

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Машинобудівний

(повне найменування інституту, факультету)

Технології машинобудування

(повне найменування кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проекту (роботи)

Магістр

(ступінь вищої освіти)

на тему

Вплив геометрії кінцевої срезки
на якість обробки ПЗ

Виконав: студент(ка) 2м курсу, групи Мз-10М

Спеціальності 131 Прикладна механіка
(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)

Технології машинобудування

Полякова В.С.

(прізвище та ініціали)

Керівник Козлова О.Г.

(прізвище та ініціали)

Рецензент Вішнєпольскіс Е.В.

(прізвище та ініціали)

2021 р.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»
 (повне найменування закладу вищої освіти)

Інститут, факультет Машинобудівний
 Кафедра Технологія машинобудування
 Ступінь вищої освіти магістр
 Спеціальність 131 Прикладна механіка
 (код і найменування)
 Освітня програма (спеціалізація) Технологія машинобудування
 (назва освітньої програми (спеціалізації))

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри _____

« _____ » _____ 20 _____ року

ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА(КИ)

Полякова Вікторія Серіївни
 (прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Вплив геометрії кінцевої фрези на якість обробки

керівник проекту (роботи) Козлова О.Б., доцент
 (прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від « 16 » 11 2021 року № 444

2. Строк подання студентом проекту (роботи) 30.11.2021

3. Вихідні дані до проекту (роботи) необхідність вивчення впливу геометрії кінцевої фрези на якість обробки

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Аналіз геометрії різальної частини кінцевої фрези.

2. Методи проведення досліджень

3. Визначення швидкісної зони як зони виникнення резонансних коливань

4. Дослідження впливу величини стріжки на задані параметри з'їда фрези

5. Економічне обґрунтування прийнятих рішень

6. Охорона праці та безпека у нестандартних ситуаціях

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

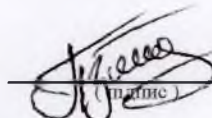
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
1	Козлова О.Б., доцент		
2	Козлова О.Б., доцент		
3	Козлова О.Б., доцент		
4	Козлова О.Б., доцент		
5	Козлова О.Б., доцент, Пухальська Г.В.		
6	Шмирко В.І., доцент		
7	Нормоконтроль Дядю С.І.		

7. Дата видачі завдання « 01 » 09 2021 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	Аналіз геометрії різальної частини кінцевих фрез	28.06.2021	
2	Методики проведення досліджень	19.07.2021	
3	Визначення швидкісної зони як зони виникнення регенеративних автоколивань	02.08.2021	
4	Дослідження впливу величини стріски на задній поверхні зуба фрези	16.08.2021	
5	Економічне обґрунтування прийнятих рішень	27.09.2021	
6	Оцінка праці та безпеки у надзвичайних ситуаціях	11.10.2021	

Студент(ка)


(підпис)

Полокова В.С.
(прізвище та ініціали)

Керівник проєкту (роботи)

(підпис)

Козлова О.Б.
(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

ПЗ: 90 с., 4 табл., 50 рис., 48 джерел.

АВТОКОЛИВАННЯ, ВІБРОСТІЙКІСТЬ, ТОЧНІСТЬ, КІНЦЕВА
ФРЕЗА, ЗАДНЯ ПОВЕРХНЯ, СТРІЧКА

Об'єктом дослідження є механічна обробка тонкостінних деталей кінцевою фрезою зі стрічкою на задній поверхні зуба.

Предметом дослідження є вплив геометрії фрези на процеси, що виникають при фрезеруванні, а саме точність і якість обробленої поверхні.

Метою даного дослідження є визначення впливу величини стрічки на задній поверхні зуба кінцевої циліндричної фрези на якість обробки: вібростійкість процесу фрезерування, а також параметри шорсткості та точність обробки.

Методи дослідження - експериментальний, науково-дослідний.

У роботі представлено результати експериментальних досліджень щодо впливу геометрії зуба фрези, а саме стрічки на задній поверхні на зниження рівня автоколивань, а також точність і якість обробленої поверхні.

ЗМІСТ

Скорочення та умовні позначки.....	7
Вступ.....	8
1 Аналіз геометрії різальної частини кінцевих фрез. Цілі і завдання дослідження.....	9
1.1 Загальне уявлення щодо процесу фрезерування.....	9
1.2 Аналіз конструкції і геометрії різальної частини кінцевих фрез.....	11
1.3 Цілі і завдання дослідження.....	18
1.4 Висновки.....	19
2 Методики проведення досліджень.....	20
2.1 Основні поняття.....	20
2.2 Аналіз сучасних методик дослідження вібрацій при фрезеруванні.....	24
2.3 Опис конструкції експериментальної фрези.....	36
2.4 Методика дослідження ефективності видалення припуску і якості обробленої поверхні.....	37
2.5 Загальні умови проведення експериментів.....	39
2.6 Висновки.....	40
3 Визначення швидкісної зони як зони виникнення регенеративних автоколивань.....	42
3.1 Аналіз проведених експериментів.....	44
3.2 Висновки.....	55
4 Дослідження впливу величини стрічки на задній поверхні зуба фрези...	56
4.1 Опис проведення досліджень.....	56
4.2 Опис результатів експериментів.....	57
4.3 Висновки.....	66
5 Економічне обґрунтування прийнятих рішень.....	67
6 Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях.....	72

	6
6.1 Аналіз потенційних небезпек.....	72
6.2 Заходи по забезпеченню безпеки.....	74
Висновки.....	84
Перелік джерел посилання.....	85

СКРОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

AI	- аналоговий вхід (Analog Input)
AB	- акустичне випромінювання
AЧХ	- амплітудно-частотна характеристика
АЦП	- аналогово-цифровий перетворювач
БФО	- базовий фрагмент осцилограми
ГТД	- газотурбінний двигун
BC	- визначальне співвідношення
ПК	- персональний комп'ютер
ПЗ	- програмне забезпечення
ВПД	- верстат-пристосування-інструмент-деталь
ТС	- технологічна система
TE	- тонкостінний елемент
ПС	- пружна система
ЧПК	- числове програмне керування

ВСТУП

Процес фрезерування - це насамперед багатолезова обробка поверхонь різними фрезами на фрезерних верстатах. Цей процес є одним з найбільш продуктивних процесів механічної обробки різанням, через що й отримав широке застосування в машинобудуванні [1, 2].

Тому, важливо вивчити всі аспекти фрезерування і постійно покращувати процес обробки, вивчаючи сам процес і явища, що його супроводжують.

Кінцеве фрезерування є фрезеруванням, що найбільш часто використовується через свою універсальність. Тому, актуальним є вивчення процесу обробки поверхонь, зокрема, тонкостінних елементів, а також геометрії кінцевих фрез і її впливу на точність, якість оброблених поверхонь, а також на вібраційні процеси в зоні різання.

Геометрія кінцевих фрез має ряд особливостей, які вказані в ГОСТ 17026-71 та літературі, а саме стрічку на задній поверхні зуба фрези. Вона сприятливо впливає на процес фрезерування і супутні процеси. Однак, є необхідність в подальшому вивченні впливу її величини на процеси різання.

Актуальним питанням, що розглянуте в дипломній роботі, є те: як величина стрічки на задній поверхні зуба фрези впливає на якість обробки, а саме: на ефективність видалення припуску, якість обробленої поверхні і пригнічення автоколивань тонкостінного елемента при фрезеруванні кінцевими фрезами.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ГЕОМЕТРІЇ РІЗАЛЬНОЇ ЧАСТИНИ КІНЦЕВИХ ФРЕЗ.

ЦІЛІ І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Загальне уявлення щодо процесу фрезерування

Фрезерування - це процес обробки поверхонь багатолезовим інструментом, а саме фрезою на фрезерних верстатах. Фрезерування є одним з найбільш продуктивних процесів механічної обробки різанням, завдяки чому порівняно швидко набуло широкого застосування [2].

При обробці розрізняють зустрічне і попутне фрезерування.

Попутне фрезерування, або ж фрезерування за подачею - це спосіб, при якому напрямок руху заготовки і вектора швидкості різання співпадають. При цьому товщина стружки на вході зуба в різанні максимальна і зменшується до нульового значення на виході. При попутному фрезеруванні умови входу інструменту в різання більш сприятливі, тому вдається уникнути високих температур в зоні різання і мінімізувати схильність матеріалу заготовки до зміцнення. Велика товщина стружки в даному випадку є перевагою. Сили різання притискають заготовку до столу верстата, сприяючи зменшенню вібрації. Схема даного способу фрезерування представлено на рис. 1.1 [6, 24].

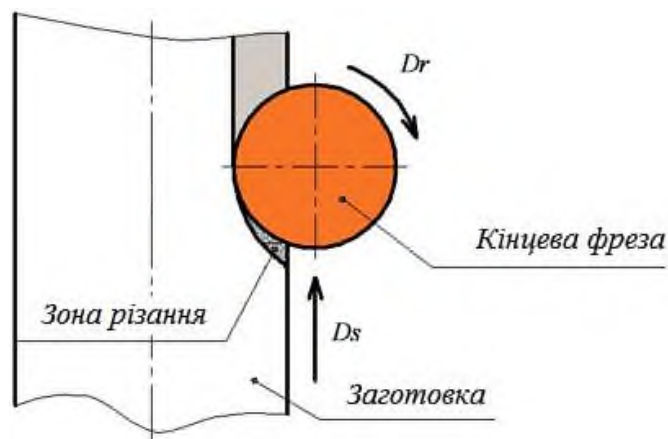


Рисунок 1.1 - Схема попутного фрезерування [24]

Зустрічне фрезерування - спосіб, при якому спостерігається процес, коли швидкість різання і рух подачі заготовки спрямовані в протилежні боки. При врізанні товщина стружки дорівнює нулю, на виході ж вона максимальна. У разі зустрічного фрезерування, коли інструмент починає роботу зі стружкою нульової товщини, виникають високі сили тертя, які відтискають фрезу і заготовку один від одного. У початковий момент врізання зуба процес різання нагадує вигладжування, з супутніми йому високими температурами і підвищеним тертям. Найчастіше це загрожує небажаним зміцненням поверхневого шару деталі. На виході через велику товщину стружки в результаті раптового розвантаження зуби фрези відчувають динамічний удар, який приводить до викришування і значного зниження стійкості [24]. На рис. 1.2 показано схему зустрічного фрезерування.

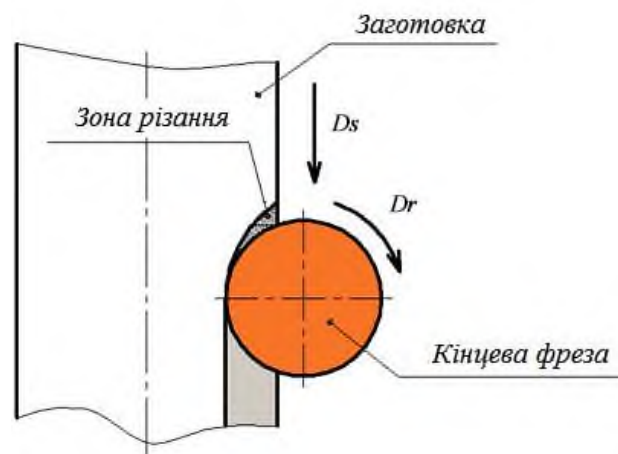


Рисунок 1.2 - Схема зустрічного фрезерування [24]

Процес фрезерування виконується фрезами різних видів. Зокрема, кінцева фреза використовується найбільш часто, так як дозволяє обробити одночасно різні види поверхонь. Кінцеві фрези часто застосовуються для обробки площин, пазів, фасонних поверхонь, тіл обертання, а також для розрізання матеріалів [18, 33].

На рис. 1.3 представлено різні виконання кінцевих фрез для отримання вище зазначених поверхонь [10].



Рисунок 1.3 - Виконання кінцевих фрез [10]

Це фрези з різним нахилом ріжучої кромки, що призначені для обробки різних матеріалів, а також з додатковими поверхнями на різальній частині для чорнової обробки.

1.2 Аналіз конструкції і геометрії різальної частини кінцевих фрез

Основними конструктивними елементами кінцевої фрези є: хвостовик, різальна частина фрези і їх складова - загальна довжина (рис. 1.4) [33].

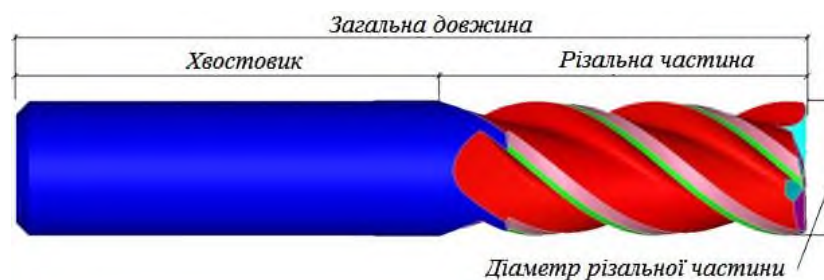


Рисунок 1.4 - Основні елементи кінцевої фрези [33]

У свою чергу, різальна частина кінцевої фрези складається з таких елементів, як (рис. 1.5):

- стружкова канавка;
- різальна кромка;
- стрічка;
- передня поверхня.

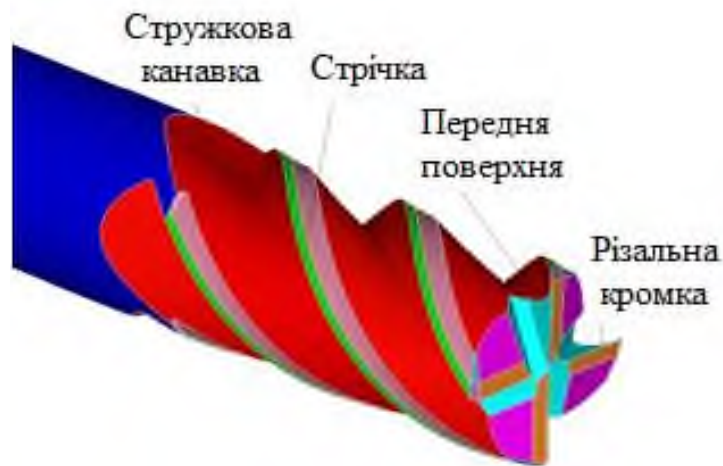


Рисунок 1.5 - Елементи різальної частини фрези [33]

Загальний вигляд елементів і геометрії різальної частини кінцевої фрези показано на рис. 1.6.

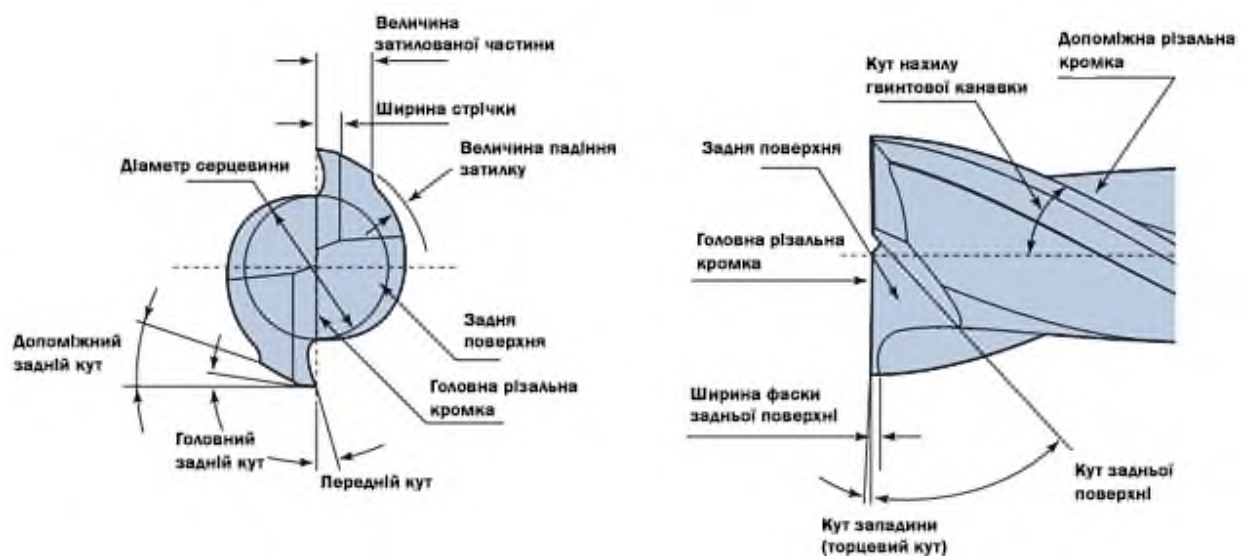


Рисунок 1.6 - Геометрія кінцевої фрези [16]

До основних характеристик геометрії різальної частини фрези відносять (рис. 1.7):

- головний задній кут - α ;
- допоміжний задній кут - α_1 ;
- передній кут - γ ;
- стрічку - f_c .



Рисунок 1.7 - Геометрія різальної частини фрези [33]

Кількість різальних зубів на кінцевій фрезі - це важливий показник, який залежить від матеріалу, що обробляється, і можливостей верстата. Відповідно до класифікації кінцевих фрез, вони є 2-7-зубі і більше. Найбільш поширеними варіантами вважаються 2, 3 або 4-зубі фрези [33].

Двозубі кінцеві фрези з центральним різом призначаються для врізання, обробки пазів, контурів, мають збільшені стружкові канавки для ефективного відводу стружки. На високих швидкостях подачі при важкому периферійному фрезеруванні забезпечується чорнова якість оброблюваної поверхні [33].

Тризубі кінцеві фрези є компромісом поміж великим об'ємом канавок кінцевих фрез з двома канавками і міцністю кінцевих фрез з 4-ма канавками. Радіус або фаска кута різальної кромки захищають від сколів і несправностей і продовжує термін служби інструменту [33].

Чотиризубі кінцеві фрези є універсальним рішенням для фрезерування в тих випадках, коли немає проблем з відведенням стружки із зони різання фрези. Збільшена товщина сердечника інструменту зменшує прогин і підвищує точність обробки, в той час як зменшене навантаження призводить до підвищення якості поверхні [33].

Кінцеві фрези з більш ніж 4-ма зубами відмінно підходять для підвищення продуктивності роботи з жорсткими матеріалами, такими як титан, де обертів шпинделя найчастіше просто не вистачає [33].

Фрези з п'ятьма зубами забезпечують добре зчеплення різальної кромки і чистоту обробки поверхні [33].

Фрези з шістьма зубами збільшують стабільність інструменту, утримуючи більше різальних кромок в контакті з робочим матеріалом. Зменшується кількість сколів різальної кромки, продовжують термін служби кінцевої фрези і в рази підвищують стійкість інструменту [33].

Кінцеві фрези з сімома і більше зубами забезпечують високе зчеплення різальних кромок з матеріалом, що оброблюється, збільшують швидкість видалення металу і чистову якість обробленої поверхні [33].

За своєю формою зуб фрези може бути загостреним або ж затилованим. У сучасному машинобудуванні більш широке поширення мають фрези з загостреними зубами [34]. На рис. 1.8 показано різні форми зубів фрези.

Завдяки сучасному розвитку інструментального виробництва на цей час можливо уникнути передчасного списання більшої частини інструментів, що використовуються в механічній обробці, і їх виключення з технологічного процесу. І як наслідок - уникнути витрат на закупівлю нових. Як правило, виробником інструментів з твердого сплаву в геометрію від початку закладена можливість як мінімум триразового заточування фрези [33].

Знос фрези, здебільшого, відбувається по задній поверхні. За ним можна судити за погіршенням якості обробленої поверхні або появи вібрацій [14].

Заточування фрез починається зі стрічки - f_c (рис. 1.9) і триває по всій ширині спинки зуба. Геометрія заточування фрези показана на рис. 1.10.

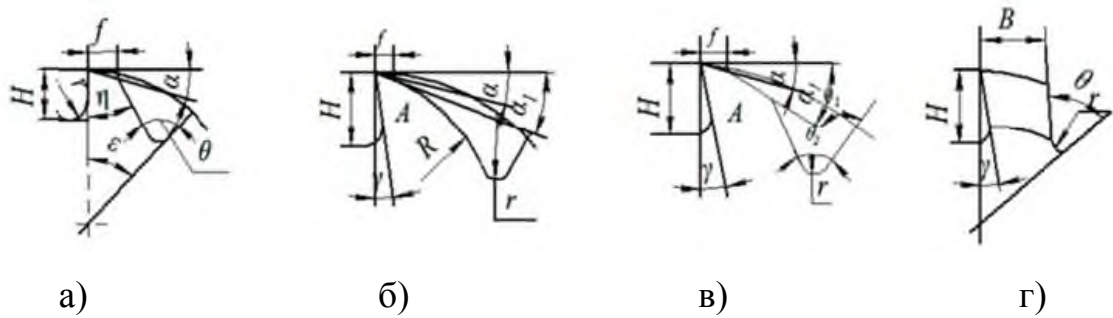


Рисунок 1.8 - Форма зубів фрези (а - однокутова; б - параболічна; в - з ламаною спинкою; г - затилована) [34]

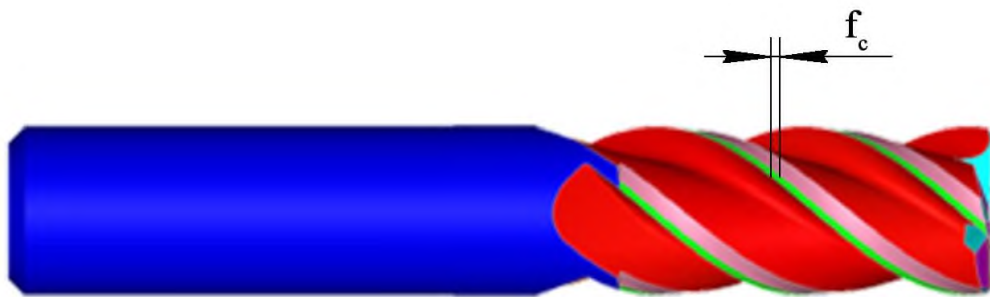


Рисунок 1.9 - 3D зображення стрічки кінцевої фрези [14]

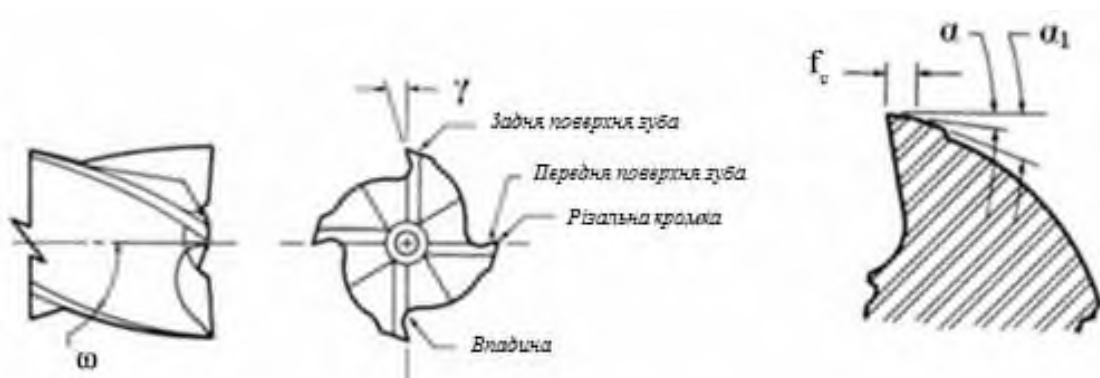


Рисунок 1.10 - Геометрія заточування кінцевої фрези [13]

Розмір стрічки - f_c впливає на силу тертя між інструментом і заготовкою. Тому ширину необхідно підтримувати в певному діапазоні [13].

Виходячи з інформації, що зазначена в ГОСТ 17026-71, кінцеві фрези виготовляють в двох виконаннях: А - з циліндричною стрічкою на задній поверхні зуба ($f_c \leq 0,05$ мм), Б - заточені нагостро [11]. На рис. 1.11 показано основні розміри та виконання фрез за ГОСТ 17026-71.

