. Одночасно з цим починається втягуватися повітря разом із стружкою. Необхідно так направити обдув, щоб повітря разом зі стружкою прямував у бік труби, що всмоктує, і тим самим скоротити перебування стружки в зоні різання і виключити можливість контакту з основними вузлами верстата.

Все вищезгадане відноситься до технічної сторони високошвидкісної обробки. Інша сторона пов'язана із системою ЧПК та передачі інформації з CAD/CAM – системи до системи ЧПК.

Архітектура сучасної системи керування SINUMERIK 840D ґрунтується на обробці цифрових сигналів та з'єднанні компонентів за допомогою шин. При цьому використовують високоінтегровані електронні блоки (ASICs), завдяки яким система управління має невеликі розміри. Система ЧПК складається з наступних основних компонентів:

- панель управління для комунікації між людиною та машиною, виконана за технологією промислового комп'ютера (Human Computer Interface, HCI);
- ядро ЧПК (Numerical Control Unit, NCU);
- програмована система керування PLC (Programmable Logic Control, PLC);
- модулі приводів для осей та шпинделів верстата (приводи подачі – VSA та приводи головного шпинделя – HSA);
- двигуни (двигуни змінного струму та лінійні приводи);
- модулі живлення та рекуперації (модулі E/R).

Кожен модуль приводу, NCU, PLC та панель управління мають власні процесори, тому сучасне ЧПК є багатопроцесорною системою.

Однією з найважливіших функцій ЧПК для високошвидкісної обробки є точне управління приводами подачі та шпинделями. Традиційне аналогове з'єднання ЧПК з аналоговими приводами замінюється цифровими приводами, які підключаються до ЧПК за допомогою високошвидкісної цифрової шини. Як у процесорах модулів приводу, так і в ЧПК використовуються технології цифрового керування для регулювання положення, частоти обертання та моменту двигуна. При цьому вимірювальні системи дуже точно визначають фактичний стан осей. Численні структури управління для скорочення помилок обчислення траєкторії та обліку жорсткості верстата підвищують продуктивність обробки та точність деталей. В рамках регулювання за допомогою цифрового приводу існують такі функції:

- цифрова реєстрація частоти обертання та траєкторії;
- алгоритми регулювання високого порядку для компенсації помилок обчислення траєкторії завдяки попередньому встановленню частоти обертання та моменту;
- різноманітні види аналізу, наприклад, вимір частотних характеристик;

- автоматичне кругове тестування із само оптимізацією реверсивних помилок, що виникають на мертвих точках осей (квадратні помилки);
- підключення безпосередніх приводів, наприклад, лінійних двигунів;
- двоканальна реалізація функцій захисту верстата за допомогою процесора ЧПК та приводу.

Вимоги до ЧПК для високошвидкісної обробки:

- встановлення швидкості з попереднього перегляду ("Look ahead") більш ніж на 100 записів;
- перетворення, наприклад, для корекції закріплення або деталі 5-осьового перетворення;
- регулювання осі без помилок подачі для високої точності траєкторії;
- обмеження темпу прискорення за напрямом траєкторії та за напрямом осі для захисту верстата;
- корекція інструментів (довжина, радіус, різні типи фрез);
- автоматизовані функції згладжування траєкторії для гладких поверхонь за допомогою певного накладання полігонів;
- компенсація механічно зумовлених помилок;
- безпечна експлуатація у робочому просторі верстата з метою охорони праці.

Завданням установки швидкості з переглядом (Look-Ahead) є розпізнавання переходів записів з перериванням швидкості та перевищення прискорення осей, які є результатом викривлення траєкторії. Умовою для безперервної обробки записів ЧПК, час виконання яких є меншим, є буфер програм, який контролюється з попереднім переглядом. При цьому необхідно враховувати, що необхідне технології незначне прискорення одночасно з великою подачею траєкторії і короткими записами можуть збільшити необхідну дистанцію перегляду вперед до 50 - 150 записів. ЧПК для

високошвидкісної обробки спрощують програмування та корекцію інструментів безпосередньо на верстаті без повторного запуску постпроцесора. Замість програмування у координатах осей верстата можна визначити нові системи координат щодо деталі (наприклад, на похилих поверхнях). ЧПК перебирає перерахунок координат деталі у відповідні координати осей. Орієнтація інструментів може бути запрограмована за допомогою позицій кругової осі, векторів напрямку інструментів, кутів RPY (RPY = Roll/Pitch/Yaw) або кутів Ейлера. Ця функція також має велике значення в ручному режимі руху, наприклад при вільному русі при поломці інструменту. Так як система управління ЧПК може коригувати довжину інструменту, то під час процесу обробки можна повторно вимірювати інструмент безпосередньо на верстаті, відповідним чином реагувати на поломку інструменту і автоматично компенсувати знос інструменту внесенням відповідних коригувань в ЧПК. Крім того, можлива корекція різних типів фрез у просторі, таких як циліндрична та конусна фреза безпосередньо в ЧПК, що для однакових програм дозволяє використовувати різні інструменти.

Для прикладних програм високошвидкісного фрезерування особливо важливими є наступні компенсації статичних, динамічних та температурних похибок верстата:

- компенсація температурних похибок, що виникають у зв'язку з високою частотою обертання шпинделя та швидкістю осі, шляхом охолодження шпинделя та осей подачі;
- компенсація похибок тертя у мертвих точках осей (квадратні похибки);
- компенсація похибок підйому шпинделя та похибок вимірювальних систем;
- компенсація кутових похибок та похибок прогинів верстата за допомогою інтерполяційної компенсації (об'ємна компенсація або компенсація перехресних похибок);
- компенсація зазорів на опосередковано виміряних осях.

Правила з охорони праці та техніки безпеки, що діють, вимагають наявності різних систем обмеження та контролю. Насамперед до таких систем належить контроль над усіма функціями верстата через PLC. Завдяки відповідній технології безпеки (Safety Integrated) забезпечується надійний двоканальний контроль частоти обертання шпинделя та руху осей. Таким чином система ЧПК SINUMERIC 840D задовольняє вимогам, які пред'являють для систем ЧПК для високошвидкісної обробки і буде застосована для управління високошвидкісним фрезерним верстатом, що проектується.

3 ДОСЛІДЖЕННЯ СТРАТЕГІЙ ФРЕЗУВАННЯ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИСОКОШВИДКІСНОЇ ОБРОБКИ НА ПРОЕКТУВАНОМУ ВЕРСТАЦІ

3.1 Аналіз режимів різання, рекомендованих виробниками ріжучого інструменту, та рекомендації щодо підвищення ефективності обробки

При розробці керуючих програм, перед оператором стоїть необхідність вибору діаметра ріжучого інструменту, як для чорнової так і для чистової обробки. Здебільшого вибір ріжучого інструменту складає досвід технолога. У роботі отримано криві залежності хвилинної подачі від діаметра ріжучого інструменту. Це дозволило розглянути деякі стратегії обробки та показати ефективність обробки при використанні фрез різного діаметра.

Для визначення залежностей було розглянуто інструменти різних світових виробників: Sandvik Coromant, Fraisa, Kobelco, SGS Tools, Hitachi, Mitsubishi. Тільки для різального інструменту фірми Sandvik Coromant була знайдена повна інформація про геометрію інструменту, оброблюваний матеріал, режими різання. Тому всі подальші дослідження було виконано для цього інструменту.

Розглядається чорнова обробка кінцевими фрезами $\varnothing 3 - 12$ мм із числом зубів $z = 2$ і $\varnothing 8 - 12$ мм із числом зубів $z = 4$. Для двох типів інструменту різальна геометрія однакова: передній кут $\gamma = 0 - 3^\circ$ та задній кут $\alpha = 8 - 10^\circ$.

Відповідно до міжнародного стандарту оброблюваний матеріал поділяється на 3 класи в залежності від твердості:

- Р – нелегована сталь із твердістю до 150 НВ, легована сталь із твердістю 175 – 330 НВ;
- М - нержавіюча сталь 200 - 230 НВ, жароміцна сталь до 350 НВ, титановий сплав до 350 НВ;

- К - загартована сталь HRC 55 - 63, чавун 120-250 HB, алюміній до 100 HB.

