Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
Навчально-науковий інститут «Українська інженерно-педагогічна академія»
Кафедра Машинобудування, транспорту і зварювання

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

магістра

на тему

Професійна підготовка фахівця машинобудівних підприємств з підвищення ефективності обробки осьових ріжучих інструментів із швидкорізальної сталі за рахунок застосування методу фрезоточення

(тема кваліфікаційної роботи)

Виконав: студент 5 курсу, групи ДПОМ24мг
спеціальності:015.34«Професійна освіта (Машинобудування)»
(шифр і назва напряму підготовки, спеціальності)

_____/Андрій ЗУБІК
(підпис) (ім'я та прізвище)

Керівник _____/Антон СКОРКІН
(підпис) (ім'я та прізвище)

Рецензент _____/Вікторія КНЯЗЄВА
(підпис) (ім'я та прізвище)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри _____/Олег ПОДОЛЯК
(підпис) (ім'я та прізвище)

Нормоконтроль _____/ Олег ПОДОЛЯК
(підпис) (ім'я та прізвище)

Секретар ЕК _____/Валентина СКОРКІНА
(підпис) (ім'я та прізвище)

Харків – 2025 рік

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені В.Н. КАРАЗІНА

Навчально-науковий інститут «Українська інженерно-педагогічна академія»
Кафедра машинобудування, транспорту і зварювання
Спеціальність 015.34 Професійна освіта (Машинобудування)
Освітньо-професійна програма Професійна освіта (Машинобудування)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри МТіЗ
_____ О.С. Подоляк
"06" 10 2025 р.

ЗАВДАННЯ
на кваліфікаційну роботу
другого (магістерського) рівня вищої освіти

студенту (ці) Андрію ЗУБІКУ
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Професійна підготовка фахівця машинобудівних підприємств з підвищення ефективності обробки осьових ріжучих інструментів із швидкорізальної сталі за рахунок застосування методу фрезоточення

затверджена наказом 4801-5/3664 від 06.10. 2025 р.

2. Термін здачі магістрантом закінченої роботи "01" грудня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи: *Зразки осьових ріжучих інструментів із швидкорізальної сталі*

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що їх належить розробити): *Вступ. Актуальність професійної підготовки фахівців машинобудівної галузі з підвищення ефективності обробки осьових ріжучих інструментів із швидкорізальної сталі за рахунок застосування методу фрезоточення. Огляд науково-технічної та нормативної літератури. Математичне моделювання процесу ортогонального фрезоточення. Розробка дидактичного проєкту факультативного заняття на тему «підвищення продуктивності адитивного виробничого процесу за рахунок вдосконалення методу виготовлення виробу з просторових криволінійних шарів» для фахівця машинобудівних підприємств. Висновки. Список джерел інформації. Додатки.*

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень, плакатів: *У вигляді презентації PowerPoint.*

6. Консультант:

Розділ	Консультант	Підпис, дата		Оцінка (бали)
		Завдання видав	Завдання прийняв	
педагогічний	Синельник І.В.			

7. Дата видачі завдання «7» 10 2025р.

Керівник _____ Антон СКОРКІН
(підпис) (ім'я, прізвище)

Завдання прийняв до виконання _____ Андрій ЗУБІК
(підпис) (ім'я, прізвище)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН-ГРАФІК
виконання кваліфікаційної роботи

№ з/п	Назва етапів роботи та питань, які мають бути розроблені відповідно до завдання	Термін виконання	Позначки керівника про виконання завдань
1.	Вибір теми й обґрунтування проблеми дослідження. Визначення об'єкта, предмета, мети й завдань.		
2.	Складання плану роботи. Підбор літератури й інших джерел		
3.	Оформлення завдання проектування для затвердження теми кваліфікаційної роботи		
4.	Підготовка аналітичної частини		
5.	Підготовка теоретичної частини		
6.	Розробка дослідницької частини		
7.	Розробка методичного розділу		
8.	Підготовка графічного матеріалу		
9.	Доробка проекту по зауваженнях наукового керівника		
10.	Доробка проекту по зауваженнях консультантів		
11.	Оформлення кваліфікаційної роботи. Підготовка до захисту.		
12.	Захист кваліфікаційної роботи		

Здобувач вищої освіти _____ Андрій ЗУБІК
(підпис) (ім'я, прізвище)

Нормоконтроль _____ Олег ПОДОЛЯК
(підпис) (ім'я, прізвище)

ЗМІСТ

Вступ	7
Розділ 1 Актуальність професійної підготовки фахівців машинобудівної галузі з підвищення ефективності обробки осьових ріжучих інструментів із швидкорізальної сталі за рахунок застосування методу фрезоточення	10
2 Огляд науково-технічної та нормативної літератури. Постановка завдань дослідження	20
3 Математичне моделювання процесу ортогонального фрезоточення	36
4 Методи та засоби здійснення досліджень	47
5 Експериментальні дослідження впливу режимів різання на вихідні параметри	54
Розділ 6 Розробка дидактичного проєкту факультативного заняття на тему «підвищення ефективності обробки осьових ріжучих інструментів із швидкорізальної сталі за рахунок застосування методу фрезоточення» для фахівців машинобудівної галузі	67
Висновки	80
Список використаних джерел	81

Реферат магістерської кваліфікафійної роботи з теми “ Професійна підготовка фахівця машинобудівних підприємств з підвищення ефективності обробки осьових ріжучих інструментів із швидкорізальної сталі за рахунок застосування методу фрезоточення ”

РЕФЕРАТ

Робота містить 83с., 42 рис., 21 табл., 23 джерел.

Кваліфікаційна робота (дипломний проєкт) присвячений науковому обґрунтуванню та вдосконаленню системи підготовки фахівців машинобудівних підприємств з підвищення ефективності обробки осьових ріжучих інструментів із швидкорізальної сталі за рахунок застосування методу фрезоточення.

У першому розділі розглянуто Актуальність професійної підготовки фахівців машинобудівної галузі з підвищення ефективності обробки осьових ріжучих інструментів із швидкорізальної сталі за рахунок застосування методу фрезоточення.

У другому розділі виконано Огляд науково-технічної та нормативної літератури. Постановка завдань дослідження.

У третьому розділі виконано Математичне моделювання процесу ортогонального фрезоточення.

У четвертого розділі Методи та засоби здійснення досліджень.

У п’ятому розділі Експериментальні дослідження впливу режимів різання на вихідні параметри.

Запропонована методика може бути покладена в основу інноваційних технологій під час навчання для отримання кваліфікованих фахівців машинобудівної галузі.

Ключові слова: професійна підготовка, машинобудівна галузь, фахівець, фрезоточіння, швидкорізальна сталь

Abstract of the master's qualification work on the topic “Professional training of specialists of machine-building enterprises to increase the efficiency of processing axial cutting tools from high-speed steel by applying the milling-turning method”

ABSTRACT

The work contains 83 pages, 42 figures, 21 tables, 23 sources.

The qualification work (diploma project) is devoted to the scientific substantiation and improvement of the system of training specialists of machine-building enterprises to increase the efficiency of processing axial cutting tools from high-speed steel by applying the milling-turning method.

The first section considers the relevance of professional training of specialists of the machine-building industry to increase the efficiency of processing axial cutting tools from high-speed steel by applying the milling-turning method.

The second section provides a review of scientific, technical and regulatory literature. The research tasks are stated.

The third section provides mathematical modeling of the orthogonal milling-turning process.

The fourth section provides methods and means of conducting research.

In the fifth chapter, experimental studies of the influence of cutting modes on the initial parameters.

The proposed methodology can be used as the basis for innovative technologies during training to obtain qualified specialists in the mechanical engineering industry.

Keywords: professional training, mechanical engineering industry, specialist, milling, high-speed steel

ВСТУП

Аналіз сучасних технологій виготовлення осьового інструменту із швидкорізальних сталей показує, що цей процес може бути оптимізований за допомогою багатозадачних верстатів, які дозволяють зосередити операції на одному робочому місці. Цей метод відрізняється від традиційних підходів, що вимагають використання кількох типів верстатів, таких як токарні, фрезерні, свердлильні та спеціалізовані. Використання багатозадачних верстатів може також скоротити кількість обладнання з ЧПУ (з числовим програмним управлінням) необхідного для виробництва, зменшити площу виробничих приміщень та кількість персоналу.

Найбільший ефект від інтенсифікації процесів різання отримують у галузях, де на високопродуктивному устаткуванні, виготовляються деталі з матеріалів, що важко обробляються. До важкооброблюваних матеріалів інструментальному виробництві відносяться кобальтові швидкорізальні сталі збільшеної продуктивності. Лезовий інструмент із швидкорізальної сталі сьогодні надзвичайно затребуваний вітчизняною промисловістю для вирішення широкого спектру технологічних завдань, пов'язаних з необхідністю обробки деталей машинобудування, що виготовляються з титану, жароміцних сплавів, нержавіючих та легованих сталей. Для обробки осьового різального інструменту, зокрема фрез, розгорток, зенкерів, мітчиків тощо, застосовується метод контурної обробки. Дана технологія дозволяє виконувати обробку поверхонь, що утворюють контур деталі за кілька установок заготівлі. При цьому можливості сучасного високопродуктивного обладнання дозволяють застосовувати прогресивніші технології ортогонального, тангенціального, а також коаксіального фрезоточення. Зазначені технології дозволяють скоротити кількість переустанов заготовки і знизити кількість використовуваного в процесі обробки інструменту за рахунок концентрації операцій точіння і фрезерування на одному робочому місці і використовуючи тільки один інструмент - фрезу.

p align="justify"> Важливим фактором при виборі способів підвищення якості та продуктивності обробки деталей є економічна ефективність даних методів, яка дозволяє знизити собівартість готової продукції. Це особливо важливо в умовах одиничного та дрібносерійного виробництва. Резерви підвищення продуктивності технологічного процесу виготовлення осьового різального інструменту з швидкорізальних сталей бачаться в інтенсифікації режимів обробки та концентрації операцій та інструменту на багатозадачному верстаті.

На даний момент відсутні ефективні та широкодоступні виробникам різального інструменту технологічні рішення для підвищення ефективності попередньої механічної обробки осьового ріжучого інструменту до етапу термічної обробки, які могли б забезпечити збільшення кількості інструменту, що виготовляється в плановий період.

Об'єкт дослідження – процес професійної підготовки фахівців машинобудівних підприємств у контексті підвищення ефективності обробки осьових ріжучих інструментів із швидкорізальної сталі на сучасних високотехнологічних верстатах.

Предмет дослідження – професійна підготовка фахівців машинобудівних підприємств, спрямовані на підвищення продуктивності обробки осьових ріжучих інструментів за рахунок застосування методу фрезоточення.

Мета дослідження – теоретично обґрунтувати та розробити дидактичний проєкт професійної підготовки фахівців машинобудівних підприємств для підвищення ефективності обробки осьових ріжучих інструментів із швидкорізальної сталі шляхом використання методу фрезоточення, включаючи практичні рекомендації щодо оптимізації технологічних процесів.

Завдання дослідження:

1. Проаналізувати сучасний стан професійної підготовки фахівців машинобудівної галузі, враховуючи впровадження високотехнологічного обладнання та методів механічної обробки.

2. Розробити методичні рекомендації та дидактичні матеріали для підготовки фахівців до роботи з фрезоточними технологіями, включаючи практичні завдання та моделювання виробничих процесів.

Методи дослідження: теоретичний аналіз науково-технічної, методичної та педагогічної літератури; вивчення технічної документації та виробничих інструкцій; розробка дидактичних матеріалів та програм підготовки фахівців.

Наукова новизна результатів полягає у розробці комплексного підходу до професійної підготовки фахівців машинобудівної галузі, що інтегрує сучасні технології фрезоточення з практичним навчанням, дозволяючи формувати професійні компетентності для підвищення ефективності обробки осьових ріжучих інструментів із швидкорізальної сталі. Новизна також проявляється в удосконаленні системи підготовки кадрів через впровадження практико-орієнтованих методик та моделювання реальних виробничих умов.

Практичне значення дослідження полягає у створенні методичних рекомендацій та дидактичних матеріалів, що можуть використовуватися у навчально-виробничих центрах, на курсах підвищення кваліфікації та безпосередньо на машинобудівних підприємствах для підготовки інженерно-технічних кадрів, здатних ефективно працювати на сучасних верстатах та оптимізувати технологічні процеси обробки інструментів.

Структура та загальний обсяг роботи: робота включає українську та англійську анотації, перелік умовних скорочень, вступ, чотири розділи, висновки до кожного розділу, загальні висновки, список використаних джерел та додатки.

РОЗДІЛ 1
АКТУАЛЬНІСТЬ ПРОФЕСІЙНОЇ ПІДГОТОВКИ ФАХІВЦІВ МАШИНОБУДІВНОЇ ГАЛУЗІ З ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ОБРОБКИ ОСЬОВИХ РІЖУЧИХ ІНСТРУМЕНТІВ ІЗ ШВИДКОРІЗАЛЬНОЇ СТАЛІ ЗА РАХУНОК ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ФРЕЗОТОЧЕННЯ

1.1. Сучасні вимоги до професійної підготовки фахівців машинобудівної галузі

Сучасна машинобудівна галузь розвивається швидкими темпами, що ставить перед фахівцями високі вимоги до професійної підготовки. Основна мета навчання інженерів-технологів сьогодні полягає не лише у засвоєнні традиційних знань з механічної обробки та матеріалознавства, а й у формуванні комплексних компетентностей, що відповідають принципам Індустрії 4.0. Це включає здатність аналізувати виробничі процеси, використовувати цифрові моделі та симуляційні інструменти, а також приймати оптимальні технологічні рішення в умовах сучасного високотехнологічного виробництва.

Інтеграція цифрових технологій у навчальний процес є необхідною складовою підготовки фахівців, оскільки сучасні обробні центри та автоматизовані системи керування вимагають від інженера-технолога уміння працювати з CAD/CAM-програмами, системами імітаційного моделювання та контролю якості. Застосування симуляційних інструментів дозволяє студентам відпрацьовувати технологічні операції віртуально, прогнозувати можливі помилки та оптимізувати послідовність обробки деталей ще до виходу на виробництво.

Сучасний фахівець машинобудівного підприємства повинен мати розширений спектр професійних функцій. Крім безпосереднього виконання технологічних розрахунків та планування процесів, інженер-технолог бере

участь у впровадженні нових методів обробки, контролі продуктивності обладнання, оптимізації витрат матеріалів та підвищенні якості готової продукції. Розширення функцій передбачає постійне оновлення знань, самостійне освоєння нових технологій та активну участь у цифровізації виробничих процесів.

Таким чином, підготовка фахівців сучасного машинобудівного профілю вимагає комплексного підходу, що поєднує фундаментальні технічні знання з практичними навичками роботи в цифровому середовищі, а також формування гнучких компетентностей, які дозволяють адаптуватися до швидкозмінних умов виробництва.

1.2. Виклики підготовки фахівців до роботи з високотехнологічним обладнанням

Сучасне машинобудівне виробництво характеризується високим рівнем автоматизації та використанням складних обробних центрів, що значно ускладнює підготовку фахівців. Одним із основних викликів є освоєння сучасних фрезерних і обробних центрів разом із програмним забезпеченням, яке забезпечує автоматизоване керування технологічними процесами. Інженерам-технологам необхідно не лише розуміти принципи роботи обладнання, а й володіти навичками налаштування, програмування та контролю виробничих операцій.

Ще однією проблемою є недостатність практичної підготовки до роботи з комплексними виробничими системами. Традиційне навчання часто обмежується теоретичними заняттями та простими лабораторними вправами, що не завжди дає можливість студентам опанувати реальні технологічні процеси. Це ускладнює адаптацію молодих спеціалістів до умов сучасного підприємства, де обробка деталей відбувається у тісній взаємодії різних технологічних операцій та автоматизованих модулів.

Особливо гостро стоїть питання підготовки фахівців до роботи зі складними інструментами, наприклад, осьовими ріжучими інструментами із швидкорізальної сталі. Їх ефективне використання потребує спеціалізованих знань щодо геометрії різців, режимів обробки, вибору оптимальних параметрів фрезерування та контролю якості поверхні. Відсутність цих знань призводить до зниження продуктивності, підвищення зносу інструментів та зростання виробничого браку.

Таким чином, підготовка сучасних інженерів-технологів має враховувати високі вимоги до цифрової компетентності, практичної майстерності та здатності працювати зі складними виробничими системами та високотехнологічним обладнанням, що є ключовим фактором підвищення продуктивності та якості обробки деталей.

1.3. Значення професійної підготовки для підвищення ефективності виробництва

Сучасне машинобудівне виробництво характеризується високим рівнем автоматизації та використанням складних обробних центрів, що значно ускладнює підготовку фахівців. Одним із основних викликів є освоєння сучасних фрезерних і обробних центрів разом із програмним забезпеченням, яке забезпечує автоматизоване керування технологічними процесами. Інженерам-технологам необхідно не лише розуміти принципи роботи обладнання, а й володіти навичками налаштування, програмування та контролю виробничих операцій.

Ще однією проблемою є недостатність практичної підготовки до роботи з комплексними виробничими системами. Традиційне навчання часто обмежується теоретичними заняттями та простими лабораторними вправами, що не завжди дає можливість студентам опанувати реальні технологічні процеси. Це ускладнює адаптацію молодих спеціалістів до умов сучасного

підприємства, де обробка деталей відбувається у тісній взаємодії різних технологічних операцій та автоматизованих модулів.

Особливо гостро стоїть питання підготовки фахівців до роботи зі складними інструментами, наприклад, осьовими ріжучими інструментами із швидкорізальної сталі. Їх ефективне використання потребує спеціалізованих знань щодо геометрії різців, режимів обробки, вибору оптимальних параметрів фрезерування та контролю якості поверхні. Відсутність цих знань призводить до зниження продуктивності, підвищення зносу інструментів та зростання виробничого браку.

Таким чином, підготовка сучасних інженерів-технологів має враховувати високі вимоги до цифрової компетентності, практичної майстерності та здатності працювати зі складними виробничими системами та високотехнологічним обладнанням, що є ключовим фактором підвищення продуктивності та якості обробки деталей.

1.4. Актуальність освоєння сучасних методів проєктування технологічних процесів

Сучасне машинобудування характеризується високою складністю виробничих процесів, підвищеними вимогами до якості та точності обробки деталей, а також швидким розвитком цифрових технологій. У цьому контексті підготовка інженерів-технологів вимагає не лише знань традиційних методів обробки, а й умінь ефективно проєктувати, оптимізувати та моделювати технологічні процеси. Високий рівень компетентності фахівців є ключовою умовою для підвищення продуктивності та конкурентоспроможності сучасних машинобудівних підприємств.

Одним із головних викликів для сучасних інженерів-технологів є необхідність опанування методів моделювання та оптимізації технологічних процесів. Традиційне навчання, яке зосереджувалося на засвоєнні правил обробки та послідовності операцій, сьогодні вже не відповідає потребам

промисловості. Інженери повинні не лише знати параметри різання та властивості матеріалів, а й вміти розробляти технологічні карти, прогнозувати вплив різних режимів на якість обробки та витрати ресурсів.

Моделювання технологічного процесу дозволяє передбачити можливі проблеми, оцінити ефективність різних варіантів обробки та вибрати оптимальну стратегію виробництва. Це особливо важливо при роботі зі складними деталями та високоточним обладнанням, такими як обробні центри MAST_MM855_S24. Вміння будувати математичні та графічні моделі процесів сприяє зниженню кількості браку, скороченню часу виробництва та економії матеріальних ресурсів.

Імітаційне моделювання, що інтегрується з цифровими технологіями, стає невід'ємною частиною підготовки сучасного фахівця. Використання спеціалізованого програмного забезпечення дозволяє створювати тривимірні моделі деталей, прогнозувати поведінку матеріалу при обробці та оптимізувати режими різання без потреби проведення дорогих експериментів на виробництві.

Цифрові інструменти, включаючи системи CAD/CAM, віртуальні симулятори та програмне забезпечення для імітаційного моделювання, забезпечують комплексний підхід до проєктування технологічних процесів. Інженер може швидко перевірити різні комбінації режимів обробки, вибрати оптимальні параметри та оцінити економічну ефективність процесу. Це суттєво підвищує швидкість прийняття рішень та мінімізує ризики на етапі запуску виробництва.

Важливим аспектом є й інтеграція цих цифрових технологій у навчальний процес. Студенти та молоді фахівці отримують змогу відпрацьовувати навички на віртуальних моделях, що створює безпечне середовище для експериментів та формує впевненість у роботі з реальним обладнанням. Таким чином, цифровізація навчання та використання імітаційного моделювання стає ефективним інструментом підвищення професійної компетентності майбутніх інженерів.

Сучасні виробничі системи дедалі частіше переходять до використання групових технологічних процесів, які дозволяють одночасно обробляти декілька деталей або виконувати комплексні операції за допомогою багатофункціонального обладнання. Цей підхід підвищує продуктивність та ефективність виробництва, але ставить нові вимоги до професійної підготовки кадрів.