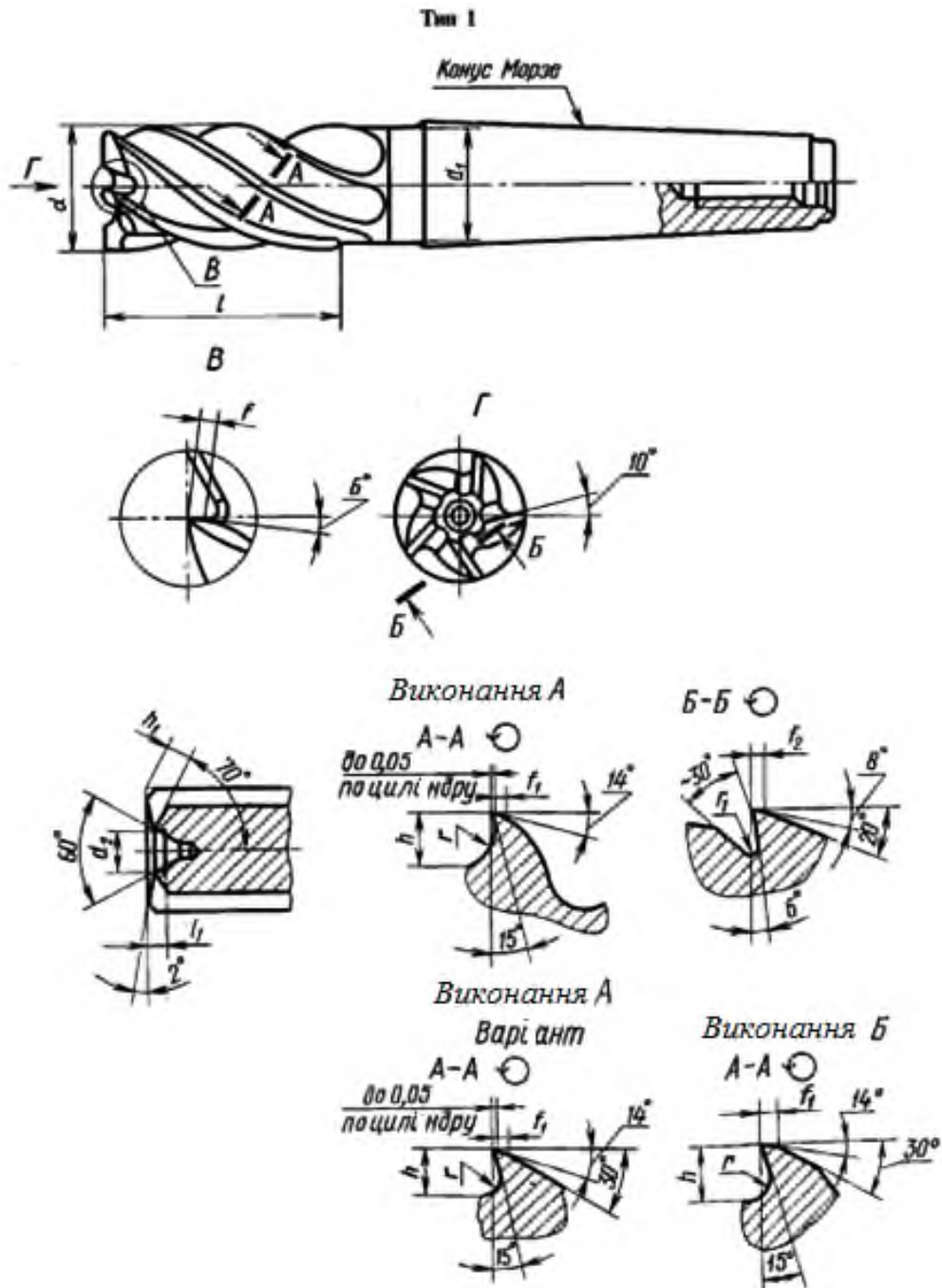


Рисунок 1.11 - Основні розміри та виконання фрез за ГОСТ 17026-71 [11]

Наявність стрічки і величина радіусу округлення різальної кромки істотно впливає на вібростійкість при роботі в діапазоні виникнення регенеративних автоколивань [3, 18].

Крім збільшення стійкості, наявність стрічки повністю виключає мікровідколи різальних кромок при виході зуба з роботи при попутному фрезеруванні і відповідно при зустрічному під час врізання. Це пояснюється створенням стискаючих напруг в ріжучому клині при позитивних передніх кутах зі зміцнюючою фаскою і стрічкою з нульовим заднім кутом за циліндром і вигину для ріжучого клина без зміцнюючої фаски при виході зуба з роботи з нульовою товщиною зрізу [5].

Таким чином, фаска з негативним переднім кутом і стрічкою за циліндром при виході зуба з роботи при попутному фрезеруванні або при вході в роботу при зустрічному створюють напруження стискання при виході зуба з роботи при попутному фрезеруванні і врізанні при зустрічному. Це запобігає викришуванню різальних кромок [5].

В роботі [3] показані експериментальні дослідження щодо впливу стрічки - f_c на задній поверхні зуба фрези на пригнічення регенеративних автоколивань ТЕ.

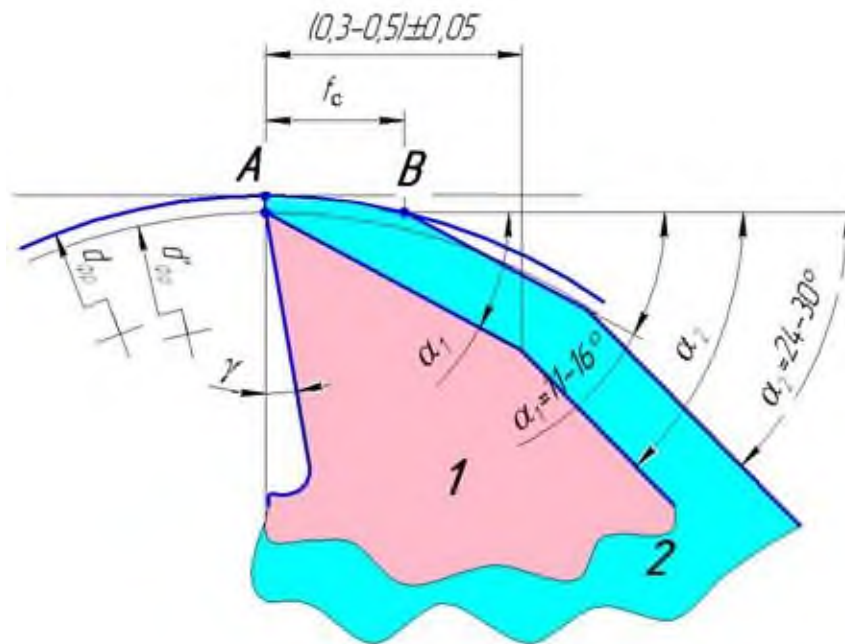
Для зменшення биття фрези на зубі залишають циліндричну стрічку величиною $f_c = 0,05-0,1$ мм, і задній кут починається вже за цією стрічки [4]. Іноді залишають циліндричні стрічки шириною $f_c = 0,02...0,03$ мм [17].

У зв'язку з цим виникає питання про актуальність аналізу впливу циліндричної стрічки на задній поверхні зуба фрези і її геометричних параметрів, зокрема, ширини стрічки, на якість і точність оброблюваних поверхонь при кінцевому циліндричному фрезеруванні ТЕ.

Зовнішній вигляд циліндричної стрічки, а також загальна геометрія заточування задньої поверхні гвинтового зуба кінцевої циліндричної фрези показано на рис. 1.12.

Отже стрічка на задній поверхні зуба фрези є невід'ємною частиною геометрії кінцевих фрез і актуальним є вивчення та визначення залежності

найкращих умов процесу фрезерування, а саме точності обробки, параметрів якості та ефективності від її геометричного розміру.



1 - зуб заточений нагостро; 2 - зуб заточений зі стрічкою - f_c

Рисунок 1.12 - Геометрія заточування задньої поверхні гвинтового зуба кінцевої циліндричної фрези [3]

1.3 Цілі і завдання дослідження

Метою даного дослідження є дуже важливе та актуальне питання, тому для її досягнення необхідно вирішити наступні завдання:

1. Провести аналіз процесу фрезерування і геометричних особливостей різальної частини кінцевих фрез, а також методик, що дозволяють експериментально визначити рівень вібростійкості процесу фрезерування.

2. На вимірному стенді, за розробленою раніше методикою, провести експерименти спеціальною фрезою.

3. Виконати дослідження по визначенню частоти обертання фрези, при якій спостерігаються найбільш інтенсивні регенеративні автоколювання при фрезеруванні.

4. Дослідити вплив величини стрічки на задній поверхні зуба фрези на пригнічення регенеративних автоколювань, а також точність і якість обробленої поверхні.

5. Сформулювати рекомендації щодо основних параметрів і режимів фрезерування кінцевими фрезами в умовах виникнення автоколювань.

1.4 Висновки

В результаті проведеного аналізу можна зробити наступні висновки:

1. Розглянуто процес фрезерування, його види та особливості.
2. Проведено аналіз конструкції кінцевих фрез, в результаті якого було виявлено такий важливий елемент, як стрічка шириною f_c , яка заточується на задній поверхні зуба фрези. Було виявлено ряд позитивних якостей даного елемента, який дозволяє і далі вивчати його особливості.
3. Визначено актуальне питання щодо впливу ширини стрічки фрези на якість і точність оброблюваних поверхонь.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Основні поняття

В даний час в галузевому машинобудуванні досить поширеними стали монолітні деталі з ТЕ, які в більшості випадків отримують шляхом кінцевого фрезерування на верстатах з ЧПК [29].

У різних джерелах формулювання ТЕ звучить по-різному, тому слід розширено розглянути визначення поняття токостенності як такого і того, що входить в певну частину цілісної деталі.

Автори наукового дослідження [29] детально описують різницю визначення тонкостінності і встановлюють сполучні речі, які і характеризують загальне формулювання цього визначення.

У роботі [35] було розділено поняття тонкостінного і товстостінного циліндру, ґрунтуючись на рівномірному розподілі напруг по всій товщині стінки.

У свою чергу, джерело [38] повідомляє нам теорію тонкостінних циліндрів і сфер, яка ґрунтується на співвідношенні товщини стінки до діаметра (близько $1/10$). Це значення являє собою кордон між тонкою і товстою стінкою циліндра.

Застосовуючи співвідношення товщини пластини до найкоротшої її довжини з двох ребер, в роботі [39] пластини були розділені на:

- надтонкі (співвідношення товщини пластини до довжини менше 0,01);
- тонкі (діапазон співвідношення 0,01-0,25);
- товсті пластини (співвідношення більше 0,25).

Автори роботи [30] класифікували деталі за чотирма категоріями жорсткості:

- дуже жорсткі (масивні);

- підвищеної жорсткості;
- середньої жорсткості;
- малої жорсткості.

У джерелі [12] дається таке визначення нежорсткої деталі: «Деталь, яка деформується такою мірою, що у вільному стані виходить за межі допусків розмірів і (або) форми і розташування, що відносяться до деталі в закріпленому стані». Спрощеним для сприйняття є формулювання нежорсткої деталі як певного стану деталі, на яку впливає тільки сила тяжіння.

Автор роботи [21] до нежорстких конструкцій відносить деталі, які мають суттєво відмінні розміри поперечних перерізів $A \times B$, довжин l , товщин стінок t і висот H , які характеризуються кількісним співвідношенням розмірів. Так, наприклад, нежорсткі круглі пластини мають $H \leq (0,2 - 0,3)D$, гладкі та ступінчасті вали - $l \geq 15D$, трубчасті деталі - $t \leq 0,05D$ [23].

За більш вичерпний критерій нежорсткості в роботі [8] пропонується прийняти несучу здатність конструкції деталі.

У роботі [37] за фундаментальне брали поняття про те, що тонкостінним є той елемент, у якого пружна деформація стінки більше або дорівнює допуску на обробку.

У підсумку, тонкостінним називають елемент деталі, який відрізняється від іншої її частини певним чином, а саме: має різну жорсткість, стійкість, має власну частоту коливань, масу, коефіцієнт демпфірування [29].

Прикладом тонкостінних деталей, які активно використовуються в авіамашинобудуванні є лопатки моноколеса «Блиск» ГТД, які фрезерують з цільного матеріалу. Зовнішній вигляд лопаток представлено на рис. 2.1.

В цілому, в конструкціях сучасних ГТД все частіше відбувається заміна традиційних дисків з лопатками, які використовуються (рис. 2.2, а) на моноколеса - «блиски» (рис. 2.2, б) і аналогічні бездисккові кільцеві

конструкції - «блінги» (рис. 2.2, в). Моноколеса дозволяють істотно зменшити розміри ободу диска за рахунок усунення замкових з'єднань і знизити вагу конструкцій типу «блиск» на 30 %, «блінг» на 70 % [32].

Отже, такий вид обробки є дуже актуальним.



Рисунок 2.1 - Лопатки моноколеса «блиск»



Рисунок 2.2 - Види коліс, які використовуються в машинобудуванні
(а - диск з лопатками, б - «блиск», в - «блінг») [32]

Тонкостінний елемент в процесі фрезерування сприймає дію різних сил. Це збурююча сила, яка відхиляє деталь від положення рівноваги,

відновлювальна сила пружності, сили внутрішнього тертя або демпфування і сила інерції [18].

Принципову схему фрезерування тонкостінного елемента показано на рис. 2.3.

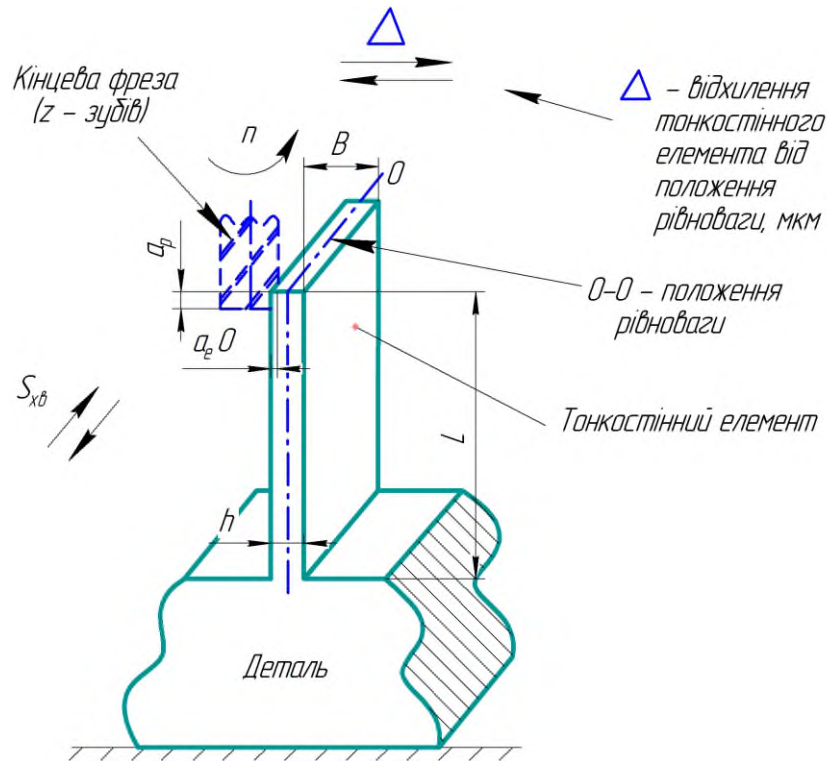


Рисунок 2.3 - Принципова схема кінцевого фрезерування ТЕ [18]

При обробці даного типу деталей, внаслідок періодичної нестійкості системи ВПД, виникають коливання з певною амплітудою, які називаються автоколиваннями (при різанні і терті вібрації пов'язано зі зрізанням стружки по хвилястому сліду на поверхні різання, отриманого при попередньому проході зуба фрези) [22].

Загалом, автоколивання - це незгасаючі коливання неконсервативної системи, при яких амплітуда, що встановилася і частота визначається властивостями самої системи (неконсервативною називається система, в якій при коливаннях відбувається розсіювання енергії, обумовлене пружною недосконалістю матеріалів елементів або тертям в нерухомих з'єднаннях, тобто так званим конструкційним демпфуванням) [22].

Автоколивання є стійкими коливаннями з частотою, яка визначається властивостями коливальної системи, що близька з однією з частот власних коливань пружної технологічної системи [22].

Автоколивання системи починаються одночасно з початком процесу різання і припиняються після відведення інструмента. Це свідчить про те, що причиною виникнення автоколивань є сам процес різання [22].

Таким чином, автоколивання - це незгасаючі стаціонарні коливання, що підтримуються за рахунок енергії, яка підводиться до системи від джерел неколивального характеру засобами, що виникають в самій коливальній системі. Вони виникають з частотою, що близька до частоти власних коливань будь-якої ланки системи ВПД. Для збудження автоколивань необхідно зовнішній вплив, який би вивів систему зі стану рівноваги. Але після того, як ці коливання встановилися, амплітуда і частота коливань визначаються тільки параметрами самої системи. Від параметрів системи залежить і мінімальний енергетичний рівень зовнішнього впливу, що приводить до автоколивань [31].

2.2 Аналіз сучасних методик дослідження вібрацій при фрезеруванні

На тему вібрацій в металообробці наведено безліч наукових робіт, які описують це явище, досліджують і створюють різні методики по зниженню вібрацій і явищ, які виникають внаслідок цього.

В роботі [19] було проаналізовано метод оцінювання амплітуди коливань ТС за величиною звукового тиску, що створюється АІ на мембрану мікрофона. Для цього була використана експериментальна установка, яку зображено на рис. 2.4.

Також була розроблена методика прийому, перетворення, реєстрації та обробки АІ процесу кінцевого фрезерування і показано зв'язок між спектром сигналу АІ і параметрами автоколивань.

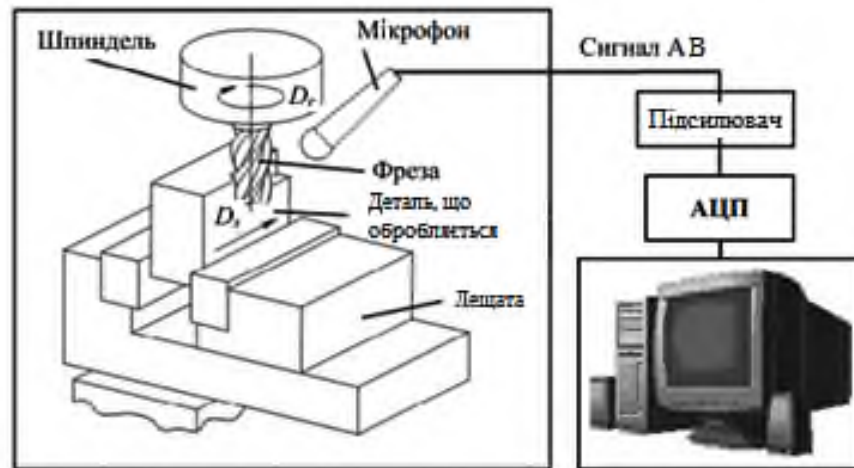


Рисунок 2.4 - Експериментальна установка для реєстрації сигналу АІ процесу кінцевого фрезерування [19]

Проведені дослідження показали, що при збільшенні глибини фрезерування зростає амплітуда в діапазоні частот автоколивань в порівнянні з діапазоном частот вимушених коливань.

Це свідчить про зміну коливального режиму, що є стійким до автоколивань до нестійкого режиму (табл. 2.1) [19].

Таблиця 2.1 - Залежність коливального режиму від глибини фрезерування [19]

Глибина фрезерування, мм	Режим автоколивань
5	стійкий
10	на межі стійкості
20	нестійкий
30	нестійкий
40	нестійкий

Стаття [1] була присвячена аналізу причин виникнення автоколивань при механічній обробці різанням, в результаті якої було встановлено, що прогнозування вібростійкості по пелюстковій діаграмі стійкості працює тільки в умовах чорнового фрезерування, а при чистовому - аналіз вібростійкості ускладнюється високою уривчастістю різання. В умовах фінішного фрезерування, коли уривчастість обробки зростає, точність прогнозування знижується. Однак в цьому випадку зростає роль вимушених коливань, викликаних періодичним врізанням зубів, що особливо важливо при високій уривчастості обробки. В області низьких швидкостей обертання фрези, що представлені в роботі моделі вібростійкості, як і раніше не враховують роль задньої поверхні в демпфіруванні коливань.

Автор роботи [15] розглядає дослідження, яке спрямоване на розвиток методів вібродіагностики фрезерних металорізальних верстатів. В результаті експериментів була розроблена методика проведення вібраційних випробувань фрезерних верстатів на основі мобільного діагностичного комплексу «Віброрегістратор-М2», яка в свою чергу дозволяє визначити режими обробки з найменшим рівнем вібрації.

Наукова робота [9] складається з дослідження вимушених видів коливань, які виникають при вході зуба під стружку і виході зуба з-під стружки. Схема установки приведена на рис. 2.5, де колювання сили різання вимірюються динамометром, а амплітудно-частотна характеристика будується за результатами вимірювання коливань зразка, затиснутого в лещатах, акселерометром. Автоколювання у даному дослідженні не розглядалися.

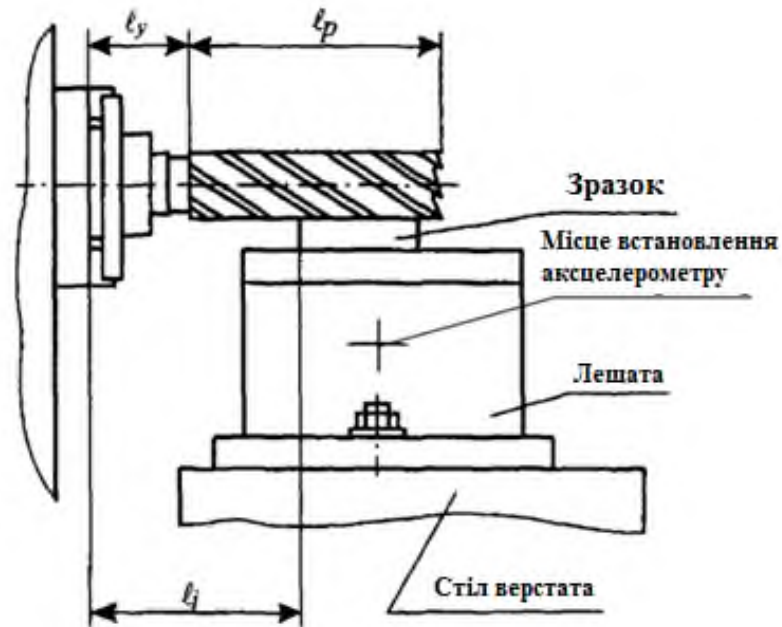


Рисунок 2.5 - Схема установки кінцевої фрези відносно заготовки [9]

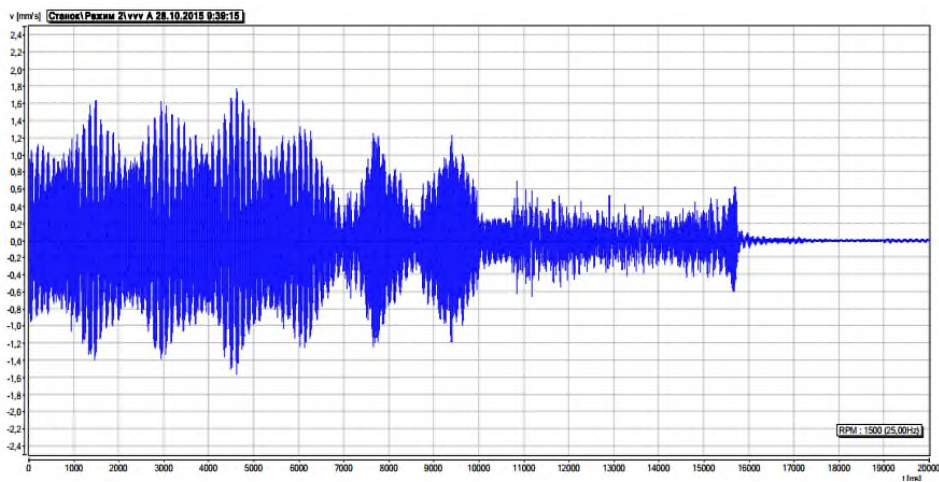
У роботі [20] було розроблено математичний опис компонентів вібрації при кінцевому фрезеруванні портативним обладнанням, що дозволяє визначити необхідну віброшвидкість демпфера для конкретних умов обробки. Аналіз експерименту проводився за допомогою даних розподілу гармонік, які представлено на рис. 2.6.

Також було розроблено конструкцію демпфуючого пристрою і запропонований алгоритм його налаштування, який дозволяє вести обробку кінцевим інструментом на більш продуктивних режимах або обробляти більш міцні матеріали. Крім того була розроблена методика демпфування, що дозволяє підвищити на 25% продуктивність обробки кінцевим інструментом за рахунок зниження загального рівня коливань технологічної системи малої жорсткості і застосування більш продуктивних режимів обробки.

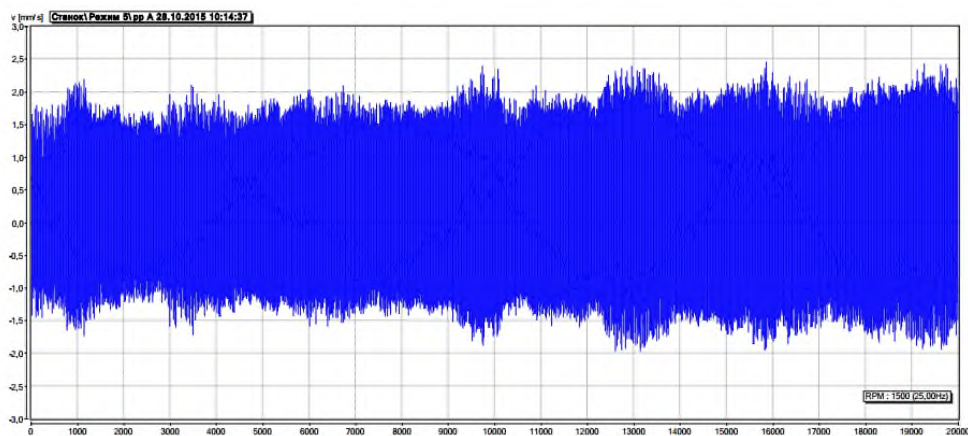
У роботі [7] було досліджено питання взаємозв'язку вібрацій лопатки ГТД і шорсткості обробленої поверхні при фрезеруванні ТЕ. Для оцінки залежності між амплітудно-частотними характеристиками і показниками шорсткості обробленої поверхні проводилася вібродіагностика процесу

фрезерування. Зовнішній вигляд пера лопатки ГТД і траєкторія руху інструменту при чистовій обробці показані на рис. 2.7.