Для кожної групи матеріалів виробник пропонує рекомендовані швидкості різання (рис 3.1 – 3.3)

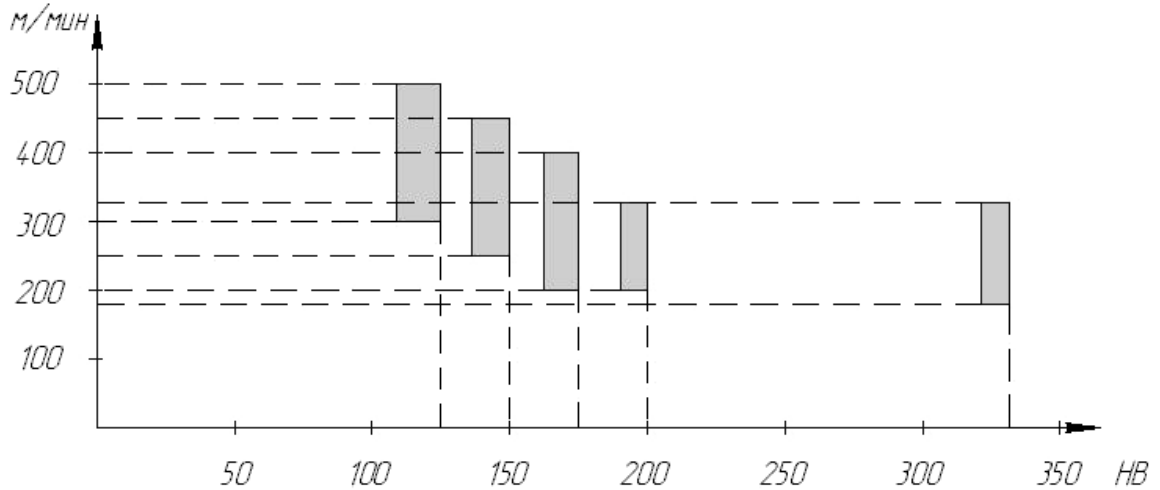


Рисунок 3.1 – Швидкість різання для матеріалів групи Р

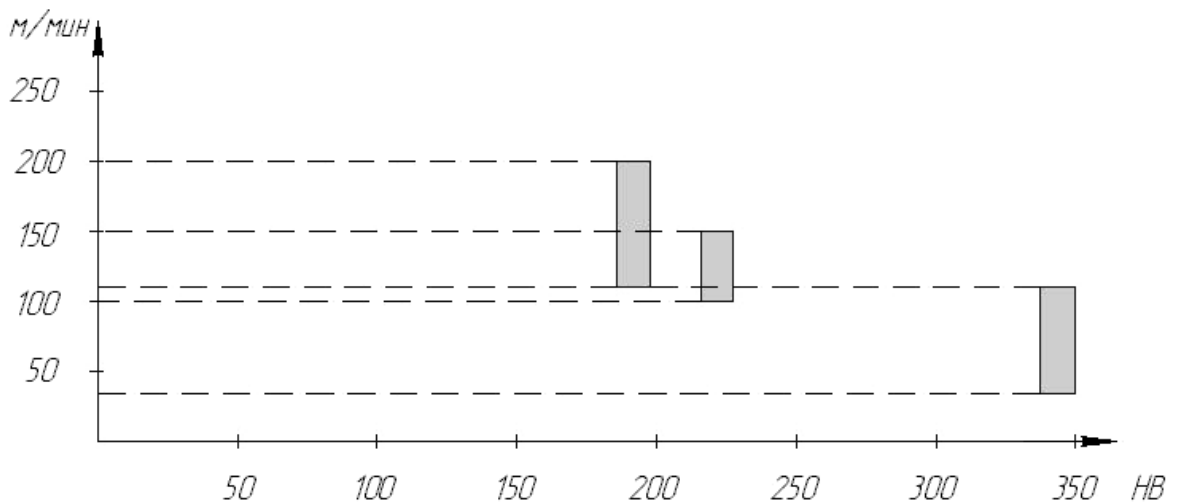


Рисунок 3.2 – Швидкість різання для матеріалів групи М

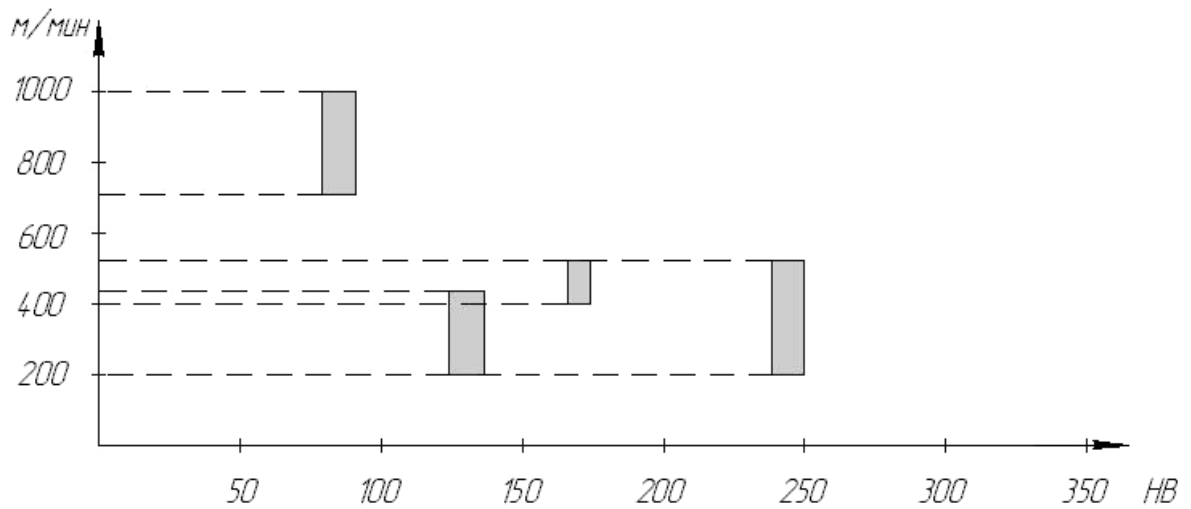


Рисунок 3.3 – Швидкість різання для матеріалів групи К

Для кожного значення діаметра надається рекомендована подача на зуб фрези (табл. 3.1)

Таблиця 3.1 – Подача на зуб фрези залежно від діаметра фрези

Діаметр інструменту, мм	Подача на зуб, мм/зуб
3	0,03-0,04
4	0,04-0,07
5	0,05-0,09
6	0,05-0,10
8	0,06-0,11
10	0,07-0,12
12	0,08-0,13

Далі розраховується хвилинна подача за формулою:

$$S_m = S_z \cdot n \cdot z = S_z \cdot z \cdot \frac{1000 \cdot V}{\pi \cdot D} \quad (3.1)$$

де S_m - хвилинна подача, мм/хв;

n - частота обертання шпинделя, об/хв;

z - Число зубів фрези;

V - швидкість різання, рекомендована виробником залежно від матеріалу, що обробляється, м/хв;

D - Діаметр інструменту, мм.

За критерій оцінки приймається хвилинне подання, т.к. при її розрахунку використовуються всі режими різання (швидкість різання, подача на зуб, діаметр інструмента, кількість зубів).

В результаті розрахунків отримано графіки залежності $S_m = f(D)$.

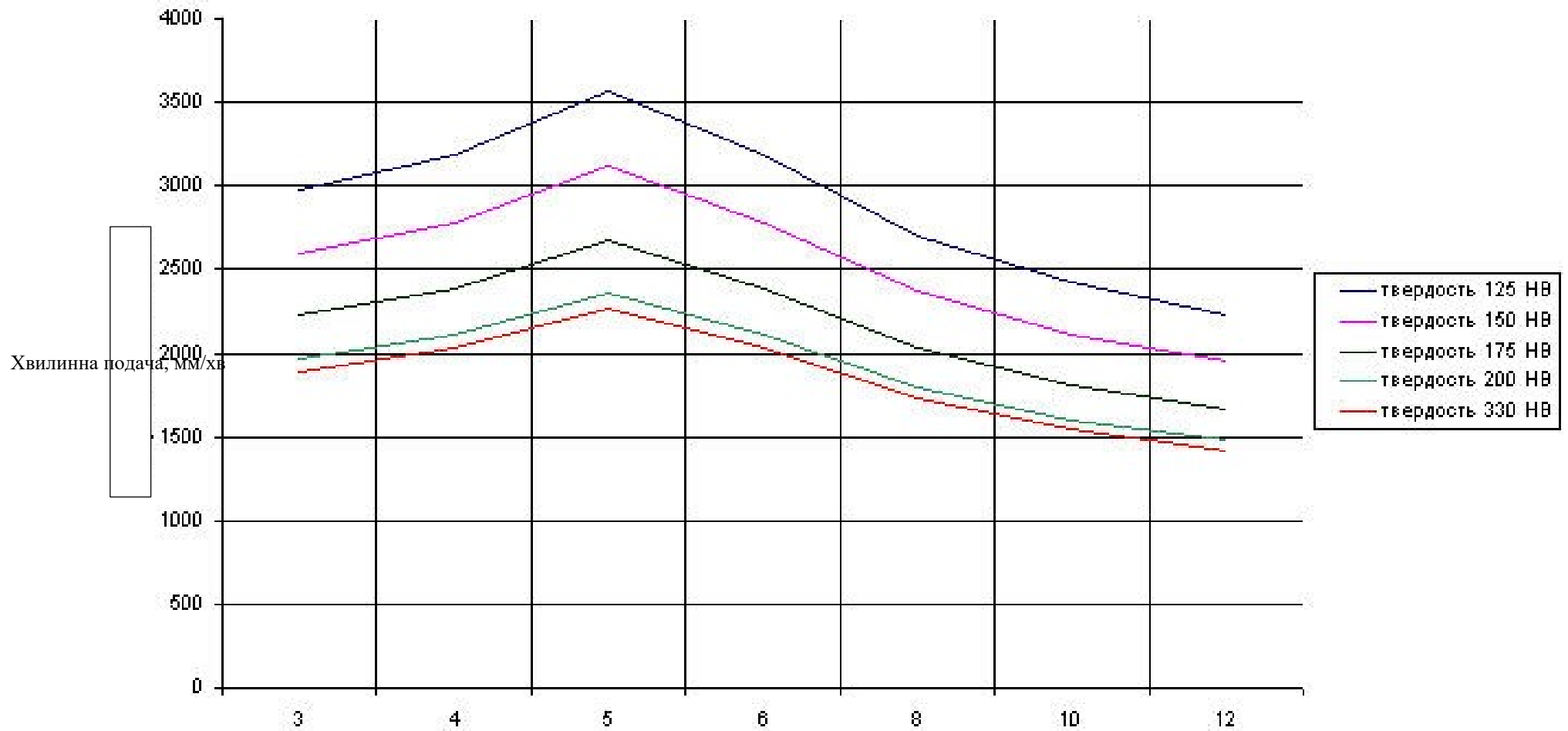


Рисунок 3.4 – Залежність хвилинної подачі від діаметра інструменту під час обробки матеріалу групи Р ($z = 2$)