Фахівці повинні вміти планувати та організовувати групові операції, розраховувати режими обробки для кожного етапу та координувати роботу між різними робочими місцями. Впровадження групових процесів вимагає від інженера-технолога широкого спектра знань: від матеріалознавства до програмування числових систем управління та цифрових симуляцій.

Освоєння сучасних методів групового проєктування технологічних процесів дозволяє підвищити ефективність виробництва, зменшити час переналагодження обладнання, оптимізувати витрати матеріалів та підвищити рівень безпеки на робочих місцях. Підготовка кадрів у цьому напрямі включає поєднання теоретичних знань із практичними заняттями на обробних центрах, використанням цифрових лабораторій та симуляційного програмного забезпечення.

Таким чином, актуальність освоєння сучасних методів проєктування технологічних процесів обумовлена розвитком цифрових технологій, підвищеними вимогами до продуктивності та якості обробки деталей, а також переходом виробництва на групові технологічні процеси. Формування навичок моделювання та оптимізації технологічних процесів, використання імітаційного моделювання та цифрових інструментів дозволяє інженерам-технологам ефективно планувати виробничі операції, зменшувати виробничі витрати та підвищувати конкурентоспроможність підприємств.

Професійна підготовка сучасного інженера повинна включати комплексний підхід, що поєднує теоретичну підготовку, практичні навички та роботу з цифровими симуляторами. Це забезпечує високий рівень

компетентності фахівців, необхідний для роботи на сучасних обробних центрах та впровадження інноваційних технологій обробки складних деталей.

1.5. Освітні проблеми та потреби удосконалення системи професійної підготовки

Сучасні вимоги промисловості до інженерних кадрів машинобудівної галузі кардинально змінилися під впливом швидкого розвитку цифрових технологій, автоматизації виробництва та інтеграції інтелектуальних систем управління. В умовах індустрії 4.0 традиційні підходи до професійної підготовки фахівців все більше виявляють свою недостатність. Основні проблеми пов’язані зі змістом навчальних програм, відсутністю практичної спрямованості та застарілою матеріально-технічною базою навчальних закладів.

Багато традиційних навчальних планів, які застосовуються у вищих та середніх технічних закладах, орієнтовані на засвоєння теоретичних знань без достатньої практичної складової. Такий підхід не враховує складності сучасних виробничих процесів, використання багатофункціонального обладнання, цифрових систем управління та програмних комплексів для імітаційного моделювання технологічних процесів. В результаті випускники мають обмежений досвід роботи з реальним обладнанням та недостатньо розвинені навички, необхідні для швидкого адаптування на виробництві.

Невідповідність навчальних програм реальним виробничим вимогам проявляється у низькій готовності фахівців до вирішення комплексних технологічних завдань, оптимізації процесів та впровадження нових методів обробки деталей. Це особливо критично для роботи з інструментами зі швидкорізальної сталі та складними обробними центрами, де важливі точність, швидкість та ефективність виробничих операцій.

Для подолання зазначеної проблеми необхідним є введення практико-орієнтованих навчальних модулів, що дозволяють студентам безпосередньо

застосовувати теоретичні знання у реальних або умовно-реальних виробничих ситуаціях. Такі модулі включають лабораторні роботи, які моделюють роботу обробних центрів, дослідження параметрів різання та випробування різних методів фрезерування, зокрема осьових ріжучих інструментів із швидкорізальної сталі.

Практичні заняття та лабораторні експерименти допомагають формувати у студентів компетентності, необхідні для розробки та оптимізації технологічних процесів. Вони дозволяють відпрацьовувати навички планування послідовності операцій, вибору оптимальних режимів обробки, оцінки економічної ефективності та прогнозування результатів виробництва без ризику пошкодження дорогого обладнання. Такий підхід не лише підвищує рівень підготовки майбутніх інженерів, а й сприяє розвитку аналітичного мислення та навичок прийняття рішень.

Ще однією критичною проблемою є застаріла матеріально-технічна база освітніх закладів. Багато навчальних лабораторій не мають сучасних обробних центрів, верстатів із числовим програмним управлінням, CAD/CAM систем та програмного забезпечення для імітаційного моделювання. Це обмежує можливості студентів для практичного освоєння складних технологічних процесів та робить процес навчання менш ефективним.

Модернізація навчальної бази є ключовою умовою підготовки висококваліфікованих фахівців. Вона включає придбання сучасного обладнання, впровадження цифрових симуляторів, розробку лабораторних стендів для відпрацювання групових технологічних процесів та створення умов для моделювання реальних виробничих ситуацій. Такий підхід дозволяє не лише підвищити якість підготовки, а й забезпечити конкурентоспроможність випускників на ринку праці.

Аналіз сучасних освітніх проблем свідчить про необхідність комплексного удосконалення системи професійної підготовки фахівців машинобудівної галузі. Основні напрямки вдосконалення включають адаптацію навчальних програм до реальних виробничих вимог, впровадження

практико-орієнтованих модулів та лабораторних робіт, а також модернізацію матеріально-технічної бази навчальних закладів.

Освоєння сучасних методів проєктування технологічних процесів та цифрових інструментів є ключовим для підвищення ефективності виробництва та забезпечення високого рівня компетентності майбутніх інженерів. Тільки поєднання теоретичних знань, практичної підготовки та використання сучасного обладнання дозволяє сформувати фахівця, здатного працювати у сучасних умовах індустрії 4.0 та успішно впроваджувати інноваційні технології обробки складних деталей.

Висновки до розділу 1

Проведений аналіз сучасних вимог до професійної підготовки фахівців машинобудівної галузі свідчить про те, що ефективна підготовка кадрів є ключовим чинником підвищення продуктивності та якості обробки осьових ріжучих інструментів із швидкорізальної сталі. Сучасний інженер-технолог повинен володіти не лише теоретичними знаннями з механічної обробки, а й практичними навичками роботи з високотехнологічним обладнанням, здатністю застосовувати цифрові технології та симуляційні моделі для оптимізації процесів.

Основними викликами підготовки фахівців є складність освоєння сучасних фрезерних і обробних центрів, недостатність практичної підготовки до роботи з комплексними виробничими системами та потреба у спеціалізованих знаннях для обробки складних інструментів із швидкорізальної сталі. Ці фактори підкреслюють необхідність оновлення навчальних програм та інтеграції сучасних методів навчання, зокрема фрезоточення та імітаційного моделювання технологічних процесів.

Практична спрямованість підготовки, впровадження лабораторних робіт та моделювальних занять дозволяє формувати у студентів компетентності, необхідні для ефективного використання потенціалу сучасних обробних

центрів. Це сприяє зменшенню виробничих витрат, зниженню браку та підвищенню продуктивності обробки інструментів.

Модернізація матеріально-технічної бази навчальних закладів та впровадження цифрових технологій у навчальний процес є ключовими умовами для підготовки висококваліфікованих фахівців, здатних впроваджувати інноваційні технології обробки та забезпечувати конкурентоспроможність підприємств машинобудівної галузі.

Отже, актуальність професійної підготовки фахівців у контексті застосування методу фрезоточення полягає у необхідності формування у студентів сучасних компетентностей, що дозволяють підвищувати ефективність виробничих процесів та відповідати вимогам індустрії 4.0. Впровадження таких підходів у навчальний процес забезпечує інтеграцію теоретичних знань, практичних навичок і цифрових технологій, що є запорукою високого рівня підготовки майбутніх інженерів-механіків.

2 ОГЛЯД НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ТА НОРМАТИВНОЇ ЛІТЕРАТУРИ. ПОСТАНОВКА ЗАВДАНЬ ДОСЛІДЖЕННЯ

Сучасні багатозадачні верстати з ЧПУ та токарні обробні центри надають широкі технологічні можливості та значний потенціал для використання перспективних методів обробки деталей [105]. Ці верстати мають масове поширення завдяки можливості виконання множини операцій обробки на одному робочому місці: розточування, свердління, фрезерування та вимірювання. Використання таких верстатів значно економить час та знижує витрати на інвестиції, кадрове забезпечення та виробничу площу.

Для сучасного машинобудування одним із ключових завдань є досягнення максимальної ефективності роботи дорогих багатозадачних верстатів з ЧПУ та токарних обробних центрів, забезпечуючи необхідну якість поверхні деталей, що виробляються. Постійно зростаючі вимоги до якості та термінів обробки деталей спонукають вивчати та розробляти нові способи обробки деталей. Незважаючи на те, що існують різні методики, які можуть підвищити ефективність механічної обробки, вони не набули широкого поширення з різних причин [31, 81]. У таблиці 2.1 наведено перспективні методи підвищення ефективності обробки.

Таблиця 2.1 - Методи підвищення ефективності механообробки

Метод обробки	Ефективність, що спостерігається
Точіння полігональне	В основному, полігональне точення використовується для отримання кріплення - квадратних і шестигранних головок болтів або гайок на автоматах поздовжнього точення, оскільки при полігональному точенні година обробки зменшується в кілька разів у порівнянні з фрезеруванням шестигранників у звичайний спосіб. До мінусів цього виду обробки можна віднести вузьку спеціалізацію застосування.

Точення ротаційне	Ротаційне точення має переваги у вигляді можливості збільшення стійкості різального інструменту завдяки постійному оновленню ріжучої кромки інструменту, а також продуктивності через можливість збільшення подачі без втрати якості оброблюваної поверхні. Однак слід зазначити, що цей метод має ряд недоліків. По-перше, великі значення радіальної складової сили різання призводять до появи великих притискних сил базової посадкової поверхні відвернення в пластині. По-друге, порушення плавності обертання та заклинювання ріжучої чашки часто призводить до появи вібрацій у технологічній системі. В результаті може виникнути інтенсивне знесення кругової ріжучої кромки і знизитися якість обробки поверхні

На жаль, запропоновані вченими нові підходи в даній галузі досліджень мають обмежене застосування в інструментальному виробництві.

Фрезоточіння - це технологія фрезерної обробки лінійних і криволінійних поверхонь при одночасному обертанні різального інструменту і обертанні заготовки навколо своєї осі. Обробка виконується на симетричних або несиметричних деталях, що обертаються. Вона є реальною альтернативою класичній токарній обробці завдяки своїм перевагам: вищій продуктивності та низьким температурам різання, що забезпечують тривалий термін служби інструменту. За рахунок переривчастих характеристик технології фрезоточення стає можливим підтримувати нижчі температури різання і досягати високих швидкостей різання. У процесі реалізації технології фрезоточення досягається максимальна інтенсивність знімання металу.

1946 року А.І. Каширіним було запропоновано обробляти поверхні обертання за методом Rotomille [83] наборами дискових фрез, що сидять на оправках, діаметрально розташованих по обидва боки оброблюваної деталі, з осями, паралельними осі оброблюваної заготовки. Сама заготівля

встановлюється в центри, що обертаються, і приводиться в рух приводною вилкою. 1948 року Г.І. Грановський розробив схему обробки циліндричної деталі за допомогою фрези та описав її кінематику. У кінематичній схемі заготівля є провідною ланкою, а різальний інструмент обертається щодо заготівлі. Схема передбачає рух обох осей обертання деталі та руху фрези за годинниковою стрілкою та паралельно один одному (рисунок 2.1)

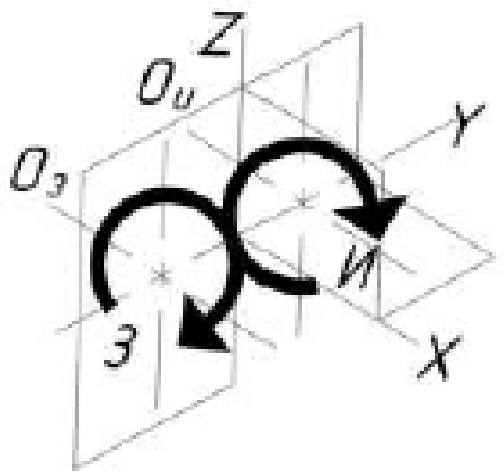

Рисунок 2.1 – Кінематика траєкторії відносного руху з перпендикулярними осями обертання

У той час як фреза встановлена у високошвидкісному приводному блоці, заготовка затискається в патроні, що обертається, який обертається з меншою швидкістю, ніж шпиндель з інструментом (рисунок 2.2). Для виконання процесу різання необхідно здійснювати рух ріжучого інструменту вздовж осі обертання заготовки, щоб створити рух подовжньої подачіSz. При цьому швидкість різанняvзалежатиме від частоти обертання заготовкиnзаг та інструментуnв. Осьова ширина різанняBос регулюється величиною переміщення фрези в осьовому напрямку.

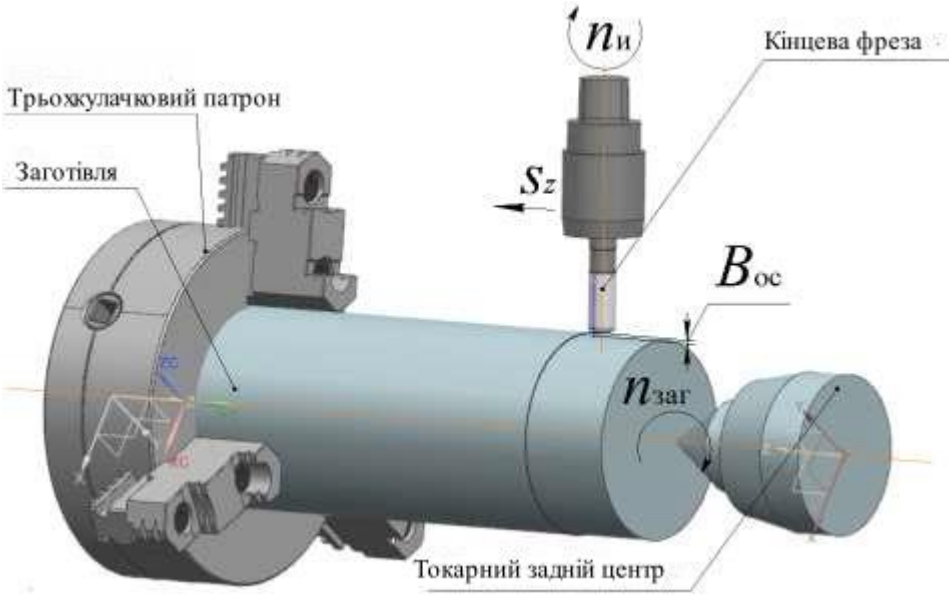

Рисунок 2.2 – Візуалізація операції ортогонального фрезотучення

Процес ортогонального фрезоточення призводить до утворення стружки в результаті дії бічної та торцевої частин різального інструменту [25].

Важливим етапом моделювання сили різання є визначення припуску [38, 46, 92, 114]. Щоб визначити товщину припуску, що залишається при виході фрези з контакту із заготівлею, необхідно визначити початкове і кінцеве положення інструменту [35]. Для досягнення повного видалення матеріалу потрібно проаналізувати геометрію інструменту та скоригувати траєкторію обробки на основі отриманих даних.

На малюнку 1.3 зображено схему операції тангенціального фрезоточення. При використанні цієї технології стружка утворюється на ріжучій кромці утворює інструментальної поверхні та стику бічного та торцевого зуба різального інструменту, а не на торцевій частині фрези, як це відбувається у разі ортогональної обробки.

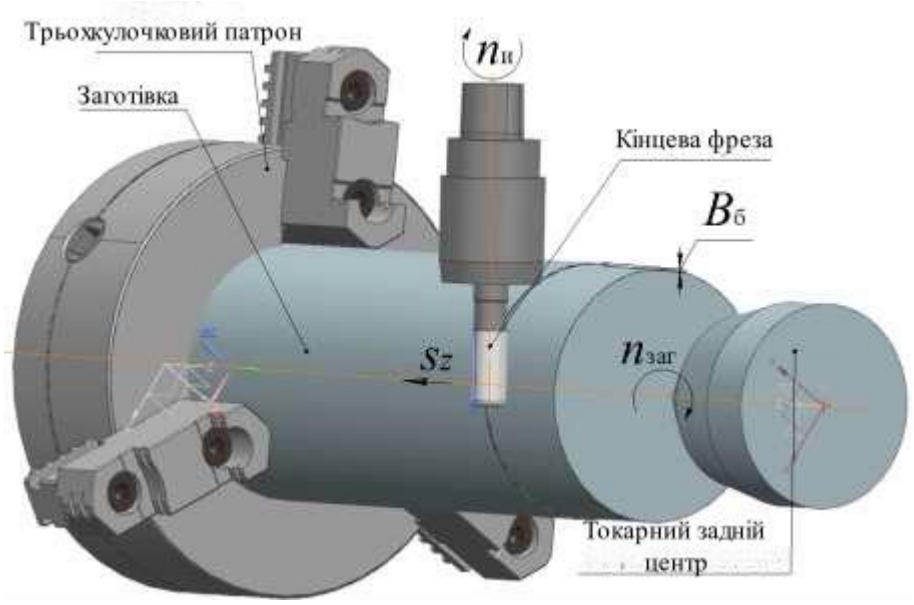

Рисунок 2.3 – Візуалізація операції тангенціального фрезотучення

У разі тангенціального фрезоточення відбувається радіальне формування шорсткості поверхні (рисунок 1.4)

$$y = \frac{1}{2}\left(D - \sqrt{D^2 - S_z^2}\right),$$

деD- Діаметр фрези, мм;

Sz- Подача на зуб, мм / зуб;

l- Базова довжина рельєфної поверхні, мм;y- Висота профілю рельєфної поверхні, мм.

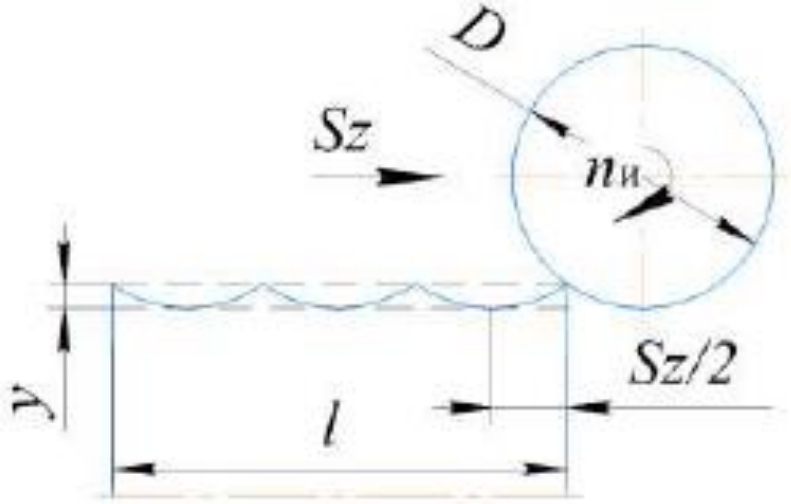

Рисунок 2.4 – Схема радіального формування поверхні кінцевою фрезою

Коаксіальне фрезоточення в основному підходить для внутрішньої та зовнішньої обробки заготовки з довжиною обробки обмеженою вильотом інструменту. На малюнку 2.4 наведено приклад зовнішнього (2.4а) та внутрішнього (2.4б) коаксіального фрезоточення.

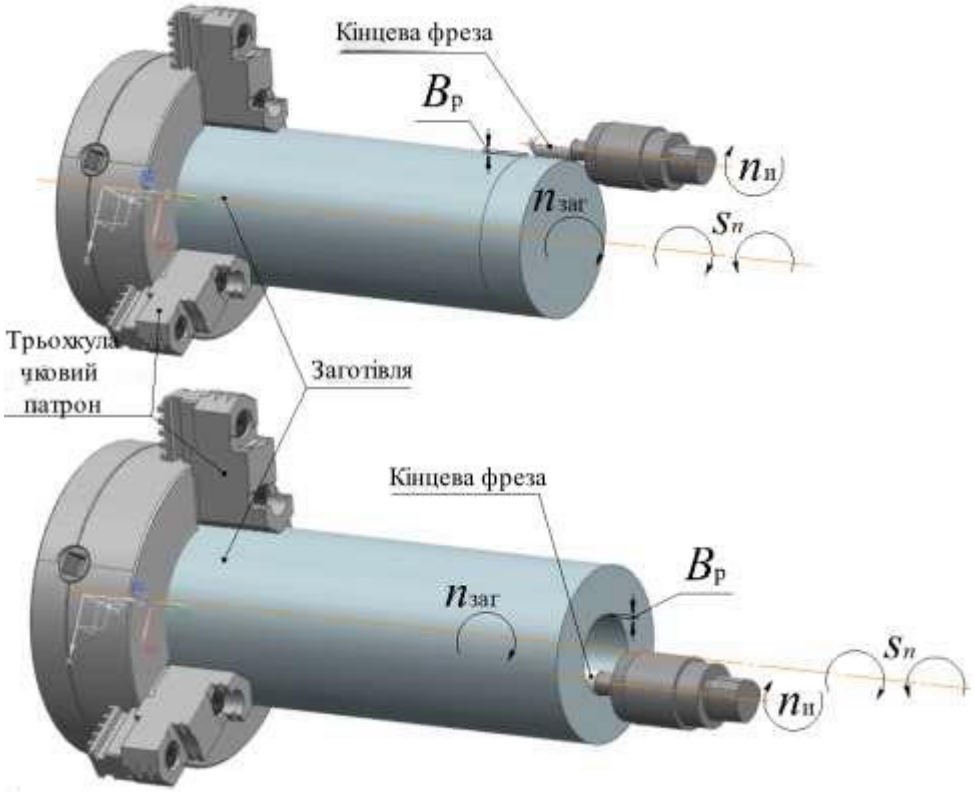

Рисунок 2.4 – Візуалізація операції коаксіального фрезотучення

При коаксіальному фрезеруванні фреза і заготівля обертаються як в одному, так і в різних напрямках, що в першому випадку забезпечує рівномірніше зняття матеріалу і знижує ймовірність появи вібрацій.