$n = 7800 \text{ хв}^{-1}, S = 200 \text{ мм/хв}$, частота піку 134,63 Гц



$n = 6000 \text{ хв}^{-1}, S = 100 \text{ мм/хв}$, частота піку 99,38 Гц



$n = 20000 \text{ хв}^{-1}, S = 2000 \text{ мм/хв}$, частота піку 337 Гц

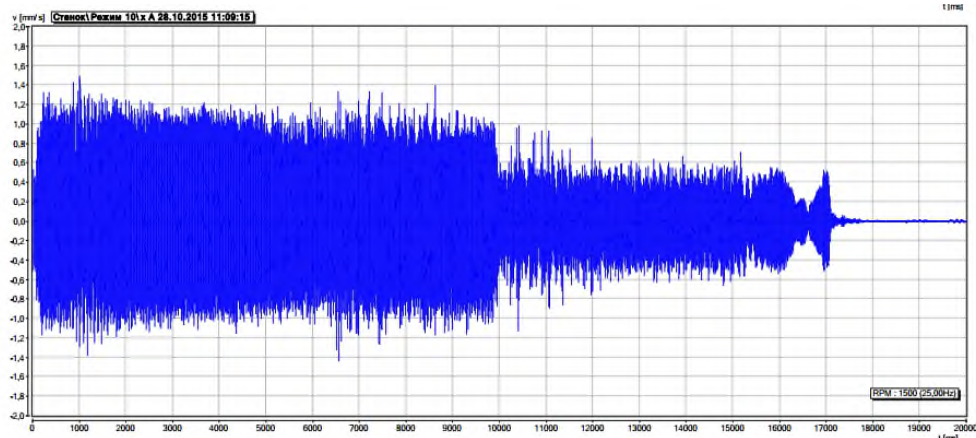


Рисунок 2.6 - Форма хвилі вібрації системи в напрямку осі z для різних режимів обробки [20]



а)



б)

Рисунок 2.7 - Зовнішній вигляд пера лопатки ГТД і траєкторія руху інструмента (а - перо лопатки, б - траєкторія руху інструмента) [7]

В якості датчиків вимірювання вібрації застосовувалися віброперетворювачі марки AP2019, які встановлювалися на фланці шпинделя, уздовж вісей системи координат верстата (рис. 2.8), а в якості інструменту використовувалася кінцева фреза 2F340-1000-200-SC 1745 Sandvik Coromant (рис. 2.9).

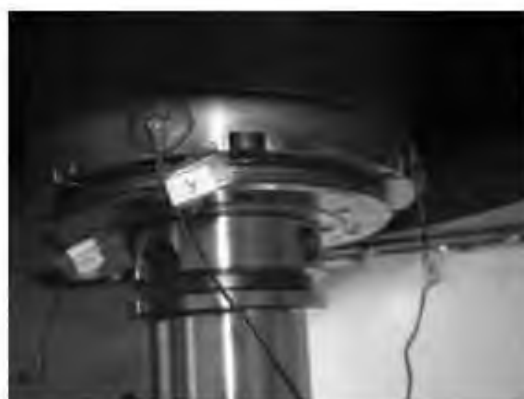


Рисунок 2.8 - Встановлення датчиків марки AP2019 [7]



Рисунок 2.9 - Зовнішній вигляд кінцевої фрези 2F340-1000-200-SC 1745
Sandvik Coromant [7]

За результатами експерименту було встановлено непряний взаємозв'язок амплітуди вібропереміщень і якості обробленої поверхні, а також розроблена методика контролю вібраційних характеристик при обробці фрезеруванням, яка в подальшому може застосовуватися для створення адаптивних систем управління верстатним устаткуванням. [7]

Автор праці [36] при вивченні впливу умов різання на динамічні силові фактори і процеси демпфування при фрезеруванні, застосовував спеціальний пристрій для закріплення зразка, що обробляється, (рис. 2.10), яке дозволяє деталі здійснювати коливальні рухи в напрямку її мінімальної жорсткості. Автор розглядає коливальну систему з одним ступенем свободи. Використовувана кінцева фреза значного діаметра приймається як умовно жорсткий інструмент.

На отриманих осцилограмах відхилень деталі (рис. 2.11), при частоті обертання шпинделя $n = 420$ об/хв добре помітні хвилі, що виникають в результаті появи автоколивань. Зі збільшенням частоти обертання до $n = 840$ об/хв автоколивання вироджуються, проте з'являються, істотні за величиною, вільні коливання після виходу зуба фрези з-під стружки [18, 36].

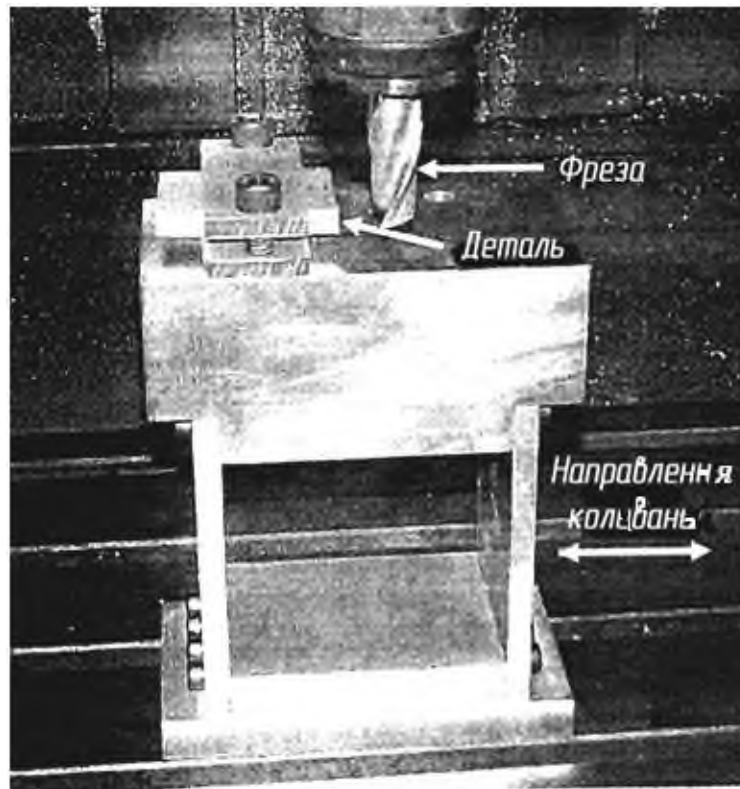


Рисунок 2.10 - Пристрій для дослідження коливань при кінцевому фрезеруванні [36]

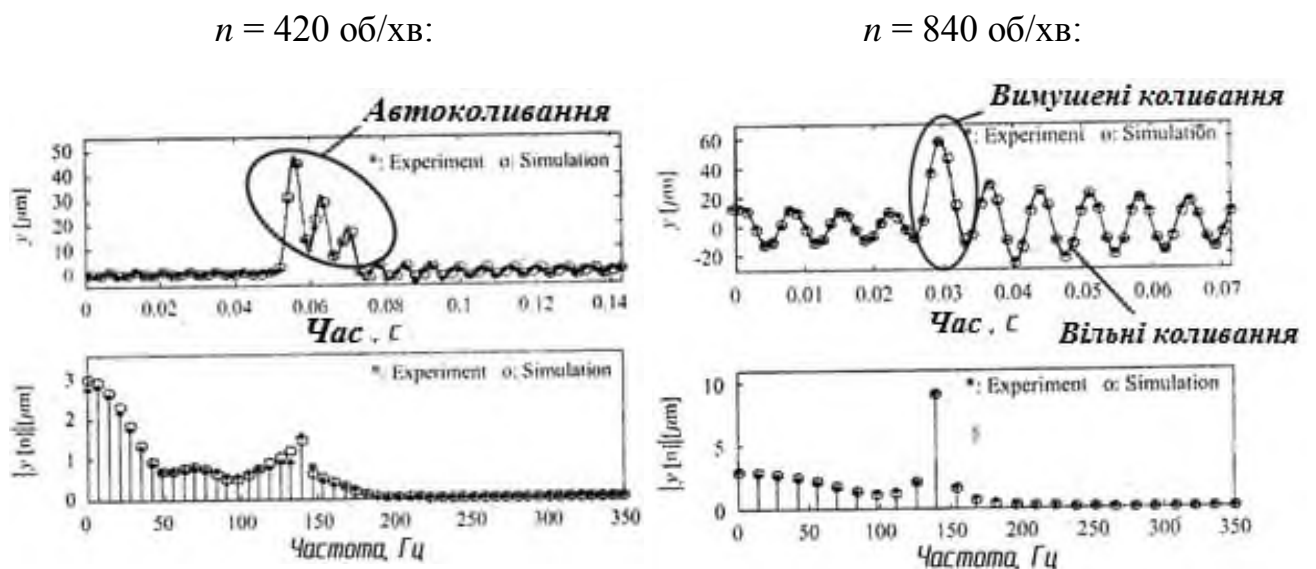


Рисунок. 2.11 - Порівняння експериментальних і розрахункових результатів при дослідженні вібрацій і АЧХ деталі [36]

Подібну систему вимірювання коливань при кінцевому фрезеруванні застосував Ahmad Yusoff у PhD роботі (рис. 2.12) [40].



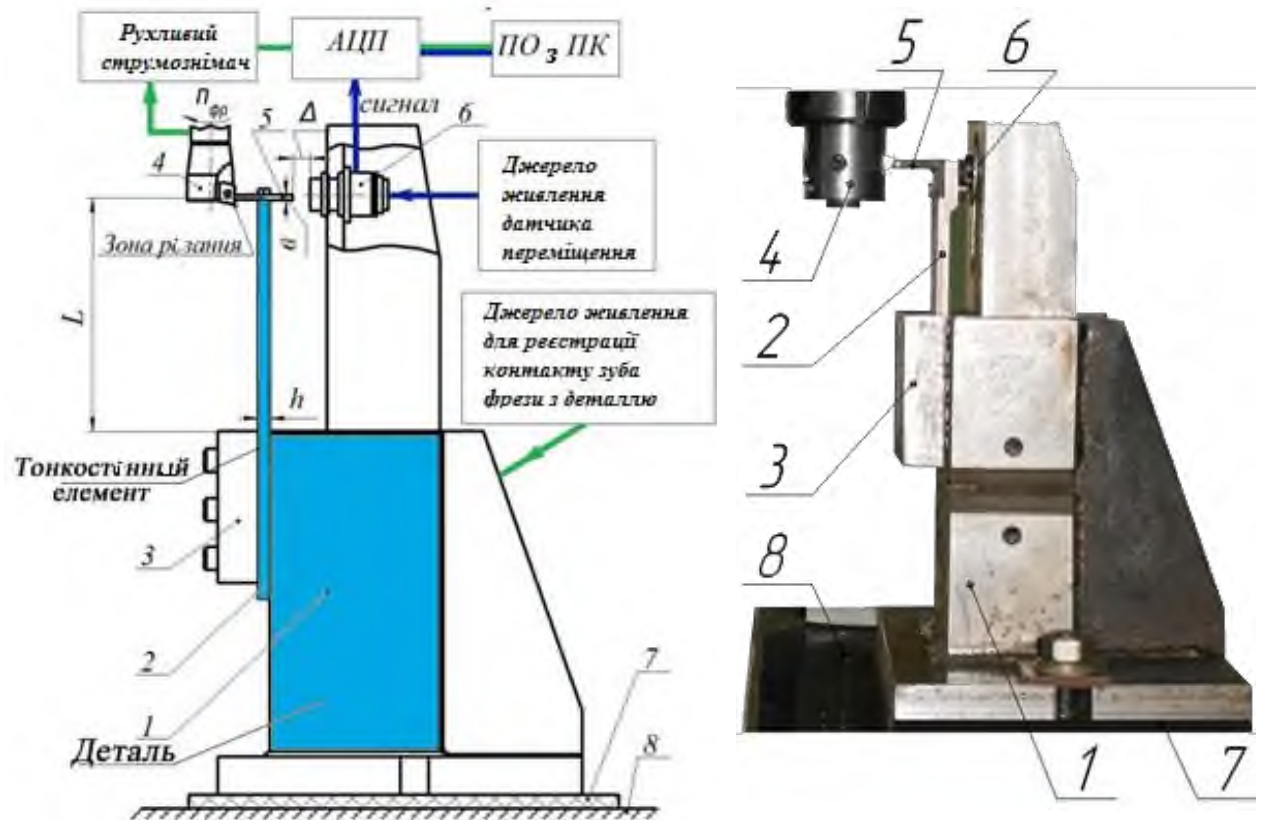
Рисунок 2.12 - Експериментальна установка для дослідження коливань при кінцевому фрезеруванні [40]

Основний недолік пристроїв для вимірювання вібрацій, які були розглянуті вище, це неможливість зміни їх динамічних характеристик (жорсткість, характеристики демпфування, маси і частоти власних коливань).

У науковій праці [18] було розроблено ряд спеціальних стендів, що дозволяють вивчати закон руху тонкостінного елемента під дією всіх видів сил [25, 26]:

Принципову схему експериментального стенду представлено на рис. 2.13. Стенд складається з масивної основи - 1, встановленої на столі фрезерного верстата - 8, через ізолятор - 7. Тонкостінна пластина - 2 жорстко кріпиться до основи - 1 притискачем - 3.

На торці пластини - 2 жорстко закріплено зразок з оброблюваного матеріалу - 5, який обробляють кінцевою фрезою - 4. В процесі фрезерування, під дією сили віджиму з боку фрези, тонкостінна пластина - 2 пружно згинається і змінює величину зазору Δ . Зміну величини зазору - Δ вимірюють датчиком переміщення - 6 (індуктивний проксиметр (XS1M18AB120)). Сигнал датчика оцифровує за допомогою АЦП Е-140 фірми L-Card, запам'ятовують і записують, використовуючи ПЗ і ПК.



1 - масивна основа; 2 - тонкостінна пластина; 3 - притиск; 4 - кінцева фреза; 5 - зразок з оброблюваного матеріалу; 6 - датчик переміщення; 7 - електроізолятор; 8 - стіл фрезерного верстата

Рисунок 2.13 - Загальна схема і фото стенду для дослідження вібрацій при кінцевому фрезеруванні тонкостінного елемента деталі [18]

Основною особливістю даного вимірювального стенду є можливість не тільки записувати осцилограми відхилення деталі, що обробляється, а й фіксувати час безпосереднього контакту зуба фрези з деталлю. Це дає можливість визначати час контакту зуба фрези з деталлю, час відсутності цього контакту, а також розрив контакту при обробці [18].

Отриману осцилограму поділяли на базові фрагменти (рис. 2.14), які дозволяють отримати дані для оцінки динамічних умов в зоні різання.

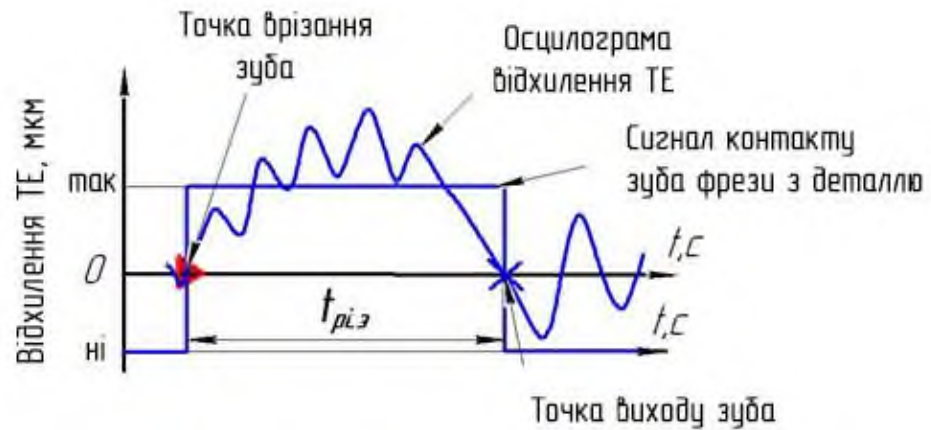


Рисунок 2.14 - Базовий фрагмент осцилограми

Отже, записана експериментально осцилограма і її фрагмент дозволяє отримати 12 параметрів коливання ТЕ і оцінити рівень вібрацій при фрезеруванні [18, 28]. Схему вимірювання параметрів коливання ТЕ показано на рис. 2.15.

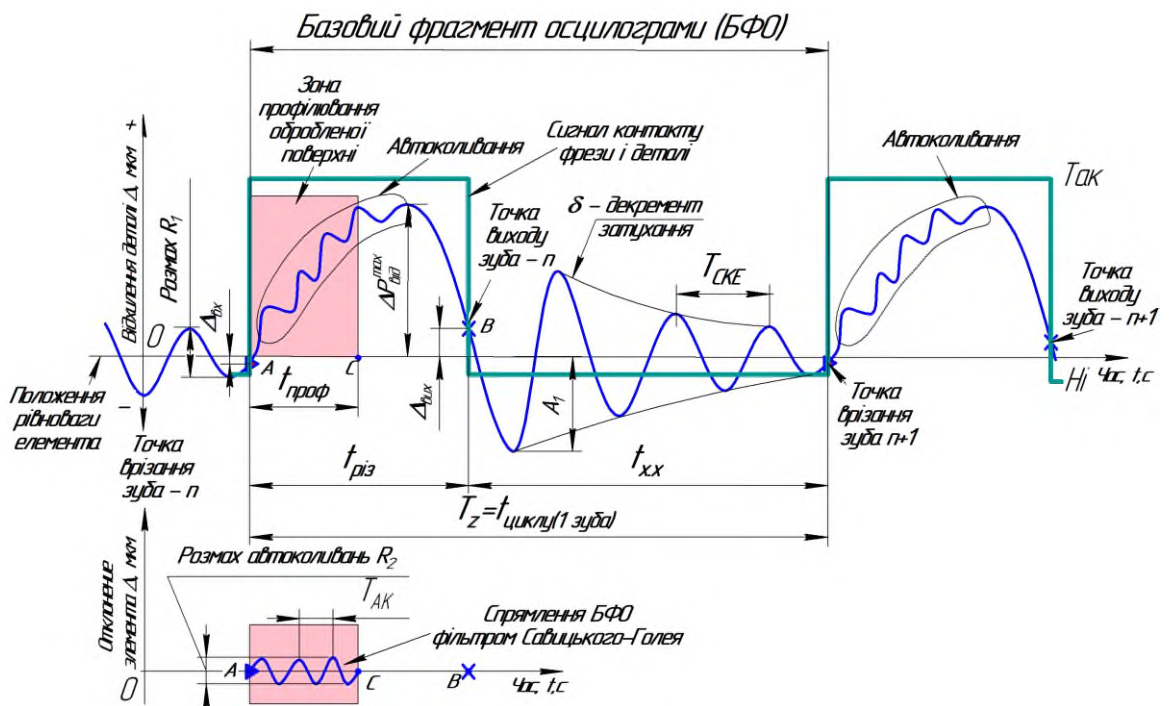


Рисунок 2.15 - Схема вимірювання 12 параметрів коливання ТЕ на БФО

Так, розмах вільних згасаючих коливань ТЕ перед врізанням зуба фрези в припуск - R_1 характеризує рівень збудження пружної системи ТЕ перед врізанням чергового зуба фрези. При високошвидкісному фрезеруванні показує діапазон відхилення деталі від положення рівноваги в момент врізання зуба фрези.

Точка А врізання зуба фрези - Δ визначає величину відхилення точки врізання фрези від положення рівноваги. Точки врізання і виходу фрези із зони різання накладають на всю осцилограму, визначаючи тим самим закономірності їх коливань. За рівнем коливання точки врізання можливо проводити регулювання частоти обертання фрези для високошвидкісної обробки при визначенні вібростійких умов фрезерування.

Розмах автоколивань ТЕ в зоні профілювання - R_2 характеризує рівень регенеративних автоколивань, які визначають якість профілю обробленої поверхні.

Частота автоколивань в процесі зрізання припуску зубом фрези ($f_{AK} = \frac{1}{T_{AK}}$, Гц) визначається шляхом вимірювання середнього значення періоду регенеративних автоколивань під час різання $t_{piz} - T_{AK}$.

Зубцева частота ($f_z = \frac{1}{T_z}$, Гц) визначається шляхом вимірювання середнього значення періоду зубцевої частоти - T_z (це час між двома врізаннями сусідніх зубів).

Час різання одним зубом фрези - t_{piz} визначає час зрізання припуску одним зубом (цей час між входом і виходом зуба фрези з припуску, що зрізається).

Час холостого ходу - $t_{x.x}$ визначається шляхом вирахування часу різання t_{piz} з періоду зубцевої частоти T_z (це час між точкою виходу з припуску, що зрізається, попереднього зуба і точкою врізання подальшого зуба).

Максимальне відхилення ТЕ в результаті впливу змушуючої сили відштовхування $\Delta P_{від}^{max}$ визначає максимальне відхилення ТЕ від положення рівноваги в період різання одним зубом.

Точка В виходу зуба фрези $\Delta_{\text{вих}}$ визначає величину відхилення точки виходу зуба фрези від положення рівноваги. Використовують при визначенні часу різання, а також точки початку зони профілювання при попутному фрезеруванні, при визначенні параметра розмаху автоколиваний ТЕ - R_2 .

Амплітуда першої хвилі вільних згасаючих коливань ТЕ A_1 характеризує величину енергії збудження ТЕ після виходу зуба фрези із зони різання. Величину A_1 використовують при розрахунку логарифмічного декременту - δ .

Частота вільних згасаючих коливань ТЕ ($f_{BKE} = \frac{1}{T_{BKE}}$, Гц) визначається шляхом вимірювання середнього значення періоду власних коливань ТЕ - T_{BKE} , с. T_{BKE} характеризує основну динамічну властивість пружної системи ТЕ, що залежить від жорсткості, маси, демпфірування і розмірів ТЕ.

Логарифмічний декремент вільних згасаючих коливань ТЕ δ характеризує інтенсивність дисипації коливальної енергії в пружній системі ТЕ.

Отже, дана методика проведення експериментів і оцінки отриманих результатів дозволяє в повній мірі оцінити всі необхідні параметри процесів, що відбуваються в зоні різання в умовах виникнення автоколивань.

2.3 Опис конструкції експериментальної фрези

Для проведення експериментів використовували спеціальну фрезу [27]. На рис. 2.16 показано її загальний вигляд.

Конструкція цієї фрези передбачає установку в корпус від 1 до 4 різальних зуба, оберт зуба на різний кут і виконання заточування різних елементів різальної частини зуба, зокрема, стрічки на задній поверхні.

Так, заточку зуба фрези і стрічки на задній поверхні виконували за методикою, що описана в роботі [18]. Пристосування для заточування показано на рис. 2.17.



Рисунок 2.16 - Зовнішній вигляд експериментальної фрези [27]



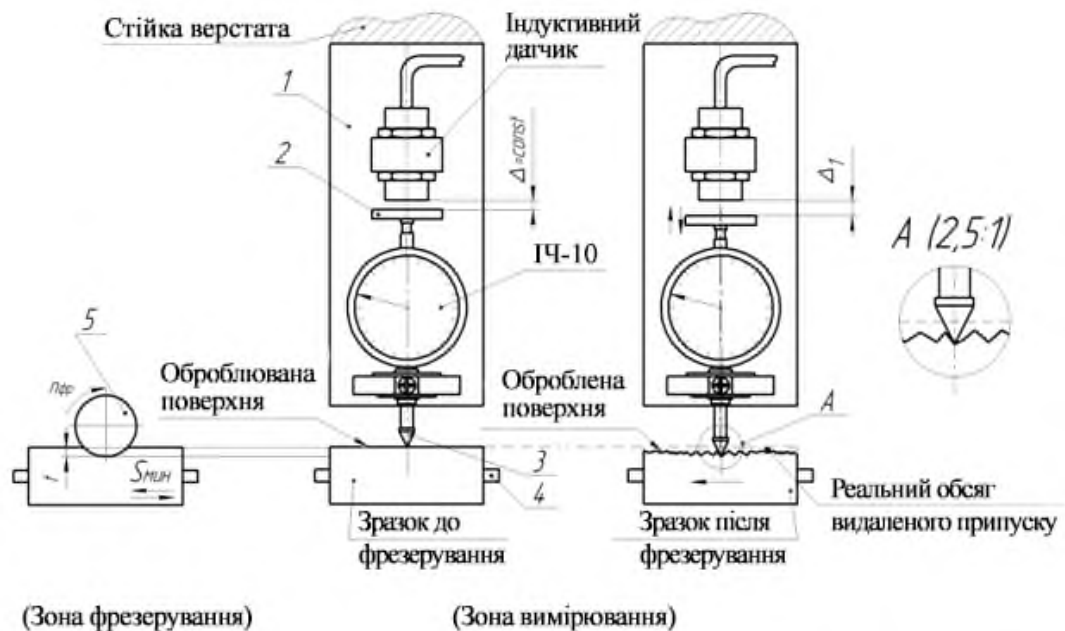
Рисунок 2.17 - Пристосування для заточування різальної кромки зуба експериментальної фрези [18]

Радіальне биття після заточки складало 0,005 мм.

2.4 Методика дослідження ефективності видалення припуску і якості обробленої поверхні

Для дослідження ефективності видалення припуску і якості обробленої поверхні була використана методика, яка описана в роботі [29].

Схему пристрою показано на рис. 2.18. Основу пристрою 1 закріплено на вертикальній стійці фрезерного верстата. На основі 1 жорстко закріплено індикаторний годинник (ІЧ-10) з наконечником 3 (радіус наконечника $r = 0,05$ мм) для контакту з поверхнею, що обробляється та обробленою поверхнею є п'ятка 2. Індуктивний датчик жорстко закріплено на основі 1 і дає змогу записувати профіль обробленої поверхні зразка [29].