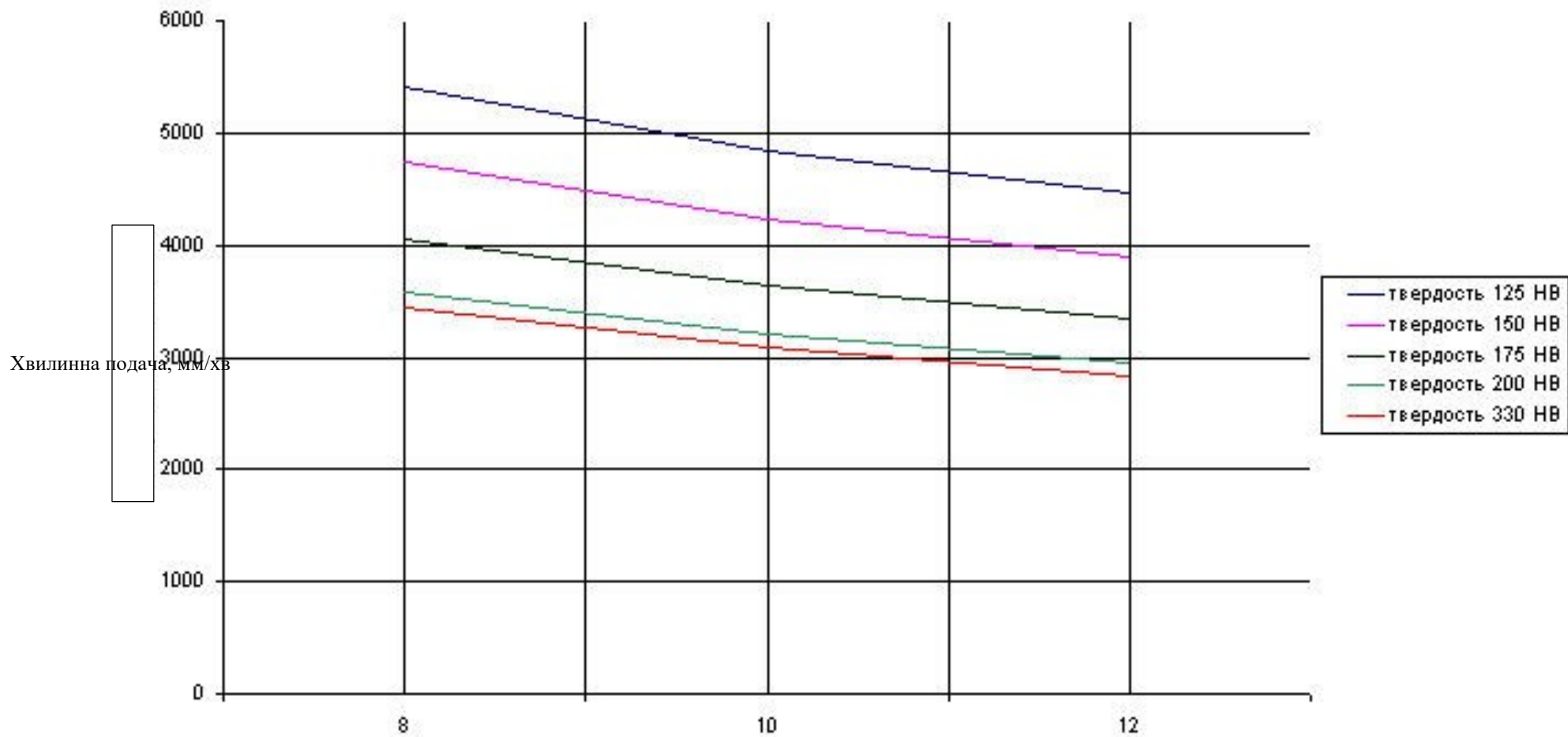


Рисунок 3.5 – Залежність хвилинної подачі від діаметра інструменту з $z = 4$

Для всіх груп матеріалів характер кривих буде однаковим.

При використанні фрез із числом зубів $z = 2$ спостерігається збільшення хвилинної подачі до діаметра 5 мм, а потім відбувається зниження. Це з тим, що з збільшенні діаметра на 1 мм подача на зуб збільшується на 0,02 мм/зуб, після 5 мм діаметр збільшується на 2 мм а подача на зуб на 0.01 мм/зуб. У зв'язку з цим, хвилинна подача після досягнення діаметра 5 мм падає.

Для практичного використання було розглянуто 2 схеми фрезерування: фрезерування площини (рис 3.6) та контурне фрезерування (рис 3.7)

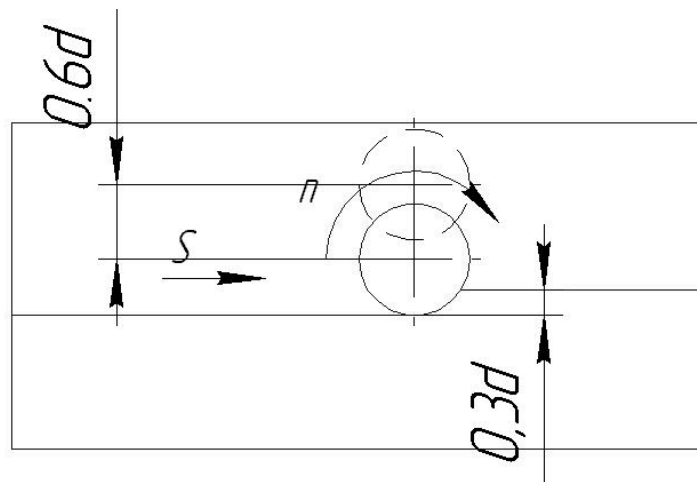


Рисунок 3.6 – Схема фрезерування площини

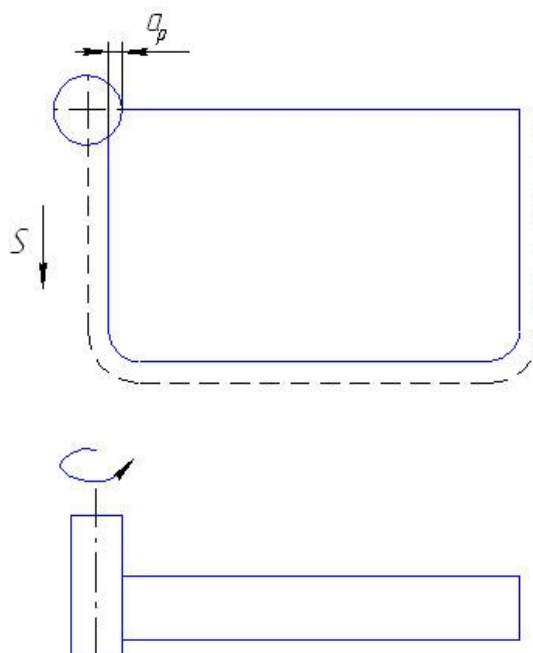


Рисунок 3.7 – Схема контурного фрезерування

Машинний час розраховується за такою формулою:

$$T_o = \frac{L}{S_{мин}} \cdot i \quad (3.2)$$

де L - Довжина різання, мм;

$S_{мин}$ - хвилинна подача, мм/хв;

i - Число проходів

При фрезеруванні площини число проходів розраховується за формулою:

$$i = \frac{(B - 0.6D)}{0.6D} \quad (3.3)$$

Розрахункова кількість проходів округляється до більшого цілого числа.

При контурному фрезеруванні число проходів розраховується за формулою:

$$i = \frac{a}{a_p} \quad (3.4)$$

де a - припуск, мм;

a_p - допустима глибина різання, мм.

При розрахунку машинного часу при фрезеруванні площини шириною 30 мм була збудована крива (рис 3.8)