Довжина стружки залежить від співвідношення між швидкостями обертання інструменту та оброблюваної деталі. Товщина стружки залежить від швидкості радіальної подачі.

Попередником коаксіального методу обробки послужив спосіб фрезерування набором дискових фрез (спосіб Rotomille) [78], схема якого представлена на малюнку 2.5.

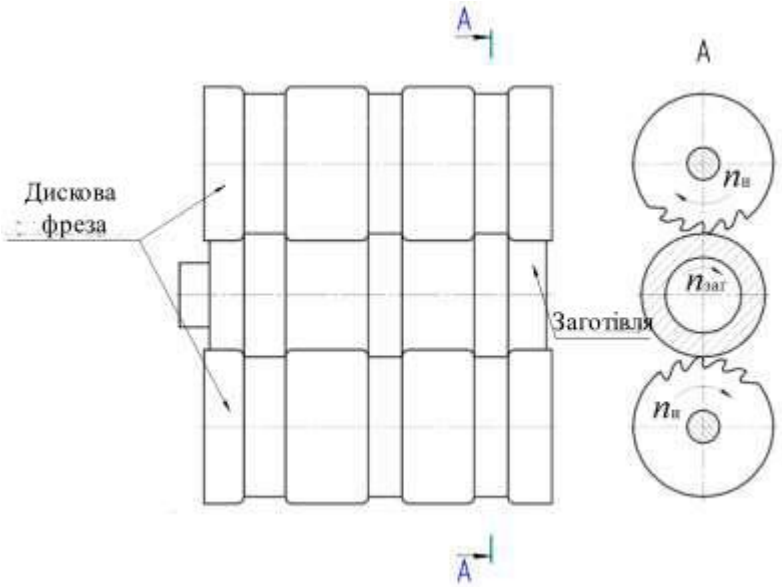

Рисунок 2.5 – Візуалізація операції Rotomille

Перевагою цього процесу є можливість отримати зовнішній контур повністю за одну операцію, що виконується за одну установку. Істотними недоліками є труднощі виготовлення, експлуатації та переточування інструменту. У відомих літературних джерелах не пояснюється, через які причини метод Rotomille не отримав практичного поширення.

2.1 Аналіз особливостей швидкорізальних сталей

Швидкорізальна сталь є поширеним матеріалом для виготовлення осьових ріжучих інструментів, таких як фрези, свердла, зенкери, мітчики і т.п. Останнім часом спостерігається зростання інтересу з боку виробників інструменту до швидкорізальної сталі, який обумовлений розвитком порошкової металургії [26]. Використання порошкової технології відкриває перспективу розробки універсальних порошкових інструментальних сталей з високим вмістом вуглецю та недорогих легуючих елементів, таких як ванадій і хром, для виготовлення ріжучого інструменту, що працює зі значними динамічними та тепловими навантаженнями [28]. Ріжучі інструменти, виготовлені з швидкорізальної сталі, отриманої методом порошкової металургії, мають кращі споживчі властивості. Порошкова швидкорізальна сталь містить карбіди, які рівномірно розподіляються у структурі металу. За рахунок них забезпечуються відмінні властивості міцності матеріалу і висока

зносостійкість. Наприклад, за даними дослідників, стійкість інструменту з порошкової швидкорізальної сталі може зростати до шести разів порівняно зі стійкістю інструментів, виготовлених з швидкорізальної сталі, отриманої класичним методом [74, 75]. Такі результати забезпечуються дрібнодисперсною карбідною структурою порошкових матеріалів. На малюнку 2.6 представлені характерні зображення мікроструктур швидкорізальних сталей, з яких в даний час здійснюється виготовлення різального різального інструменту в промислових масштабах.

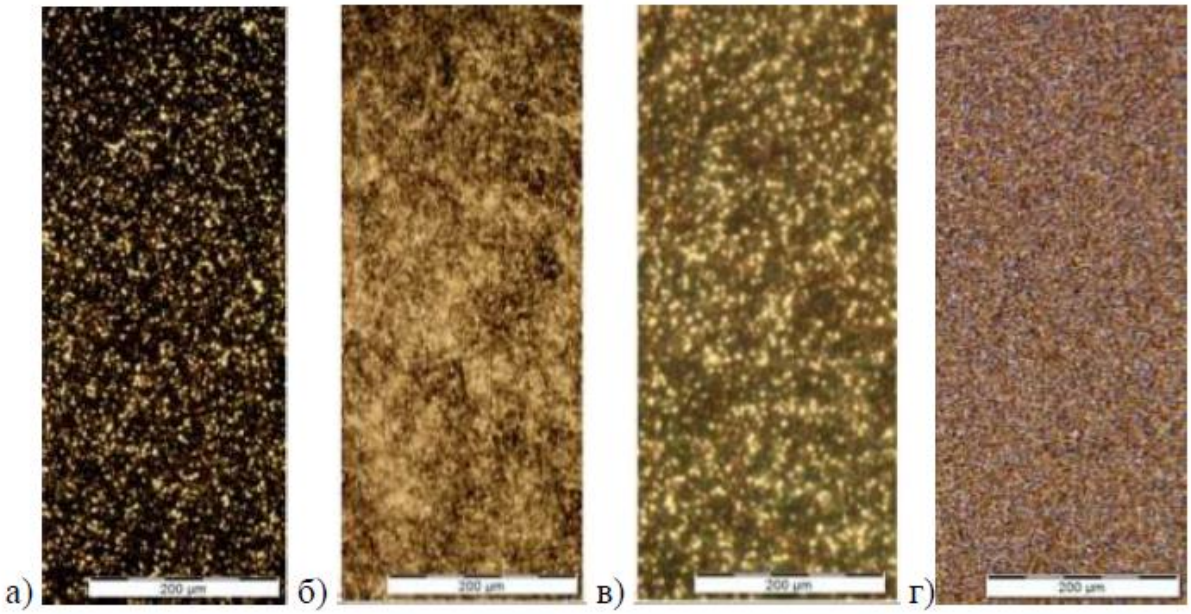

Рисунок 2.6 – Мікроструктури швидкорізальних сталей:
а) – Р6М5К5-МП після термообробки; б) - Р6М5К5-МП на хвостовику інструменту; в) - Р6М5К5-МП після повного циклу термічної обробки; г) – Böhler S390 отриманий методом гарячого ізостатичного пресування після термообробки (загартування та триразової відпустки)

Інструментальний ринок у світі розвивається, і одним із ключових напрямів цього розвитку є вдосконалення структури інструментальних матеріалів та методів їх виготовлення. Серед основних тенденцій у розвитку матеріалів для інструментального виробництва можна виділити таке:

- Вузька спеціалізація матеріалів залежно від їх призначення та умов обробки, угруповання відповідно до класифікації ISO;

- Розробка нових інструментальних сталей та сплавів спеціально для високопродуктивної механообробки;
- Удосконалення технології виробництва порошкових швидкорізальних сталей.

Різноманітність матеріалів та методів виробництва дозволяє суттєво покращити якість та ефективність інструментів для механічної обробки, а також призвести до зростання продуктивності обробних верстатів. Надалі, з розвитком науки і технологій, очікується ще більш просунутих матеріалів та методів їх виготовлення, що дозволить досягати успіхів у сфері механічної обробки.

У виробництві різального інструменту крім його конструкції та розмірів велику роль відіграє вартість його виробництва. Виробники намагаються зменшити витрати на виробництво, щоб зробити свою продукцію більш конкурентоспроможною на ринку. Для зниження витрат за виробництво ріжучого інструменту з швидкорізальних сталей використовують прогресивні технології механічної обробки [93, 104].

При впровадженні нових технологій у виробництві різального інструменту особливо важливим є питання про оброблюваність швидкорізальних сталей. Якщо швидкорізальні сталі, вироблені традиційним способом, вже давно використовуються в інструментальному виробництві, і є багатий досвід з їхньої обробки, то з порошковими швидкорізальними сталями справа зовсім інша. На даний момент практично відсутня інформація про те, як обробляються порошкові швидкорізальні сталі і як їхня структура впливає на оброблюваність матеріалу. Це означає, що вчені та виробники інструментів повинні докласти значних зусиль для вивчення цього питання та розробки інноваційних рішень, що підвищують ефективність процесу механічної обробки порошкових швидкорізальних сталей.

Швидкорізальні сталі здатні працювати в складних умовах різання завдяки теплостійкості, так як їх ріжучі кромки можуть нагріватися до

600..650°C. Крім того, вони мають переваги в технологічних властивостях у порівнянні з твердими сплавами. Дана властивість дозволяє виробляти металорізальні осьові інструменти різної конструкції та широкого асортименту з цих матеріалів, наприклад: свердла, мітчики, розгортки, фрези, протяжки та інші. Ці інструменти мають особливості у вигляді фасонно-зубчастої форми поперечного перерізу робочої частини, фасонних гвинтових поверхонь у поздовжньому напрямку, поверхонь спеціальних форм (які формують ріжучі кромки), а також поверхонь, створених за допомогою спіралі Архімеда, логарифмічної спіралі, евольвент та інших кривих. Наявність таких поверхонь і особливо їх поєднання в одному інструменті визначали в минулому необхідність застосування спеціальних верстатів: потиличних, спеціальних зубошліфувальних, різьбошліфувальних та заточувальних верстатів.

2.2 Конструктивні особливості виробів, що виготовляються із швидкорізальних сталей

Як інструменти, що є об'єктами досліджень дисертаційної роботи, було обрано типові вироби інструментального виробництва, вкрай затребувані підприємствами машинобудування та оборонно-промисловим комплексом.

Типовими виробами із швидкорізальної сталі є: кінцеві фрези, свердла, зенкери, розгортки, протяжки і т.д. (Рисунок 2.7).

Рисунок 2.7 – Типові вироби зі швидкорізальної сталі

Типовими конструктивними елементами виробу є: напрямна частина, ріжуча (робоча) частина, шийка інструменту та хвостовик. Залежно від призначення інструменту конструктивні елементи можуть мати вигляд:

- ✓ ріжуча частина: циліндрична, кутова, комбінована, фасонна (рисунок 2.8);
- ✓ напрямна: переднє, заднє, комбіноване (рисунок 2.9);
- ✓ шийка: циліндрична, кутова (рисунок 2.10);
- ✓ хвостовик: квадрат; циліндричний, конічний, Weldon (Рисунок 2.11).

Докладніше конструкція інструмента розглянута нижче:

На малюнку 2.8 представлені: фреза кінцева – 2.8а та свердло спіральне з циліндричною ріжучою частиною – 2.8б; зенкер із фасонною ріжучою частиною – 2.8в; зенкер – 1.8г та фреза кінцева з конічною ріжучою частиною – 2.8д; свердло-зенкер із комбінованою ріжучою частиною – 2.8е.

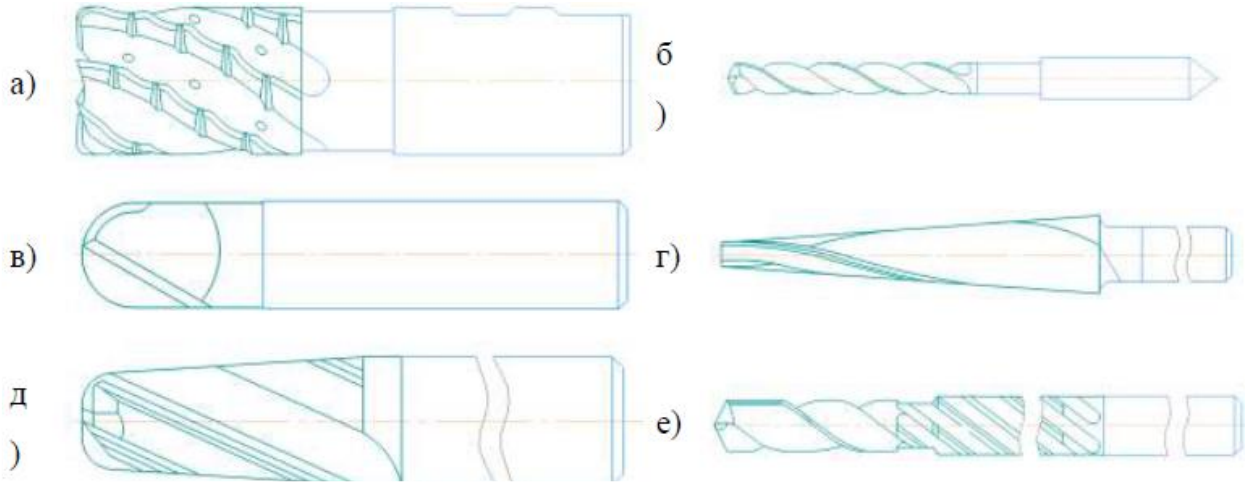

Рисунок 2.8 – Конструкція різальної частини інструменту

На малюнку 2.9 представлені: зенкер – 1.9а та розгортка з переднім напрямом – 1.9б; розгортка – 1.9в та зенкер з переднім та заднім напрямками – 1.9г.

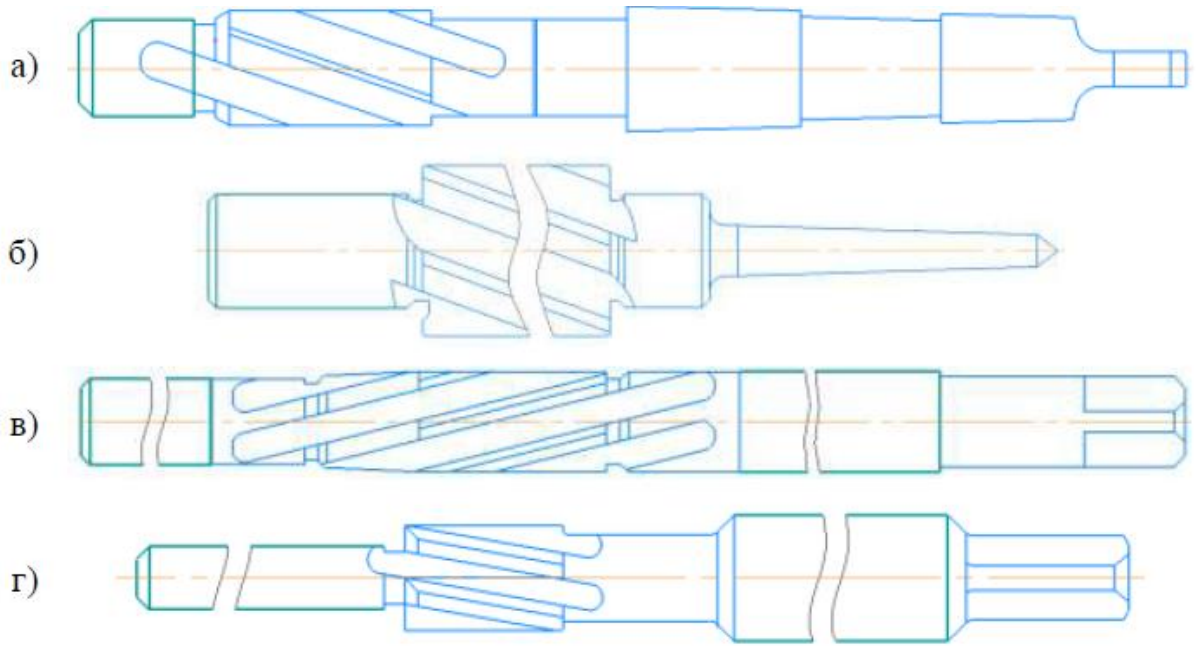

Рисунок 2.9 – Конструкція напрямних інструментів

На малюнку 2.10 представлені конструкції шийки інструменту.

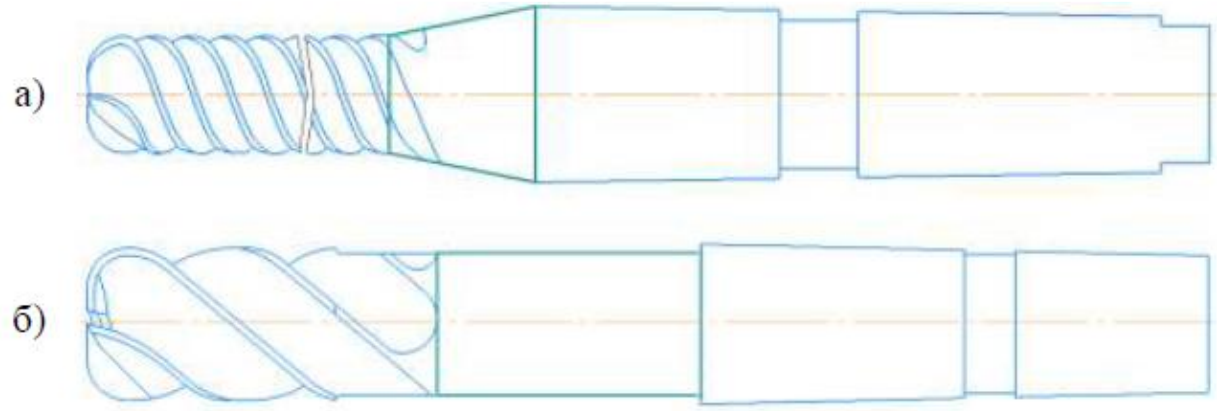

Рисунок 2.10 – Конструкція шийки інструменту: а) – циліндрична; б) – конічна

На малюнку 1.11 представлені: розгортка – 1.11а та зенкер із квадратом на хвостовику – 1.11б; борфреза – 1.11в та фреза з циліндричним хвостовиком – 1.11е; зенкер – 1.11г та розгортка з конічною ріжучою частиною – 1.11д; фреза кінцева з кутовою ріжучою частиною – 1.11д; фреза - 1.11ж; розгортка - 1.11з, фреза з конічним хвостовиком - 1.11і; фреза з хвостовиком типу Weldon - 1.11к.

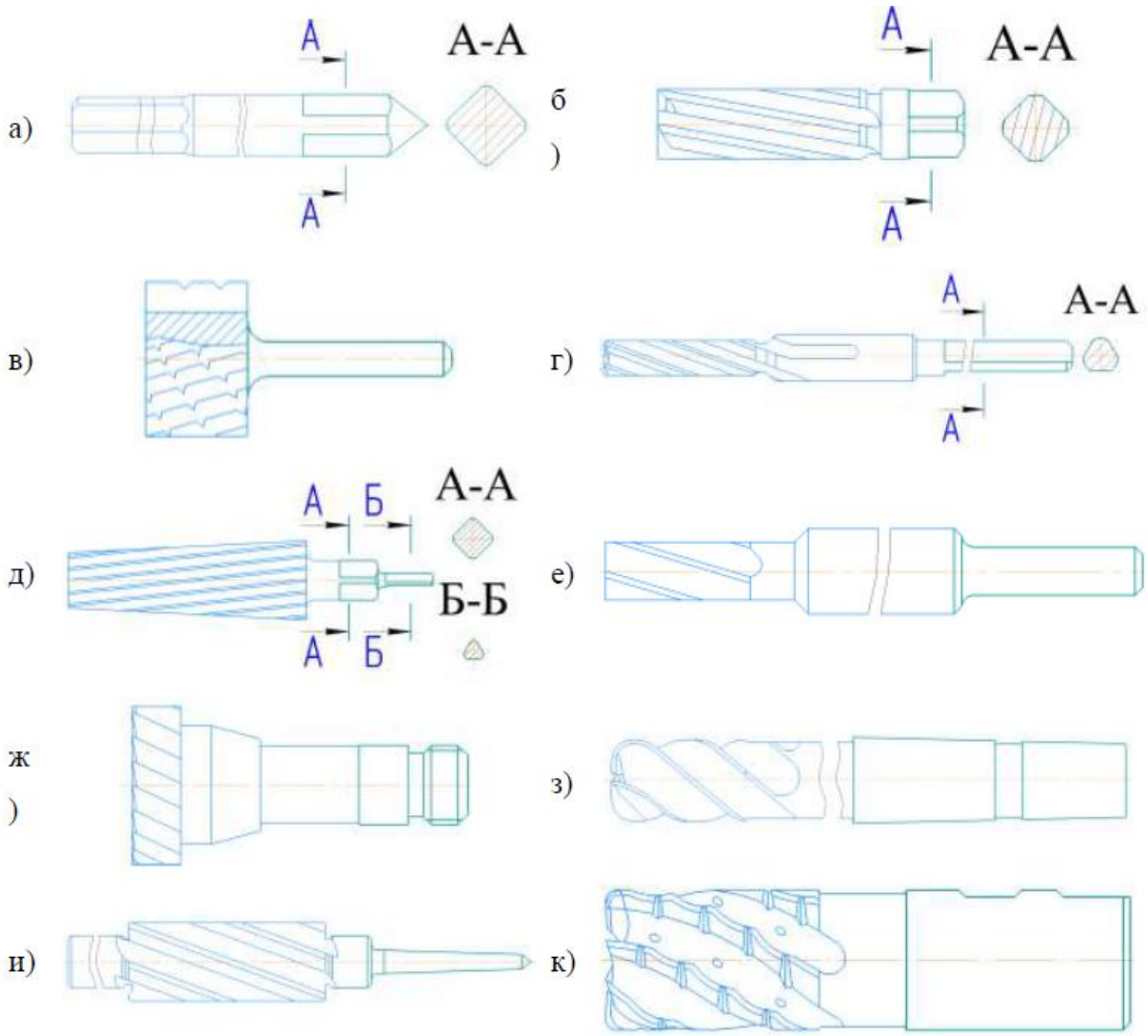

Рисунок 2.11 – Конструкція хвостовика інструменту

2.3 Запропоноване застосування технології фрезоточення для виробництва різальних інструментів

Ринок ріжучого інструменту має стратегічне значення, оскільки значною мірою впливає сучасне машинобудівне виробництво. Відмова від закупівлі різального інструменту за кордоном обумовлена економічною безпекою, технологічним розвитком, підтримкою національної промисловості та зниженням витрат. Одним із основних факторів, що визначають успішність виробництва, є витрати на інструмент – це значна стаття витрат у собівартості машинобудівної продукції. При цьому якість інструменту безпосередньо впливає на продуктивність та є ключовим аспектом конкурентоспроможності сучасних підприємств. У зв'язку з цим, необхідне безперервне вдосконалення

та підвищення якості ріжучого інструменту, а також проведення аналізу ринку для виявлення нових тенденцій та перспективних напрямів розвитку з подальшими інвестиціями у зростання виробництва [72, 118]. Застосування фрезоточення може призвести до сталого зростання продуктивності та підвищення прибутковості підприємств, а також підвищення якості осьового ріжучого інструменту.