1 - основа пристрою; 2 - п'ятка; 3 - накінецьник; 4 - ПС тонкостінної деталі (пластина); 5 - фреза; t - припуск на обробку

Рисунок 2.18 - Схема пристрою для вимірювання видаленого припуску і профілю обробленої поверхні [29]

Зазначена методика дає можливість оцінити теоретичну - Q_T і фактичну - Q_F продуктивність обробки, що дуже важливо для оцінки ефективності технологічних методів, що застосовуються.

Крім того, конструкція даного пристрою дозволяє записати профілограми поверхні зразка до і після обробки, що дає можливість оцінити якість обробленої поверхні.

2.5 Загальні умови проведення експериментів

Для проведення експериментів використовували описаний вище стенд. Фрезерування виконували на фрезерному верстаті моделі FWD-32J.

Режими обробки:

- припуск на обробку (радіальна глибина) $a_e = t = 0,5$ мм;
- подача на зуб $S_z = 0,1$ мм/зуб;
- число обертів фрези $n = 140 \div 280$ об/мин;
- величина осьової глибини (ширина зразка) $a_p = 4$ мм.

Зразок для проведення експериментів зображено на рис. 2.19.

Матеріал зразка - Ст.3 ГОСТ380-2005.

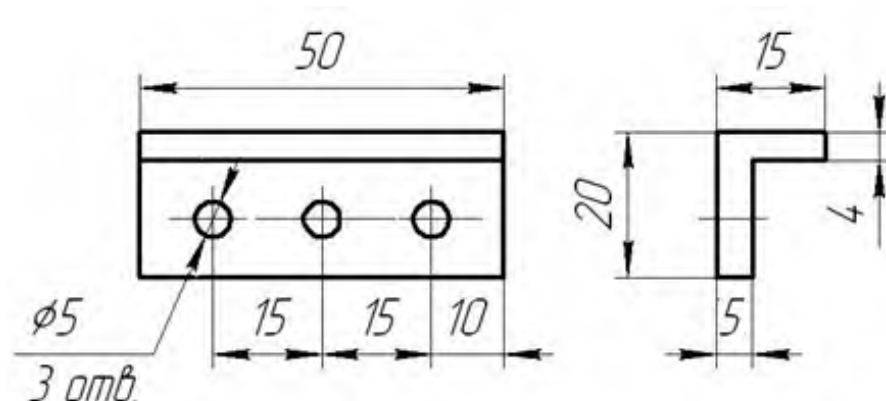


Рисунок 2.19 - Зразок для експериментальних досліджень

Зразок закріплювали на тонкостінній пластині, що імітує ТЕ.

Матеріал пластини - Сталь 65Г.

Розміри пластини:

- висота вильоту - $L = 80$ мм;
- ширина - $H = 60$ мм;
- товщина - $h = 6$ мм;
- жорсткість - $j = 800$ Н/мм;
- частота власних коливань - $f_{вке} = 450$ Гц;
- період власних коливань - $T_{вке} = 0,0022$ с;
- логарифмічний декремент вільних згасаючих коливань, $\delta = 0,14$.

Як інструмент застосовували експериментальну фрезу.

Характеристики експериментальної фрези [18]:

- діаметр фрези - $d_{фр} = 55$ мм;
- матеріал різальної частини - твердий сплав ВК8;
- кількість зубів $z = 1$;
- кут нахилу різальної кромки $\omega = 0^\circ$;
- маса виступаючої частини, $m = 0,59$ кг;
- жорсткість, $j = 20000$ Н/мм;
- частота власних коливань, $f_{ВКЕ} - 830$ Гц;
- період власних коливань, $T_{ВКЕ} - 0,0012$ с;
- логарифмічний декремент вільних згасаючих коливань, $\delta = 0,23$.

Характеристики інструменту і деталі різні, тому розглядається умова, в якому коливальна система використовується з одним ступенем свободи, тобто основною ланкою є ТЕ.

2.6 Висновки

1. Розглянуто поняття ТЕ і показана принципова схема його обробки. Було виявлено, що при обробці ТЕ, внаслідок періодичної нестійкості системи ВПД, виникають коливання з певною амплітудою, які називаються автоколиваннями.

2. Проведено аналіз сучасних методик дослідження вібрацій при фрезеруванні, завдяки чому було визначено основний пристрій для дослідження механічних коливань при фрезеруванні тонкостінних деталей і методика, за якою в подальшому будуть проводитися експерименти.

3. Було описано обрану методику експериментальних досліджень вібрацій ТЕ при кінцевому фрезеруванні і розглянуто параметри оцінки коливань ТЕ за БФО.

4. Описано конструкцію експериментальної кінцевий циліндричної фрези, її налаштування та заточування.

5. Визначено умови проведення експериментів.

РОЗДІЛ 3

ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКІСНОЇ ЗОНИ ЯК ЗОНИ ВИНИКНЕННЯ РЕГЕНЕРАТИВНИХ АВТОКОЛИВАНЬ

У науковій роботі [18] проводилось дослідження впливу частоти обертання фрези на умови збудження коливань ТЕ при зустрічному і попутному фрезеруванні на підставі аналізу БФО. Було встановлено, що в діапазоні частот обертання фрези (від 56 до 1800 об/хв) спостерігається чотири зони з різними механізмами збудження коливань ТЕ.

При цьому, за даними роботи [18], у III швидкісній зоні на осцилограмі відхилення ТЕ з'являються регенеративні автоколивання. Вони виникають при різанні за попереднім вібраційним слідом.

За результатами досліджень авторами [18] введено поняття ВС, що дорівнює відношенню часу різання - t_{piz} до періоду власних коливань ПС ТЕ - T_{BKE} (3.1):

$$BC = \frac{t_{piz}}{T_{BKE}}, \quad (3.1)$$

Величина ВС дозволяє кількісно визначати швидкісні зони для всіх випадків фрезерування. Так, у III швидкісній зоні виникають вимушені коливання із зубцевою частотою $f_z = \frac{1}{T_z}$, регенеративні автоколивання з частотою $f_{AK} = \frac{1}{T_{AK}}$ і вільні затухаючі коливання з частотою власних коливань ТЕ $f_{BKE} = \frac{1}{T_{BKE}}$. Визначальне співвідношення для цієї зони знаходиться в діапазоні: $1 > BC \geq 7$ [18].

На рис. 3.1 приведена схема БФО для III швидкісної зони, на якій показані всі види коливань ТЕ в часовому масштабі (вимушені, автоколивання і вільні затухаючі коливання).

Отже, під час різання t_{piz} на ТЕ буде діяти змушуюча сила відштовхування $P_{від}$, а під час холостого ходу $t_{х.х}$ ТЕ буде здійснювати вільні затухаючі коливання з періодом $T_{ВКЕ}$. Регенеративні автоколивання можуть впливати на пружну систему тільки під час різання t_{piz} , тобто накладатися на вимушені відхилення ТЕ з періодом $T_{АК}$.

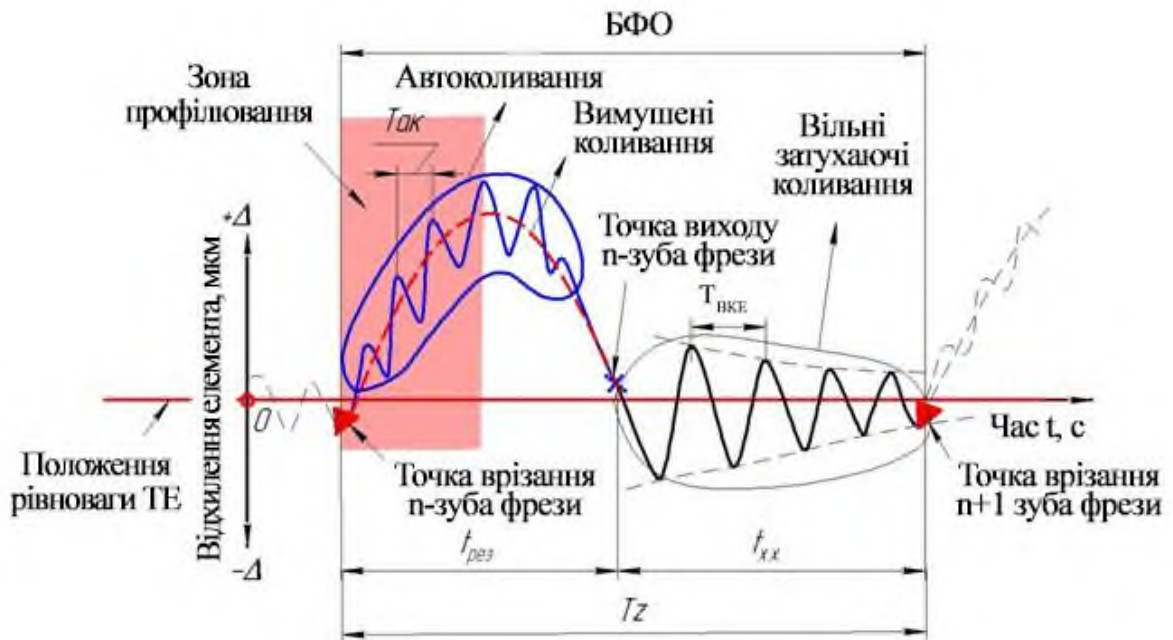


Рисунок 3.1 - Схема БФО для III швидкісної зони фрезерування ТЕ (зустрічне фрезерування) [18]:

t_{piz} - час різання, с, $t_{х.х}$ - час холостого ходу, с, T_z - період зубцевої частоти, с, $T_{ВКЕ}$ - період власних коливань ТЕ, с, $T_{АК}$ - період автоколивань

Унаслідок цього, одним з основних параметрів фрезерної обробки, яка визначає умови збудження вимушених коливань, а також поява і розвиток автоколивань є зубцева частота - f_z . Вона безпосередньо пов'язана з частотою обертання фрези - n і кількістю зубів фрези - z (3.2) [18]:

$$f_z = \frac{n \cdot z}{60} = \frac{1}{T_z} = \frac{1}{t_{piz} + t_{х.х}}, \quad (3.2)$$

3.1 Аналіз проведених експериментів

Виходячи з описаної вище інформації, дослідження по вивченню автоколивальних процесів під час різання проводилося в III швидкісній зоні.

Були вибрані частоти обертання фрези $n = 140$ об/хв, 180 об/хв, 224 об/хв, 280 об/хв, які відносяться до III швидкісної зони.

На рис. 3.2 показані БФО, що отримані при обробці експериментальною фрезою, у якій ширина стрічки на задній поверхні зуба складала $f_c = 0$ мм. Експеримент проводився при різних напрямках подачі.

Отримані після фрезерування БФО були проаналізовані за методикою [18].

Аналіз отриманих БФО дозволяє відзначити, що зі збільшенням частоти обертання фрези спостерігається збільшення інтенсивності автоколивань. Так, при частоті обертання $n = 140$ об/хв автоколивання тільки зароджуються. Далі їх інтенсивність стрімко збільшується. Ця тенденція властива як зустрічному, так і попутному напрямку подачі.

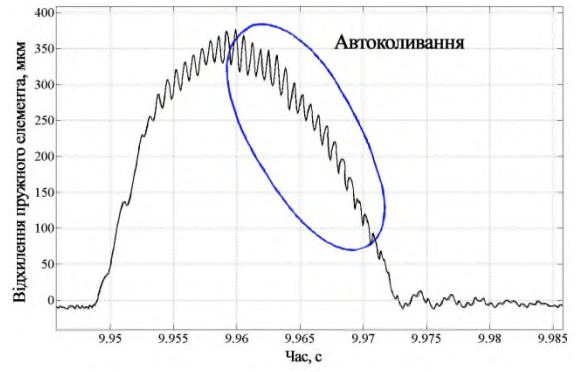
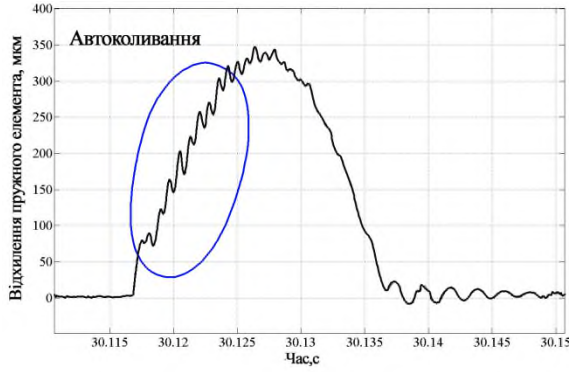
Найбільша інтенсивність спостерігається для частоти обертання фрези $n = 280$ об/хв.

Також за отриманими БФО оцінювали і рівень відхилення деталі від лінії пружної рівноваги. Максимальні значення отримані при $n = 140$ об/хв як при попутному, так і при зустрічному фрезеруванні. Далі цей параметр знижується.

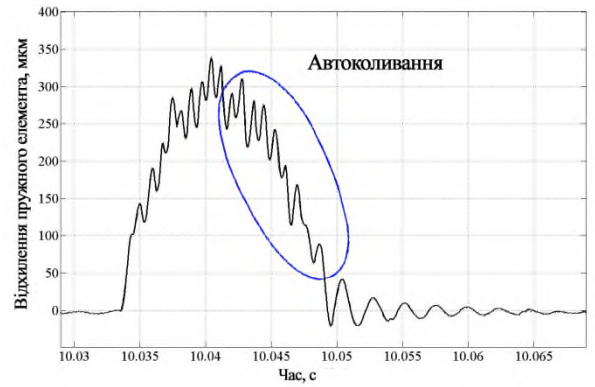
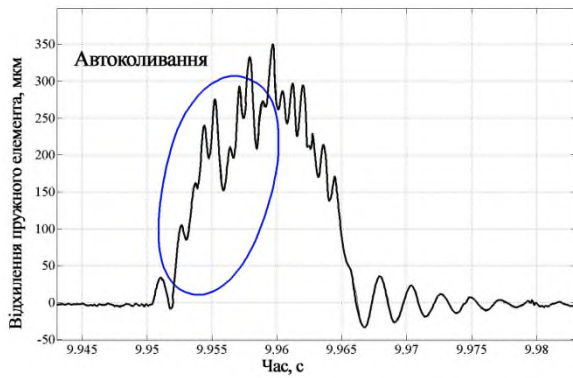
Зустрічне фрезерування

Попутне фрезерування

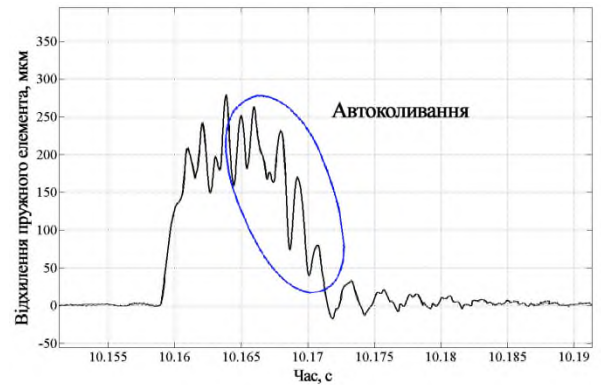
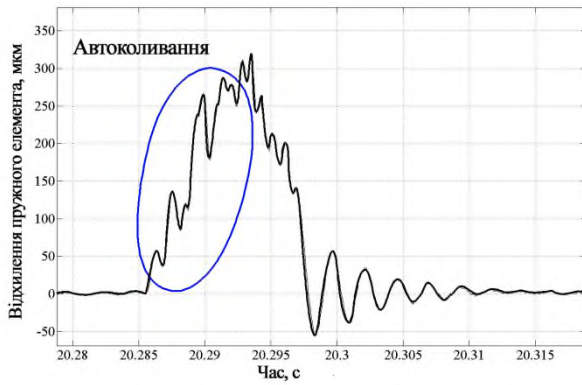
$n_{об} = 140 \text{ об/хв}$



$n_{об} = 180 \text{ об/хв}$



$n_{об} = 224 \text{ об/хв}$



$n_{об} = 280 \text{ об/хв}$

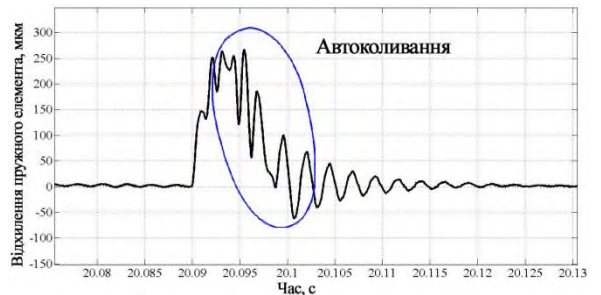
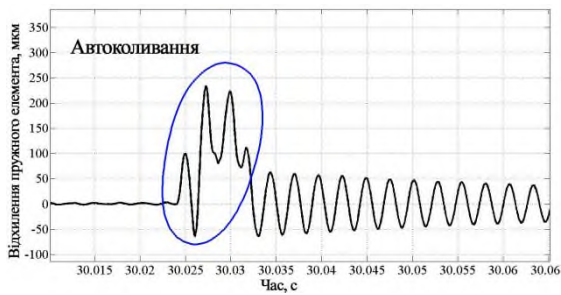


Рисунок 3.2 - Базові фрагменти осцилограм

Після обробки за допомогою спеціального пристрою [26] були записані профілограми оброблених поверхонь.

На рис. 3.3 показані фрагменти профілограм і зображення оброблених поверхонь після фрезерування при $n = 140 \div 280$ об/хв при ширині стрічки $f_c = 0$ мм.

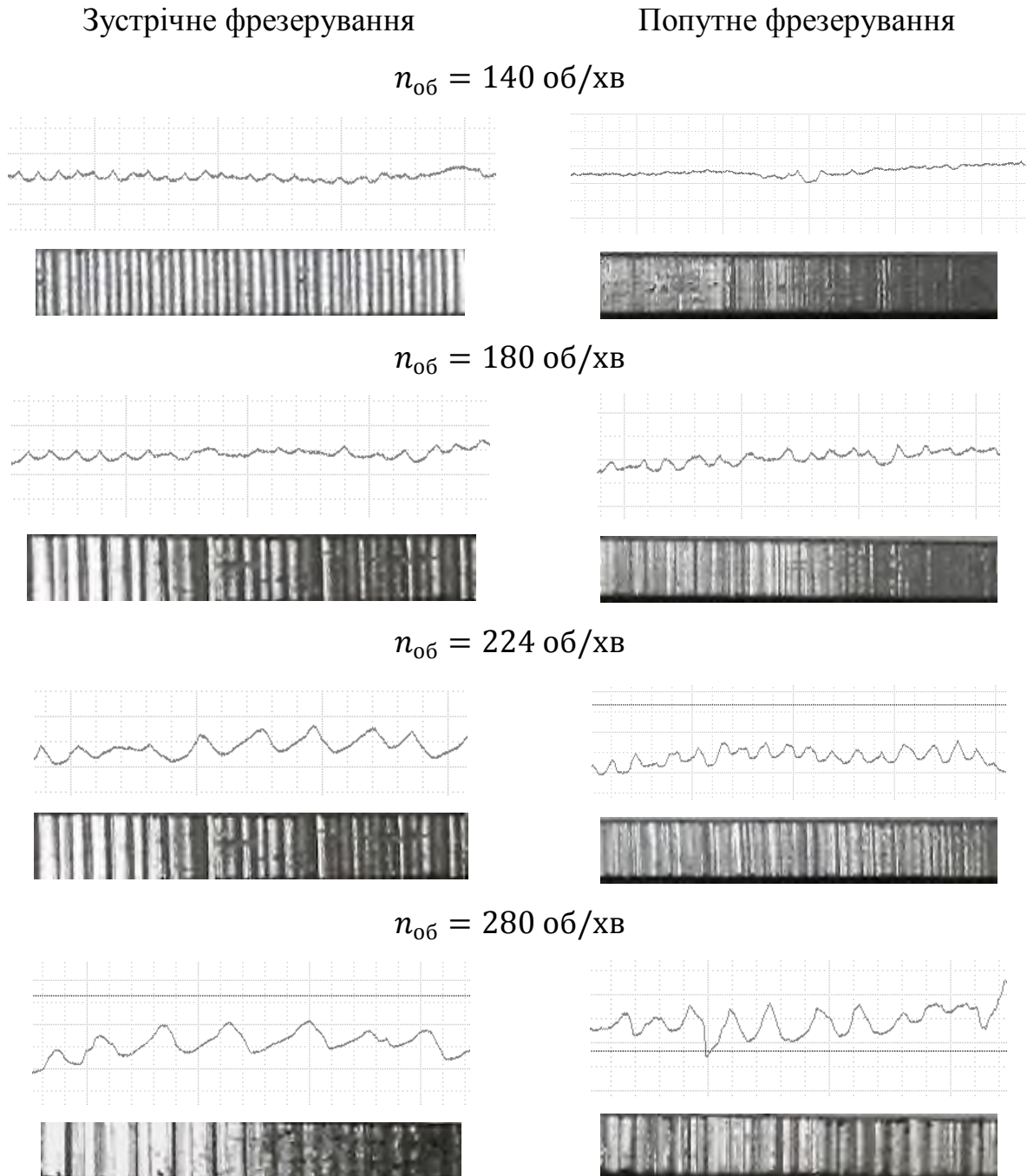
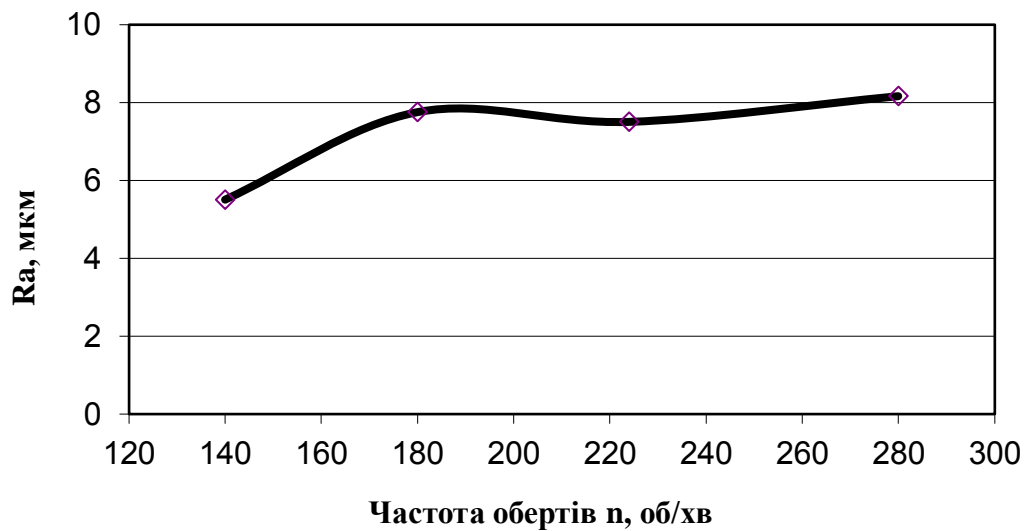


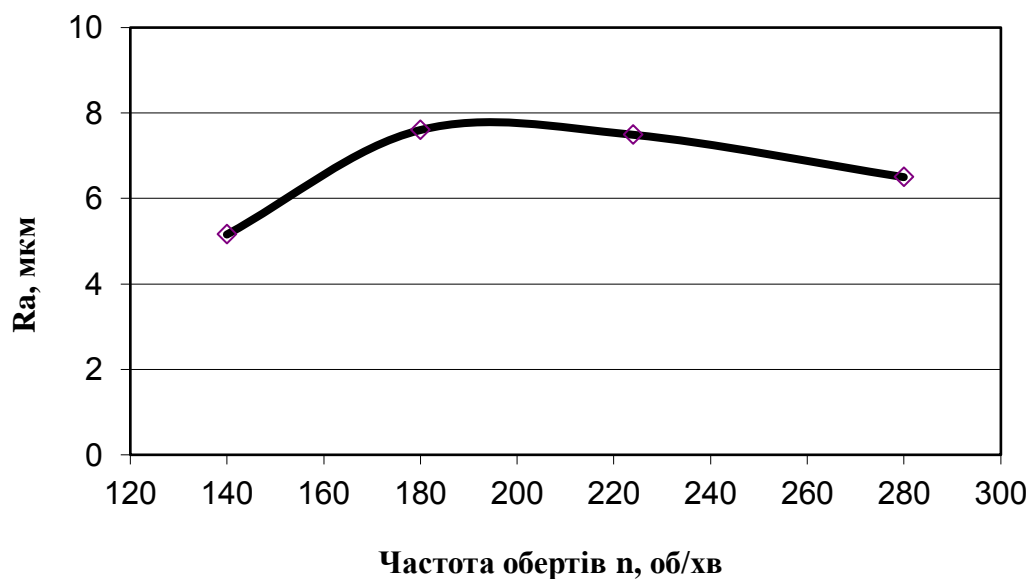
Рисунок 3.3 - Фрагменти профілограм і зображення обробленої поверхні

Аналіз отриманих профілограм дозволяє зробити висновок про те, що зі збільшенням частоти обертання фрези погіршується профіль обробленої поверхні. На ній спостерігаються хвилястість і відхилення профілю, які підтверджені зображеннями цих поверхонь.

За отриманими профілограмами оцінювали шорсткість обробленої поверхні. На рис. 3.4 показано отримані залежності при зустрічному і попутному фрезеруванні.