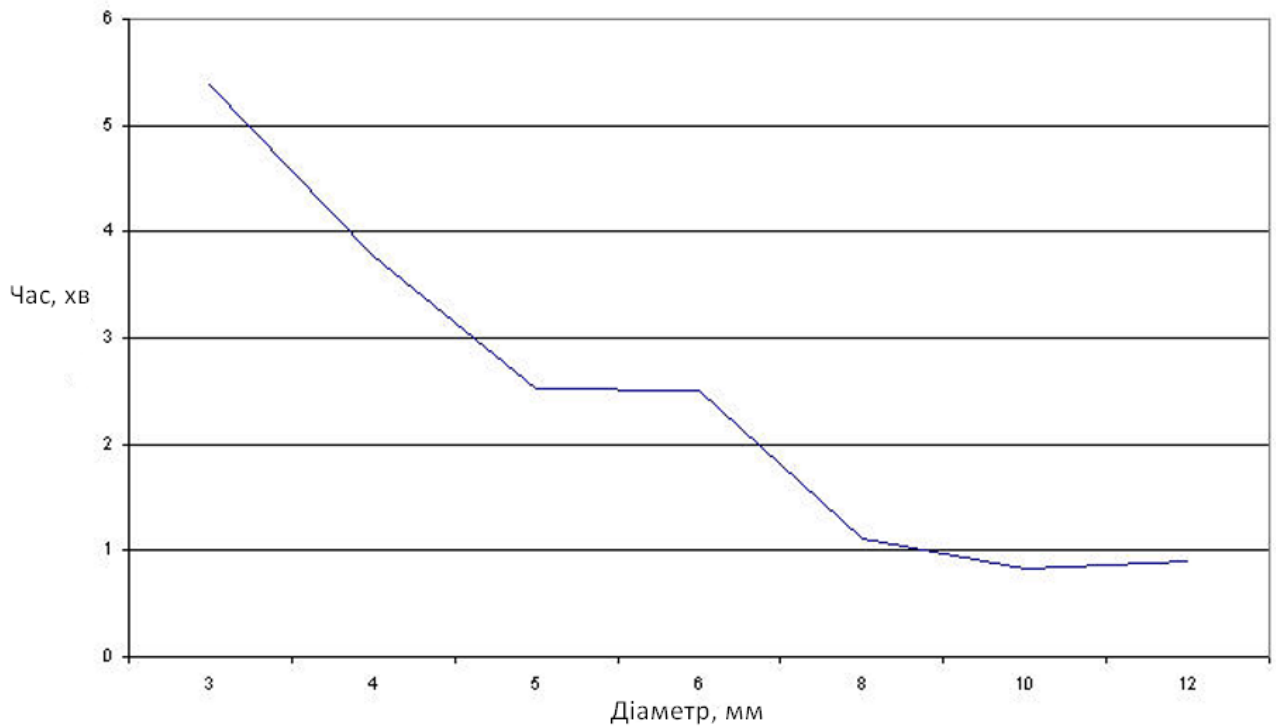


Рисунок 3.8 – Залежність часу обробки від діаметра фрези при фрезеруванні площини

Ступінчастість кривої пов'язана з тим, що при обробці діаметром кратним ширині фрезерування не потрібно додаткового проходу для зняття частини матеріалу, що залишилася. Тому, як видно з графіка, ефективнішим буде обробка $\varnothing 10$ мм, а не $\varnothing 12$ мм.

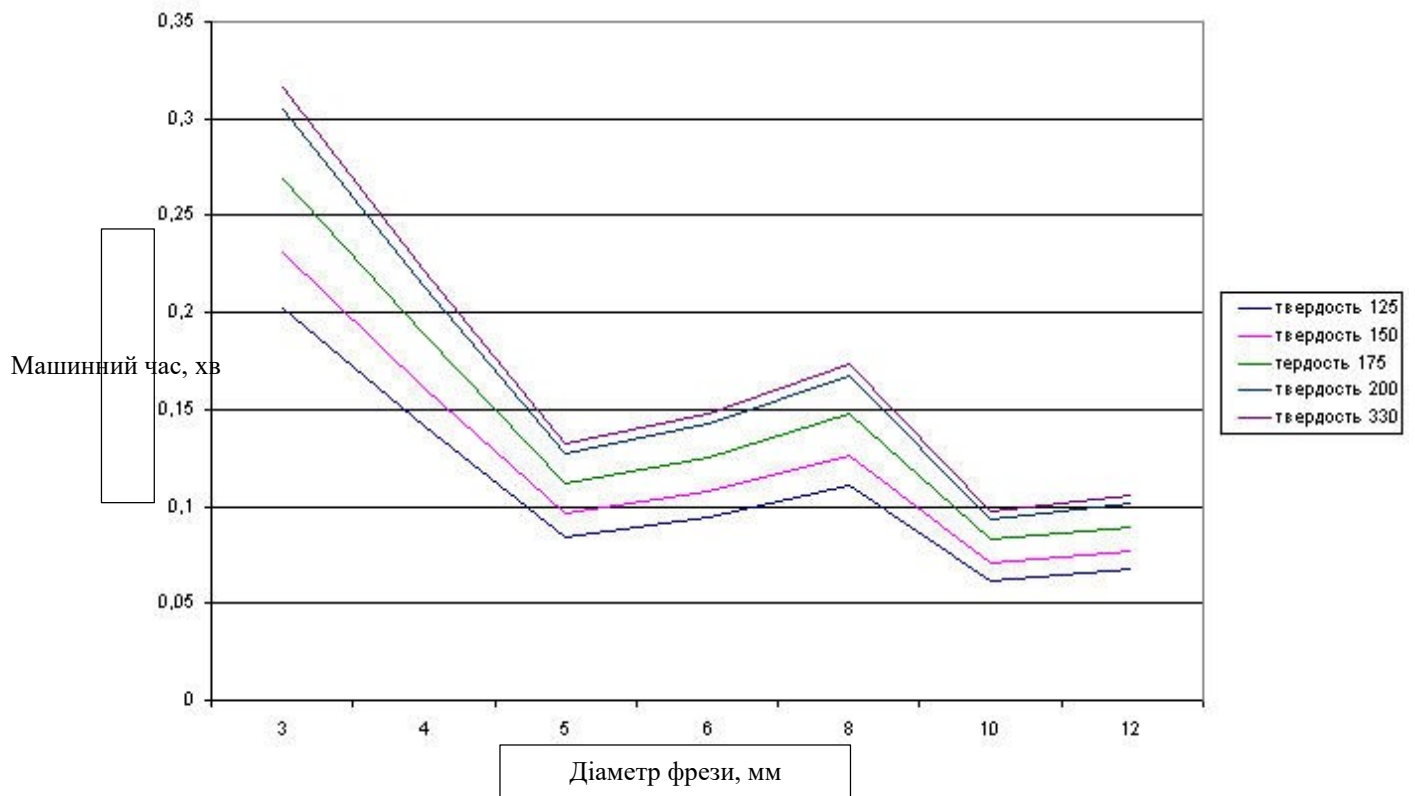


Рисунок 3.9 – Залежність машинного часу від діаметра фрези

Розрахунки проводилися для деталі $\phi = 50$ мм, $l = 50$ мм, $a_p = 0.08$ мм. З отриманої залежності випливає, що при обробці контуру фрезою діаметром 5 мм, 6 мм, 8 мм найефективнішою буде обробка фрезою діаметром 5 мм. Це з тим, що з розрахунку числа проходів призначається найближче ціле число. Отже, на останньому проході буде зніматися припуск, що залишився, який менше допустимої глибини різання. При обробці діаметром 5 мм розрахункова кількість проходів збігається із прийнятим. Ефективність обробки таким діаметром буде максимальною.

При контурному фрезеруванні обробку доцільніше виконувати тим діаметром, при якому $a \leq a_p$. Тобто, щоб обробка по можливості велася за один прохід та з максимальною хвилинною подачею. Якщо $a \geq a_p$, то необхідно вибрати такий діаметр інструменту, при якому розрахункова кількість проходів максимально наближається до прийнятого.

3.2 Дослідження стратегій фрезерування

Стійкість інструменту залежить від призначених режимів різання, а також від сталості цих режимів у процесі обробки. Діаметр фрези та частота обертання шпинделя під час обробки приймаються постійними. Тоді фактична швидкість різання буде залежати від напрямку різання [15]. Відповідно до 2.1.5, при малих значеннях хвилинної подачі різницю між зустрічним і попутним напрямом фрезерування незначні. З підвищенням подачі та швидкості різання все більше впливають вібрації в технологічній системі заготовка – інструмент. Тому при високошвидкісному фрезеруванні застосовують попутний напрямок подачі, при якому менше вібрації.

Для запобігання динамічним зарізам система ЧПК верстата зобов'язана уповільнювати рух у точках зміни напрямку руху. На рисунку 3.10 показано траєкторію руху інструменту при обробці криволінійної поверхні.

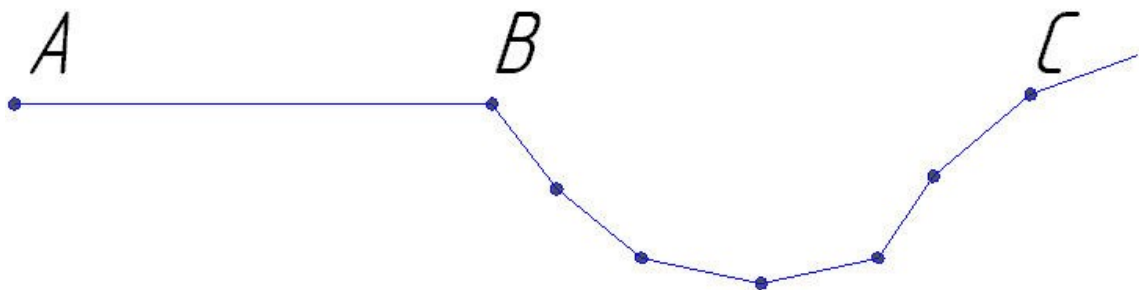


Рисунок 3.10 – Траєкторія руху фрези

На рисунку 3.11 представлений графік розгону та гальмування приводу та фактична швидкість руху інструменту по заданій траєкторії.