Для отримання необхідного ефекту на першій стадії необхідно визначити операції технологічного процесу механообробки осьового ріжучого інструменту з швидкорізальної сталі, в яких застосування фрезоточення буде приносити найбільший ефект.

Для визначення необхідного ефекту розглянемо кінцеву фрезу швидкорізальної сталі з хвилеподібною ріжучою кромкою для чорнової обробки титанових сплавів (рисунок 1.12). Актуальність її виготовлення обумовлена вищою продуктивністю порівняно з фрезами з твердосплавними пластинами, що не переточуються, типу «кукурудза», а також вартістю в 3-5 разів нижче, ніж у зарубіжних аналогів [104].

Рисунок 2.12 – Кінцева фреза зі швидкорізальної сталі

Типовий технологічний процес виготовлення кінцевої фрези, без урахування нанесення захисного покриття, поділено на три основні етапи:

1. Попередня та остаточна обробка перед термічною обробкою;
2. Термообробка;
3. Формування геометрії різальної частини (шліфування та заточування).

Першим етапом при серійному виготовленні в інструментальному виробництві осьових різальних інструментів із швидкорізальної сталі є обробка на п'ятикоординатних багатозадачних верстатах з ЧПУ (рисунки 1.12, 1.13).

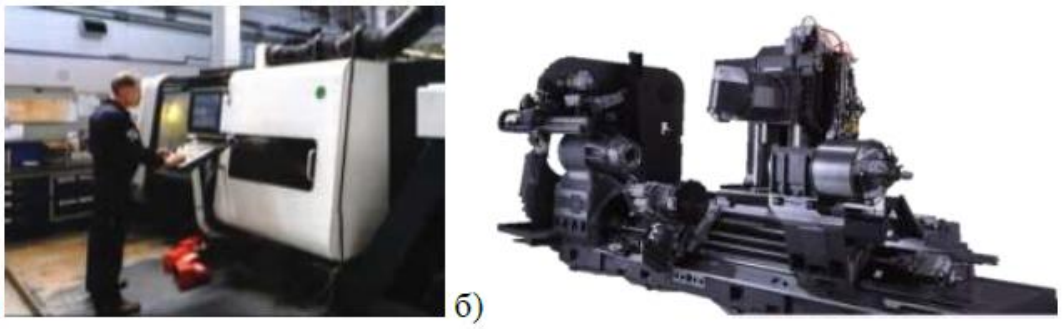

Рисунок 2.12 – Багатозадачний обробний центр із ЧПУ DMG CTX beta 1250: а) – загальний вигляд; б) – пристрій

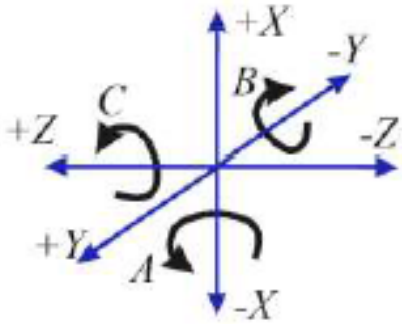

Рисунок 2.13 – Осі багатозадачного обробного центру з ЧПУ

На даному етапі здійснюється обробка таких частин фрези як хвостовик, ріжуча частина та шийка (за її наявності), конструктивні елементи якої наведені на малюнку 2.14. Розглянемо докладніше технологічні переходи, що виконуються класичними токарними інструментами, наприклад прохідними різцями.

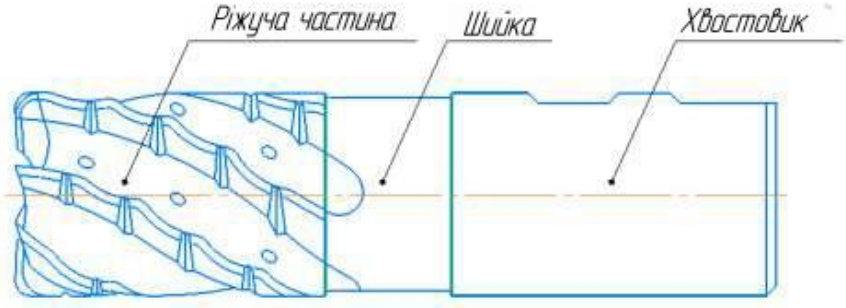

Рисунок 2.4 – Конструктивні елементи типової кінцевої фрези з порошкової швидкорізальної сталі

Слід зауважити, що основна частина матеріалу заготовок різальних інструментів видаляється до термообробки. На цій стадії виконуються такі операції як фрезерування, точення, нарізування різьблення та обробка отворів.

За допомогою поздовжнього точення проводиться попередня та остаточна обробка хвостовика, шийки, а також попередня обробка ріжучої частини та попереднє розвантаження стружкових канавок. Аналізуючи зазначені переходи, слід пам'ятати, що можливі різні співвідношення між діаметрами хвостовика і ріжучої частини. Діаметр різальної частини може бути як дорівнює діаметру хвостовика, так і бути меншим за нього або більше. Від цього співвідношення залежить обсяг матеріалу, що видаляється з частин фрези під час попередньої обробки. Також зазначене співвідношення визначає величину радіусу сполучення між двома поверхнями.

Вибір інструменту для проведення фрезоточення залежить від геометричних параметрів оброблюваних частин інструменту, матеріалу та обладнання, що використовується. Зазвичай використовуються два типи фрез: монолітні твердосплавні фрези та фрези, оснащені багатогранними змінними пластинами. Кожен вид інструменту має свої переваги та недоліки, але різноманітність інструменту для реалізації процесу фрезоточення набагато більше, ніж при класичному точенні.

Внаслідок проведеного аналізу встановлено вплив заданих параметрів якості обробки частин осьових ріжучих інструментів на ефективність методу фрезоточення. Визначено операції, при виконанні яких фрезоточення дає максимальний ефект. Отримані результати можуть бути використані в інструментальній промисловості при розробці технологічних процесів виготовлення різальних осьових інструментів з швидкорізальної сталі.

3 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ОРТОГОНАЛЬНОГО ФРЕЗОТОЧЕННЯ

При описі аналітичних та експериментальних досліджень у рамках першого розділу цієї роботи було порушено питання недостатньої вивченості таких параметрів, як формування відхилення форми типу «огранювання», визначення допустимих температурних зон у зоні різання для виключення фазових змін мікроструктури, а також оброблюваність швидкорізальних сталей, отриманих різними методами. Однією з інструментів вивчення перелічених питань є математичне моделювання.

3.1 Вхідні параметри при фрезотуванні

Для визначення режимів обробки, що забезпечують якість поверхні при ортогональному фрезотуванні, встановимо технологічні фактори, що безпосередньо впливають на якість поверхні. Це:

- подача на зубSz, мм/зуб;
- глибина різанняt, мм;
- осьова ширина фрезеруванняBос, мм;
- швидкість різанняv, м/хв;
- частота обертання заготівліnзаг, про/хв;
- частота обертання інструментуnі, про/хв.

Параметри глибини різанняt та осьовий ширини фрезеруванняBос є параметрами класичного фрезерування, проте стратегія обробки, що застосовується у фрезотуванні, є шлях інструментуlрез є відрізком, описаним спіраллю по довжині кола навколо заготівлі на задану довжину обробки L. На малюнку 3.1 представлена схема формування геометрії при ортогональному фрезотученні, де αае - кут зміщення фрези;

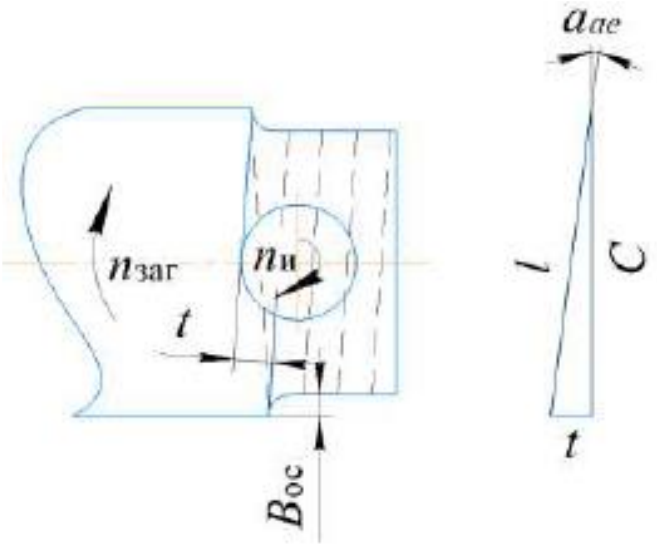

Рисунок 3.1 – Геометрія ортогонального фрезоточення

Розрахунок хвилинної подачіSхв виконується за формулою:

$$S_{мин} = n_и \cdot Z \cdot S_z,$$

деZ- Кількість зубів фрези;

Враховуючи те, що довжина колаCвизначається якC=$\pi \cdot d$, формула розрахунку частоти обертання заготовки матиме вигляд

$$n_{заг} = \frac{S_{мин}}{C}.$$

Кут зміщення фрези вздовж заготовки визначається за

$$\alpha_{ae} = \arcsin^{-1}(\frac{C}{l_{рез}}).$$

Результат обробки поверхні залежить від функціонування всієї складної системи верстатного обладнання. У процесі механічної обробки головними параметрами, що визначають якість одержуваної поверхні деталі, є точність її геометричної форми та фактори, що впливають на її формування.

3.2 Математична модель формування шорсткості при ортогональному фрезотуванні

Шорсткість поверхні, що представляє собою сукупність нерівностей, значно впливає на експлуатаційні властивості виробів. Мікрогеометрія поверхні оцінюється висотними, кроковими та структурними параметрами шорсткості за профілем перерізу поверхні. Одним із найпоширеніших

параметрів шорсткості є середнє арифметичне відхилення профілюRaщо домінує вплив на експлуатаційні властивості, зокрема на контактну жорсткість, корозійну стійкість, коефіцієнт теплопередачі. Параметр шорсткостіRaдає повне уявлення про топографію поверхні. Відповідно до ГОСТ 25142-82, відхиленняRaвизначається як середнє арифметичне абсолютних значень відхилень профілю поверхні на базовій довжині l (рисунок 3.2) [88], і виражається як:

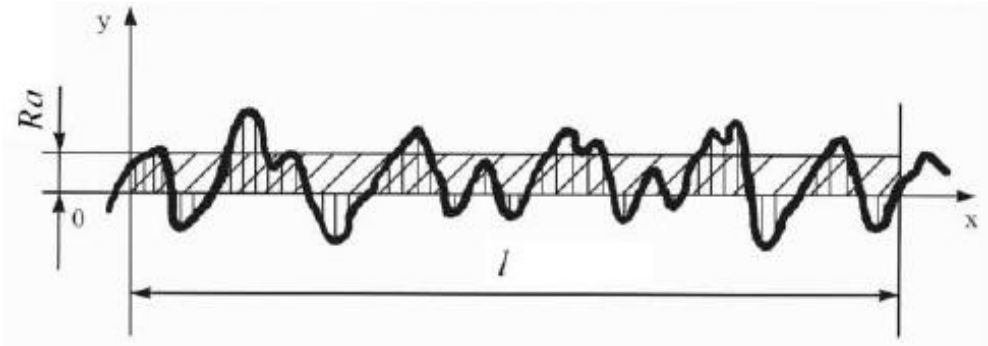

Рисунок 3.2 – Середнє арифметичне відхилення профілюRa

$$Ra = \frac{1}{l}\int_0^l |y| dx.$$

или

$$Ra = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} |y|.$$

де n - Число обраних точок профілю на базовій довжині;

y – відхилення профілю, що виражається у відстані між будь-якою точкою профілю та середньою лінією, мкм.

Шорсткість поверхні, обробленої ортогональним фрезоточенням, представлена малюнку 3.3.

Рисунок 3.3 – Отримання шорсткості поверхні при ортогональному фрезотуванні

Таким чином, досягнення високої продуктивності при фрезотуванні може зіткнутися з проблемами якості поверхні, що вимагатиме додаткових досліджень, спрямованих на оптимізацію процесу. У цьому випадку зазначені проблеми можуть бути вирішені застосуванням відповідних математичних моделей.

Як було зазначено раніше, підвищена шорсткість поверхні виникає за високого значення параметра глибини різання [78].

У математичній моделі геометрія різальної частини фрези представлена у вигляді, що відображається на малюнку 3.4.

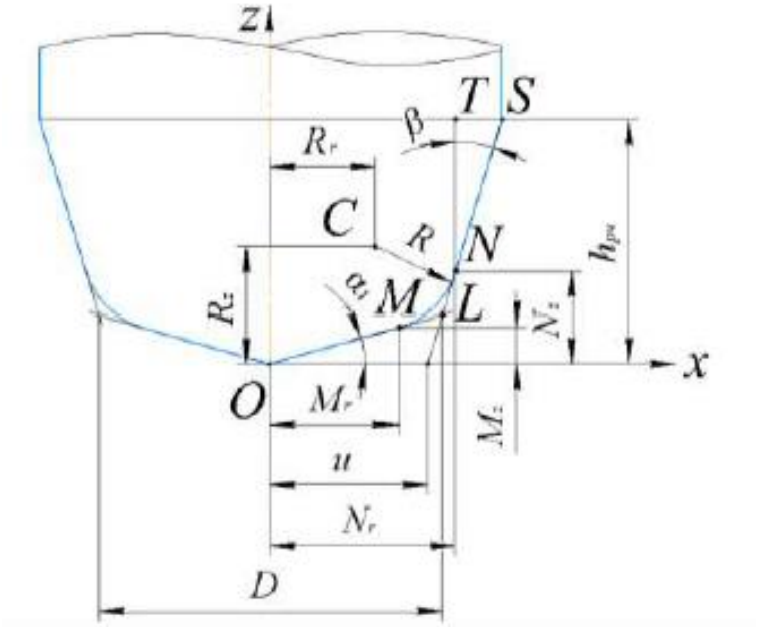

Рисунок 3.4 – Геометричні параметри фрези

У зв'язку з тим, що в процесі фрезерної обробки поверхні ріжучої кромки інструмента відбуваються регенеративні вібрації, а також враховуючи, що інструмент має кут нахилу гвинтової лінії, точка на поверхні ріжучої кромки κ_i^{j+1} відстає від крапки на попередньому кроці κ_{i-dT}^{*j} вздовж осі інструменту, тобто має запізнення (рисунок 2.5)

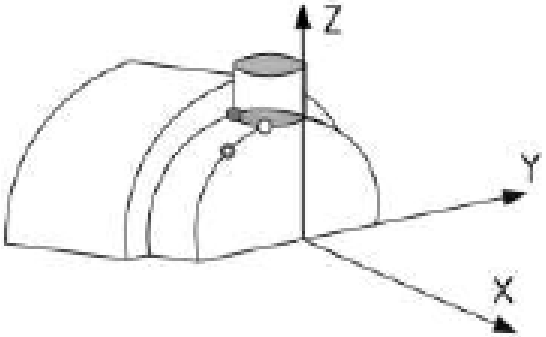

Рисунок 3.5 – Положення зубів у момент часу

На малюнку 3.6 зображено процес запізнення ріжучої кромки, де κ_i^{j+1} - Положення зуба в момент часу і;

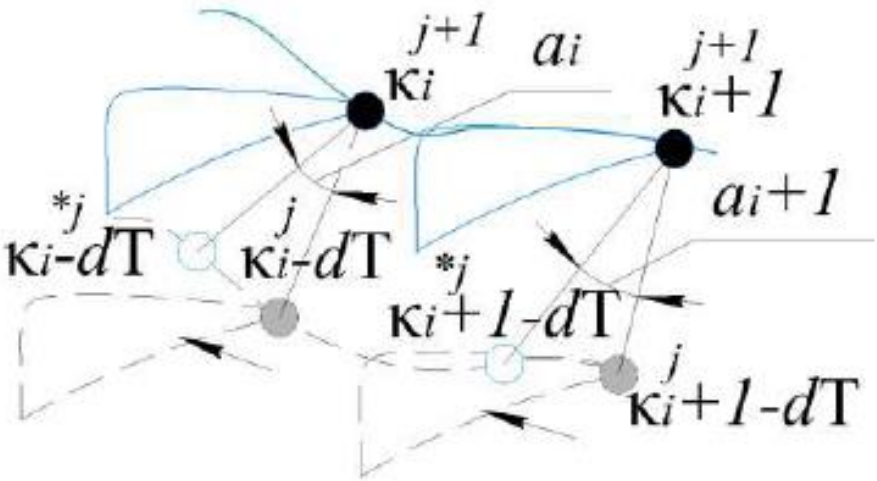

Рисунок 3.6 – Схема запізнення зуба фрези

Загальна величина запізнення при регенерації поверхні розраховується за формулою

$$\tau_{j,i} = \frac{\alpha_i \cdot Z \cdot dT}{2 \cdot \pi} + dT,$$

дedT- Період врізання зуба.

Результати розрахунків за моделлю дозволяють побудувати мікрогеометрію обробленої поверхні. Представлена на малюнку 2.7 поверхня є циліндром після обробки торцем фрези з радіусом сполучення (радіус ріжучої кромки фрези) до торцевої поверхні (знятий бічною частиною фрези). На малюнку 2.8 на вигляді А представлений оброблений шар матеріалу у вигляді трикутників, з докладного виду Б можна зробити висновок про те, що матеріал знятий не повністю, а оброблена поверхня має відхилення форми «огранювання».

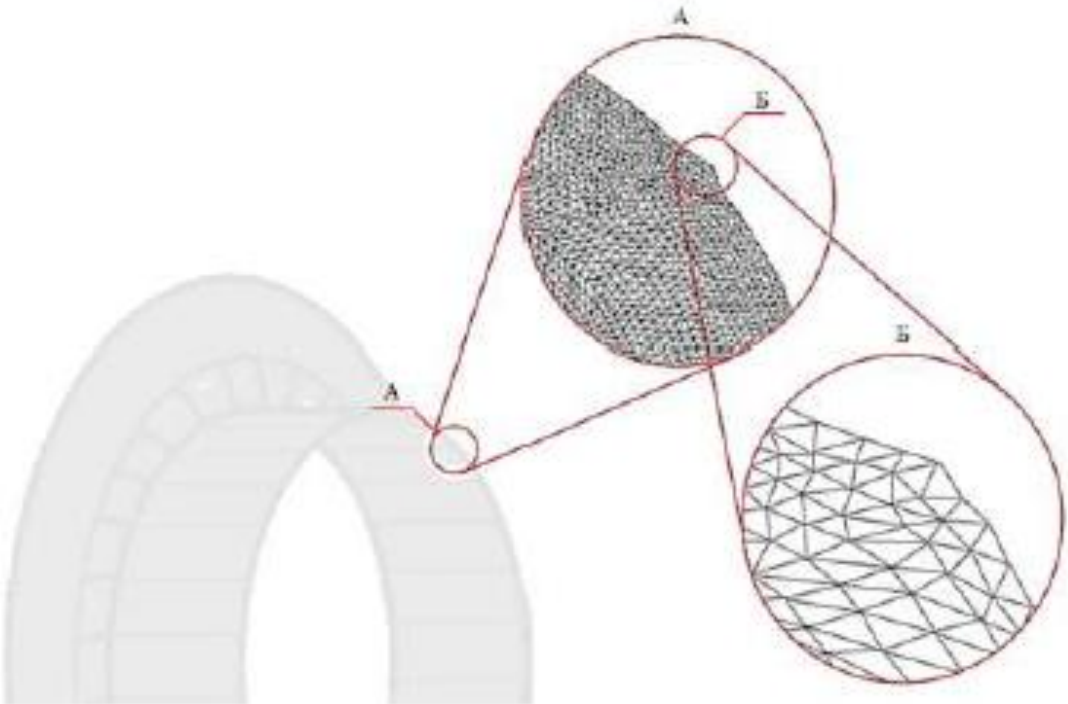

Рисунок 3.7 – Результати моделювання поверхні

Параметри різання було обчислено з використанням методу імітаційного моделювання, а потім експериментально проведено перевірку точності розроблених моделей.