а)



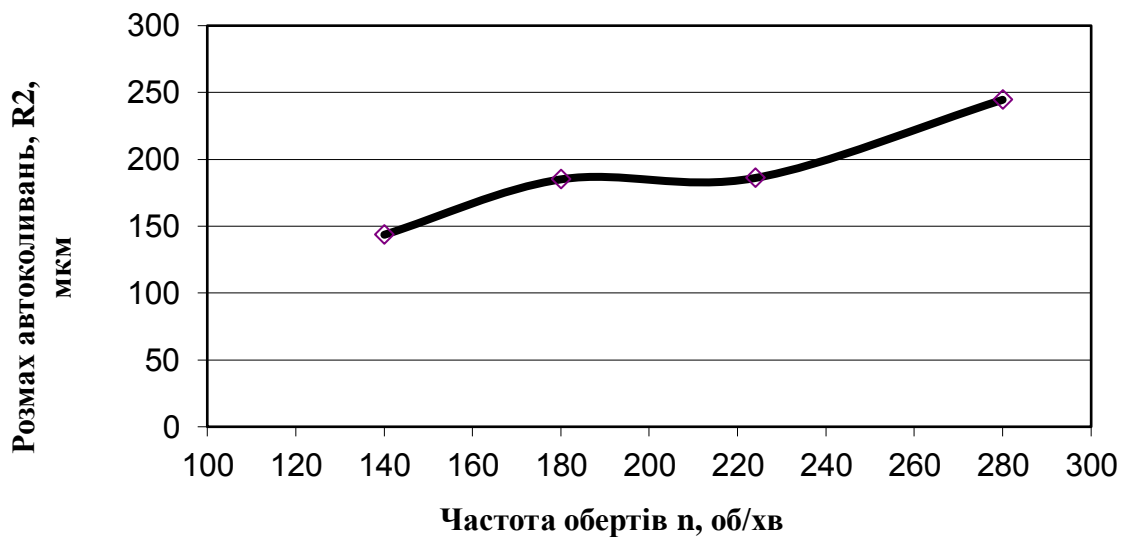
б)

Рисунок 3.4 - Шорсткість R_a обробленої поверхні (а - зустрічне фрезерування, б - попутне фрезерування)

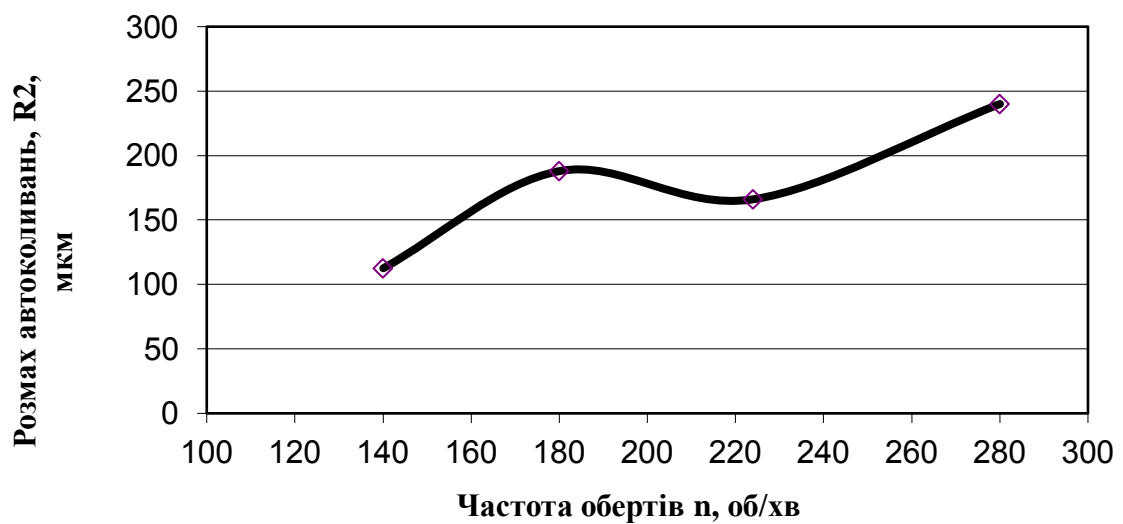
З графіків видно, що найгірша якість обробленої поверхні спостерігається при $n = 280$ об/хв при зустрічному фрезеруванні і при $n = 224$ об/хв при попутному.

Погіршення цього параметра доводить наявність автоколивального процесу в зоні різання.

На рис. 3.5 показано розмах автоколивань R_2 в залежності від частоти обертання фрези при зустрічному і попутному фрезеруванні при ширині стрічки $f_c = 0$ мм.



а)



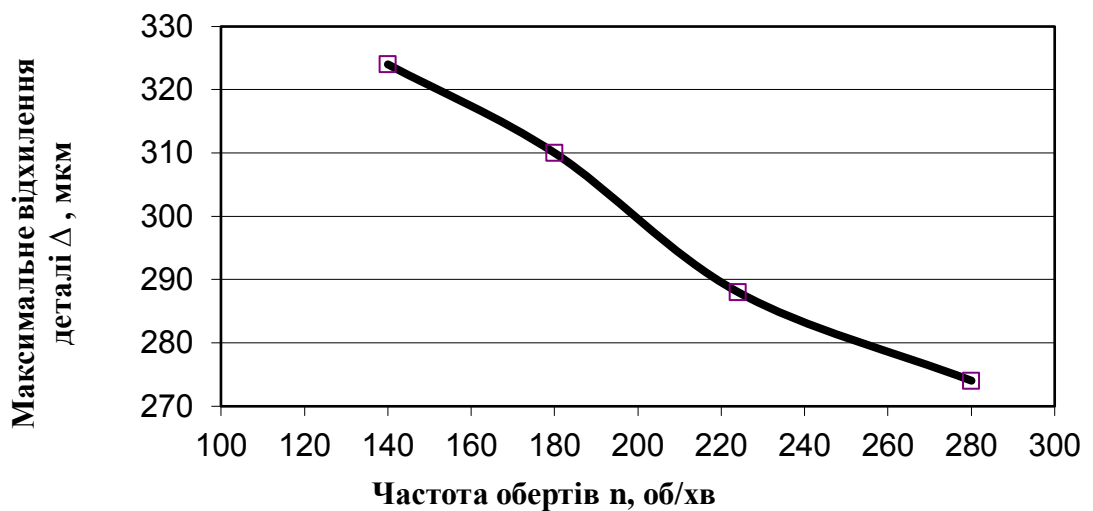
б)

Рисунок 3.5 - Величина розмаху автоколивань R_2 , мкм (а - зустрічне фрезерування, б - попутне фрезерування)

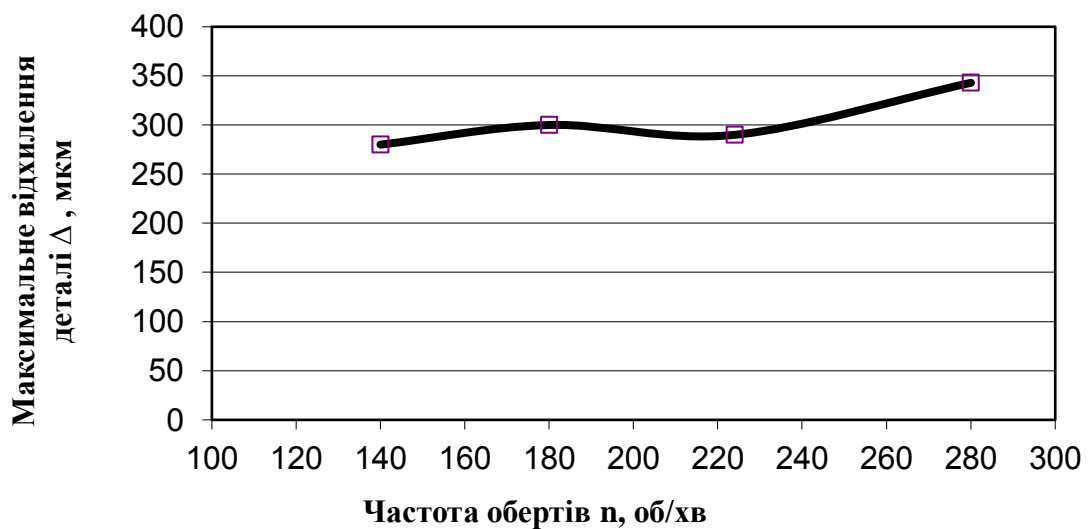
Отримані залежності дозволяють зробити висновок про те, що найбільші значення R_2 отримані при $n = 280$ об/хв, що ще раз доводить наявність автоколивального процесу і його зв'язок з параметром R_a [18].

Також проаналізовано рівень відхилення деталі від положення пружної рівноваги - Δ . Це вплив тієї самої сили віджиму $P_{від}$, що виникає в процесі обробки.

На рис. 3.6 показано отримані залежності ($f_c = 0$ мм).



а)



б)

Рисунок 3.6 - Відхилення ТЕ Δ , мкм (а - зустрічне фрезерування, б - попутне фрезерування)

При зустрічному фрезеруванні при частоті обертання фрези $n = 280$ об/хв спостерігається найменше значення відхилення деталі. У той час як при попутному фрезеруванні ці значення більш стабільні.

Автором роботи [29] запропонована методика визначення продуктивності обробки. Суть полягає у визначенні та порівнянні теоретичного і фактичного обсягу припуску, що знімається.

Так як тонкостінна деталь має невисоку жорсткість, вона відхиляється під дією сили різання, тому необхідно знати теоретичну і фактичну продуктивність обробки.

Теоретична продуктивність обробки - Q_T визначається за формулою (3.3) [29]:

$$Q_T = a_p \cdot a_e \cdot S_{xв}, \quad (3.3)$$

де a_p - осьова глибина (ширина зразка), мм;

a_e - радіальна глибина (припуск), мм;

$S_{xв}$ - хвилинна подача, мм/хв.

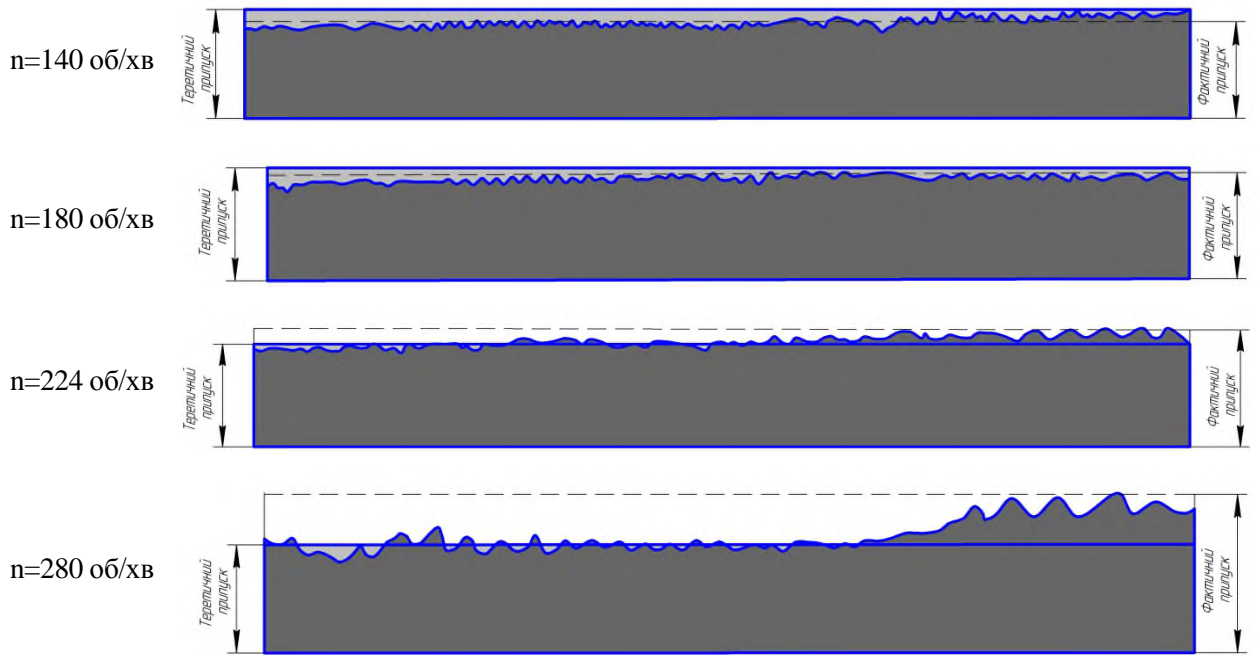
Фактичний об'єм припуску, що знімається - Q_Φ визначають з експериментальних даних.

Ефективність видалення припуску при фрезеруванні тонкостінної деталі визначають процентним співвідношенням (3.4) [29]:

$$E_\Phi = \frac{Q_\Phi \cdot 100}{Q_T}. \quad (3.4)$$

На основі експериментально отриманих профілів обробленої поверхні були побудовані графічні зображення (рис. 3.7) для визначення фактичного і теоретичного припуску при зустрічному і попутному фрезеруванні (діапазон частот обертання фрези $n = 140 \div 280$ обхв, $f_c = 0$ мм).

Зустрічне фрезерування



Попутне фрезерування

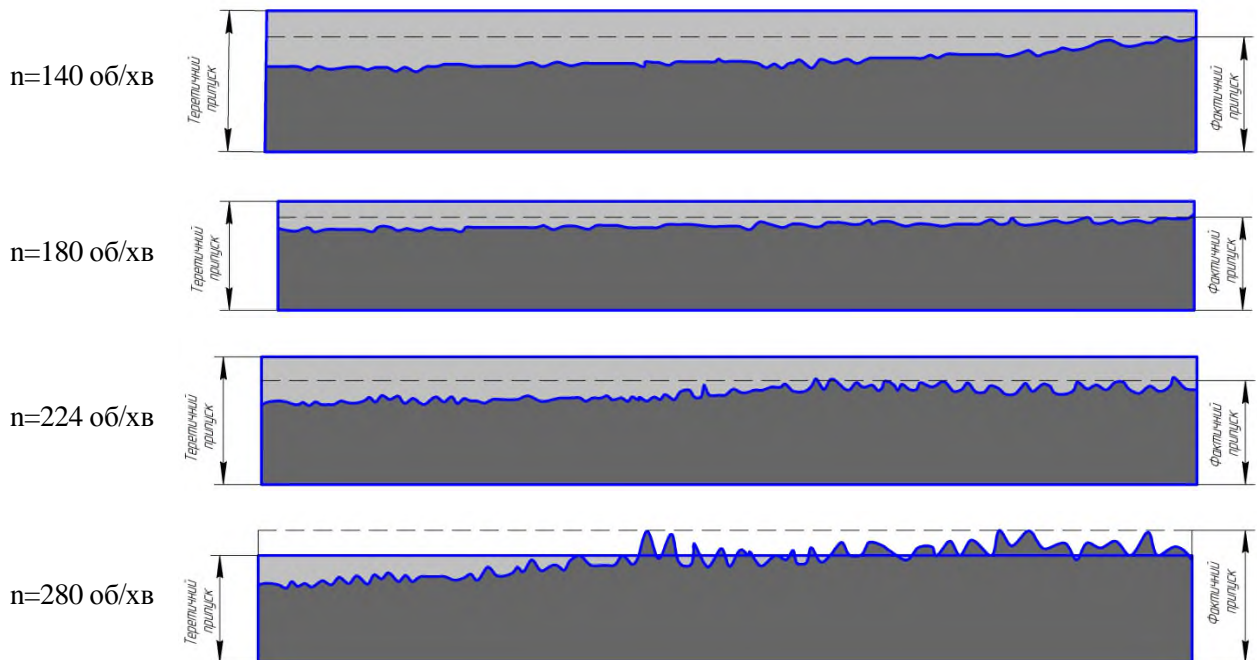
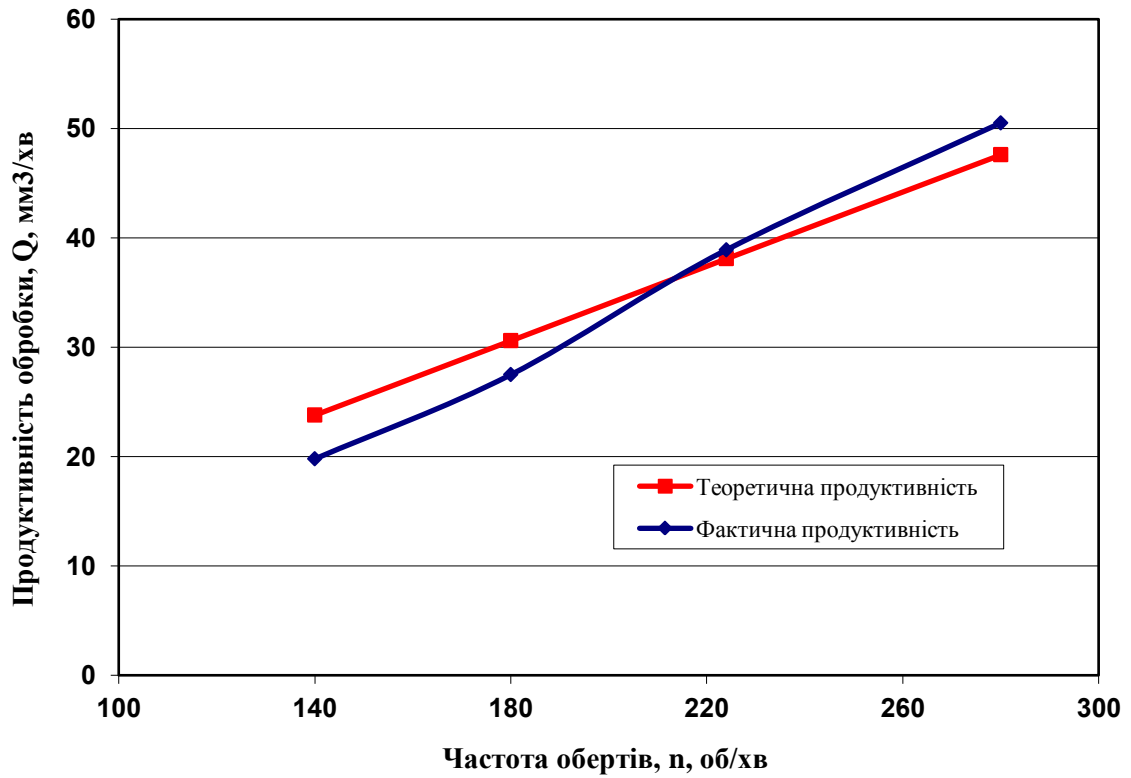
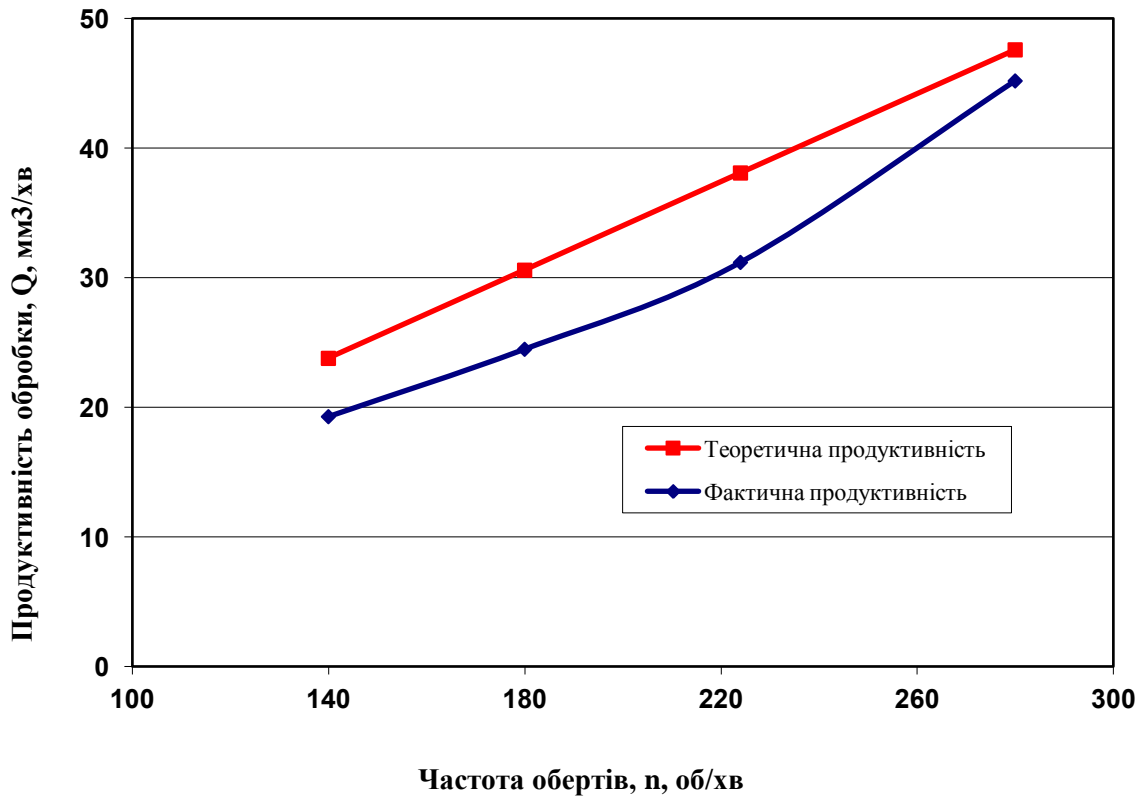


Рисунок 3.7 - Схеми для визначення фактичного і теоретичного об'єму припуску, що видаляється

За допомогою цих схем побудовані графіки залежності продуктивності обробки Q від частоти обертання фрези - n (рис. 3.8).



а)



б)

Рисунок 3.8 - Теоретична і фактична продуктивність обробки Q при різних швидкостях обертання шпинделя (а - зустрічне фрезерування, б - попутне фрезерування)

Аналізуючи отримані дані можна зробити висновок про те, що зі збільшенням частоти обертання значення фактичної продуктивності наближаються до значень теоретичної продуктивності, а при частоті обертання фрези $n = 280$ об/хв при зустрічному фрезеруванні перевищують її.

Використовуючи ці значення, за формулою [3.4] було визначено ефективність видалення припуску.

На рис. 3.9 показано залежності ефективності видаленого припуску від частоти обертання фрези.

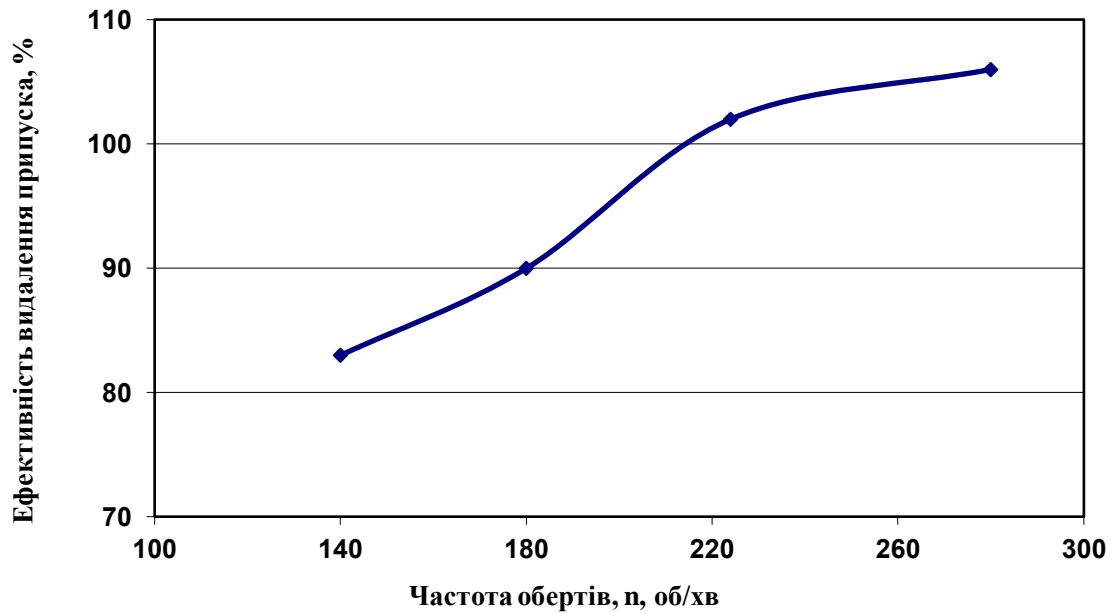
Виходячи з отриманих даних видно, що загальна ефективність зняття припуску при зустрічному фрезеруванні вище, ніж при попутному. Також, при зустрічному фрезеруванні ефективність видалення припуску, виражена у відсотках, збільшується більш-менш рівномірно і прямо пропорційно зі збільшенням частоти обертання шпинделя. При цьому, при досягненні показника частоти понад $n = 180$ об/хв значення ефективності перевищують показник 100% і продовжують підвищуватися.

Збільшення цього показника і підвищення значення 100% говорить про те, що при обробці знімається більший припуск, ніж вказано для даної операції. Це неприпустимо при виконанні операції і знижує основний показник - розмірну точність обробки.