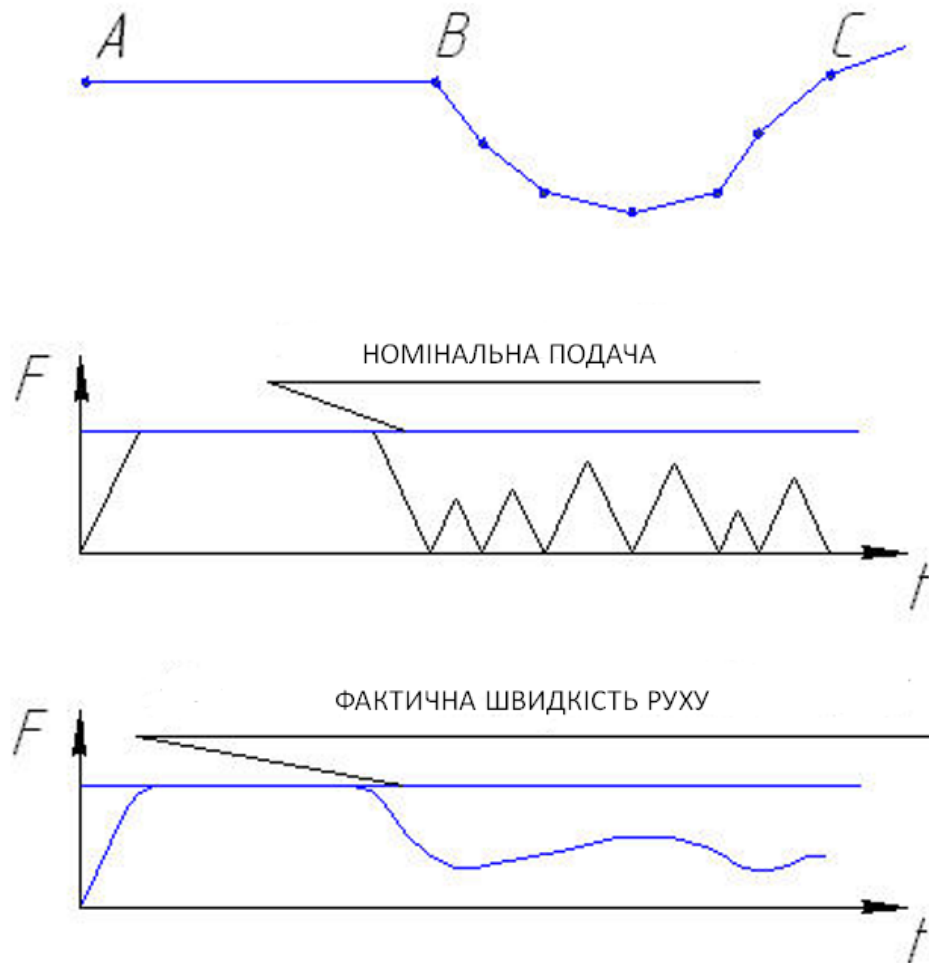


Рисунок 3.11 – Графік розгону та гальмування приводу

Після надходження сигналу початку обробки привід починає розганятися і досягає номінального значення подачі, заданої технологом. На лінійній ділянці АВ подача, досягнувши номіналу, залишається постійною. Перед точкою В привід починає гальмування перед зміною напрямку руху. Але як видно з графіка, на складнішій ділянці траєкторії ВС привід взагалі не досягає номінального значення швидкості. Щоб уникнути такої ситуації необхідно застосування системи ЧПК з функцією попереднього перегляду (look - ahead). Наприклад система ЧПК SINUMERIC 840 аналізує траєкторію руху інструменту на 200 кадрів вперед, як сильно змінюється напрям руху і мінімізує гальмування. При застосуванні таких систем графік зміниться (рис. 3.12).

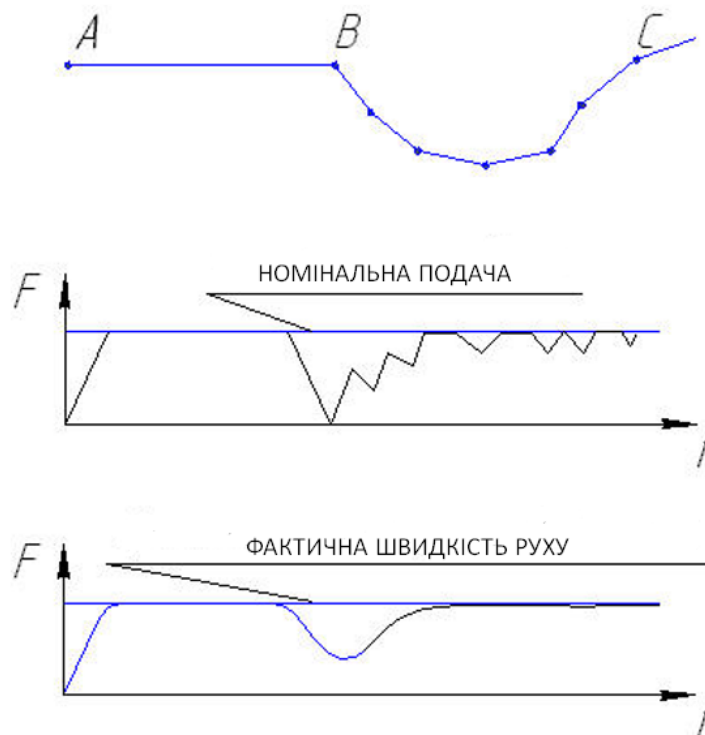


Рисунок 3.12 – Графік розгону та гальмування приводу системою ЧПК з функцією перегляду

Швидкість руху приблизно дорівнює заданій. Але все одно залишається ділянка, на якій швидкість руху фрези не відповідають заданій. Для високошвидкісної обробки необхідно, щоб траєкторія була максимально гладкою, тобто у міру можливостей унеможливити різку зміну напрямку руху (рис 3.13).

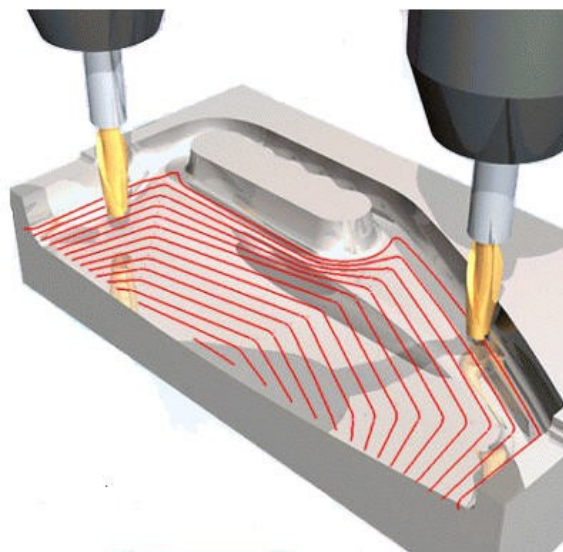


Рисунок 3.13 – Згладжена траєкторія обробки

На стійкість інструменту також впливає перевищення значень радіальної та осьової подачі. Ці значення рекомендуються виробником інструменту. Перевищення рекомендованих значень спричиняє зміну теплового режиму роботи інструменту. Підвищується температура різання, що призводить до підвищеного зносу. Тому траєкторія руху інструменту, по можливості, повинна запобігати перевантаженню.

Для чорнової обробки матеріалу в САМ – системі Power Mill є три стратегії: растр; спіраль; усунення, або офсет.

Класична растрова траєкторія (рис 3.14) є набір паралельних проходів, які можуть виконуватися під заданим кутом у площині ХУ.

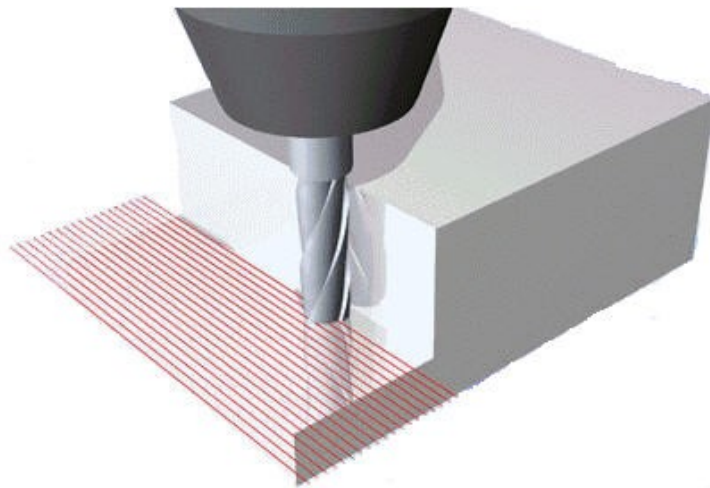


Рисунок 3.14 – Растрова стратегія фрезерування

Напрямок різання за такої траєкторії змінюється при кожному переході на новий прохід. Зміни напрямку різання можна уникнути, здійснюючи перехід на наступну ділянку траєкторії на безпечній висоті, але це збільшує час обробки і змушує робити врізання на початку кожного проходу. Врізання може відбуватися в цілісний метал, тому потрібно робити це похило, на низькій подачі.

При растровій обробці, коли крок обробки перевищує чверть діаметру інструменту, після виконання обробки на профілі деталі залишаються великі гребінці. Їхня наявність негативно впливає на умови напівчистої обробки. Необхідно вводити додатковий обхід профілю деталі, що збільшує час обробки.

Растрова траєкторія не забезпечує гладкість траєкторії, тому що наприкінці кожного проходу відбувається дворазова зміна напрямку руху. Це призводить до гальмування практично до нуля, що не тільки збільшує час обробки, але скорочує термін служби інструменту.

При обробці вздовж лінійного сегмента траєкторії крок постійний і подача не змінюється, але при зміні напрямку руху в кінці кожного проходу навантаження на фрезу різко збільшується.

Растрова траєкторія ефективна тільки на невисоких подачах, якщо при цьому геометрія області дозволяє утримувати високе відсоткове співвідношення між довжиною лінійних переміщень і довжиною переходів (обробка прямокутної кишені).