На рис.*D*= 16 мм із чотирма зубами.

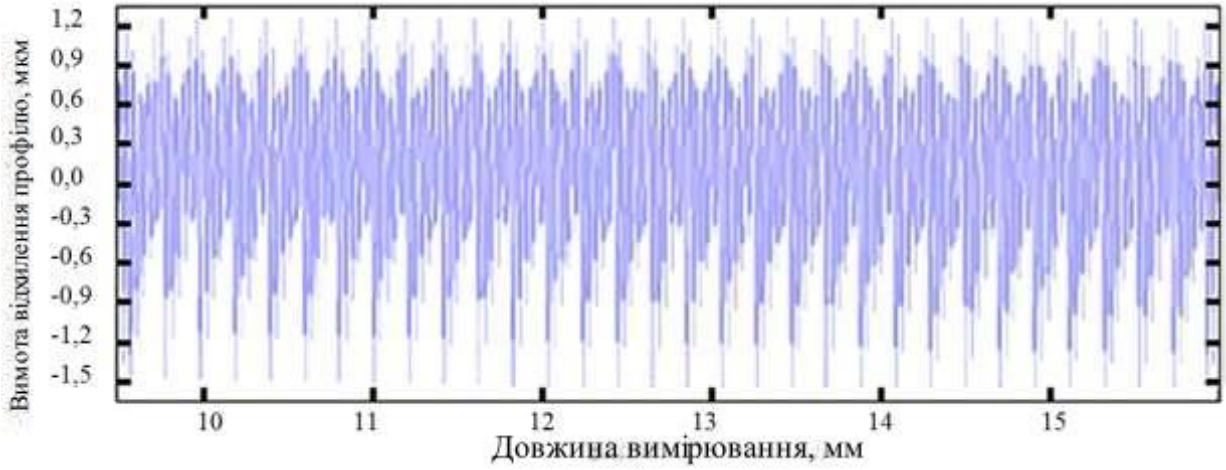

Рисунок 3.8 – Розрахований мікропрофіль обробленої поверхні

Для вибору оптимальних параметрів обробки необхідно розрахувати продуктивність процесу ортогонального фрезоточення і співвіднести ці дані з отриманими при моделюванні значеннями шорсткості поверхні і даними, що варіюються при розрахунку (рисунки 2.9 і 2.10).

Для розрахунку продуктивності процесу ортогонального фрезотучення використовувалася така формула

$$W = n_{и} \cdot S_{пр} \cdot B_{ос} \cdot (d_{заг} - B_{ос}),$$

де*S*пр-подача інструменту на оборот заготівлі;

d з а г – діаметр заготівлі;

*B*ос - осьова ширина різання.

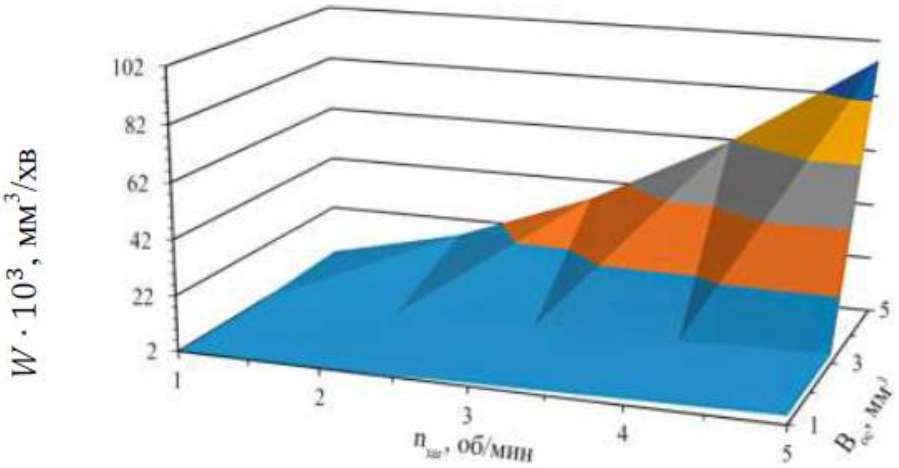

Рисунок 3.9 – Діаграма залежності продуктивності процесу обробки від частоти обертання заготовки та осьової ширини різання

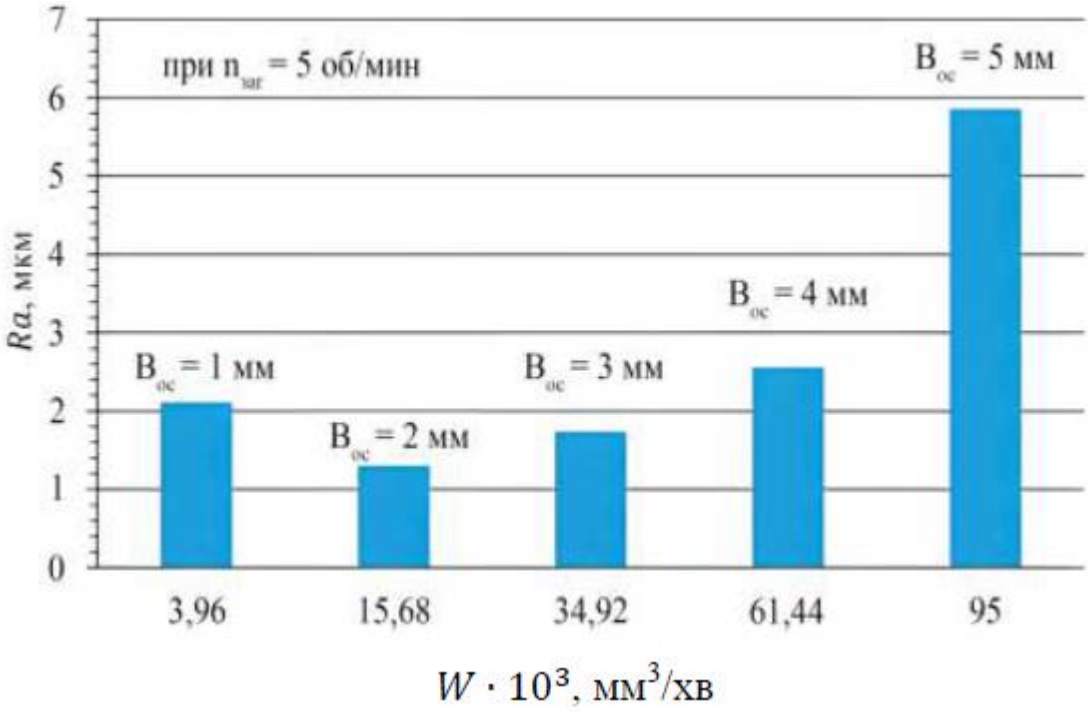

Рисунок 3.10 – Діаграма значень шорсткості та продуктивності процесу обробки приnзаг = 5 хв-1 іBос = 1..5 мм

Враховуючи схему процесу ортогонального фрезоточення, врізання має відбуватися в радіальному напрямку, при цьому швидкість обертання заготовки повинна відповідати подачі на зуб, рекомендованої для інструменту. Ця умова дозволяє враховувати можливості інструменту та обладнання при виборі оптимальної частоти обертання заготовки.

При моделюванні шорсткості поверхні при ортогональному фрезотуванні використовувалося інтерактивне середовище програмування та візуалізації результатів Matlab, що найкраще зарекомендувало себе при моделюванні складних технічних систем.

3.3. Математична модель сил різання

Необхідною умовою для практичної реалізації дослідження є всебічне вивчення впливу структури матеріалу швидкорізальних сталей на сили різання. Складові сил різання в декартовій системі координат:

горизонтальна складова сили різання, Pz;

вертикальна складова сили різання, Px.

Для виключення впливу другорядних факторів застосовувалося точення в умовах вільного прямокутного різання.

Для отримання сил різання Pzта Pxу процесі вільного прямокутного точення будуються графіки залежності цієї сили від величини подачі у відповідних напрямках – тангенційному та осьовому. Схематичне зображення визначення сил різання при точенні представлене малюнку 2.11.

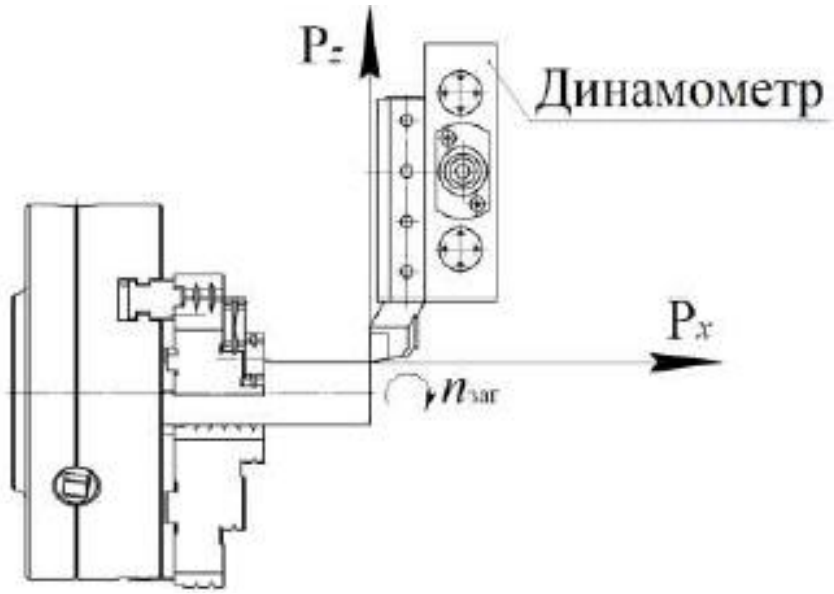

Рисунок 3.11 – Схема визначення сил різання під час гостріння

Існують сучасні методики визначення оброблюваності різанням, що мають універсальний характер. Наприклад, можна виділити метод визначення коефіцієнтів сил різання [43]. Даний метод не просто дозволяє оцінити оброблюваність матеріалу, а й використовувати надалі розраховані коефіцієнти сил різання визначення областей стабільного різання [2, 50, 110]. У свою чергу області стабільного різання дають можливість технологам розрахувати оптимальні режими різання для конкретної технологічної системи і домогтися максимальної продуктивності процесу обробки при заданій якості поверхні і економічно прийнятної стійкості інструменту [27, 32].

При визначенні коефіцієнтів сил різання можливе варіювання геометричних параметрів ріжучого інструменту, наприклад переднього або заднього кута [110, 111]. Це є додатковою перевагою методу, тому що дає

інформацію для оптимізації геометрії ріжучого інструменту та підвищує точність прогнозування областей стабільного різання.

Відповідно до теорії Merchant та досліджень Altintas, представлені проекції сил різання, які розраховуються при заданих значеннях параметрів кута тертя, кута зсуву та дотичної напруги.

$$P_z = a_c \cdot b_c \left(\tau_s \cdot \frac{\cos(\beta_a - \gamma)}{\sin\varphi_c \cos(\varphi_c + \beta_a - \gamma)}\right);$$

$$P_x = a_c \cdot b_c \left(\tau_s \cdot \frac{\sin(\beta_a - \gamma)}{\sin\varphi_c \cos(\varphi_c + \beta_a - \gamma)}\right),$$

де Px- Головна сила різання в осьовому напрямку;

Pz– сила різання у тангенціальному напрямку;

ac- Товщина зрізу;

bc- Ширина зрізу;

τs– дотичні напруги площини зсуву, що рівномірно розподіляються по площині;

Кут зсуву постає як параметр процесу різання, який визначає напрямок деформації. Його значення визначається за допомогою рівняння

$$\varphi_c = \frac{\pi}{4} + \gamma - \beta_a,$$

деφc- Кут зсуву;

γ- Головний передній кут різця;

βa– кут між результуючою силою та перпендикуляром до передньої поверхні.

Так як визначення кута тертя і кута зсуву викликає труднощі, ці параметри були об'єднані в один коефіцієнт, який називається питомим тиском різання К. У результаті рівняння представлені у вигляді.

$$P_x = a_c b_c l_c K_x K_a^{\mu};$$

$$P_z = a_c b_c l_c K_z K_a^{\mu},$$

деKx- Питомий тиск різання в осьовому напрямку;

Kz– питомий тиск різання у тангенціальному напрямку;

$K\mu$ - Коефіцієнт потовщення стружки;

lc- Довжина зрізу.

Метод визначення оброблюваності матеріалу на основі коефіцієнтів сил різання заснований на лінійній моделі сил різання з крайовими коефіцієнтами [33]. Згідно з цією моделлю рівняння сил різання записуються у вигляді:

$$P_z = K_{ZC}K_a b_c + K_{ZE}b_c;$$

$$P_x = K_{XC}K_a b_c + K_{XE}b_c,$$

деKZC,KXC- Коефіцієнти тангенціальної та осьової сил різання;

KZE,KXE- Коефіцієнти тангенціальної та осьової сил контакту;

Kа- Коефіцієнт потовщення стружки.

На підставі вищевикладеного рівняння можна представити у вигляді:

$$P_z = A_Z K_a + B_Z;$$

$$P_x = A_x K_a + B_x,$$

деAZ- Нахил лінії тренду тангенціальної сили різання;

Ax– нахил лінії тренду осьової сили різання;

BZ- Зміщення лінії тренду тангенціальної сили різання;

Bx- Зміщення лінії тренду осьової сили різання.

На основі рівнянь отримуємо наступні залежності:

$$K_{ZC} = \frac{A_z}{b_c};$$

$$K_{ZE} = \frac{B_z}{b_c};$$

$$K_{XC} = \frac{A_x}{b_c};$$

$$K_{XE} = \frac{B_x}{b_c}.$$

Для отримання всіх параметрів, що використовуються в рівняннях, потрібне проведення робіт з одноточкового прямокутного різання.

4 МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ЗДІЙСНЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

Для проведення експерименту обраний токарний обробний центр DMG NEF400, оснащений стійкою ЧПУ Siemens 840D з приводним інструментом і додатковою віссю С (рисунок 3.1), завдяки якій можливо виконувати обробку інструментом, що обертається (фрези, свердла, розточувальні головки і т.д.).

Рисунок 4.1 – Токарний обробний центр DMG NEF400

Висока точність верстата досягається завдяки використанню конструкції, яка забезпечує симетричний розподіл тепла та системі безпосередніх вимірювань.

Для реалізації кінематичної схеми ортогонального фрезоточення визначено інструментальні наладки на базі інструментальних блоків для приводного інструменту:

- 410503035-30 Sauter із системою кріплення Capto 3 (рисунок 3.2а);
- 0.5.941.203-087536 Sauter із вбудованим цанговим патроном (рисунок 3.2б)

а)

б)

Рисунок 4.2 – Привідні блоки: а) – 410503035-30; б) - 0.5.941.203-087536

Привідні блоки закріплюються в револьверній головці верстата (рисунок 3.3)

Рисунок 4.3 – Загальний вигляд інструментального блоку, встановлений у револьверну головку верстата

У зв'язку із застосуванням інструменту з різним типом хвостовиків використовуються такі інструментальні налаштування:

Ріжучий інструмент із хвостовиком Capto закріплюється безпосередньо в приводний блок 410503035-30 (рисунок 3.4а);

Ріжучий інструмент з циліндричним хвостовиком менше Ø12 закріплюється в силовий прецизійний патрон C3-391.HMD-12049 з наступною установкою блок 410503035-30 (рисунок 3.4б);

Ріжучий інструмент із циліндричним хвостовиком більше Ø12 закріплюється з використанням цанги в інструментальному блоці 0.5.941.203-087536 (рисунок 3.4в).

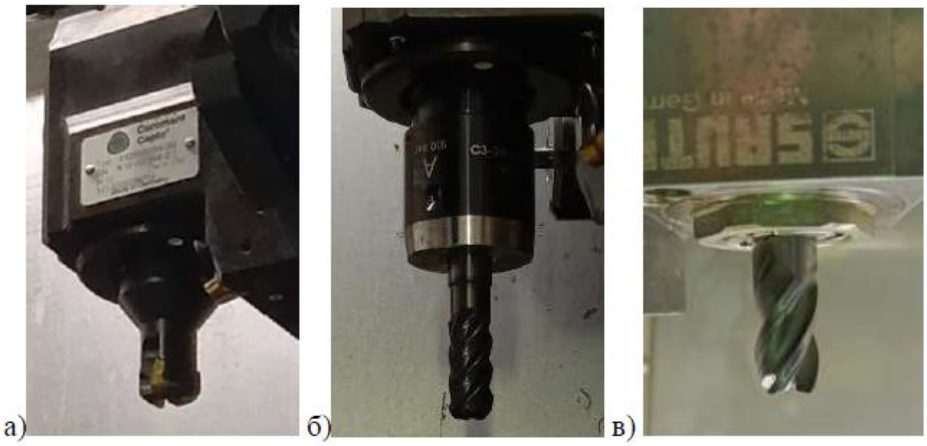

Рисунок 4.4 – Інструментальні налагодження на базі приводних блоків:
а) - закріплення інструменту з хвостовиком Capto 3;
б) – закріплення інструменту з циліндричним хвостовиком до Ø12 мм; в) закріплення інструменту з циліндричним хвостовиком понад Ø12 мм

4.1 Заготівлі щодо дослідження

Як зразки для проведення експериментів обрані заготовки з швидкорізальних сталей: Böhler S390 MICROCLEAN (код MC P3.1.Z.AN), Р6М5К5-МП (ДІ101-МП), отримані методом порошкової металургії; Р6М5К5, отримана стандартним способом.

Заготовки повинні бути попередньо оброблені точенням для усунення биття, а також мати попередньо сформовані канавки, що забезпечують радіальне врізання фрези (рисунок 3.5а). Для дослідження оброблюваності швидкорізальних сталей застосовується заготівля з розмірами: Ø21 х 3 х 40 мм з Р6М5К5-МП та Р6М5К5 (рисунок 3.5б). Технічні параметри заготовок відповідають значенням, наведеним у таблиці 3.3.

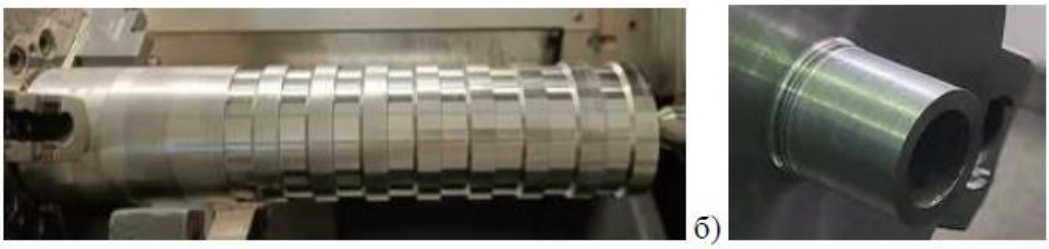

Рисунок 4.5 – Заготівлі для проведення досліджень:
а) - ортогонального фрезоточення; б) - оброблюваності швидкорізальних сталей

4.2 Ріжучий інструмент проведення дослідження

При виборі інструменту було розглянуто фрези виробництва фірм: Sandvik, YG-1. Як ріжучий інструмент розглядався наступний:

фреза для обробки прямокутних уступів Sandvik Coromant CoroMill R390-020C3-11M050, діаметром*D*= 20 мм оснащена трьома багатогранними змінними пластинами R390-11 T3 31E-PM 4240,Z= 3 (рисунок 3.6);

Рисунок 4.6 – Фреза CoroMill R390

монолітна твердосплавна радіусна фреза YG-1 GMG19910 12(R3) x 12 x 48 x 120, діаметром*D*= 12 мм; що має шість ріжучих кромокZ= 6 (рисунок 3.7);

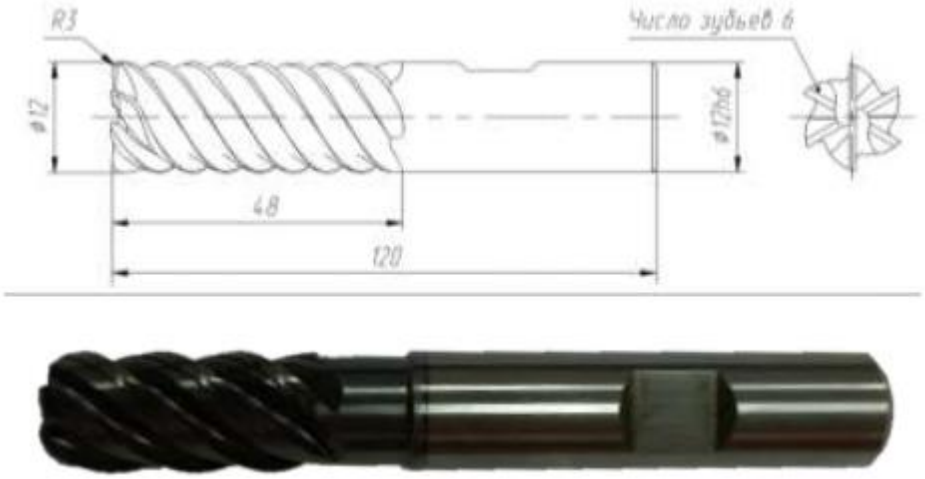

Рисунок 4.7 – Фреза YG-1 GMG19910

монолітна твердосплавна кінцева фреза ФКЦ 4321 16 х 26 х 82 х 16 HF 301 AlTSiN (рисунок 3.8), виготовлена відповідно до ТУ 3918-011-88213850-2010, діаметром*D*= 16 мм, що має чотири ріжучі кромкиZ=4.