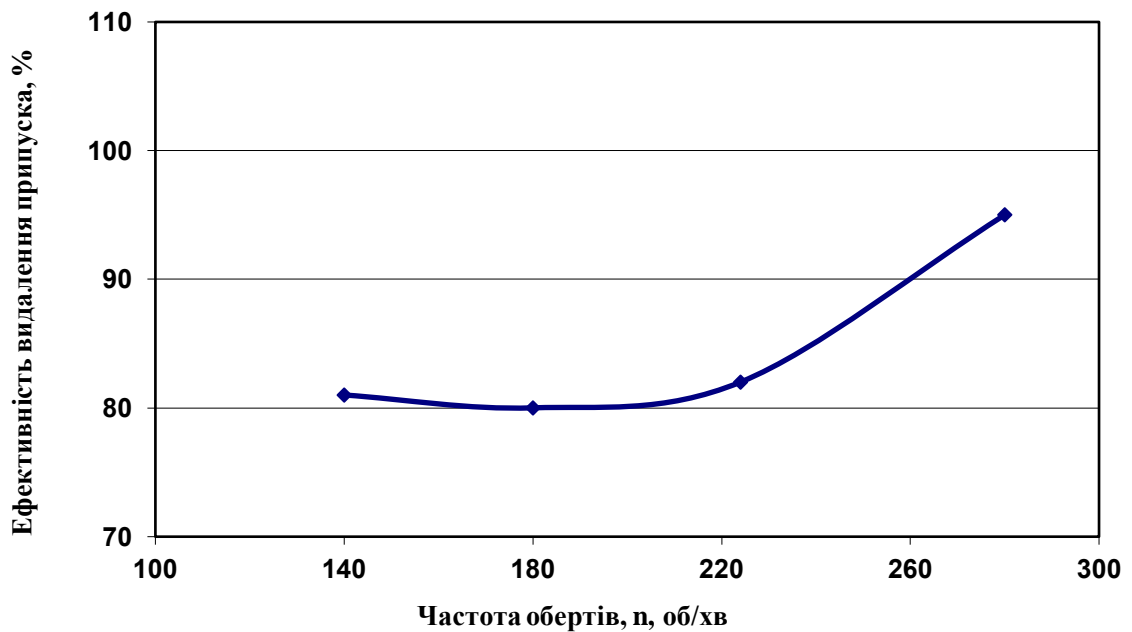
При попутному фрезеруванні ситуація інакша. Значення ефективності при частоті обертів $n = 140$ об/хв знаходяться в районі 80% як при зустрічному, так і при попутному фрезеруванні. Але далі при збільшенні частоти обертання (попутне фрезерування) до $n = 240$ об/хв показник ефективності падає, на відміну від показників зустрічного фрезерування. Лише подолавши значення понад $n = 180$ об/хв ефективність видалення припуску зростає.

Так, аналізуючи отримані результати можна зробити висновок про те, що в обраному діапазоні частот обертання фрези, що належать до III швидкісної зони, де виникають регенеративні автоколивання, найбільш

несприятливою з точки зору вібростійкості, є частота обертання $n = 280$ об/хв. Експерименти для визначення ролі стрічки фрези на задній поверхні зуба фрези f_c необхідно проводити на цих режимах.



а)



б)

Рисунок 3.9 - Ефективність видалення припуску E_{ϕ} , % при різних швидкостях обертання фрези (а - зустрічне фрезерування, б - попутне фрезерування)

3.2 Висновки

1. Розглянуто питання визначення зони виникнення регенеративних автоколивань ТЕ. У III швидкісній зоні на профілограмі відхилення ТЕ з'являються значні коливання, які пов'язані з регенеративними автоколиваннями при різанні за попереднім вібраційним слідом.

2. Було проведено та проаналізовано експерименти з шириною стрічки $f_c = 0$ мм. Згідно з результатами було визначено частоту обертання фрези, при якій автоколивання проявляють себе найбільш інтенсивно.

РОЗДІЛ 4

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВЕЛИЧИНИ СТРІЧКИ НА ЗАДНІЙ ПОВЕРХНІ ЗУБА ФРЕЗИ

4.1 Опис проведення досліджень

Отримані і описані вище результати досліджень з використанням фрези з шириною стрічки $f_c = 0$ дали повну картину виникнення і розвитку автоколивань при різних частотах обертання фрези, які належать до III швидкісної зони.

Частота обертання фрези $n = 280$ об/хв є тією частотою, при якій спостерігається максимальний рівень автоколивань, інші показники також мають найгірші значення. Тому, подальші експерименти будуть проводитися саме на цій частоті обертання фрези.

Метою дослідження є визначення впливу величини стрічки на задній поверхні зуба фрези - f_c на якість обробки при фрезеруванні кінцевими фрезами. Так як дослідження літературних джерел показало наявність двох величин, які рекомендують до виконання на зубі кінцевих фрез: це $f_c = 0,05$ мм та $f_c = 0,1$ мм, експерименти проводили саме з урахуванням цих рекомендацій.

Експерименти проводилися на фрезерному верстаті моделі FWD-32J спеціальною фрезою, на задній поверхні зуба були заточені стрічки величиною $f_c = 0,05$ мм та $f_c = 0,1$ мм.

Режими фрезерування:

- частота обертання фрези $n = 280$ об/хв;
- величина осьової глибини (ширина зразка) $a_p = 4$ мм;
- радіальна глибина (припуск на обробку) $a_e = 0,5$ мм;
- подача на зуб $S_z = 0,1$ мм/зуб.

напрямок подачі: зустрічне та попутне фрезерування.

4.2 Опис результатів експериментів

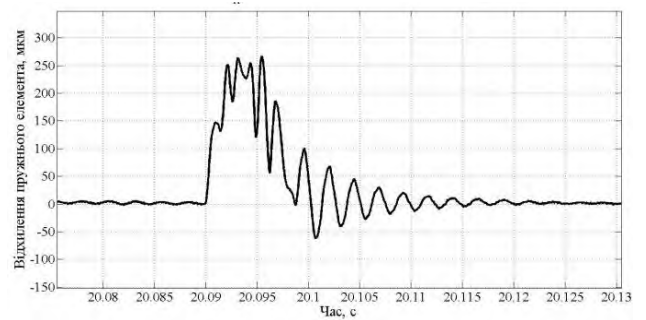
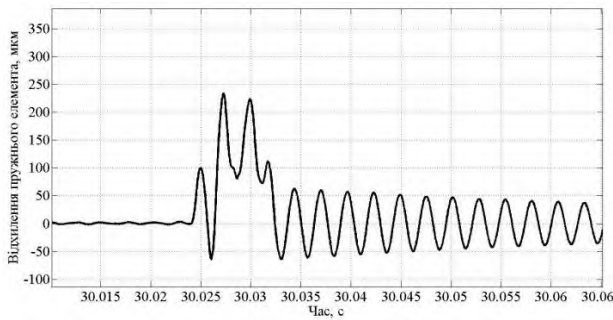
На рис. 4.1 показано базові фрагменти осцилограм, отримані експериментально, які записані при обробці спеціальною фрезою.

Ширина стрічки на задній поверхні зуба фрези - f_c становила $f_c = 0$, $f_c = 0,05$ мм та $f_c = 0,1$ мм.

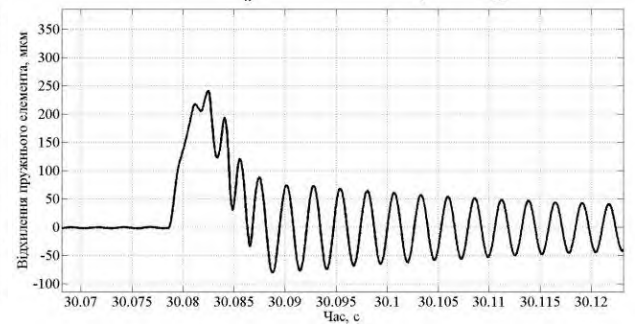
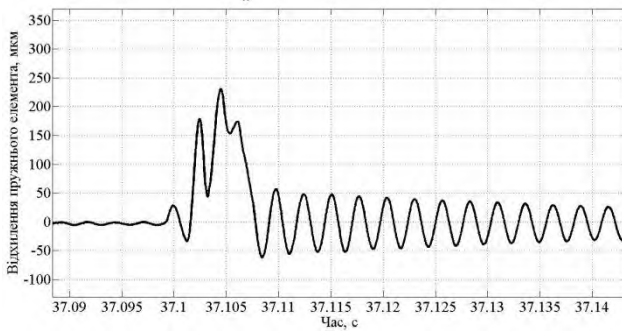
Зустрічне фрезерування

Попутне фрезерування

$f_c = 0$



$f_c = 0,05$ мм



$f_c = 0,1$ мм

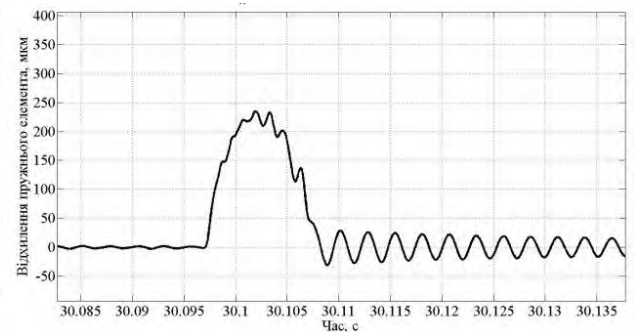
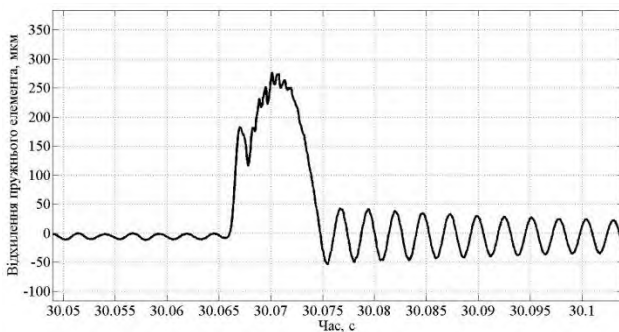
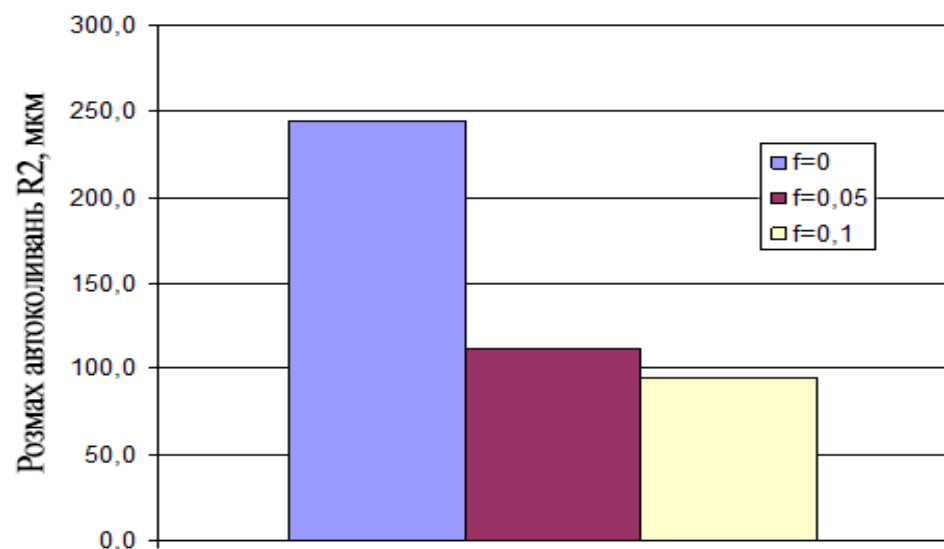


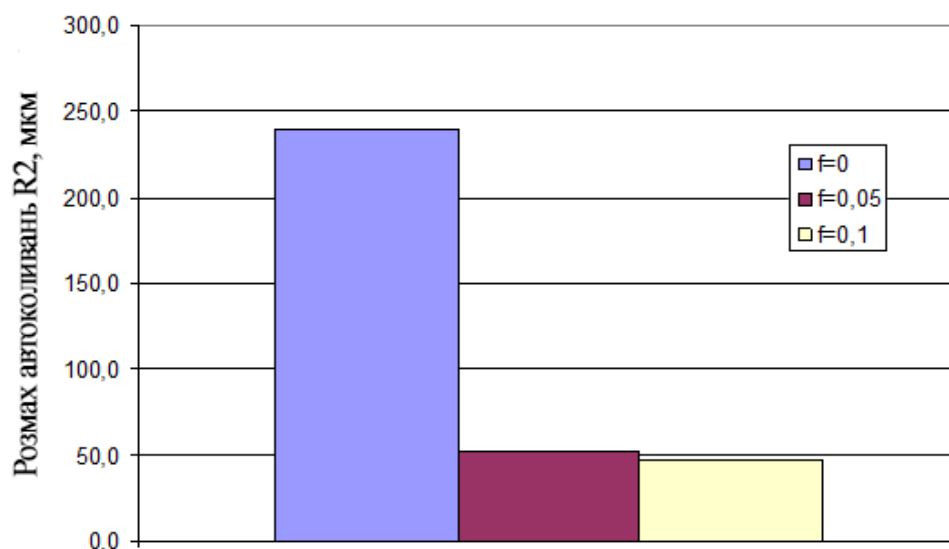
Рисунок 4.1 - Базові фрагменти осцилограм, $n = 280$ об/хв

Аналіз отриманих експериментальних БФО показав, що при зустрічному фрезеруванні інтенсивність автоколивань знижується зі збільшенням ширини стрічки. Так при $f_c = 0,1$ мм вони практично відсутні. При попутному фрезеруванні автоколивання мають таку ж інтенсивність і зі збільшенням ширини стрічки також знижуються. Це доводить рівень значень розмаху автоколивань R_2 , отриманих в процесі аналізу осцилограмм.

Далі, на рис. 4.2 показано гістограми отриманих значень розмаху автоколивань при зустрічному і попутному фрезеруванні.



а)



б)

Рисунок 4.2 - Величина розмаху автоколивань R_2 , мкм (а - зустрічне фрезерування, б - попутне фрезерування)

За цими результатами видно, що як при зустрічному, так і при попутному фрезеруванні розмах автоколивань R_2 помітно знижується при величині стрічки $f_c = 0,05$ мм та $f_c = 0,1$ мм в порівнянні з її відсутністю. Причому, при зустрічному фрезеруванні показник розмаху автоколивань R_2 знижується в обох варіантах величини стрічки більш, ніж в два рази, а при попутному фрезеруванні - до 4-х разів.

Далі було проведено аналіз отриманих даних з точки зору визначення шорсткості обробленої поверхні. Були записані профілі оброблених поверхонь і визначено параметр Ra .

Величина параметра Ra при зустрічному і попутному фрезеруванні приведена на рис. 4.3.

Видно, що як при зустрічному, так і при попутному фрезеруванні параметр відхилення профілю Ra помітно знижується при заточуванні стрічки $f_c = 0,05$ мм та $f_c = 0,1$ мм в порівнянні з шириною стрічки $f_c = 0$. Так, при зустрічному фрезеруванні відхилення профілю Ra знижується в обох варіантах величини стрічки більш, ніж в 1,7 разів, при попутному фрезеруванні - в 1,4 рази.

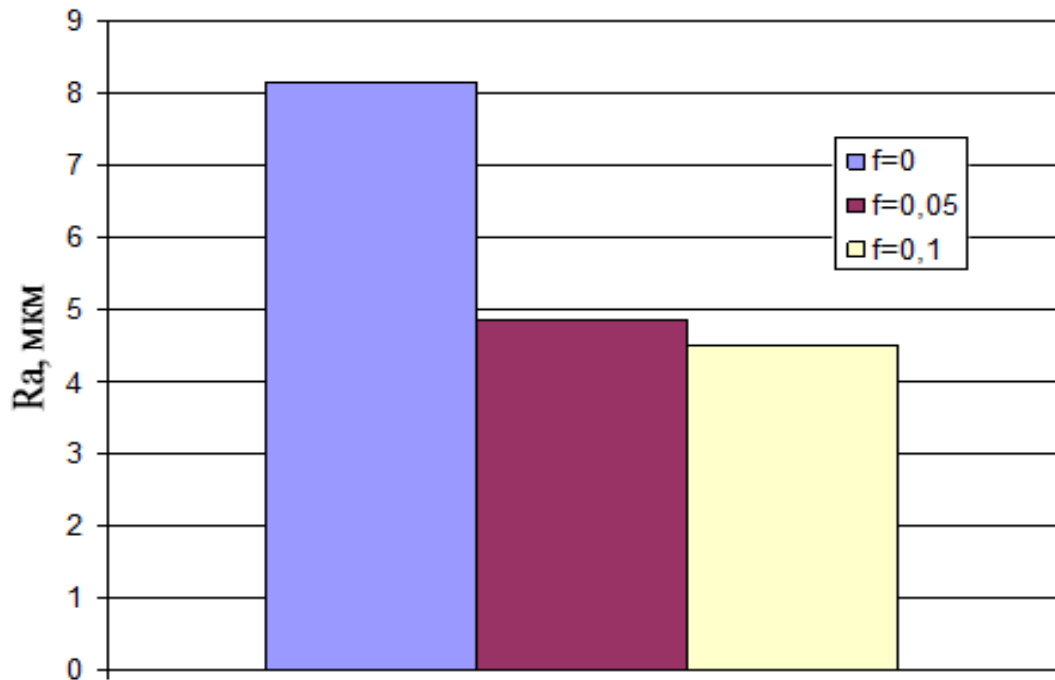
Якщо порівнювати показники при ширині стрічки фрези $f_c = 0,05$ мм та $f_c = 0,1$ мм, то різниця в них не така значна, але все ж показник відхилення профілю Ra нижче у стрічки з величиною $f_c = 0,1$ мм.

Отримані значення шорсткості обробленої поверхні повністю підтверджують зв'язок параметра R_2 і шорсткості поверхні Ra , яка була встановлена в роботах [18, 29].

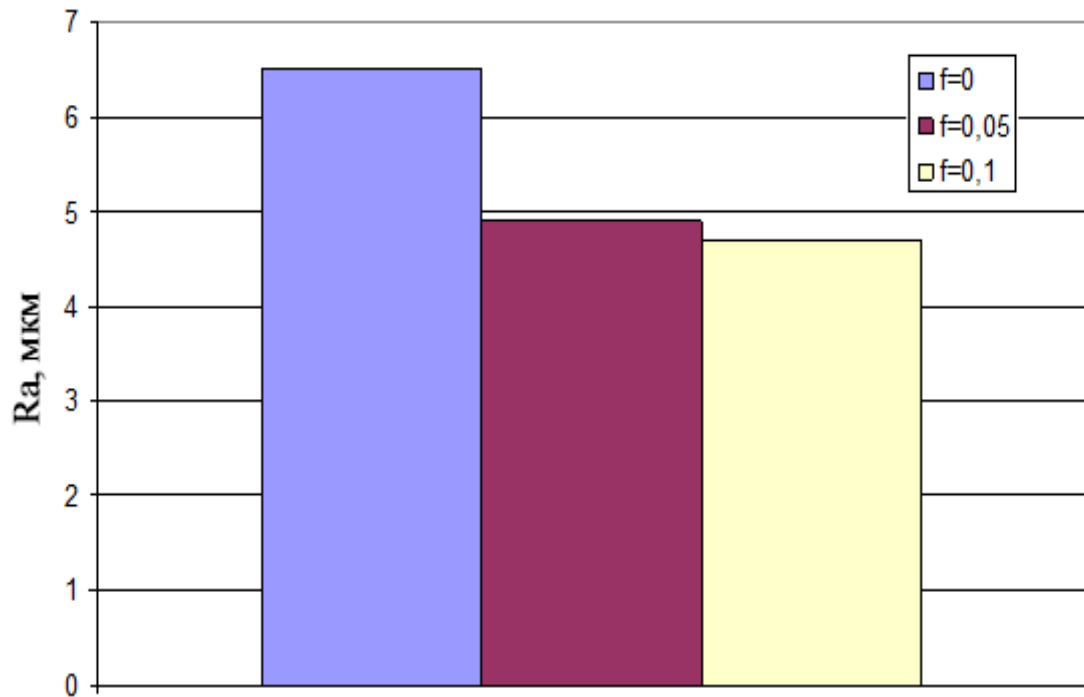
Записані БФО також аналізували з точки зору отримання параметра максимального відхилення деталі - Δ від положення лінії пружної рівноваги в процесі фрезерування.

Цей параметр досліджувався з метою отримання відповіді на питання: як змінюються сили, що діють на тонкостінний елемент при використанні фрези зі стрічкою на задній поверхні? Задня поверхня зуба, в даному

випадку, контактує з обробленою поверхнею і впливає на рівень сил тертя в зоні різання.



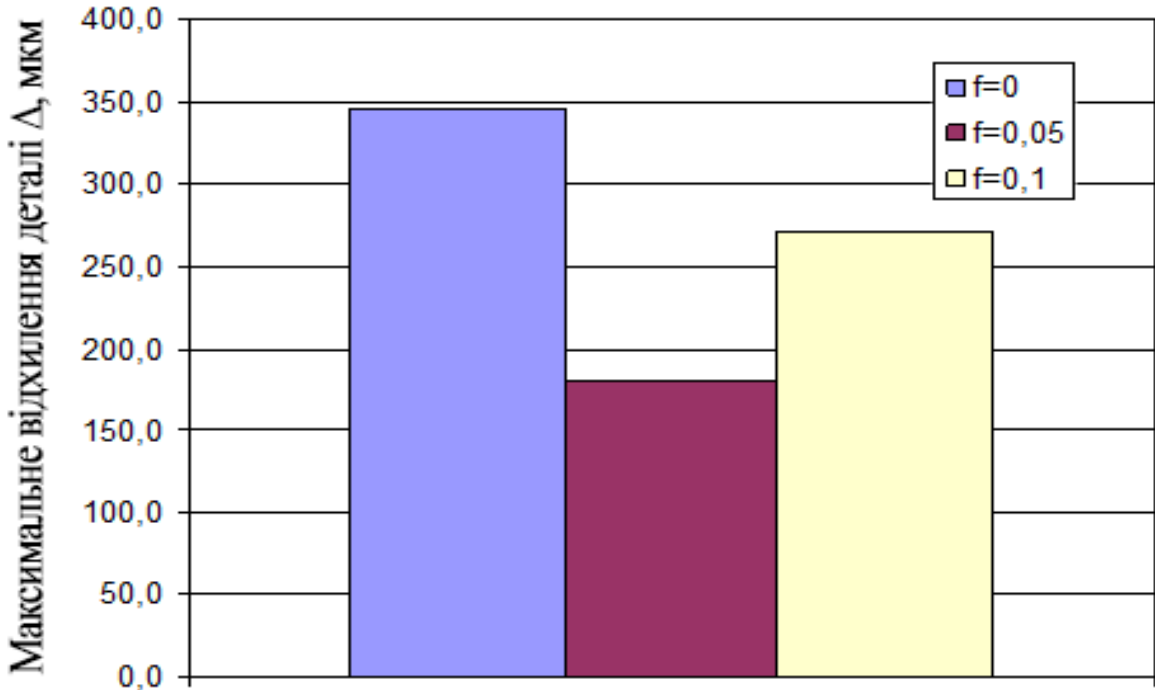
а)



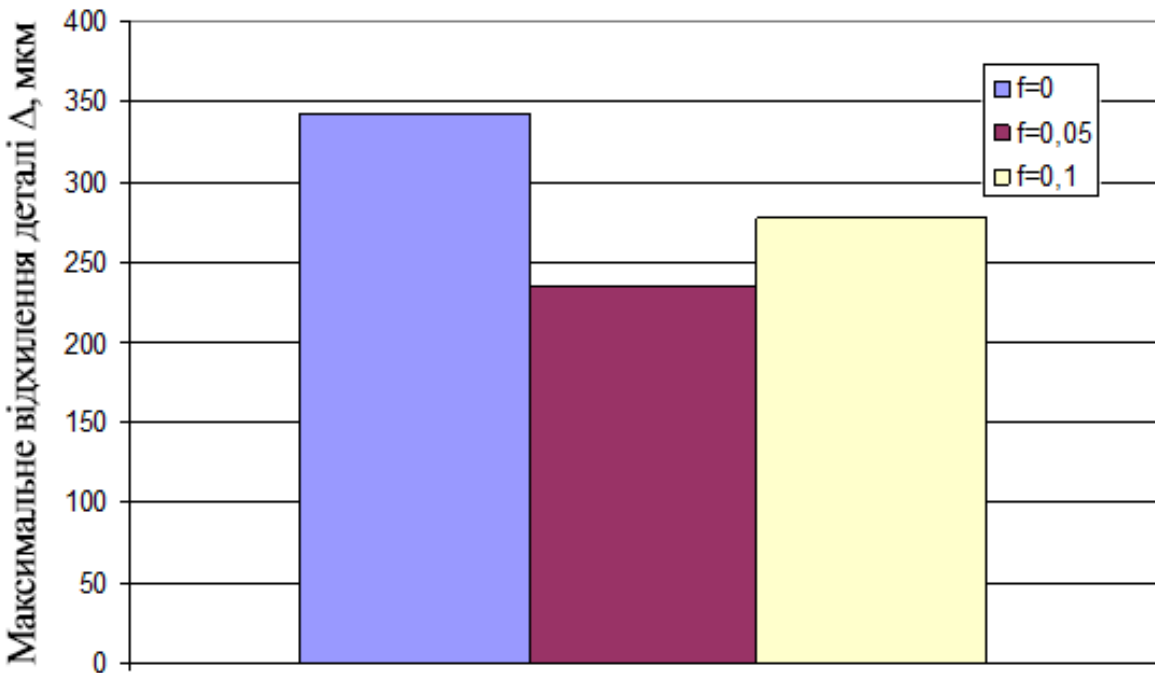
б)

Рисунок. 4.3 - Параметр R_a , μm (а - зустрічне фрезерування, б - попутне фрезерування)

Величина максимального відхилення деталі - Δ при зустрічному і попутному фрезеруванні приведена на рис. 4.4.



а)



б)

Рисунок 4.4 - Максимальне відхилення деталі Δ , мкм (а - зустрічне фрезерування, б - попутне фрезерування)

За даними побудованих гістограм можна зробити наступні висновки: при зустрічному фрезеруванні величина відхилення деталі при $f_c = 0,05$ мм менше у порівнянні з $f_c = 0$ майже в 2 рази. Однак подальше збільшення ширини стрічки до $f_c = 0,1$ мм призводить до зростання величини відхилення. При попутному фрезеруванні спостерігаються такі ж тенденції.