Спіральна траєкторія (рис 3.15) характеризується сталістю режимів різання.

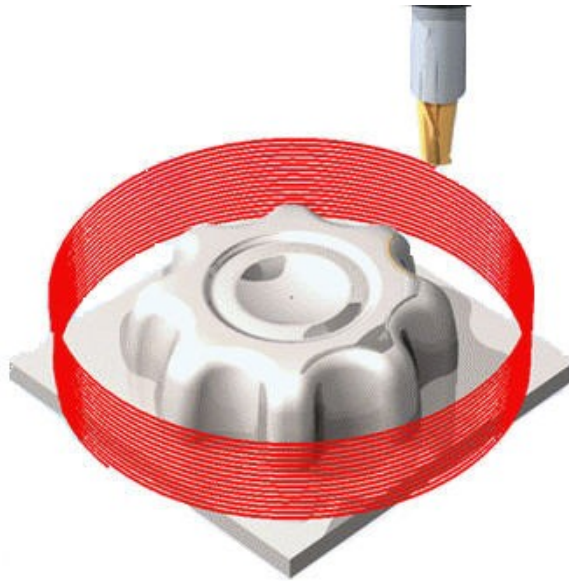


Рисунок 3.15 – Спіральна стратегія фрезерування

Траєкторія обробки йде вздовж профілю деталі та виключає необхідність додаткового проходу, на відміну від растрової обробки.

Недоліками спіральної стратегії фрезерування є відсутність переходів між витками і те, що форма траєкторії залежить від геометрії оброблюваної деталі. Всі злами профілю, що обробляється, копіюються кожним витком спіралі.

При спіральній стратегії фрезерування може виникнути недостатнє знімання матеріалу. Для забезпечення повної обробки заданої геометрії виток спіралі, прилеглий до профілю деталі, повинен бути замкнутим. Тому при поступовому наближенні до цього профілю крок обробки відповідно зменшується. При обробці на малих подачах це безпечно, але високошвидкісною обробкою неприпустимо. Тепло, що виділяється при різанні металу, повинно йти в стружку, а так як обсяг стружки, що виробляється, падає, то тепло йде в інструмент, нагріваючи його. Багаторазове повторення таких ситуацій веде до швидкого зношування інструменту. Плавний підхід до замкнутих контурів деталі збільшує довжину траєкторії. У випадках коли область, що обробляється, містить кілька окремих об'єктів обробки, безперервна спіраль розбивається на кілька самостійних спіралей. Кожна із цих спіралей має свій виток наближення до профілю деталі. Довжина цих витків суттєво позначається на загальній довжині траєкторії.

Спіральну обробку вигідно застосовувати як при традиційній, так і при високошвидкісній обробці, якщо область, що обробляється, являє собою округлу кишеню без островів (рис 3.16).

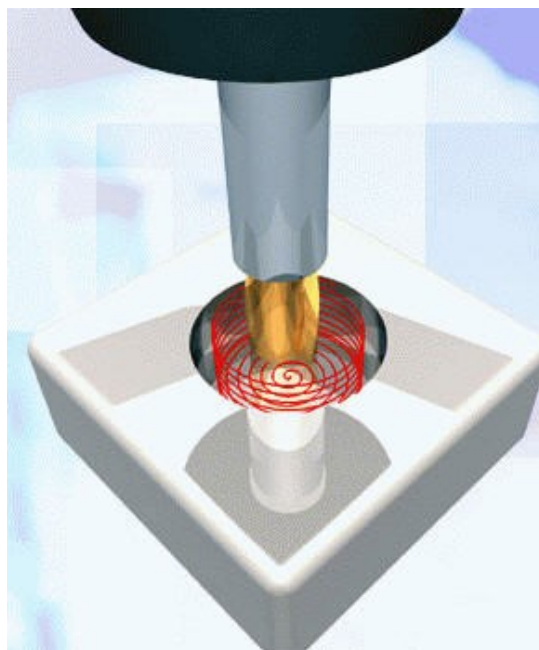


Рисунок 3.16 – Стратегія обробки округлої кишені

Постійність режимів різання забезпечує відсутність зламів у витках спіралі, а відсутність недостатнього знімання матеріалу - скорочення довжини наближення траєкторії.

Стратегія фрезерування зсувом (рис 3.17) поєднує переваги растрової та спіральної траєкторій обробки.



Рисунок 3.17 – Обробка зміщенням

Напрямок різання залишається постійним, як із спіральною траєкторією. Постійним залишається також крок обробки, як у растрової обробки. Відсутня необхідність обходу профілю деталі і відсутня траєкторія наближення.

Але разом із перевагами траєкторій обробка усуненням успадкувала також їхні недоліки. Присутня різка зміна напрямку руху при переході з витка на виток. Обробка зсувом повторює геометрію профілю, що обробляється.

Для виключення умов обробки, коли обробка ведеться повним діаметром фрези, наприклад, врізання інструменту в заготовку, в САМ - системі Power Mill розроблена трехоїдальна обробка (рис. 3.18). Система автоматично визначає місця, де обробка вестиметься повним діаметром фрези, і будує трехоїду. Така стратегія обробки застосовується й у фрезерування пазів або проточок (рис 3.19).

При традиційній обробці застосовувалася фреза діаметром рівним ширині паза. Це погіршувало умови різання та знижувало стійкість інструменту.

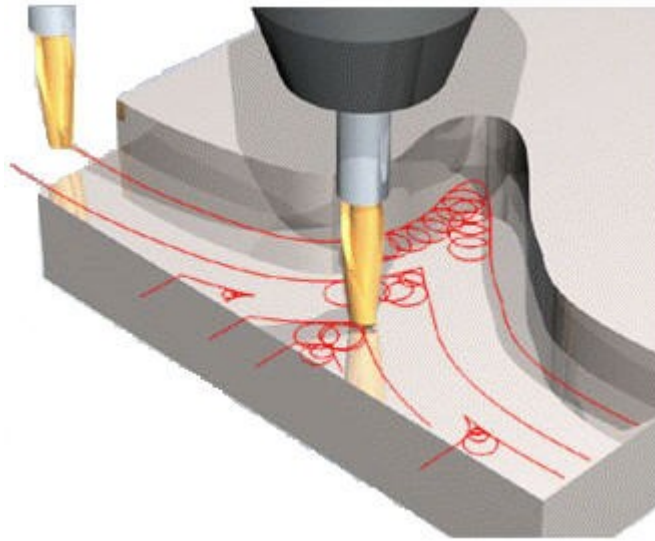


Рисунок 3.18 – Трохоїдальна стратегія обробки при врізанні

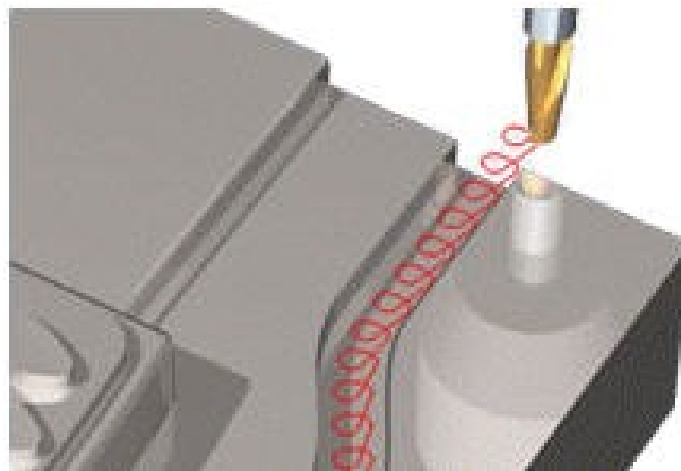


Рисунок 3.19 – Трохоїдальна обробка проточок

При трохоїдальній обробці контролер системи ЧПК виконує спіральні рухи фрези імітуючи різання повним діаметром фрези. Але при цьому не виникає перегрівання різального інструменту, що особливо важливо при фрезеруванні інструментом зі спеченого карбїду. Необхідно дотримуватися умови при якій діаметр інструменту, що використовується для обробки, повинен дорівнювати половині ширини обробки.

При традиційній стратегії обробки, у місцях зупинки інструменту можуть залишатися сліди від інструмента у вигляді зарізів. У системі Power Mill для уникнення таких випадків передбачено стратегію обробки 3D спіраль (рис 3.20).



Рисунок 3.20 – Стратегія обробки 3D спіраль

При обробці просторово складної деталі (рис 3.21) складно дотримуватися сталості навантаження на інструмент.

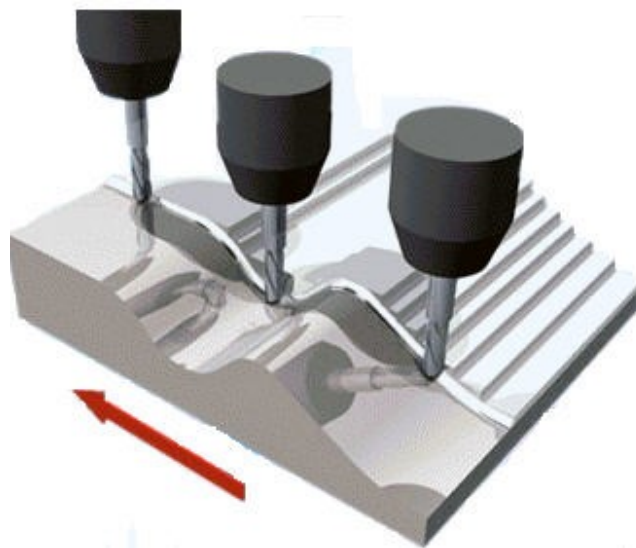


Рисунок 3.21 – Обробка складної поверхні

Для цього в системі Power Mill існує додатковий модуль PS – Optifeed, який оптимізує генеровану ЧПК – програму (рис 3.22).