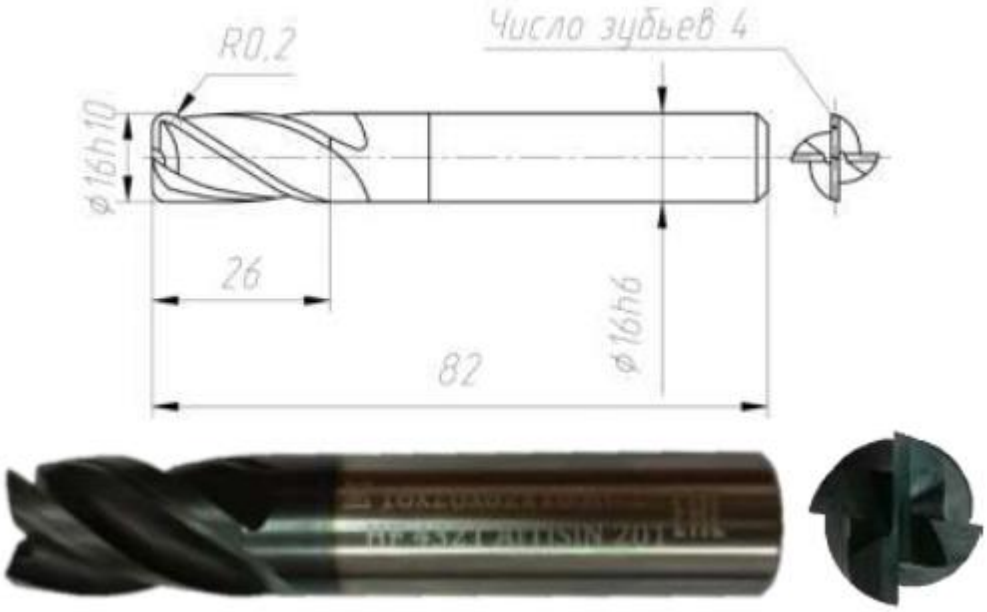

Рисунок 4.8 – Фреза ФКЦ 4321

Для проведення експериментів за умов впливу реальних теплових навантажень у процесі різання, соціальній та дослідженні якості одержуваної поверхні використовувалося два виду інструментів – збірний (рисунок 3.6) і монолітний (рисунок 3.7).

Для підтвердження працездатності динамічної математичної моделі формування шорсткості поверхні, а також для проведення експерименту з виявлення «огранювання» було обрано кінцеву монолітну фрезу з мінімальним радіусом на ріжучій кромці (рисунок 3.8).

Вибір перерахованого вище інструменту обгрунтований класичною конструкцією, що дозволяє використовувати інструмент не тільки для ортогонального фрезоточення зовнішніх діаметрів заготовки, а також для обробки опорних площин хвостовика, що неможливо при використанні спеціальних фрез конструкцій. Крім того, використання стандартного інструменту здешевлює вартість виготовлення виробів за умов реального виробництва.

Для охолодження зони різання застосовувалася мастильно-охолодна рідина Blasocat 2000. Режим «сухого» різання застосовувався при вимірюванні температури в зоні різання, т.к. мастильно-охолодна рідина перешкоджає об'єктивному контролю температури.

Загальний вид зони обробки з вибраним блоком, заготівлею та інструментом наведено на малюнку 3.9.

Рисунок 4.9 – Загальний вид зони обробки

Для створення руху поперечної подачіSzпід час процесу фрезоточення необхідно переміщати інструмент у напрямку, паралельному осі обертання деталі. При цьому швидкість різанняvбуде залежати від частоти обертання деталіnзаг. Осьова ширина різанняBос регулюється величиною переміщення фрези у радіальному напрямку.

5 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РЕЖИМІВ РІЗАННЯ НА ВИХІДНІ ПАРАМЕТРИ

5.1. Дослідження шорсткості поверхні із застосуванням фрези зі змінними багатогранними пластинами

Основна мета експерименту полягала у визначенні впливу технологічних параметрів на шорсткість поверхні при використанні фрези зі змінними багатогранними пластинами інструменту для операції ортогонального фрезоточення.

Обробка виконувалася фрезою R390-020C3-11M050 зі змінними багатогранними пластинами R390-11 T3 31E-PM.

Кодування змінних здійснюється за такими співвідношеннями:

$$x_1 = \frac{2(\ln S_z + \ln S_{z_{max}})}{\ln S_{z_{max}} - \ln S_{z_{min}}} + 1;$$

$$x_2 = \frac{2(\ln v + \ln v_{max})}{\ln v_{max} - \ln v} + 1;$$

$$x_3 = \frac{2(\ln t + \ln t)}{\ln t_{oc_{max}} - \ln t_{oc_{min}}} + 1.$$

Таблиця 5.1 містить інформацію про верхні($Szmax$,$v$max,$t$max, основних($Sz0$,$v0$,$t0$)та нижніх($Szmin$,$v$min,$t$min)рівнях.

Таблиця 5.1 - Значення рівнів факторів експерименту щодо визначення впливу технологічних параметрів на шорсткість поверхні, при використанні фрези зі змінними багатогранними пластинами в ортогональному фрезотуванні

Фактор	Одиниці вимірювання	Кодоване значення	Інтервал варьювання	Рівні факторів		
				Нижній (-1)	Основний (0)	Верхній (+1)
S_z	мм/зуб	x_1	0,04	0,08	0,12	0,16
v	м/хв	x_2	30	150	180	210
t	мм	x_3	1	1	2	3

Таблиця 5.2 – Матриця результатів планування експерименту щодо визначення впливу технологічних параметрів на шорсткість поверхні, при використанні фрези зі змінними багатогранними пластинами в ортогональному фрезотуванні

№ досідження	Вхідні фактори										Результату
	X0	X1	X2	X3	X1 X2	X1 X3	X2 X3	X12	X22	X32	Ra, мкм
1	1	-1	-1	0	1	1	1	1	1	1	3,32
2	1	1	-1	0	-1	0	-1	-1	0	-1	3,28
3	1	-1	1	0	1	0	-1	1	0	-1	3,52
4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	4,95
5	1	-1	0	-1	-1	0	-1	-1	0	-1	1,73
6	1	1	0	-1	1	0	-1	1	0	-1	1,81
7	1	-1	0		1	1	1	1	1	1	4,16
8	1	1	0		-1	0	-1	-1	0	-1	3,29
9	1	0	-1		1	0	-1	1	0	-1	1,79
10	1	0	1		1	1	1	1	1	1	2,07
11	1	0	-1		-1	0	-1	-1	0	-1	4,40
12	1	0	1		1	0	-1	1	0	-1	3,04
13	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4,33
14	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3,37
15	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3,23

Для розрахунку вектора коефіцієнтів та визначення їх значущості використовується програмний комплекс Statistica 10.0, де для розрахунків використовується метод найменших квадратів:

$$B = (X^T X)^{-1} X^T Y,$$

де X – матриця планування експерименту;

Y – результат досліджуваної величини в експериментах при фрезотуванні, що містить значення відгуку залежної величини у логарифмічному масштабі.

Дисперсії коефіцієнтів регресії$S2(bj)$ знаходяться з виразу:

$$S^2(b_j) = c_{ii}S_y^2,$$

Середнє значення та дисперсія досвіду знаходяться за допомогою вектором дослідів у центрі плану.

$$y := \frac{\sum_{i=0}^{2} Y_{u_i}}{3},$$

За результатами дослідів, виконаних згідно з планом (таблиця 4.2), рівняння регресії, отримане на основі проведених експериментів, записується у вигляді:

$$y = b_0 \cdot x_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + b_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + b_{11} \cdot x_1^2 + b_{22} \cdot x_2^2 + b_{33} \cdot x_3^2;$$

$$b_0 = \frac{1}{n_0}\sum_{u=1}^{n_0} y_{0u};$$

$$b_i = A\sum_{j=1}^{N} x_{ij}y_j;$$

$$b_{il} = D\sum_{j=1}^{N} x_{ij}x_{lj}y_j;$$

$$b_3 = B\sum_{u=1}^{N} x_{ij}^2 y_j + C\sum_{i=1}^{k}\sum_{j=1}^{N} x_{ij}^2 y_j - \frac{1}{p \cdot n_0}\sum_{u=1}^{n_0} y_{0u},$$

У відсотковому відношенні відхилення векторів, результатів моделі та вихідних даних серії експериментів при фрезотуванні становить допустиму величину рівну 2,75<3,88%.

Різниця між експериментальними значеннями функції відгуку та її розрахунковими значеннями дорівнює середньому розкиду результатів повторних вимірів у кожному експерименті щодо їх математичних очікувань, як показано на малюнку 5.1.

Рисунок 5.1 – Графік збіжності виміряної та розрахованої шорсткості поверхні

Якість обробленої поверхні оцінювалося параметром шорсткостіRa, З використанням контактного профілометра. Як приклад результатів вимірювань малюнку 4.2 наведено філограма поверхні отримана при вимірі досвіді №5.

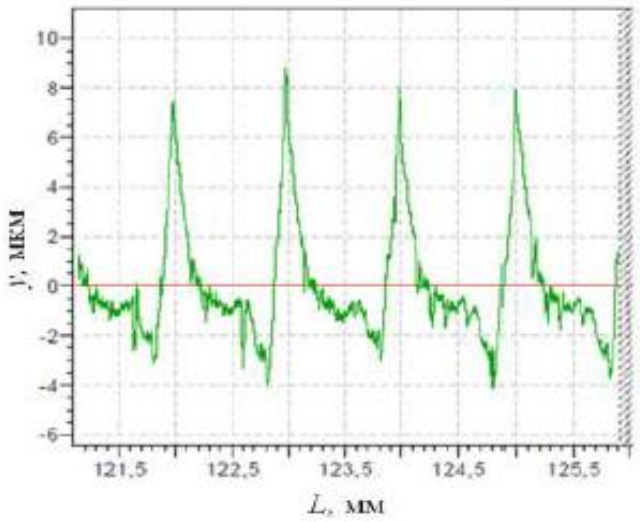

Рисунок 5.2 – Профілограма поверхні

Поверхні відгуку параметра шорсткості обробленої поверхні залежно від режимів обробки представлені малюнку 5.3.

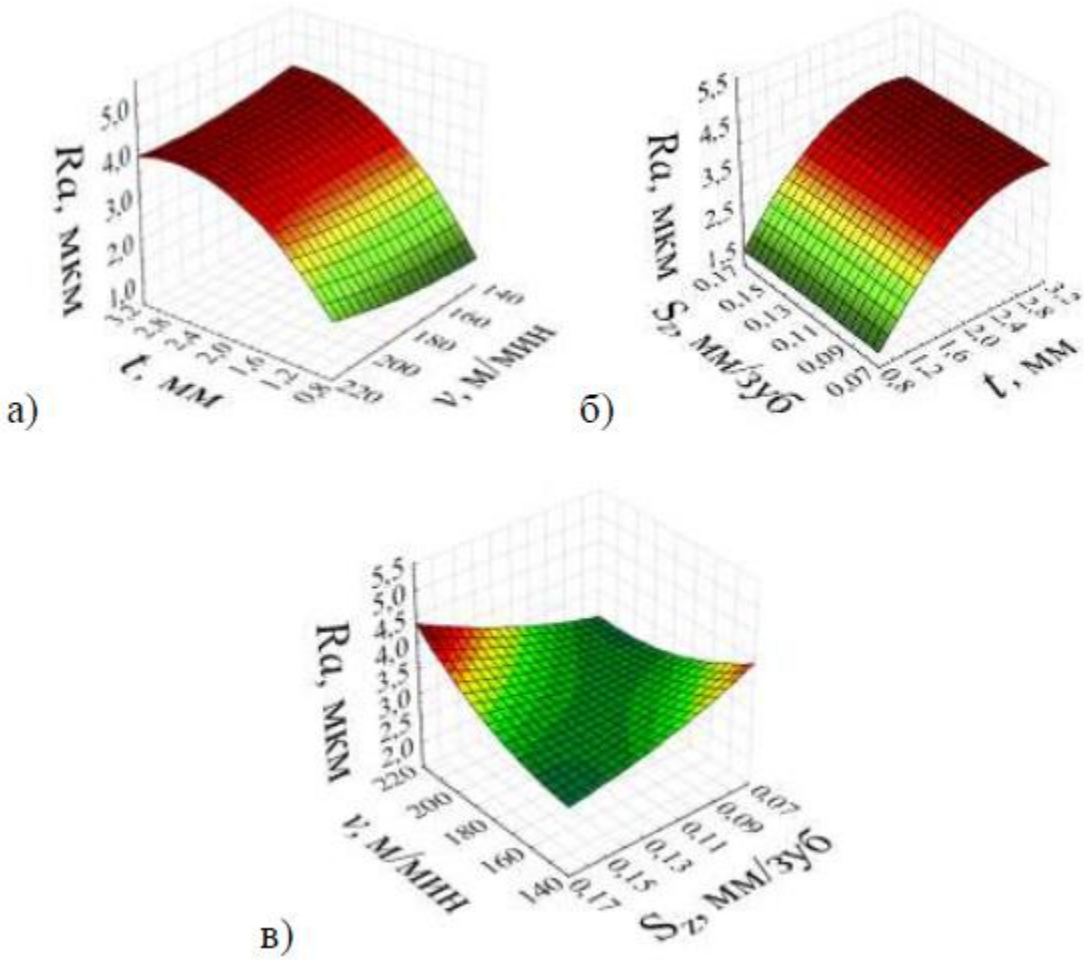

Рисунок 5.3 – Залежність відхилення параметра шорсткостіRa:

а) – від швидкості різанняvта глибини різанняt; б) – від подачі на зубSzта глибини різанняt; в) – від подачі інструментуSzта швидкості різанняv

Аналіз отриманих залежностей показує, що шорсткість поверхні лінійно зростає зі збільшенням подачіSz(Рисунок 4.3а, 4.3в). Це дозволить призначити оптимальну, з погляду продуктивності обробки, подачу інструменту для досягнення заданої шорсткості поверхні. Це відповідає основним положенням класичної теорії різання.

Зміна швидкості різанняvне істотно впливає на шорсткість (рисунок 4.3а, 4.3в). Однак при збільшенні швидкості різанняvдо 200...220 м/хв можна помітити деяке погіршення якості поверхні. Це можна пояснити тим, що при фрезеруванні із зазначеними швидкостями різанняvмає місце ефект наростання матеріалу. При цьому погіршення якості поверхні не є критичним, так як шорсткість відповідає стандартним вимогам чистової обробки.

5.2 Дослідження впливу сили різання на оброблюваність швидкорізальних сталей

Мета проведення експерименту полягає у визначенні впливу структури швидкорізальних сталей Р6М5К5 та Р6М5К5-МП на їх оброблюваність різанням.

У роботі представлені результати аналізу впливу структури швидкорізальних сталей Р6М5К5 і Р6М5К5-МП на їхню оброблюваність різанням від постійної величини радіальної глибини різанняtшвидкості різанняv, та подачіSта змінних величин заднього кута різця α. Для проведення експерименту використовувалася математична модель, адаптована в розділі 2. Для вимірювання сил використовувався динамометр вибраний у розділі 3. Під час експерименту задній кут різця (див. розділ 3.) змінювався в межах 2..10° з кроком 2°. Передній кут був постійним і становив 2°. Режими різання призначалися в розділі 3. Вимірювання робилися за допомогою динамометра Kistler Type 9129AA (див. розділ 3). Під час обробки використовувалася мастильно-охолодна рідина Blasocut 2000 universal.

На рисунках 5.4-5.8 точками наведено результати експериментального визначення сил різання, що відображають залежність сил різання від величини подачі в тангенціальному та осьовому напрямку, отриманої при змінних задніх кутах різця. Їх залежності представлені у вигляді ліній тренду (Р6М5К5 - штрихова лінія Р6М5К5-МП - суцільна лінія), розраховані за методом найменших квадратів, з метою визначення коефіцієнтів сил різання.