Для визначення продуктивності обробки - Q були проаналізовані схеми, що побудовані за експериментальними даними. Схеми показано на рис. 4.5.

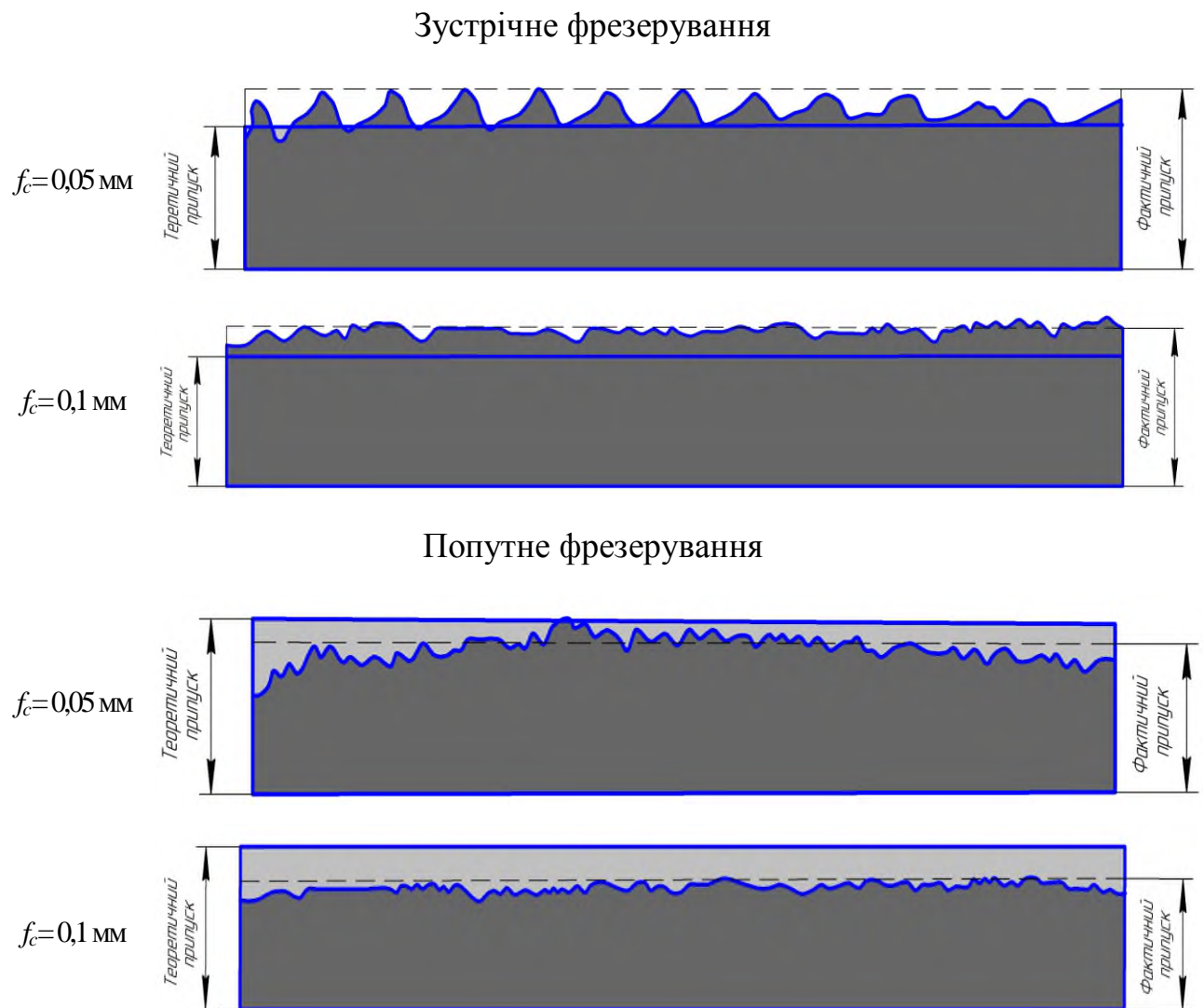
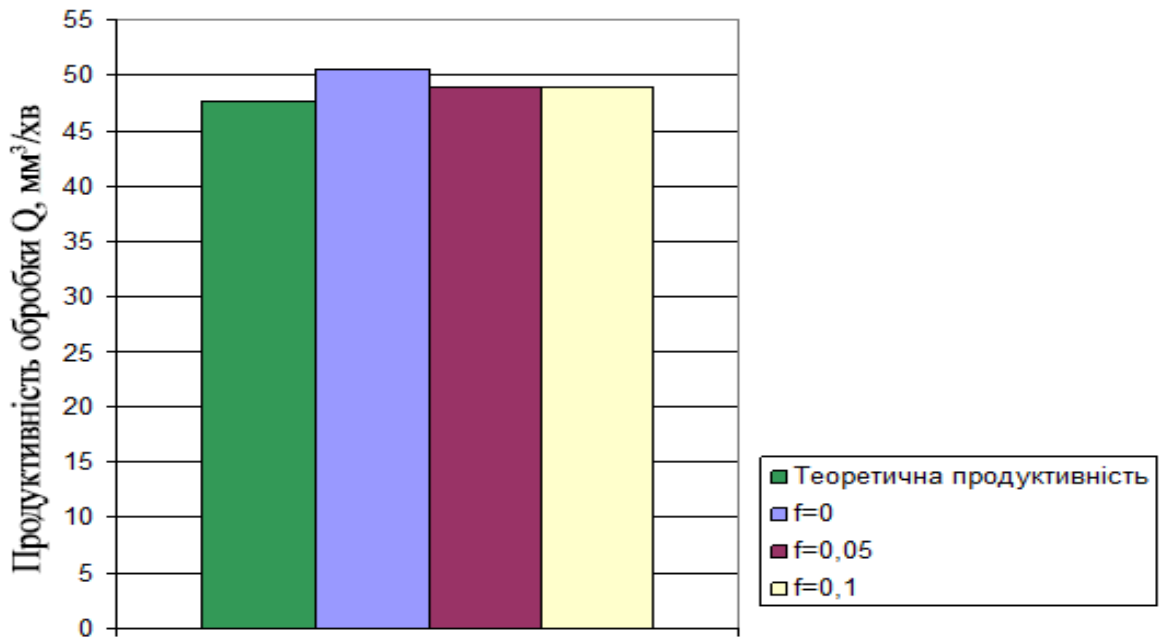
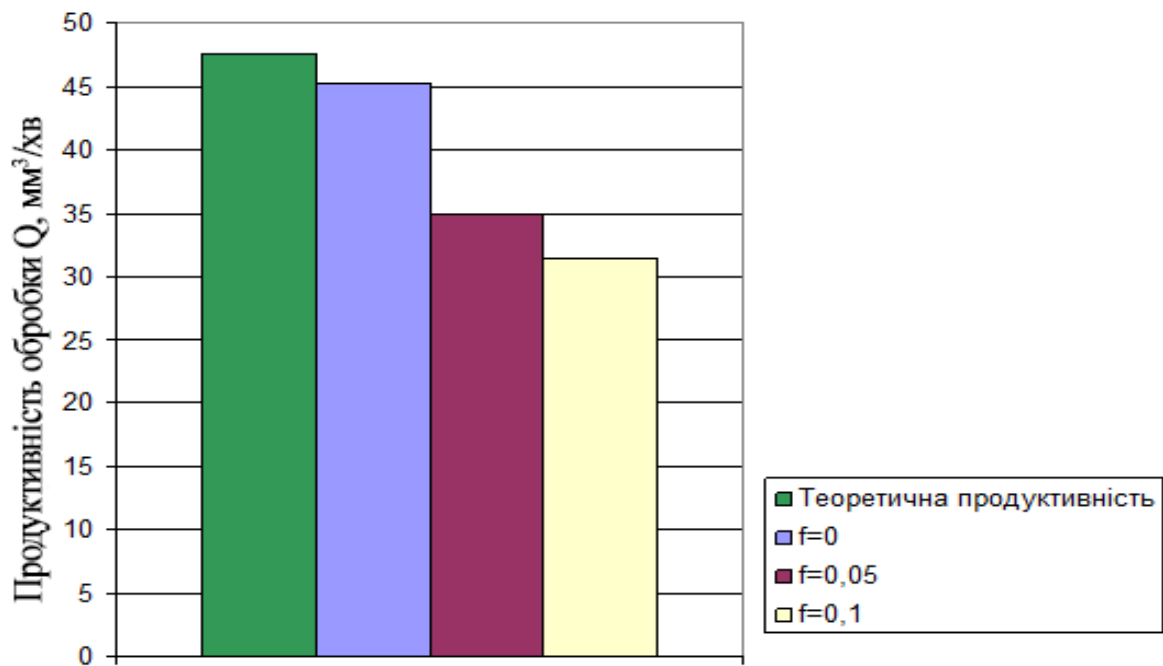


Рисунок 4.5 - Схеми для розрахунку продуктивності і ефективності обробки

Далі показані гістограми, на яких наведені дані певної теоретичної і, отриманої експериментально, продуктивності при зустрічному і попутному фрезеруванні (рис. 4.6).



а)



б)

Рисунок 4.6 - Продуктивність обробки Q (а - зустрічне фрезерування, б - попутне фрезерування)

За даними побудованих гістограм видно, що величина подачі істотно впливає на показники теоретичної Q_T і фактичної Q_Φ продуктивності видалення припуску. При зустрічному фрезеруванні значення фактичної продуктивності наближаються до значень теоретичної продуктивності по всіх варіантах величини стрічки f_c . Найефективніше підвищення показника продуктивності серед усіх учасників експерименту показує заточка з величиною стрічки $f_c = 0,05$ мм.

Щодо попутного фрезерування, значення теоретичної Q_T і фактичної Q_Φ продуктивності помітно відрізняються. Лише при $f_c = 0$ ці показники схожі. При $n_{об} = 280$ об/хв показники фактичної продуктивності менше, ніж показники теоретичної продуктивності за фрезами з $f_c = 0,05$ мм та $f_c = 0,1$ мм в 1,5 рази.

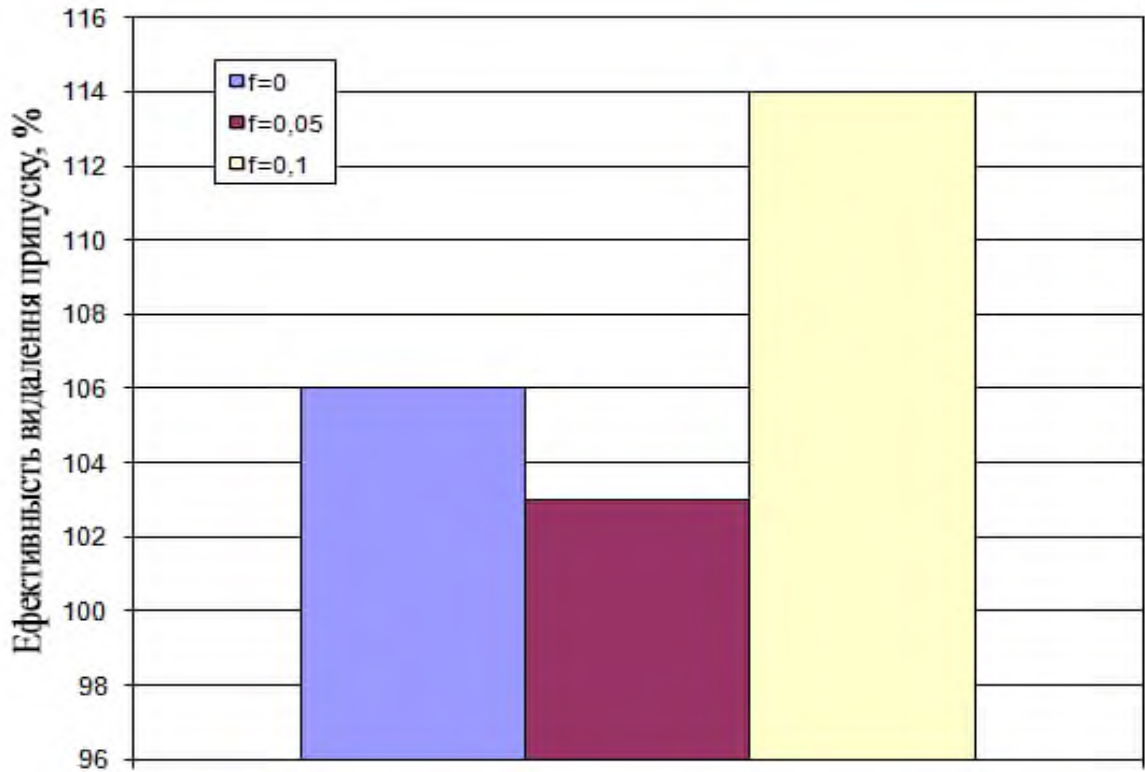
За вище описаною методикою [29] і формулами [3.3, 3.4] визначали ефективність видалення припуску при різних значеннях ширини стрічки f_c при зустрічному і попутному фрезеруванні.

На рис. 4.7 показано ці результати.

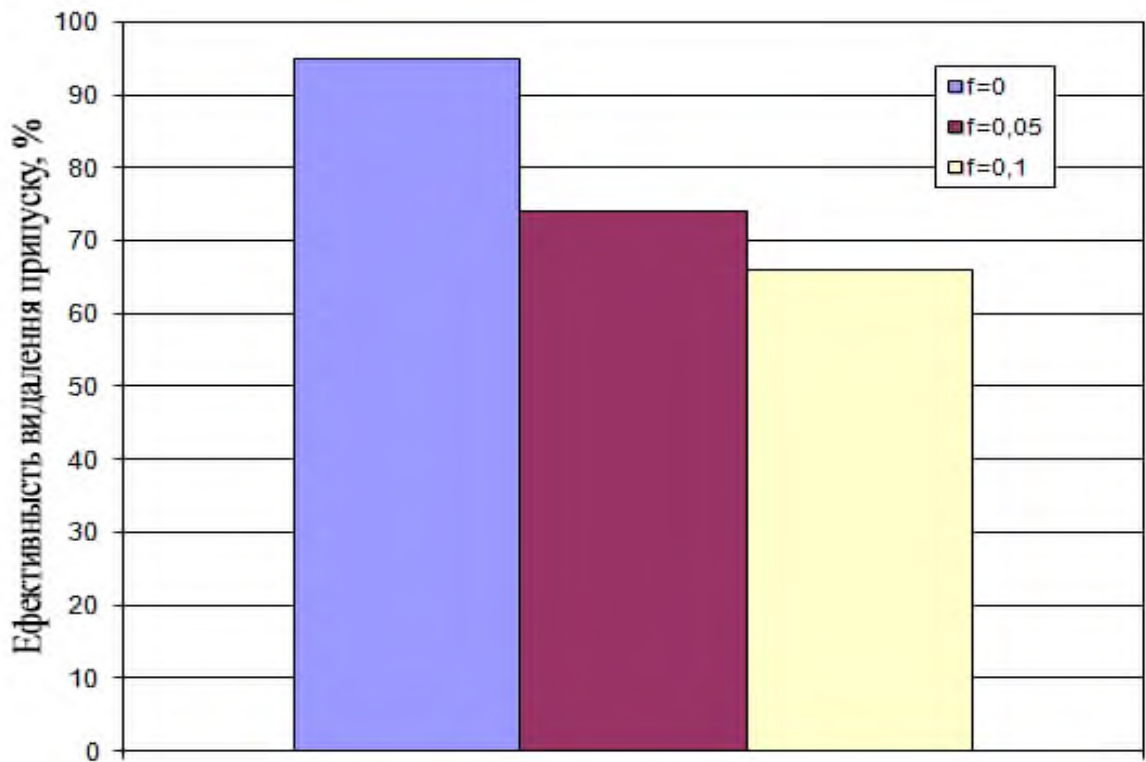
Виходячи з отриманих даних видно, що загальна ефективність зняття припуску при зустрічному фрезеруванні вище, ніж при попутному. Також помітно, що при зустрічному фрезеруванні ефективність видалення припуску, виражена у відсотках, збільшується більш-менш рівномірно і прямо пропорційно зі збільшенням частоти обертання шпинделя.

Найбільші значення ефективності зняття припуску при зустрічному фрезеруванні отримані при величині стрічки $f_c = 0,1$ мм. Ці значення більше 100%. Це означає, що в процесі фрезерування внаслідок коливання відбувається зняття припуску, більшого, ніж встановлений на операції. Це говорить про зниження точності при обробці, що є неприйнятним. Відбувається це в зв'язку зі збільшенням відхилення деталі в процесі обробки.

При ширині стрічки $f_c = 0,05$ мм значення ефективності нижче.



а)



б)

Рисунок 4.7 Ефективність видалення припуску E_f , % при різній ширині стрічки - f_c (а - зустрічне фрезерування, б - попутне фрезерування)

При попутному фрезеруванні ситуація абсолютно зворотна. Збільшення ширини стрічки до $f_c = 0,1$ мм призводить до зниження ефективності. Значення становлять близько 60 %, тобто при $f_c = 0,1$ мм спостерігається не повне зрізання припуску, а тільки його половина. Це також негативно впливає на показники точності.

Ширина стрічки $f_c = 0,05$ мм показує великі значення ефективності.

4.3 Висновки

1. Було проведено дослідження з визначення впливу стрічки на задній поверхні зуба фрези f_c на вібраційні процеси при фрезеруванні кінцевими фрезами, а також на точність і якість обробленої поверхні.

2. Проведено порівняльний аналіз досліджень з різними величинами стрічки f_c , в результаті чого було виявлено, що при зустрічному і попутному фрезеруванні показники інтенсивності автоколивань, розмаху автоколивань R_2 , відхилення профілю Ra знижуються зі збільшенням ширини стрічки. Однак параметр максимального відхилення деталі Δ в різних варіантах ширини стрічки f_c показує протилежні значення. Так при $f_c = 0,05$ мм показник менше в порівнянні з $f_c = 0$ майже в 2 рази, а при подальшому збільшенні ширини стрічки до $f_c = 0,1$ мм показник відхилення деталі зростає.

3. Також було визначено і проаналізовано теоретичну і фактичну продуктивність обробки, а також ефективність видалення припуску. В результаті стрічка з шириною $f_c = 0,1$ мм показала себе незадовільно при зустрічному (значення становили понад 100%) і попутному (значення становили близько 60%) фрезеруванні. Це означає, що точність обробки не буде відповідати заявленій точності. Ширина стрічки $f_c = 0,05$ мм показує великі сприятливі показники ефективності як при зустрічному, так і при попутному фрезеруванні.

РОЗДІЛ 5

ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРИЙНЯТИХ РІШЕНЬ

Економічна ефективність виготовлення виробів - це, передусім, максимальне зниження витрат і отримання максимального прибутку [41].

Головним показником економічної ефективності є розрахунок собівартості виробу, який складається з наступних складових [41]:

- витрати на інструмент (3%);
- сировина (17%);
- обладнання (27%);
- заробітна плата робітників або трудовитрати (31%);
- інші витрати (22%).

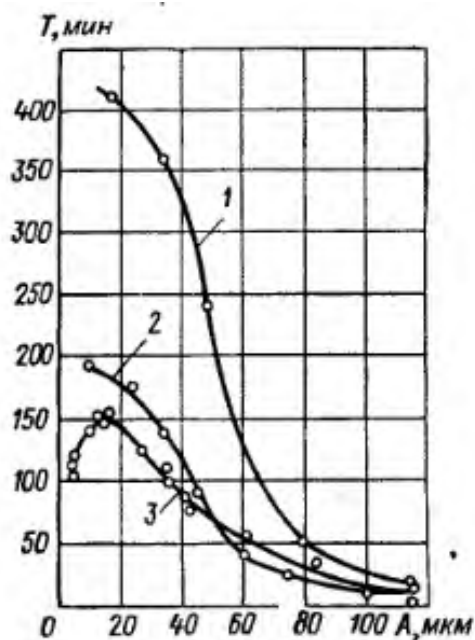
Головними якостями прогресивних інструментів є високі режими різання, стійкість, надійність і стабільність отримання результатів. Саме ці характеристики впливають на зниження машинного часу та інших витрат [41].

У машинобудуванні будь-які зміни технології як істотні, так і менш значні, здійснюють істотний вплив на вартість виготовлення деталей. Інтенсивність використання основного технологічного обладнання, параметри його роботи і продуктивність нерозривно пов'язані з якістю інструменту, що для цього застосовується. Своєчасна заміна інструментального оснащення виробництва на сучасне дозволяє швидше окупати вкладення на придбання нового обладнання, підвищувати продуктивність наявного обладнання та економічну ефективність операцій, які виконуються [42].

Недостатня стійкість інструменту призводить до виникнення додаткових простоїв обладнання, тривалість яких визначається тривалістю заміни інструменту. В результаті знижується і продуктивність. Тому

ефективність обробки обумовлена, в тому числі, і правильністю вибору інструменту і параметрами режимів різання, що призначаються [42].

У роботі [43] вказані дослідження по визначенню залежності стійкості інструменту від інтенсивності автоколивань. Завдяки численным дослідженням було створено графік залежності стійкості інструменту від інтенсивності автоколивань при фрезеруванні (рис. 5.1). Дані цієї залежності будуть використані далі.



- 1 - дискова фреза ВК8: $D = 70$; $z^* = 16$; $B = 3$; $t = 3$; $s_z = 0,05$;
 $v = 1,37$ м/с; $\gamma = 10^\circ$; $\alpha = 15^\circ$; $\alpha_6 = 1^\circ 30'$; матеріал, що обробляється ОТ4;
 2 - кінцева фреза ВК8; $D = 40$; $z = 5$; $B = 13,5$; $t = 1$; $s_z = 0,056$;
 $v = 2$ м/с; $\gamma = 5^\circ$; $\alpha = 15^\circ$; $\omega = 5^\circ$; матеріал, що обробляється ВТ20;
 3 - умови ті ж, що в п. 2, але $\omega = 20^\circ$; $z = 4$

Рисунок 5.1 - Залежність стійкості інструменту від амплітуди автоколивань при роботі дисковими газовими та кінцевими фрезами [43]

Вихідні дані для проведення розрахунків:

- частота обертання фрези $n_{фр} = 280$ об/хв;
- параметри різальної частини: ширина стрічки на задній поверхні зуба $f_c = 0$ та $f_c = 0,05$ мм;

- машинний час $t_m = 0,22$ хв;
- напрям фрезерування: зустрічний та попутний.

Для визначення стійкості інструменту за наявними даними використовується графік залежності стійкості інструменту від інтенсивності автоколивань при фрезеруванні, що наведено на рис. 5.1.

Амплітуда автоколивань отримана за експериментальними даними, а саме за даними осцилограм. У табл. 5.1 показано дані для подальших розрахунків.

Таблиця 5.1 - Стійкість інструменту при $f_c = 0$ та $f_c = 0,05$ мм

Параметр різальної частини фрези	Зустрічне фрезерування		Попутне фрезерування	
	Амплітуда автоколивань А, мкм	Період стійкості T_c , хв	Амплітуда автоколивань А, мкм	Період стійкості T_c , хв
$f_c = 0$	120	15	55	65
$f_c = 0,05$ мм	115	10	25	140

Економічна ефективність виготовлення деталі проводиться за допомогою розрахунку кількості інструменту, що розраховується за формулою (5.1) [42]:

$$N_p = \frac{t_m \cdot K_{\delta} \cdot K_n \cdot K_v}{T_c \cdot K_m \cdot K_p}, \text{ шт} \quad (5.1)$$

де t_m - машинний час, хв;

K_{δ} - коефіцієнт випадкової убитку інструменту, $K_{\delta} = 1,05$ [42];

K_n - поправочний коефіцієнт, що враховує збільшення витрат різального інструменту через необхідність паралельної обробки деталей виробу в декількох механообробних цехах одного підприємства, $K_n = 1,0$ [42];

K_g - поправочний коефіцієнт, що враховує збільшення витрат різального інструменту для виготовлення засобів технологічного оснащення 2-го порядку (визначається підприємством), $K_g = 1,25$ [42];

T_c - період стійкості, хв;

K_m - чисельне значення поправочного коефіцієнта, що враховує вид матеріалу, що обробляється, $K_m = 3,1$ [42];

K_p - чисельне значення поправочного коефіцієнта, що враховує стан поверхні виробу, $K_p = 1,2$ [42].

Результати розрахунку кількості інструменту N_p у випадках використання фрези з різною геометрією різальної частини фрези наведено у табл. 5.2.

Таблиця 5.2 - Розрахунок кількості інструменту N_p , шт

Параметр різальної частини фрези	Зустрічне фрезерування	Попутне фрезерування
$f_c = 0$	0,0051	0,0077
$f_c = 0,05$ мм	0,0011	0,0005

Розрахунок витрат на інструмент C_i , грн. при виготовленні однієї деталі проводився за формулою (5.2) [42]:

$$C_i = N_p \cdot C_\phi \cdot f, \quad (5.2)$$

де C_ϕ - вартість фрези, грн, $C_\phi = 2618$ грн [44];

f - кількість деталей на один виріб, шт, $f = 1$ шт;

Результати розрахунку витрат на інструмент C_i наведено у табл. 5.3.

Таблиця 5.3 - Витрати на інструмент C_i , грн

Параметр різальної частини фрези	Зустрічне фрезерування	Попутне фрезерування
$f_c = 0$	13,35	20,15
$f_c = 0,05$ мм	2,87	1,30

Виходячи з результатів, економія витрат на інструмент C_i при виготовленні однієї деталі за допомогою фрези з шириною стрічки на задній поверхні зуба $f_c = 0,05$ мм для зустрічного фрезерування становить 10,48 грн, а для попутного фрезерування - 18,85 грн.