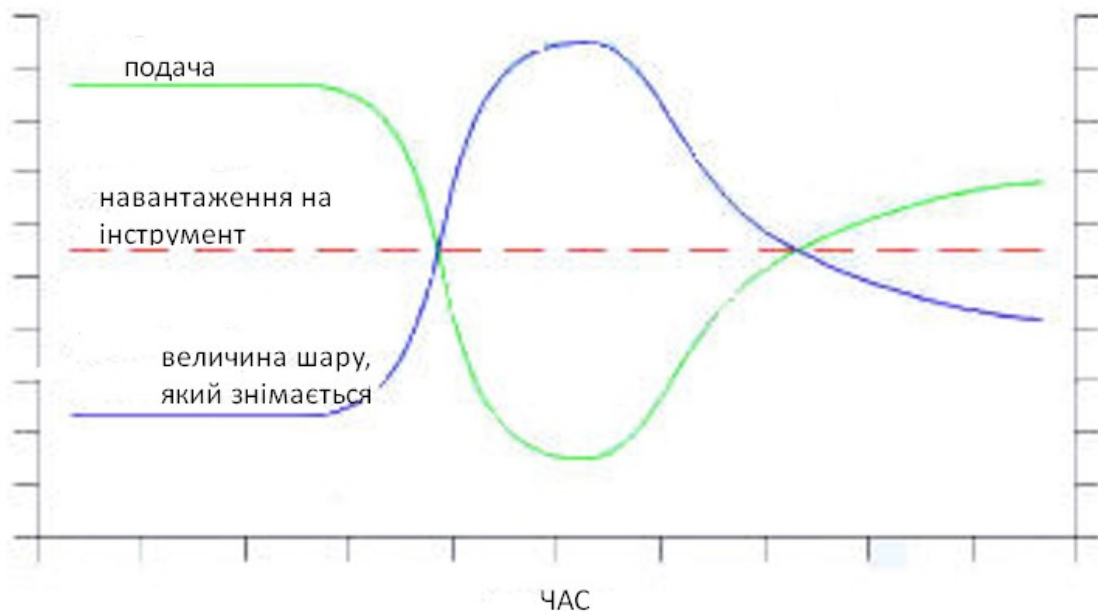


Рисунок 3.22 – Графік оптимізації подачі

Постійність навантаження забезпечується зниженням або збільшенням подачі в залежності від величини шару, що знімається.

3.2. Рекомендації щодо вибору стратегій фрезерування на проектованому верстаті

Погана стратегія зазвичай призводить до непринятно короткого терміну служби інструменту або до катастрофічних помилок. Дуже важливо пам'ятати, що для ВШО мало лише запустити готову траєкторію обробки та збільшити швидкість обертання шпинделя та подачі.

Траєкторія інструменту для високошвидкісного фрезерування повинна задовольняти низку вимог:

- різуче навантаження на інструмент має бути в допустимих для нього межах;
- траєкторія інструменту не повинна робити гострих виступів (піків), що перевищують певну межу;
- необхідно уникати різкої зміни швидкості видалення матеріалу;
- швидкості та прискорення повинні бути у допустимих для верстата межах;
- має підтримуватися зустрічний шлях різання;
- потрібно уникати різких змін напрямку різання;
- холості ходи повинні бути мінімізовані;
- час проходження і траєкторії все має бути зведено до мінімуму.

Потрібно забезпечити плавність траєкторії руху інструменту. Це зумовлено необхідністю зниження динамічних навантажень під час різкої зміни напрямку руху інструменту. Необхідно максимально можливе виключення кутів траєкторії. У кутах де інструмент змінює напрямок, він повинен зупинитися, і зниження навантаження в цей момент викликає врзання фрези в деталі. Наприклад при обробці деталі (рис 3.23), яка має часті виступи, траєкторія інструмента буде ступінчастою (рис 3.24).

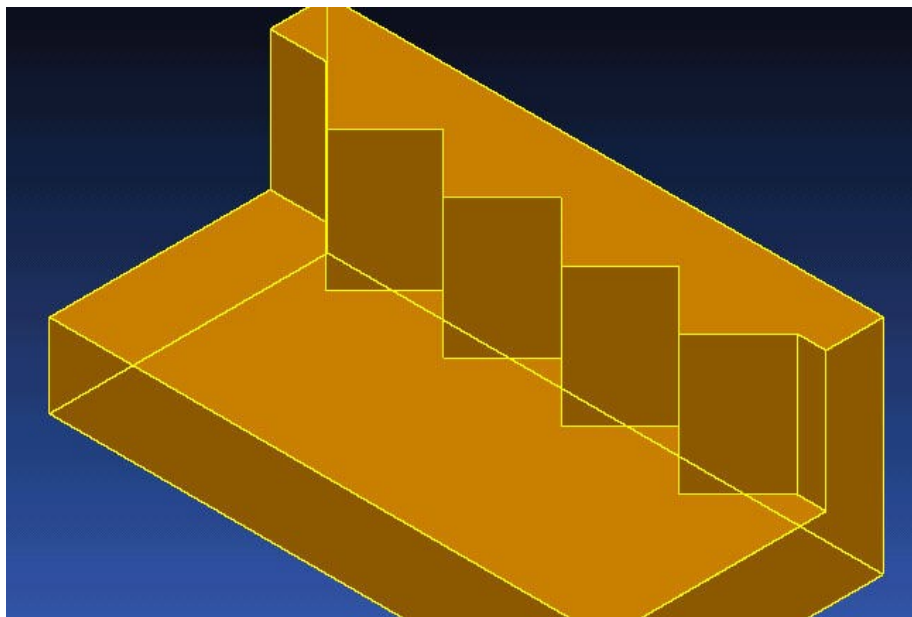


Рисунок 3.23 – Оброблювана деталь

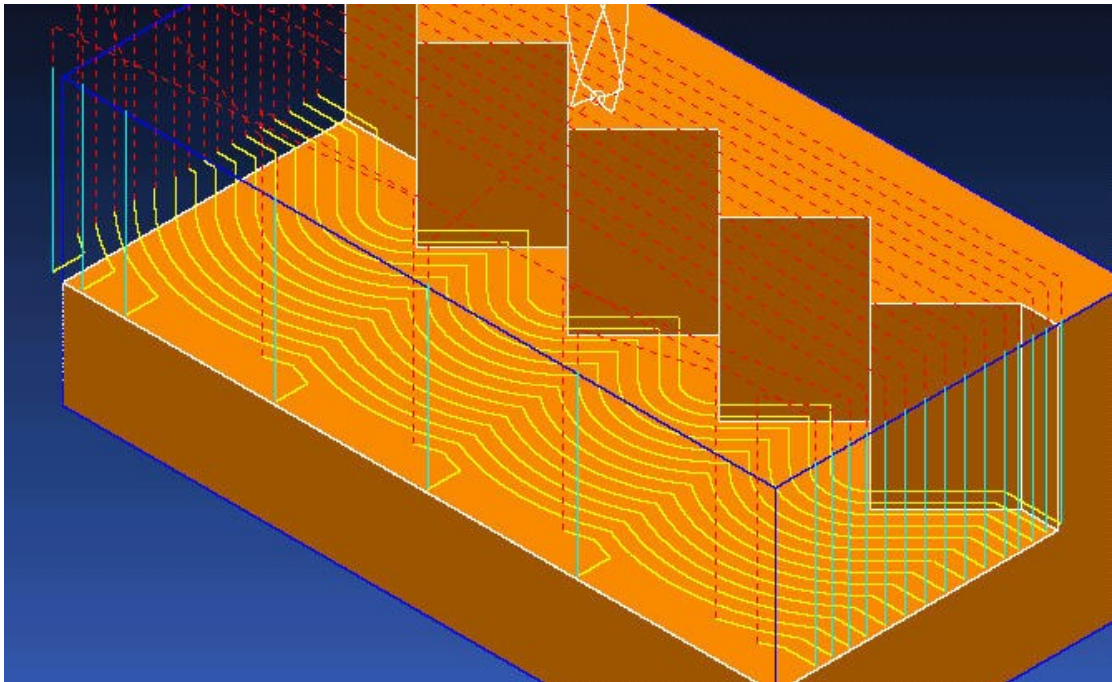


Рисунок 3.24 – Траєкторія руху фрези

Для виправлення такої траєкторії у системі Power Mill існує функція згладжування траєкторії (рис. 3.25).