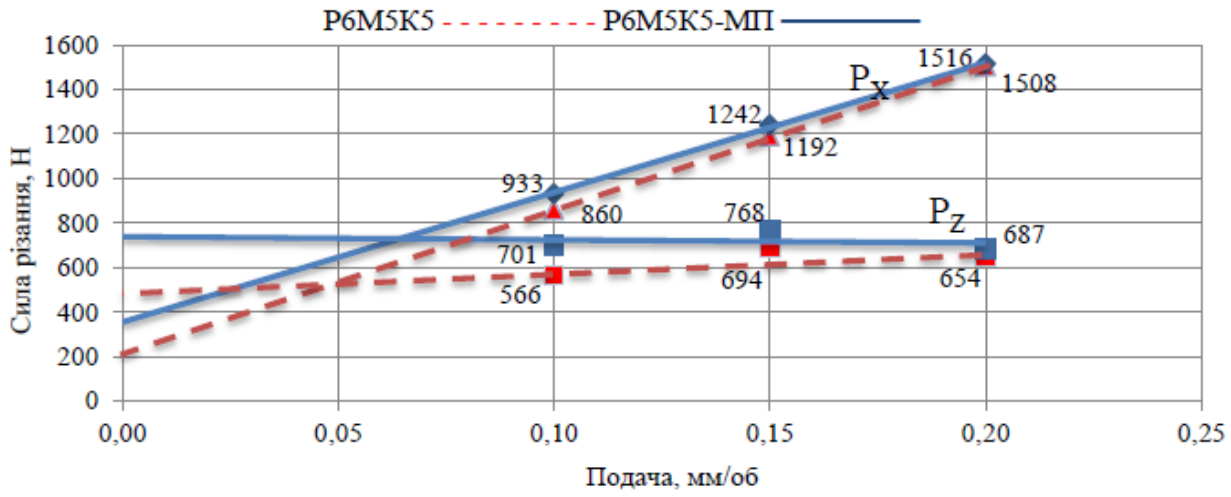

Рисунок 5.4 – Залежність сил різання від подачі при задньому кутіα= 2 °

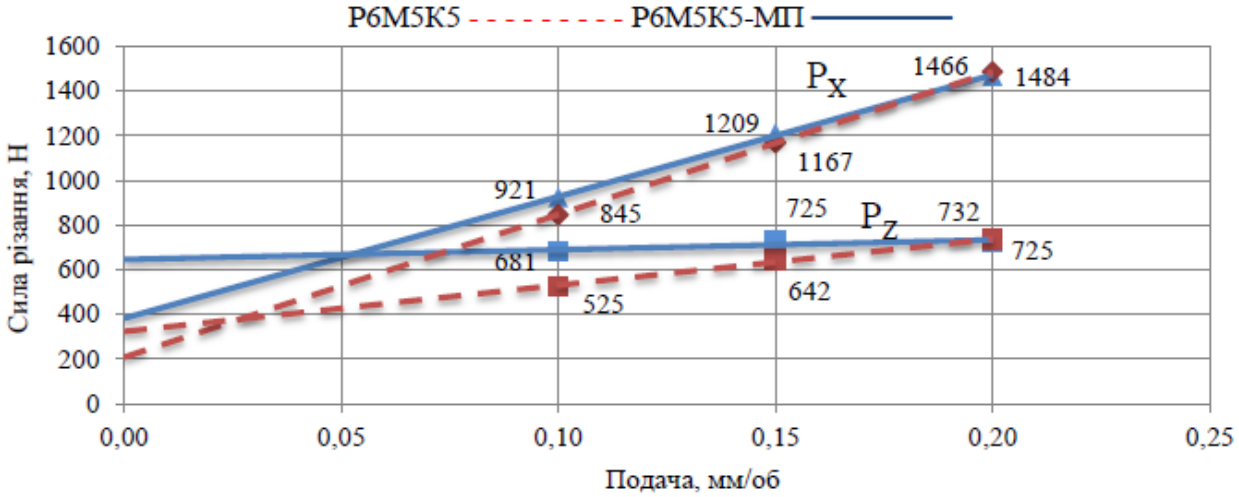

Рисунок 5.5 – Залежність сил різання від подачі при задньому кутіα= 4 °

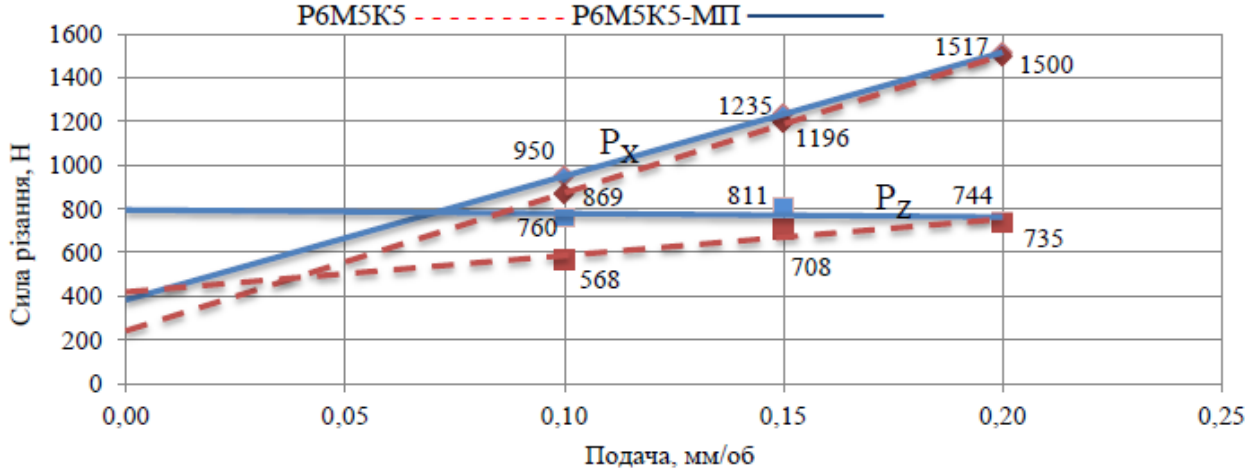

Рисунок 5.6 – Залежність сил різання від подачі при задньому кутіα= 6 °

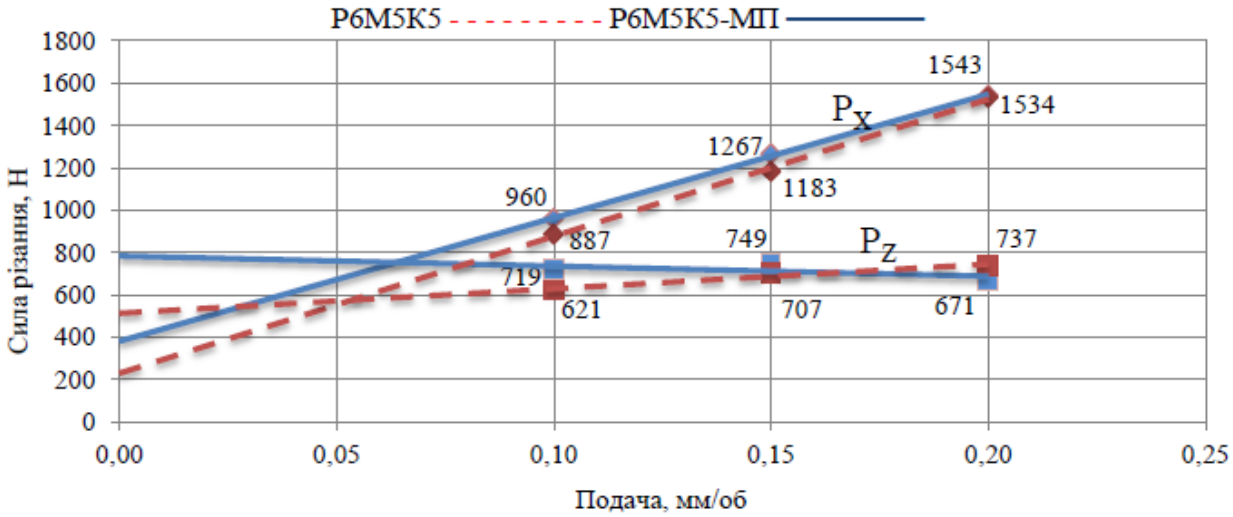

Рисунок 5.7 – Залежність сил різання від подачі при задньому кутіα= 8 °

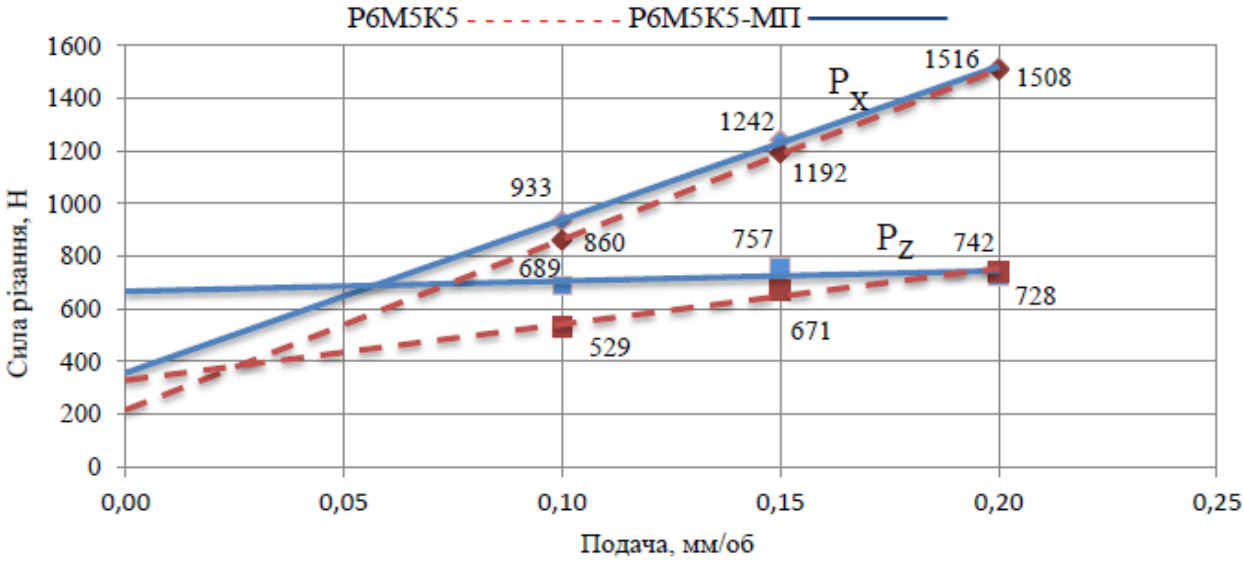

Рисунок 5.8 – Залежність сил різання від подачі при задньому кутіα= 10 °

Результати аналізу графіків та отриманих коефіцієнтів сил різання свідчить про те, що при обробці сталі Р6М5К5, отриманої методом лиття спостерігаються менші сили різання (штрихова лінія) порівняно з обробкою сталі Р6М5К5-МП, отриманої порошковим методом (суцільна лінія). Це стосується як осьового, так і тангенціального напрямку сил різання. При збільшенні подачі зменшується різниця між силами різання, а при подачі 0,2 мм/про різниці між силами практично немає. При подачі 0,1 мм/об зафіксована максимальна різниця. З вищевикладеного можна зробити висновок про те, що отриману литтям сталь можна ефективніше обробляти різанням, тому при її обробці можна використовувати вищі режими різання, ніж при обробці

порошкової швидкорізальної сталі Р6М5К5-МП. У даних сталей схожий хімічний склад, різниця у вмісті деяких легуючих елементів мінімальна становить не більше 5%.

Дослідниками раніше не проводилося широкого вивчення механічних властивостей швидкорізального сплаву Р6М5К5-МП, у зв'язку з цим складно судити про відмінності від Р6М5К5 отриманої методом лиття. Отже, можна дійти невтішного висновку, що різна структура є основним чинником, що впливає оброблюваність Р6М5К5 і Р6М5К5-МП.

Як відомо, при виконанні чорнової обробки інтенсифікація режимів різання обмежена характеристиками конкретної технологічної системи. Однак, при виконанні чистової обробки додатково необхідно враховувати якість обробленої поверхні, що може вимагати проведення додаткових досліджень.

У процесі експерименту було встановлено, що зміна заднього кута різця з кроком 2° в діапазоні від 2 до 10° незначно впливає на осьову силу різання Pz. Вплив на радіальну силу Pzзаднього кута різця під час обробки сплаву Р6М5К5 при значеннях α = 4° і α = 10°, зі збільшенням подачі виявляється у збільшенні радіальної сили, на відміну від α = 2°, α = 6°, α = 8°, коли зі збільшенням подачі радіальна сила знижується. Передній кут був постійним і становив 2°. Один з можливих факторів, що пояснюють це явище, полягає в неоптимальній геометрії ріжучої частини інструменту, використаного в експерименті. Однак ці дані можуть бути використані для підвищення точності розрахунку зон стабільного різання в процесі розробки технологічних процесів механічної обробки виробів з швидкорізальної сталі в умовах інструментального виробництва. Зазвичай, щоб знизити вібрації при різанні, зменшують задній кут ріжучого інструменту, це призводить до збільшення сили різання, яка в даному випадку стає фактором, що обмежує. Зниження сил різання можна розглядати як потенціал для компенсації зростаючого через збільшення швидкості зношування інструменту. Якщо збільшення сили різання не залежить від величини заднього кута, це дає

додаткові можливості для забезпечення стабільності процесу різання і, отже, підвищення якості обробленої поверхні, стійкості інструменту та ресурсу обробного обладнання.

5.3 Ефективність використання фрезоточення порівняно з класичним точенням

Переважна більшість зовнішніх поверхонь тіл обертання обробляються однолезовим різальним інструментом – призматичними вершинними різцями. Внаслідок того, що обробка заготівлі ведеться вершиною різця, цей метод має ряд обмежень за швидкістю різання, продуктивності та формоутворення поверхні. Однак основним недоліком токарної обробки є дроблення стружки, що викликає додаткові труднощі з обслуговування верстатів, зокрема при обробці заготовок з матеріалів, що утворюють довгу стружку. При точенні така стружка, намотуючи на різець і заготовку, погіршує якість обробки та псує деталі верстата.

З метою кратного підвищення продуктивності при виготовленні осьового ріжучого інструменту, однолезову обробку можна замінити на фрезоточення. Використання зазначеного методу дозволяє скоротити основний час, що витрачається на обробку деталі (скорочення кількості проходів у порівнянні з токарною обробкою у зв'язку зі збільшеною товщиною припуску, що знімається за 1 прохід), за рахунок високих швидкостей різання.

Використання ортогонального фрезоточення дозволяє скоротити кількість операційних переходів (поздовжнього точення, підрізання торця, точення канавок) та, у поєднанні із збільшенням режимів різання (порівняно з базовим варіантом).

5.4 Технологічні рекомендації щодо застосування операції ортогонального фрезоточення в інструментальному виробництві

Технологічні рекомендації розроблені для проектування технологічних процесів виготовлення осьового ріжучого інструменту методом ортогонального фрезоточення з метою забезпечення заданої точності форми та забезпечення заданої якості поверхні в інструментальному виробництві.

Технологічні рекомендації містять необхідні вихідні дані щодо вибору геометричних параметрів ріжучого інструменту, формули та розраховані за ними значення режимів різання, а також інші технологічні параметри механічної обробки для виконання операції ортогонального фрезоточення заготовки з швидкорізальної сталі за допомогою кінцевої твердосплавної фрези.

Область поширення: інструментальні ділянки та інструментальне виробництво, що має в своєму розпорядженні потужності для виготовлення осьового ріжучого інструменту зі швидкорізальної сталі.

Технологічні рекомендації призначені для використання інженерами-технологами інструментального виробництва під час розробки директивних, типових та робочих технологічних процесів обробки.

Процес ортогонального фрезоточення рекомендується проводити на багатозадачних верстатах з ЧПУ з координатами X, Z, B, наявність координати Y рекомендується (рисунок 4.9), DMG CTX beta 800 та DMG CTX beta 1250 підходять для цих цілей. Варто зазначити, що на верстатах, що не володіють достатнім запасом ходу по осі Y, обробка не може проводитися.

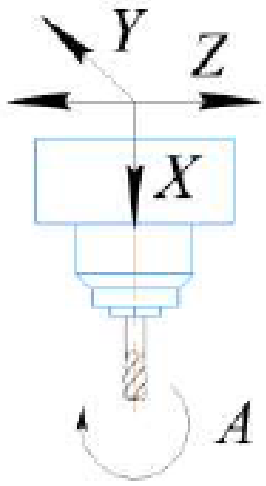

Рисунок 5.9 – Координати фрезерної головки багатозадачного верстата з ЧПУ

Фрезоточення можна виконувати і на токарному обробному центрі з приводним інструментом з кутовим розташуванням інструменту, що закріплюється, при цьому кут установки інструменту дорівнює 90°.

Багатозадачний верстат з ЧПУ забезпечує надійне закріплення приводного блоку інструменту та високу частоту обертання інструменту.

Як оброблюваний матеріал використовуються сталі Böhler S390, Р6М5К5 і Р6М5К5-МП. Властивості сплаву в напівфабрикатах та деталях повинні відповідати вимогам EN ISO 4957, ГОСТ 19265-73, ГОСТ 28393-89.

Для чорнової, напівчистової та чистової обробки швидкорізальної сталі ортогональним фрезоточенням рекомендується застосовувати два основних типи конструкцій різального інструменту: монолітні та фрези зі змінними багатогранними пластинами. Рекомендується в першу чергу застосування монолітних кінцевих фрез з твердого сплаву марки H10F і групи оброблюваності М30 за ГОСТ 3882-74, які мають перевагу в досягненні низької шорсткості поверхні. Рекомендуються також фрези з багатогранними змінними пластинами, які забезпечують зниження допоміжного часу.

РОЗДІЛ 6
РОЗРОБКА ДИДАКТИЧНОГО ПРОЄКТУ ФАКУЛЬТАТИВНОГО ЗАНЯТТЯ НА ТЕМУ «ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ОБРОБКИ ОСЬОВИХ РІЖУЧИХ ІНСТРУМЕНТІВ ІЗ ШВИДКОРІЗАЛЬНОЇ СТАЛІ ЗА РАХУНОК ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ФРЕЗОТОЧЕННЯ» ДЛЯ ФАХІВЦІВ МАШИНОБУДІВНОЇ ГАЛУЗІ

6.1. Постановка цілей факультативного заняття з теми «Підвищення продуктивності виготовлення деталі «Підвищення ефективності обробки осьових ріжучих інструментів із швидкорізальної сталі за рахунок застосування методу фрезоточення»

В таблиці 6.1 наведено оперативні цілі з теми.

Таблиця 6.1

Постановка цілей факультативного заняття

Цілі факультативного заняття	Цілі формування різних рівнів засвоєння навчального матеріалу	Умови досягнення	Результат у вигляді дій здобувачів освіти
1	2	3	4
Ознайомити студентів з сучасними методами фрезоточення осьових ріжучих інструментів	Формування знань про властивості швидкорізальної сталі та особливості її обробки	Використання лекційних матеріалів, технічної документації, демонстрацій обладнання	Студенти пояснюють принципи обробки та властивості матеріалів
Розвинути навички моделювання технологічного процесу фрезоточення	Засвоєння навичок планування технологічних операцій та оптимізації режимів обробки	Практичні вправи на комп’ютерних симуляторах та стендах	Студенти здатні розробити послідовність технологічних операцій та визначити оптимальні режими

Продовження табл. 6.1

1	2	3	4
Сприяти формуванню компетентностей у використанні сучасних обробних центрів	Формування вмінь практичного керування обладнанням та контролю параметрів процесу	Робота на навчальних та промислових обробних центрах	Студенти проводять обробку інструментів за оптимізованим планом, контролюючи точність і швидкість
Підвищити здатність до аналізу та оцінки ефективності технологічного процесу	Засвоєння умінь порівнювати продуктивність різних методів обробки	Використання кейсів, порівняльних таблиць і графіків	Студенти оцінюють ефективність процесу та пропонують вдосконалення
Формувати навички самостійного пошуку рішень та інноваційного підходу	Розвиток аналітичного мислення та умінь оптимізувати процеси	Робота в групах, застосування методів імітаційного моделювання	Студенти самостійно пропонують шляхи підвищення продуктивності та зниження витрат

6.2. Перелік літературних джерел з теми

1. Бондаренко, І. П. Сучасні технології обробки металів різанням. – К.: Видавництво «Техніка», 2021. – 320 с.

2. Ковальчук, О. М. Цифрові технології та імітаційне моделювання у машинобудуванні. – Львів: ЛНУ, 2020. – 256 с.

3. Петренко, В. І. Методи підвищення продуктивності обробки ріжучих інструментів із швидкорізальної сталі. – Харків: Машинобудування, 2019. – 184 с.

4. Сидоренко, Л. О. Підготовка інженерів-технологів у контексті Індустрії 4.0: теорія і практика. – Одеса: Видавництво ОНУ, 2022. – 200 с.

6.3. Конструювання дидактичних матеріалів з теми «Підвищення ефективності обробки осьових ріжучих інструментів із швидкорізальної сталі за рахунок застосування методу фрезоточення»

Процес конструювання дидактичних матеріалів передбачає створення навчальних засобів, які забезпечують системне засвоєння знань та формування практичних навичок у студентів та фахівців машинобудівної галузі. Основна мета дидактичних матеріалів за даною темою полягає у сприянні розвитку компетентностей, що дозволяють ефективно застосовувати метод фрезоточення для обробки осьових ріжучих інструментів із швидкорізальної сталі та підвищувати продуктивність виробництва.

До складу дидактичних матеріалів слід включити такі елементи:

1. Теоретичні матеріали – конспекти, лекційні схеми, презентації, які висвітлюють фізико-технологічні властивості швидкорізальної сталі, особливості конструкції осьових ріжучих інструментів, основи методу фрезоточення та критерії ефективності обробки.
2. Методичні рекомендації – покрокові інструкції щодо проведення практичних занять, формулювання навчальних завдань, приклади розрахунків параметрів різання та визначення оптимальних режимів обробки.
3. Ілюстративні матеріали та графічні моделі – схеми технологічних процесів, зображення інструментів, діаграми та таблиці, що дозволяють візуалізувати взаємозв’язок режимів різання, матеріалу інструмента та продуктивності обробки.
4. Практичні завдання та вправи – моделювання процесу фрезоточення, розрахунок режимів різання, вибір інструментальних матеріалів, оцінка якості обробленої поверхні. Завдання мають різний рівень складності для формування базових та прикладних компетентностей.

5. Контрольні та тестові матеріали – питання для самоперевірки, тести з вибором правильної відповіді, задачі для обчислення оптимальних параметрів різання, ситуаційні завдання для прийняття технологічних рішень.

6. Інтерактивні та цифрові засоби – симуляційні програми, відео демонстрації роботи фрезерних верстатів, онлайн-симулятори для моделювання обробки інструментів, що дозволяють студентам отримати досвід без безпосередньої роботи на виробничому обладнанні.

Конструювання дидактичних матеріалів передбачає врахування різних рівнів навчальної підготовки студентів: від базових знань про властивості матеріалів та принципи фрезерування до складних завдань з оптимізації технологічних процесів. Застосування структурованих матеріалів та інтерактивних методів навчання сприяє формуванню у фахівців практичних навичок, необхідних для підвищення ефективності обробки інструментів із швидкорізальної сталі та зменшення виробничих витрат.

У підсумку, правильно розроблені дидактичні матеріали забезпечують системну підготовку фахівців, сприяють інтеграції теоретичних знань і практичних умінь та формують компетентності, що відповідають сучасним вимогам машинобудівної галузі.

6.4. Аналіз базових умов навчання з теми «Підвищення ефективності обробки осьових ріжучих інструментів із швидкорізальної сталі за рахунок застосування методу фрезоточення»

В таблиці 6.2 приведено вибір базових понять, визначення способів перевірки та формування базових знань.

Таблиця 6.2

Вибір базових понять, визначення способів перевірки та формування базових знань

Перелік базових понять, законів, способів дії	Способи (методи, форми, засоби) перевірки рівня сформованості базових знань і способів дій	Способи актуалізації або поповнення базових знань і способів дій
1	2	3
Матеріалознавство	Метод – усне опитування. Форма – фронтальна. Засіб – контрольні питання. 1. Які основні властивості швидкорізальної сталі впливають на довговічність ріжучого інструменту? 2. Поясніть, як структура сталі впливає на її здатність до обробки високими швидкостями. 3. Які термічні та механічні характеристики необхідно враховувати при виборі матеріалу для осьових ріжучих інструментів?	Розв'язання практичних задач і кейсів – сприяє застосуванню теоретичних знань у реальних виробничих ситуаціях, формує аналітичні та критичні здібності. Використання наочних матеріалів – схем, таблиць, 3D-моделей або відеодемонстрацій, що допомагає візуалізувати процеси та покращує сприйняття складних технологічних явищ.
Технологія машинобудування	1. Назвіть основні режими різання при фрезеруванні та фрезоточенні. 2. Як вибір параметрів різання впливає на продуктивність обробки? 3. Поясніть особливості обробки високотвердісних матеріалів. 4. Які фактори визначають ефективність використання методу фрезоточення?	
Машини та обладнання машинобудівного виробництва	1. Назвіть типи фрезерних верстатів і обробних центрів, придатних для обробки осьових ріжучих інструментів. 2. Які особливості роботи сучасних високоточних верстатів з ЧПУ слід враховувати? 3. Поясніть, як конструкція обробного центру впливає на точність обробки інструменту.	

Продовження табл. 6.2

1	2	3
Проєктування та моделювання технологічних процесів	1. Що таке імітаційне моделювання технологічних процесів і які його переваги? 2. Як можна оптимізувати режими різання за допомогою моделювання? 3. Що таке груповий технологічний процес і які вимоги він ставить до підготовки кадрів?	
Метрологія та контроль якості	1. Які методи вимірювання геометричних параметрів осьових ріжучих інструментів ви знаєте? 2. Як контроль точності обробки впливає на знос інструменту та якість деталей? 3. Поясніть взаємозв'язок між технологічними параметрами та якістю обробки.	
Основи інженерної графіки та креслення	1. Як правильно виконати креслення осьового ріжучого інструменту для виробничого процесу? 2. Яким чином технологічна схема обробки допомагає оптимізувати процес? 3. Як візуалізація параметрів різання сприяє підвищенню ефективності обробки?	
Основи автоматизації виробництва та ЧПУ	1. Які етапи програмування обробного центру з ЧПУ ви знаєте? 2. Як цифрові технології можуть підвищити продуктивність обробки інструментів?	

6.5. Проєктування мотиваційних технологій навчання з теми «Підвищення ефективності обробки осьових ріжучих інструментів із швидкорізальної сталі за рахунок застосування методу фрезоточення»

На рис. 6.3 представимо характеристику мотиваційних технологій навчання.

Таблиця 6.3

Визначення способів реалізації мотивації

Способи реалізації мотивації	Внутрішня мотивація
1	2
Вступна мотивація	Доброго дня, шановні здобувачі освіти! Сучасне машинобудування характеризується високою конкуренцією, вимогами до якості продукції та швидкістю виробничих процесів. В умовах індустрії 4.0 ефективність обробки інструментів та деталей стає критично важливою для забезпечення стабільного функціонування виробництва та зниження витрат. Особливо це стосується осьових ріжучих інструментів із швидкорізальної сталі, від якості обробки яких безпосередньо залежить точність, довговічність і продуктивність усіх наступних операцій. Вивчення методів фрезоточення дозволяє фахівцям оптимізувати процес обробки, підвищити продуктивність та зменшити знос інструментів. Опанування цих технологій сприяє формуванню компетентностей сучасного інженера-технолога, здатного застосовувати передові методи моделювання, вибирати оптимальні режими обробки та ефективно управляти виробничими процесами. Мотивація до вивчення даної теми полягає в тому, що здобуті знання і практичні навички безпосередньо впливають на професійну підготовку фахівців машинобудівної галузі, дозволяють підвищити якість продукції, зменшити час технологічних операцій та адаптуватися до роботи з сучасними високотехнологічними обробними центрами. У процесі заняття студенти зможуть не лише зрозуміти теоретичні основи фрезерування швидкорізальних інструментів, а й відпрацювати практичні методи підвищення продуктивності, що є ключовим елементом їхньої професійної компетентності. Таким чином, опанування цієї теми є необхідним кроком для формування висококваліфікованого персоналу, здатного вирішувати сучасні виробничі завдання, підвищувати ефективність обробки і впроваджувати інноваційні технологічні рішення на підприємствах машинобудівної галузі.

6.6. Проєктування технології формування орієнтовної основи діяльності на факультативному занятті з теми «Підвищення ефективності обробки осьових ріжучих інструментів із швидкорізальної сталі за рахунок застосування методу фрезоточення»

Вибір методів, форм та засобів формування ООД наведено в таблиці 6.4

Таблиця 6.4

Способи формування ООД на факультативному занятті

Рівень засвоєння	Форми організації навчання	Методи навчання	Засоби навчання
1	2	3	4
Розуміння та засвоєння базових знань	Фронтальна лекція, бесіда	Пояснення, демонстрація, інтерактивна лекція	Презентації, схеми, відео процесу фрезерування
Застосування знань на практиці	Практична робота у лабораторії, робота у малих групах	Практичне виконання операцій фрезерування, моделювання процесу	Станок-фрезер, макети інструментів, інструкційні картки, ПЗ для симуляційного моделювання
Аналіз та оцінка процесів	Дискусія, групова робота	Порівняльний аналіз методів обробки, оцінка ефективності	Таблиці результатів експериментів, графіки, програмне забезпечення для обробки даних

Формування компетентностей та самостійна діяльність	Індивідуальні завдання, проектна робота	Розв'язування задач, оптимізація	Лабораторні стенди, комп'ютери з ПЗ для моделювання,

Продовження табл. 6.4

1	2	3	4
		режимів обробки, моделювання технологічних процесів	навчальні посібники

6.7 Проєктування технології формування виконавчих дій на факультативному занятті з теми «Підвищення ефективності обробки осьових ріжучих інструментів із швидкорізальної сталі за рахунок застосування методу фрезоточення»

Вибір методів, форм та засобів формування виконавчих дій наведено в таблиці 6.5.

Таблиця 6.5

Способи формування виконавчих дій з теми

Рівні засвоєння навчального матеріалу	Форми, методи, засоби
1	2
I, II, III, IV	Фронтальна. Рішення задач. Вправа 1. Визначення оптимальних режимів фрезерування Мета: засвоїти вплив швидкості різання, подачі та глибини різання на продуктивність і точність обробки. Завдання: розрахувати рекомендовані режими для обробки осьового інструменту із швидкорізальної сталі, враховуючи матеріал інструменту та інструментальний сплав фрези. Результат: студенти повинні скласти таблицю з оптимальними параметрами та обґрунтувати вибір режимів.
	Вправа 2. Практична фрезерна обробка інструменту Мета: відпрацювати навички точного фрезерування на реальному або навчальному верстаті.

Рівні засвоєння навчального матеріалу	Форми, методи, засоби
	Завдання: виконати обробку осьового ріжучого інструменту за попередньо розрахованими режимами. Результат: здобувачі освіти повинні отримати деталь із заданими розмірами і оцінити якість обробки за допомогою вимірювальних інструментів.

Продовження табл. 6.5

1	2
	Вправа 3. Моделювання процесу фрезерування у цифровому середовищі Мета: навчитися прогнозувати результат обробки і оптимізувати процес без матеріальних витрат. Завдання: використовуючи ПЗ для симуляції фрезерування, змоделювати процес обробки осьового інструменту, оцінити вплив різних режимів на точність і шорсткість поверхні. Результат: студенти повинні підготувати звіт із порівнянням результатів моделювання та теоретичних розрахунків.
	Вправа 4. Аналіз браку та причин дефектів Мета: розвивати навички контролю якості та аналізу технологічного процесу. Завдання: оцінити оброблені осьові інструменти, визначити дефекти (завищена шорсткість, відхилення розмірів, задирки) та встановити причини їх появи. Результат: здобувачі освіти формують таблицю дефектів із запропонованими заходами для їх усунення.
	Вправа 5. Оптимізація групового технологічного процесу Мета: навчитися покращувати продуктивність виробництва шляхом зміни послідовності операцій та режимів. Завдання: розробити покроковий технологічний процес обробки групи осьових інструментів, враховуючи економію часу та ресурсів, та провести розрахунок очікуваної продуктивності. Результат: студенти повинні представити новий технологічний процес у вигляді схеми та обґрунтувати його ефективність порівняно з базовим.

6.8 Проєктування контрольних дій з теми «Підвищення ефективності обробки осьових ріжучих інструментів із швидкорізальної сталі за рахунок застосування методу фрезоточення»

Вибір методів, форм та засобів формування контрольних дій наведено в таблиці 6.6.

Таблиця 6.6

Засоби контролю з теми факультативного заняття

Рівні засвоєння навчального матеріалу теми заняття	Форми, методи, засоби
1	2
III рівень	Фронтальне, усне опитування. 1. Які властивості швидкорізальної сталі визначають її оброблюваність при фрезеруванні? 2. Поясніть основні принципи методу фрезоточення та його відмінності від традиційного фрезерування. 3. Які фактори впливають на точність і шорсткість поверхні оброблених осьових інструментів? 4. Назвіть основні режими різання при обробці швидкорізальної сталі та поясніть їх вибір. 5. Які переваги використання групових технологічних процесів при фрезеруванні осьових інструментів? Письмове опитування. 1. Опишіть порядок вибору оптимальної швидкості різання, подачі та глибини різання для конкретного інструменту. 2. Які методи контролю якості застосовуються для оцінки оброблених осьових ріжучих інструментів? 3. Як провести аналіз дефектів поверхні після фрезерування та визначити причини їх виникнення? 4. Наведіть приклад розробки технологічного процесу обробки осьових інструментів із урахуванням економії часу та ресурсів. 5. Як імітаційне моделювання допомагає підвищити продуктивність та ефективність фрезерування?

Продовження табл. 6.6

1	2
	6. Порівняйте ефективність традиційного фрезерування та методу фрезоточення для осьових інструментів із швидкорізальної сталі. 7. Обґрунтуйте необхідність підготовки фахівців до роботи з високотехнологічними обробними центрами. 8. Розробіть пропозиції щодо покращення технологічного процесу для підвищення продуктивності та зниження браку.

6.9 Розробка сценарію факультативного заняття з теми **«Підвищення ефективності обробки осьових ріжучих інструментів із швидкорізальної сталі за рахунок застосування методу фрезоточення»**

Сценарій заняття, його структура й зміст структурних елементів представлені у вигляді табл. 6.7.

Таблиця 6.7

Сценарій заняття з теми заняття

№ з/п	Структурні елементи заняття	Зміст структурних елементів
1	2	3
1	Організаційний момент	Привітання викладача, перевірка присутніх, налаштування студентів на робочу атмосферу та концентрацію на темі заняття.
2	Повідомлення теми і мети заняття	Тема: «Підвищення ефективності обробки осьових ріжучих інструментів із швидкорізальної сталі за рахунок застосування методу фрезоточення». Мета: сформувати у студентів практичні та теоретичні навички оптимізації технологічних процесів обробки та застосування методу фрезоточення для підвищення продуктивності виробництва.
3	Мотивація навчальної діяльності	Обговорення актуальності теми: скорочення часу обробки, підвищення точності та якості інструментів, зменшення витрат матеріалів та ресурсів. Демонстрація прикладів застосування фрезоточення в сучасних машинобудівних виробництвах.

Продовження табл. 6.7

1	2	3
4	Актуалізація базових знань	Усне опитування студентів щодо: • Властивостей швидкорізальної сталі та її оброблюваності; • Особливостей обробки осьових ріжучих інструментів; • Основ методу фрезоточення та цифрового моделювання технологічних процесів. Методи: усне опитування, дискусія. Форма: фронтальна. Засоби: схеми, креслення, контрольні питання.
5	Формування нового навчального досвіду (ООД)	Викладач демонструє приклад оптимізації технологічного процесу обробки осьового ріжучого інструменту за методом фрезоточення. Студенти аналізують запропоновані процеси, пропонують альтернативні рішення та обговорюють їх ефективність. Методи: пояснення, демонстрація, лекція-дискусія, елементи мозкового штурму.
6	Формування вмінь та дій (ВД)	Практичні вправи: 1. Аналіз креслення інструменту та визначення критичних зон обробки; 2. Розробка ескізного плану фрезоточення; 3. Моделювання технологічного процесу на комп'ютері; 4. Оптимізація режимів різання та послідовності операцій; 5. Підготовка рекомендацій для підвищення продуктивності та зниження браку.
7	Формування компетентності (КД)	Контрольні питання для перевірки знань та навичок: • Переваги застосування методу фрезоточення; • Методи підвищення ефективності обробки; • Використання цифрового моделювання для оптимізації процесів; • Оцінка продуктивності та якості обробки.
8	Підбиття підсумків, видача домашнього завдання	Підсумок заняття: важливість оптимізації процесів обробки осьових ріжучих інструментів, роль методу фрезоточення та цифрового моделювання. Домашнє завдання: підготувати звіт з аналізом технологічного процесу та пропозиціями щодо його оптимізації.

Висновки до розділу 6

Розробка дидактичного проєкту факультативного заняття на тему «Підвищення ефективності обробки осьових ріжучих інструментів із

швидкорізальної сталі за рахунок застосування методу фрезоточення» дозволяє систематизувати навчальний процес, забезпечуючи логічний перехід від теоретичних знань до практичного застосування методу фрезоточення. Структура заняття, що включає організаційний момент, мотивацію, актуалізацію базових знань, формування нового навчального досвіду та практичну частину, сприяє підвищенню ефективності засвоєння матеріалу та розвитку професійних компетентностей студентів.

Використання сучасних методів навчання, таких як демонстрація, дискусії, практичні вправи та симуляційне моделювання, забезпечує формування навичок оптимізації технологічних процесів обробки осьових ріжучих інструментів із швидкорізальної сталі. Дидактичні засоби, включаючи креслення, наочні матеріали, комп’ютерне моделювання та таблиці режимів різання, дозволяють підвищити рівень практичної підготовки здобувачів освіти та сприяють розвитку їх аналітичних здібностей.

Очікувані результати факультативного заняття включають здатність студентів ефективно використовувати метод фрезоточення для підвищення продуктивності виробництва, зниження браку та підвищення точності обробки, що відповідає сучасним вимогам до фахівців машинобудівної галузі. Впровадження такого дидактичного проєкту у навчальний процес сприяє формуванню у студентів комплексного підходу до розробки технологічних процесів та розвитку професійної компетентності, необхідної для роботи на сучасному високотехнологічному обладнанні.

ВИСНОВКИ

В результаті виконання комплексу теоретичних та експериментальних досліджень у рамках роботи проаналізовано основні технологічні параметри процесу ортогонального фрезоточення, що впливають на точність форми та якість поверхні. Наукові висновки та практичні результати, роблять внесок у розвиток вітчизняного інструментального виробництва:

Алгоритм математичної моделі враховує:

взаємне розташування ріжучих кромок та оброблюваної поверхні з урахуванням одночасного обертання інструменту та заготівлі;

пружні переміщення інструменту в момент входження зуба фрези в матеріал, що обробляється;

Застосування адаптованої математичної моделі процесу ортогонального фрезотучення дозволяє прогнозувати мікрогеометрію обробленої поверхні.

Встановлено вплив параметрів різання на шорсткість та «огранювання» поверхні, а також на температуру в зоні різання при обробці швидкорізальної сталі ортогональним фрезоточенням. Отримані функціональні залежності можуть використовуватися як зручний інструментарій для прогнозування вихідних параметрів у процесі призначення режимів різання;

Показано, що фрези, оснащені змінними пластинами, є ефективним інструментом для операції фрезоточення за умови правильного вибору різальної геометрії та коректно встановленого положення фрези щодо заготівлі, що дозволяють зменшити похибку форми та досягти необхідної шорсткості поверхні;

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Головенкін В. П. Інженерна педагогіка [Електронний ресурс] : підруч. / В. П. Головенкін. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. Режим доступу: http://psy.kpi.ua/wp-content/uploads/2017/02/Injenerna_pedagogika.pdf

2. Коваленко О. Е., Брюханова Н. О., Корольова Н.В. Методика професійного навчання: дидактичне проектування: Підручник для студентів інженерно-педагогічних спеціальностей. – Харків: УІПА, 2019. – 204 с.

3. Коваленко О. Е., Брюханова Н. О., Корольова Н.В. Методика професійного навчання: основні технології навчання: Підручник для студентів інженерно-педагогічних спеціальностей. – Харків: УІПА, 2019. – 174 с.

4. Лебедик Л.В., Стрельніков В.Ю., Стрельніков М.В. Сучасні технології навчання і методики викладання дисциплін: Навчально-методичний посібник для слухачів курсів підвищення кваліфікації педагогічних працівників закладів середньої, професійної (професійно-технічної), фахової передвищої та вищої освіти / Л. В. Лебедик, В. Ю. Стрельніков, М. В. Стрельніков. – Полтава : АСМІ, 2020. – 303 с.

5. Методика професійної освіти : навч. посібник для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти за спеціальністю 015 «Професійна освіта» галузі знань 01 «Освіта / Педагогіка» / Д. О. Чернишев, К. І. Почка, Г. Л. Корчова, Ю. С. Красильник, М. В. Руденко. – Київ : Компринт, 2024. – 224 с.

6. Методичні вказівки до виконання магістерської кваліфікаційної роботи для здобувачів освіти другого (магістерського) рівня вищої освіти денної та заочної форм навчання за спеціальністю 015 Професійна освіта (за спеціалізацією) / Укр. інж.-пед. акад.; упоряд.: О. Е. Коваленко, Н. О. Брюханова, Н.В. Божко, Н.В. Корольова – Харків: УІПА, 2024. – 82 с.

7. Освітньо-професійна програма «Професійна освіта (Машинобудування)» першого (бакалаврського) рівня. Затверджена вченою радою Української інженерно-педагогічної академії від 28.06.2024 року №13.

8. Освітньо-професійна програма «Професійна освіта (Машинобудування)» другого (магістерського) рівня. Затверджена вченою радою Української інженерно-педагогічної академії від 28.06.2024 року №13.

9. Семенова А.В. Професійна педагогіка: Підручник. / Авт. : О.В. Грабовський, Л.В. Коломієць, О.С. Савєльєва, А.В. Семенова, В.Ф. Яні; за заг. ред. А.В. Семенової. – Одеса: Бондаренко М.О., 2020. – 575 с.

10. Сайт дистанційної освіти Університету – Режим доступу: https:// moodle.karazin.ua

11. EdEra – студія онлайн-освіти [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://ed-era.com/

12. Український освітній онлайн-портал для вчителів «На Урок» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://naurok.com.ua/

13. «Освіторія Медіа» – онлайн медія про освіта та виховання [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://osvitoria.media/

14. Освіта.UA [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://osvita.ua

15. Всеосвіта – освітня платформа для професійного зростання педагогічних працівників та підвищення їх педагогічної майстерності [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://vseosvita.ua/

16. Boozarpoor M. Comprehensive study on effect of orthogonal turn-milling parameters on surface integrity of Inconel 718 considering production rate as constrain / M. Boozarpoor, R. Teimouri, K. Yazdani // International Journal of Lightweight Materials and Manufacture. Elsevier Ltd. – 2021. Vol.4(2). – P.145–155.

17. Felusiak-Czyryca A. Cutting Forces during Inconel 718 Orthogonal Turn Milling / A. Felusiak-Czyryca, M. Madajewski, P. Twardowski, M. Wiciak-Pikuła // Materials. – 2021. Vol.14(20). – P.6152.

18. Karaguzel U. Mechanical and Thermal Modeling of Orthogonal Turn milling Operation / U. Karagüzel, M. Bakkal, E. Budak // Procedia CIRP. –2017. Vol.58. – P.287–292.

19. Liu Z. Characteristic of surface profile and roughness in micro turn-milling of aluminum alloy 2A12 / Z. Liu, X. Wang // International Technology and Innovation Conference 2009 (ITIC 2009). Xi'an, China: IET. – 2009. – P.46–46.

20. Otalora-Ortega H. Analytical modeling of the uncut chip geometry to predict cutting forces in orthogonal centric turn-milling operations / H. Otalora-Ortega, P.A. Osoro, P.J. Arrazola Arriola // International Journal of Machine Tools and Manufacture. Elsevier Ltd. – 2019. Vol.144(4) – P.103428.

21. Peng F. An Investigation of Workpiece Temperature in Orthogonal Turn Milling Compound Machining / F. Peng, Y. Liu, S. Lin, R. Yan, S. Yang, B. Li // Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2015. Vol.137(1). – P.011014

22. Rao K.V. A Novel Approach for Minimization of Tool Vibration and Surface Roughness in Orthogonal Turn Milling of Silicon Bronze Alloy // Silicon. Silicon. – 2019. Vol.11(2). – P.691–701.

23. Ratnam Ch. Process monitoring and effects of process parameters on responses in turn-milling operations based on SN ratio and ANOVA / Ch. Ratnam, K. Arun Vikram, B.S. Ben, B.S.N. Murthy// Measurement. Elsevier Ltd. – 2016. Vol.94. – P.221–232.