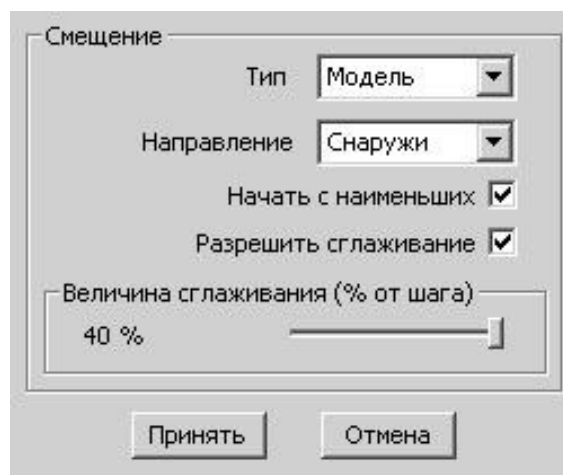


Рисунок 3.25 – Діалогове вікно параметра згладжування траєкторії

Після застосування згладжування траєкторія матиме вигляд (рис 3.26)

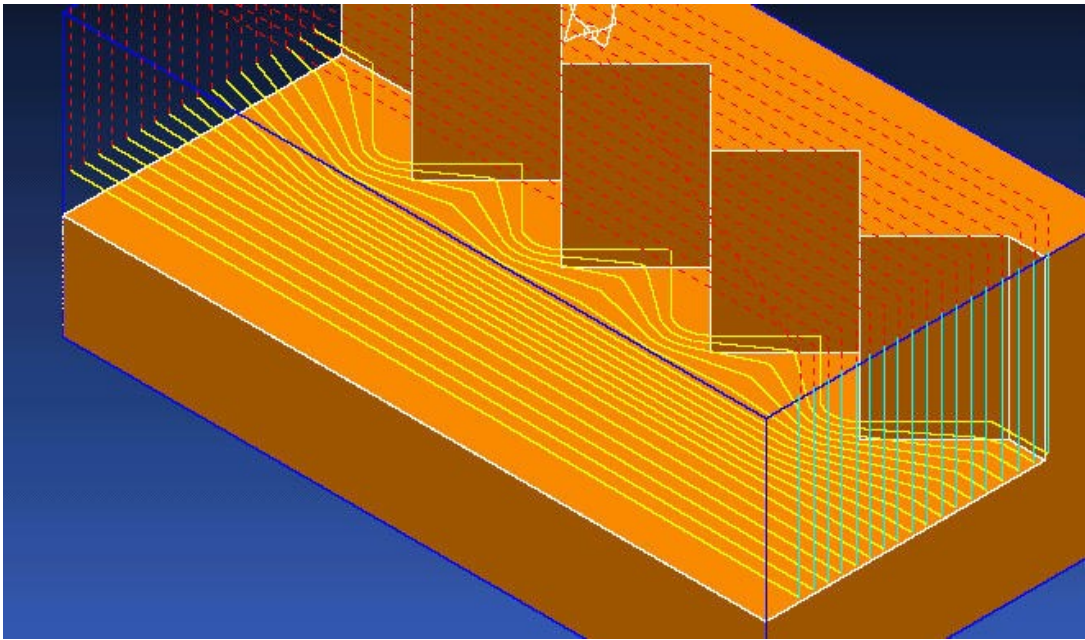


Рисунок 3.26 – Згладжена траєкторія інструменту

Як видно на рисунку, більшу частину матеріалу інструмент знімає рухаючись прямолінійною траєкторією. Тільки при наближенні до пікових ділянок деталі інструмент починає змінювати напрямок руху.

Необхідно також намагатися досягти рівномірного навантаження на інструмент. Традиційна мала обробка, що складається з численних ходів врізання і виходів інструменту (навіть якщо це згладжені входи по дузі), не може бути визнана оптимальною для ВШО. Перевага повинна віддаватися спіральним стратегіям, де інструмент, одного разу врізавшись, зберігає безперервний та рівномірний контакт із заготовкою, або стратегія еквідистантного зміщення контуру, які тривалий час зберігають контакт інструменту із заготовкою, з одним заходом та виходом. Рівномірність навантаження досягається шляхом застосування модуля PS Optifeed.

Це правило рівномірних навантажень диктує техніку обробки внутрішніх скруглень. При ВШО треба прагнути виключати обробку фрезами з радіусами заокруглення деталі. У місцях заокруглень це викликає різке збільшення перерізу зрізу та відповідне підвищення навантаження на інструмент. Отже,

однією з вимог, що висуваються до систем моделювання, має стати можливість легкого та надійного моделювання радіусів заокруглень.

Дотримуючись цих рекомендацій, можна домогтися підвищення ефективності обробки та уникнути поломки інструменту або передчасного зносу, а також підвищити якість обробленої деталі.

ВИСНОВКИ

В роботі розглянуто особливості високошвидкісної обробки та визначено параметри для проектування високошвидкісного фрезерного верстата.

1. Виконано огляд літератури з основ теорії високошвидкісної обробки. Досліджено вплив підвищення швидкості різання на основні параметрів різання.

2. Виконано аналіз умов ефективного застосування високошвидкісної обробки та взаємозв'язків факторів, що впливають на процес різання: верстат, різальний інструмент, режими різання, допоміжний інструмент, деталь, система ЧПК, CAD/CAM – система.

3. Визначено вихідні дані для проектування високошвидкісного фрезерного верстата $n_{\max} = 30000$ об/хв, $n_{\min} = 5000$ об/хв, $P_z = 208$ Н, $P_y = 125$ Н, $P_x = 85$ Н, $M_{кр} = 16,64$ Н·м, $N_e = 1,08$ кВт.

4. Визначено вимоги до верстата, приводу головного руху, приводу подач, різального інструменту, допоміжного інструменту, системи ЧПК, CAD/CAM – системи.

5. Розглянуто стратегії фрезерування, які є у сучасних САМ – системах. Визначено стратегії фрезерування, які враховують вимоги високошвидкісної обробки, для застосування на високошвидкісному верстаті, що проектується.

6. Проведено аналіз режимів різання, які рекомендують виробники інструменту при високошвидкісній обробці. На основі аналізу, дано рекомендації щодо підвищення ефективності високошвидкісної обробки.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Ashley S., High – speed machining goes mainstream, Mechanical Engineering, May 1995, (56 – 61).
2. Воронин А.Ю., Современные системы управления высокоскоростным фрезерованием
3. "High-Speed Machining" авторства Robert H. Gerrard.
4. "High-Speed Machining" авторства Bert P. Erdel.
5. Теория резания. Физические основы и тепловые процессы в технологических системах: Учеб. для вузов / П.И.Ящерицын, М.Л.Еременко, Е.Э.Фельдштейн. – Мн.:Выш. шк., 1990. – 512с.:ил.
6. Кузнецов Ю.Н. Станки с ЧПУ: Учеб. пособие. – К.: Выща шк.,1991. – 278с.: ил.
7. Молчанов Г.Н. Повышение эффективности обработки на станках с ЧПУ. – М.: Машиностроение, 1979. – 140 с.
8. Агрегатные станки малых и средних размеров/ В.Э. Пуш, Р. Пигерт, В.Л. Сосонкин; Под. Ред. В.Э. Пуша. – М.:Машиностроение, 1978. – 216с.
9. Програмное управление станками / Под.ред. В.Л. Сосонкина. – М.: Машиностроение, 1986. – 128 с.
10. Гжиров Р.И., Серебrenицкий П.П. Программирование обработки на станках с ЧПУ. – Л.: Машиностроение. Ленингр. Отд-ние, 1990. – 588 с.: ил.
11. Програмное управление станками / Под.ред. В.Л. Сосонкина. – М.: Машиностроение, 1986. – 128 с.
12. Евгенъев Г.Б. Основы программирования обработки на станках с ЧПУ. – М.:Машиностроение, 1978. – 48 с.
13. Кошкин В.Л. Аппаратные системы числового программного управления. – М.: Машиностроение, 1989. – 286 с.
14. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов. – М., 1975.
15. Верешака А.С., Третьяков И.П. Режущие инструменты с износостойкими покрытиями. – М., 1986.

16. Вульф А.М. Резание металлов. – Л., 1973.
17. Грановский Г.И., Грановский В.Г. Резание металлов. – М., 1985.
18. Жарков И.Г. Вибрации при обработке лезвийным инструментом. – Л., 1986.
19. Металлообрабатывающий твердосплавный инструмент: Справочник/В.С.Самойлов, Э.Ф. Эйхманс, В.А. Фальковский и др. – М., 1988.
20. Оптимизация режимов обработки на металлорежущих станках/ А.А. Гильман, Л.А. Брахман, Д.И. Батищев, Л.К. Матяева. – М., 1972.
21. Поатпов В.А., Айзеншток Г.И. Высокоскоростная обработка. – М., 1986.
22. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов. – М., 1981.
23. Хае Г.Л. Прочность режущего инструмента. – М., 1975.
24. Розенберг Ю.А. Создание нормативов по определению сил резания с использованием теоретических зависимостей процесса резания // Вестник машиностроения. 2000.№9. с.35 – 40.
25. Боровский Г.В. Инструментальные материалы и специальный инструмент для высокоскоростного резания // СТИН. – 1998. – с.26 – 29.
26. Справочник технолога машиностроителя. В 2-х т. Т.2 /Под ред.А.Г.Косиловой и Р.К.Мещерякова. – 4-е изд., перераб. и доп.- М.: Машиностроение, 1985. 496 с.,ил.
27. Рагулин А. Эффективная черновая обработка на станках с ЧПУ // Сапр и графика. – 2003. - №2. С.82-84.
28. Боровский Г.В. Инструментальные материалы и специальный инструмент для высокоскоростного резания // СТИН. – 1998. - №8. – с. 26-29
29. Мозговой В., Карась В., Петров С. GeMMA – 3D: пятикоординатное высокоскоростное фрезерование моноколес // Сапр и графика. – 2002. - №12. – с.68 – 69.
30. Хоббс С. CAD/CAM – системы для высокоскоростной обработки // Сапр и графика. - №12. – с.102 – 104.