При цьому, якщо взяти річну програму випуску $N_b = 1000$ шт/рік, то економія становитиме 10480 грн для зустрічного фрезерування, та 18850 грн для попутного фрезерування.

РОЗДІЛ 6

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Основна мета цього розділу при здійсненні наукових досліджень це розробка попереджувальних заходів щодо запобігання виробничого травматизму, професійних захворювань та інших шкідливих чинників під час проведення наукових досліджень.

Вихідними даними в роботі є експериментальний стенд для дослідження вібрацій при кінцевому фрезеруванні тонкостінного елемента деталі [18, 25, 26], що представлено на рис.2.13. На стенді було використано індуктивний проксиметр (XS1M18AB120). Сигнал цього датчика оцифровують за допомогою АЦП Е-140 фірми L-Card, запам'ятовують і записують, використовуючи ПЗ и ПК.

Також при дослідах використовували спеціальну фрезу [27], що вказана на рис. 2.16. Фрезерування виконували на фрезерному верстаті моделі FWD-32J.

6.1 Аналіз потенційних небезпек

Під час експериментальних досліджень можлива поява небезпек на робочому місці та в робочій зоні.

Потенційні небезпеки фізичного характеру, такі як:

1. Механічне травмування, що зв'язано з руйнуванням фрези при порушенні режимів обробки ТЕ.
2. Травмування, що пов'язані з несправністю обладнання.
3. Травмування, що пов'язані з недостатньою якістю інструменту чи зразків.

4. Травмування, що пов'язані з недотриманням правил охорони праці.

Наслідок травмувань - тимчасова або цілковита втрата працездатності та неможливість продовження проведення експериментів.

Потенційні небезпеки хімічного характеру - це небезпека впливу мілко дисперсного пилю і наявності в зоні дихання елементів марганцю, вольфраму, кобальту, що можуть утворюватися при експлуатації фрези, в процесі роботи або під час виходу з ладу обладнання без використання ефективної вентиляції [45]. Згідно з ГОСТ 12.1.007-76 «Система стандартів безпеки труда. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности» ці речовини мають 2 та 3 клас небезпеки.

Потенційні небезпеки психофізіологічного характеру:

1. Нервово-психічні перевантаження, що з'являються при недостатньому досвіді дослідника.

2. Емоційні перевантаження дослідника, що з'являються через роботу з верстатом.

3. Підвищена відповідальність за очікуваний результат в умовах відсутності достатньої кваліфікації дослідника.

4. Монотонність роботи, що пов'язана з обробкою значної кількості наукової інформації.

5. Конфлікти в колективі через необхідність виконання роботи в обмеженому проміжку часу.

Наслідок - можливість отримання неточних або помилкових результатів, що потребує додаткового часу на повторне виконання роботи та призведе до перевтоми фахівця.

Потенційні небезпеки, що пов'язані з порушеннями санітарно-гігієнічних умов: незадовільні метеорологічні параметри повітряного середовища лабораторії динамічних випробувань через недіючу систему опалення в осінь-зимовий період, що може привести до загальних захворювань.

Потенційні небезпеки, що пов'язані з порушеннями правил пожежної безпеки та електротравми:

1. Коротке замикання через несправність електрообладнання, не герметичність систем живлення, при відсутності захисного заземлення, в умовах підвищеної вологості, що є наслідком незадовільних метеорологічних умов в приміщенні (підвищена вологість, низька температура в осінньо-зимовий період);

2. Травмування дослідників при необачності.

Наслідок - виникнення пожеж у лабораторії динамічних випробувань та ураження струмом дослідників.

Потенційні небезпеки, що пов'язані з проявом наслідків надзвичайних ситуацій: паніка та виникнення травматичних ситуацій через не підготовленість персоналу в умовах надзвичайних ситуацій.

6.2 Заходи по забезпеченню безпеки

Для виключення можливого фізичного травмування під час проведення експерименту, в роботі передбачені організаційні заходи:

1. Проводиться навчання з правил охорони праці, перевірка знань та атестація персоналу згідно НПАОП 0.00-4.12-05 «Типове положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці».

2. Проводиться первинний інструктаж перед початком роботи у лабораторії динамічних випробувань згідно НПАОП 0.00-4.12-05 «Типове положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці».

3. Дотримання загальних правил безпеки при роботі на фрезерному верстаті, а саме:

- деталь, що обробляється, підводити до фрези плавно, після того як фреза отримає робоче обертання;
- застосовувати захисне огороження (екрани);
- перед включенням електродвигуна вимкнути (поставити в нейтральне положення) всі важелі управління;
- при зміні інструменту, установці і знятті пристосувань, прибирання, чищення і змащення верстата обов'язково вимкнути електродвигун;
- перед установкою на верстат пристосувань очистити від стружки і масла базові і кріпильні поверхні для забезпечення правильної установки і міцності кріплення;
- при фрезеруванні не вводити руки в небезпечну зону обертання фрези;
- при зніманні фрези з шпинделя користуватися спеціальною оснасткою, не підтримувати її незахищеною рукою - застосовувати для цього рукавицю або еластичну прокладку;
- під час роботи верстата не відкривати і не знімати огороження і запобіжні пристрої;
- зупиняючи верстат, необхідно вимкнути подачу, відвести заготовку від фрези і вимкнути обертання шпинделя.
- необхідно дотримуватися порядку і чистоти на робочому місці. Після закінчення роботи прибрати стружку, протерти поверхні, що труться і змастити, перемістити поздовжній стіл, санчата і консоль в середнє положення.

Технічні заходи:

1. Перевірка обладнання згідно з технічним регламентом безпеки машин [46].
2. Використання спецодягу та засобів індивідуального захисту при роботі з обладнанням, а саме закритого взуття, зібраного волосся, рукавів, що прилягають до рук, захисної маски задля захисту від COVID-2019 згідно з

НПАОП 0.00-7.17-18 «Мінімальні вимоги безпеки і охорони здоров'я при використанні працівниками засобів індивідуального захисту на робочому місці (54595)».

3. Використання спеціальної незношеної щітки для видалення з верстата стружки для попередження порізів рук.

4. Використання пилестружкоприймачів для знепилювання робочої зони.

Для виключення можливого погіршення самопочуття під час роботи на ПК забезпечена організація робочого місця відповідно до нормативно-правових документів, наприклад ДБН В.2.5-28:2018 «Природне і штучне освітлення», НПАОП 0.00-7.15-18 «Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями»:

1. Для профілактики погіршення зору рекомендовано середню освітленість на робочих місцях не менше 200 лк.

2. Для профілактики погіршення самопочуття та погіршення зору Відповідно до Директиви Ради 90/270 ЄЕС «Про мінімальні вимоги безпеки та здоров'я при роботі з екранними пристроями» (стаття 4, 5) здійснено основні вимоги до моніторів ПК:

- символи на екрані чіткі і добре розрізняються;
- зображення позбавлене будь-яких видів нестабільності;
- яскравість та / або контрастність легко регулюються;
- екрани вільні від відблисків і відбиття;
- екрани вільно нахиляються та переміщуються за потреби;
- випромінювання знижені до надзвичайно малих рівнів;
- при пошкодженнях екрани одразу замінювались на нові.

Також виконані основні вимоги до робочої зони дослідника, а саме:

- розташування клавіатури повинно бути зручним для роботи;
- робочий стіл повинен бути достатнього розміру для забезпечення зручного положення дослідника під час виконання роботи;

- робоче крісло повинно бути ергономічним;
- на вікнах та інших джерелах світла повинен бути захист від віддзеркалення або відбиття світла.

Для виключення можливої небезпеки хімічного характеру в роботі передбачені наступні організаційні заходи:

1. Проведення навчання з правил охорони праці згідно з НПАОП 0.00-4.12-05 «Типове положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці».

2. Передбачено встановлення місцевої вентиляції в робочій зоні, яка забезпечує трьохкратний повітрообмін. Також у приміщенні передбачено природну вентиляцію, яка відповідає ДБН В.2.5-67:2013 «Опалення, вентиляція та кондиціонування».

Для виключення можливої небезпеки психофізіологічного характеру, в роботі передбачено організаційні заходи:

1. Проводиться первинний інструктаж перед початком роботи у лабораторії динамічних випробувань згідно НПАОП 0.00-4.12-05 «Типове положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці».

2. Робота згідно з графіка виконання дослідницької роботи.

3. Виконання роботи після отримання сталих навичок безпечної роботи на верстаті.

4. Передбачення перерв у роботі, чергування різних видів робіт.

5. Дотримання режиму обідніх перерв.

6. Бесіда з керівником робіт до початку виконання операції фрезерування для отримання впевненості та сталих навичок роботи. Проведення консультацій для більш якісного виконання роботи.

Для виключення небезпек, що пов'язані з порушеннями санітарно-гігієнічних умов, в роботі передбачено такі організаційні заходи, як:

1. Дотримання вимог Державних санітарних норм та правил «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів

виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу», МЮУ 06.05.2014 р. за № 472/25249, ДСанПіН 3.3.2.007-98 «Державні стандартні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин», НПАОП 0.00-7.15-18 «Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями», ДСН 3.3.6.042-99 «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень», ДБН В.2.5-67: 2013 «Опалення, вентиляція та кондиціонування».

2. Відповідно до ДСН 3.3.6.042-99 «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень» робота у лабораторії динамічних випробувань відноситься до ІІ категорії важкості, тому необхідне недопускання підвищення тяжкості робіт.

Технічні заходи:

1. Передбачено систему водяного опалення приміщення для забезпечення необхідної температури повітря в холодний період року відповідно ДБН В.2.5-67:2013 «Опалення, вентиляція та кондиціонування». Згідно з ДБН В.2.5-39:2008 «Зовнішні мережі та споруди. Теплові мережі». Індивідуальний тепловий пункт (ІТП) має автоматичне регулювання теплового потоку, залежне від погодних умов. Температура повітря в приміщенні повинна бути не нижче, ніж +21°C.

2. Для забезпечення необхідного повітрообміну в теплий період року передбачено устрій штучної механічної загальної обмінної вентиляції відповідно до ДБН В.2.5-67:2013 «Опалення, вентиляція та кондиціонування».

Принципові схеми вентилявання приміщень [47]

Для підтримки в приміщенні необхідних санітарно-гігієнічних параметрів повітряного середовища необхідно постійно видаляти "відпрацьоване" (забруднене) повітря і передбачати надходження чистого, зовнішнього повітря, тобто здійснювати повітрообмін. Видалення з

приміщення забрудненого повітря здійснюється витяжною вентиляцією (витяжкою), подача чистого повітря - припливною вентиляцією (притоком).

В залежності від способу спонукання повітря до руху вентиляція підрозділяється на природну (аерацію) і механічну. У приміщеннях можлива комбінація цих способів вентиляції.

При видаленні шкідливих речовин безпосередньо з місця їх виділення досягається найбільший ефект дії вентиляції, так як при цьому не відбувається забруднення великих обсягів повітря, а також можливо видалити малими обсягами повітря шкідливі речовини, що виділяються. Такий спосіб вентиляції називається місцевою витяжною вентиляцією.

В якості місцевих відсмоктувачів застосовуються різні конструкції: укриття, бортові відсмоктувачі, панелі рівномірного всмоктування, парасолі та ін. (рис. 6.1). Найбільшою ефективністю серед всіх типів місцевих відсмоктувачів володіють саме укриття (рис. 6.1, а). Виділення шкідливих речовин відбувається усередині укриття, з якого вони забираються і відводяться за межі будівлі. Укриття мають дверцята або пройоми. Коли технологічний процес не дозволяє застосувати укриття, влаштовуються бортові відсмоктування або панелі рівномірного всмоктування (рис. 6.1, б, в). З метою скорочення витрат від бортових відсмоктувачів повітря, що видаляється, може влаштовуватися "передувка" (рис. 6.1, г). Бортовими відсмоктувачами обладнуються гальванічні ванни, столи для просочення і обробки виробів тощо. Над робочими столами, де технологічний процес ведеться по всій площі стола, влаштовуються панелі рівномірного всмоктування.

Над джерелами шкідливих умов, насамперед, тепла, влаштовуються парасолі (рис. 6.1, д). Великим недоліком парасольки є те, що забруднене повітря може проходити через зону дихання робітника.

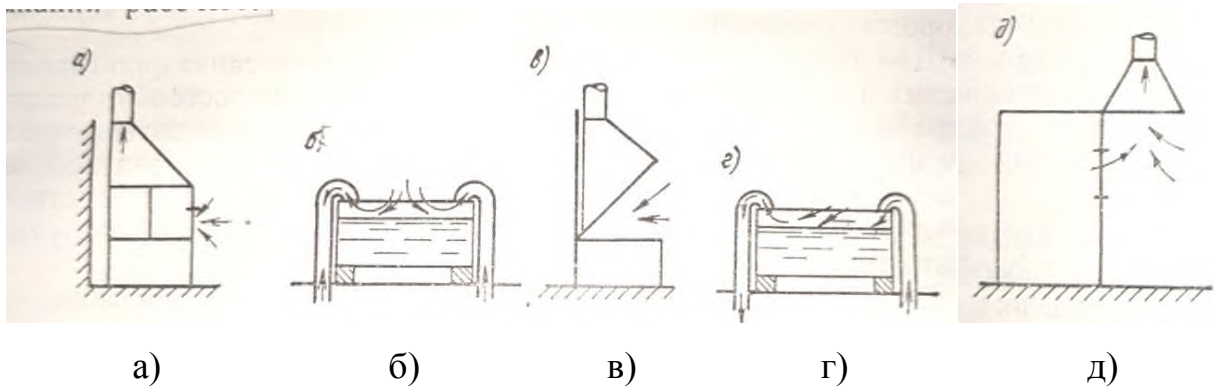


Рисунок 6.1 - Типи місцевих всмоктувачів

(а - укриття; б, г - бортові відсмоктувачі; в - панель рівномірного всмоктування; д - парасолька)

В тих випадках, коли виділення шкідливих речовин відбувається по всьому об'єму приміщення або пристрій місцевих відсмоктувачів неможливий, передбачається загальнообмінна витяжна вентиляція. Для відшкодування повітря, який видаляється з приміщення, подається зовнішнє чисте повітря, що здійснюється припливною вентиляцією, яка може бути загальнообмінною і місцевою. Загальнообмінний приплив повинен направлятися в найбільш брудні місця виробничого приміщення в таких кількостях, щоб розбавити виробничі шкідливі речовини до гранично допустимих концентрацій або знизити температуру до необхідної при надлишках тепла в приміщенні.

Місцева припливна вентиляція може виконуватися у вигляді повітряних душів (рис. 6.2) і повітряних оазисів з метою створення в обмеженому обсязі приміщення необхідних метеорологічних параметрів. Повітряний душ виконується у вигляді струменя повітря, спрямованого на людину. повітряний оазис передбачає "затоплення" частини виробничого приміщення свіжим повітрям. Ця ділянка може бути по периметру вигороджена із загального приміщення легкими конструкціями. На відміну від повітряного душа при влаштуванні повітряного оазису подача свіжого повітря здійснюється з невеликими швидкостями.

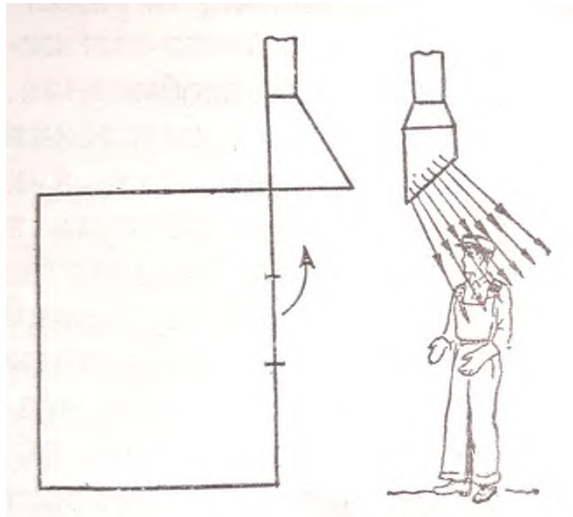


Рисунок 6.2 - Повітряний «душ»

У холодний період року повітря, що подається припливною вентиляцією, підігрівається. Витрати тепла на нагрів припливного повітря становить значну частину експлуатаційних витрат, тому найчастіше доцільно застосовувати підмішування внутрішнього (нагрітого) до зовнішнього повітря, тобто здійснювати часткову рециркуляцію повітря. Слід пам'ятати, що застосування рециркуляції при шкідливих речовинах (гази, аерозолі та ін.) обмежується санітарними нормами.

Для виключення електротравм під час виконання досліджень, в роботі передбачено організаційні заходи:

1. Проведення навчання з правил охорони праці, перевірка знань та атестація персоналу згідно НПАОП 0.00-4.12-05 «Типове положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці».

2. Проведення первинного інструктажу перед початком роботи у лабораторії динамічних випробувань згідно НПАОП 0.00-4.12-05 «Типове положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці».

3. Дотримання правил НПАОП 0.00-1.71-13 «Правил охорони праці під час роботи з інструментом та пристроями» та вимог ДСТУ Б В.2.5-82:2016

«Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом».

Технічні заходи:

1. Встановлення знаків безпеки, механізмів блокування та захисних приладів на струмопровідних частинах фрезерного верстата моделі FWD-32J відповідно до вимог «ПУЕ» [48]. Вимоги вказані у главі 1.1.32, де допускається застосовувати суцільні, сітчасті або дірчасті пристрої, які забезпечують ступінь захисту не менше ніж IP2X за ГОСТ 14254-96 (МЭК 529-89) «Степени защиты, обеспечиваемые оболочками».

2. Відповідно до вимог глави 1.8.162 «ПУЕ» [48], величина опору контуру захисного заземлення електрообладнання приміщення з ПК у будь-яку пору року не перевищує 4 Ом.

Для виключення небезпек, що пов'язані з порушеннями правил пожежної безпеки та з проявом наслідків надзвичайних ситуацій, в роботі передбачено організаційні заходи:

1. Призначення осіб, що відповідальні за пожежну безпеку, надзвичайні ситуації та проведення ними бесід з дослідниками.

2. Проведення навчання з правил охорони праці, перевірка знань та атестація персоналу згідно НПАОП 0.00-4.12-05 «Типове положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці».

3. Дотримання комплексу протипожежних заходів для лабораторії динамічних випробувань, обладнаної ПК з ВДТ, що розроблений згідно вимог НАПБ А.01.001-2014 «Правила пожежної безпеки в Україні», наприклад:

- своєчасне очищення робочої зони лабораторії динамічних випробувань від горючого сміття та інших швидко займистих матеріалів;
- пожежні виходи повинні бути доступними, засоби гасіння пожеж повинні бути в робочому стані, план евакуації має бути у кожному приміщенні;

- вікна в приміщенні повинні вільно відчинятися, під час знаходження дослідників в приміщенні ґрати вікон повинні бути відчинені.

Технічні заходи:

1. Відповідно до ДСТУ EN 2:2014 «Класифікація пожеж (EN 2:1992, EN 2:1992/A1:2004, IDT)» клас можливої пожежі лабораторії динамічних випробувань визначено як клас А1, відповідно до ДСТУ Б В.1.1-36:2016 «Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою» категорія пожежної небезпеки визначається як категорія Д. Відповідно до ДБН В.1.1.7-2002 «Пожежна безпека об'єктів будівництва» ступінь вогнестійкості будинків і споруд визначено як III.

2. Відповідно до ДБН В.1.1-7:2016 «Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги», ступінь вогнестійкості дослідницької лабораторії визначається як ступінь IIIб. Згідно з 7 розділом передбачається один евакуаційний вихід з лабораторії динамічних випробувань (відстань від найвіддаленішої точки підлоги до зазначеного виходу не перевищує 25 м).

3. Згідно з СНиП 2.09.02-85* «Производственные здания» (табл. 2) максимальна відстань від найбільш віддаленого робочого місця до найближчого евакуаційного виходу дорівнює 65 метрів.

4. Відповідно до «Правил експлуатації та типових норм належності вогнегасників», затверджених наказом МВСУ 15.01.2018 № 25 та зареєстрованих в МЮУ 23.02.2018 р. за № 225/31677, мінімальна кількість порошкових вогнегасників, а саме, переносний вогнегасник із зарядом вогнегасної речовини ВП-5 - 1 шт.

ВИСНОВКИ

1. Було розглянуто особливості процесу фрезерування, проведено аналіз конструкції і геометрії різальної частини кінцевих фрез, як наслідок, визначено основний напрямок подальших дослідів, що пов'язаний із шириною стрічки f_c , яка заточується на задній поверхні зуба фрези.

2. Розглянуто поняття ТЕ та проведено аналіз сучасних методик дослідження вібрацій при фрезеруванні, за результатом якого було описано методику, за якою проводяться експерименти та розглянуто параметри оцінки коливань ТЕ за БФО.

3. Описано основні умови проведення експериментів.

4. Визначено, що у III швидкісній зоні на профілограмі відхилення ТЕ з'являються значні коливання, які пов'язані з регенеративними автоколиваннями при різанні за попереднім вібраційним слідом.

5. Проведено та проаналізовано експерименти з шириною стрічки $f_c = 0$ мм. Згідно з результатами було визначено частоту обертання фрези, при якій автоколивання проявляють себе найбільш інтенсивно. Також проведено дослідження з визначення впливу стрічки на задній поверхні зуба фрези на вібраційні процеси при фрезеруванні кінцевими фрезами

6. Проведено порівняльний аналіз досліджень з різними величинами стрічки f_c . Також було визначено і проаналізовано теоретичну і фактичну продуктивність обробки, а також ефективність видалення припуску. В результаті було визначено, що ширина стрічки $f_c = 0,05$ мм за більшістю параметрів є найбільш ефективною для обробки ТЕ циліндричними фрезами.

7. Проведено економічне обґрунтування вибору ширини стрічки на задній поверхні зуба фрези. В результаті економія витрат на інструмент C_i при виготовленні однієї деталі за допомогою фрези з шириною стрічки на задній поверхні зуба $f_c = 0,05$ мм для зустрічного фрезерування становить 10,48 грн, а для попутного фрезерування - 18,85 грн.

8. Проведено низку попереджувальних заходів щодо запобігання виробничого травматизму, професійних захворювань та інших шкідливих чинників під час проведення наукових досліджень.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Абдурахманов А.У., Джемилов Э.Ш. Анализ причин возникновения автоколебаний при механической обработке резанием / А. У. Абдурахманов, Э. Ш. Джемилов // Научно-техническая статья. - Таврийский научный обозреватель, 2016, №5 (10).
2. Аврутин С. В. Фрезерное дело / С. В. Аврутин. - Москва : Всесоюзное учебно-педагогическое издательство Профтехиздат, 1963. - Изд. 5-е. переработ. и доп. - 542 с.
3. Автоколебания при фрезеровании тонкостенных элементов деталей : монография / Внуков Ю. Н. (ред.), Дядя С. И., Козлова Е. Б [та ін.]. - Запорожье : ЗНТУ, 2017. - 208 с. - ISBN 978-617-529-168-9.
4. Аршинов В. А. Резание металлов и режущий инструмент / В. А. Аршинов, Г. А.Алексеев - Москва : Машиностроение. - 1967. - Изд. 2-е, переработ. и доп. - 500 с. : ил.
5. Балла О. М. Особенности проектирования и изготовления концевых фрез с напайными пластинками твердых сплавов винтовой формы для обработки деталей из авиационных материалов [Электронный ресурс] / О. М. Балла // Научно-техническая статья. - Вестник ИрГТУ. - 2018. - Том 22. - № 11. - Режим доступа:
http://journals.istu.edu/vestnik_irgtu/journals/2018/11/articles/01.
6. Барбашов Ф. А. Фрезерное дело / Ф. А. Барбашов. - Москва : Издательство «Высш.школа», 1973. - 280 с. : ил.
7. Башаров Р. Р., Красников И. П., Гаймалов А. Ф., Хадиуллин С. Х. Исследование взаимосвязи вибраций и шероховатости при фрезеровании / Р. Р. Башаров, И. П.Красников, А. Ф.Гаймалов, С. Х. Хадиуллин // Научно-техническая статья. - Вестник УГАТУ, 2020, Т.24, №3(89).
8. Болотов М.А. Компьютерное моделирование деформаций заготовки в процессе фрезерной обработки / М.А. Болотов, А.Н. Жидяев,

А.В. Кузнецов, О. С. Сурков, Д. Е. Яшин // Научно-техническая статья. - Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 2011. - т. 13. - №4. - С. 170-177.

9. Васин С. А. Прогнозирование виброустойчивости инструмента при точении и фрезеровании. / С. А. Васин. - Москва : Машиностроение, 2006. - 384 с.

10. Все о фрезях по металлу - виды, назначение и применение [Электронный ресурс] // Научно-техническая статья. - 2021. - Режим доступа: <https://moiinstrumentu.ru/vse-o-frezah-po-metallu.html>

11. ГОСТ 17026-71. Фрезы концевые с коническим хвостовиком - Москва: Изд-во стандартов, 1972. - 13 с.

12. ГОСТ 30987-2003. Основные нормы взаимозаменяемости: Назначение размеров и допусков для нежестких деталей : действителен от 2005-01-01. - Москва : Изд-во стандартов. - 2004. - 6 с.

13. Заточка концевой фрезы [Электронный ресурс] // Научно-техническая статья. - 2006-2021. - Режим доступа:

<https://www.rinscom.com/articles/zatochka-kontsevoy-frezy>.

14. Заточка твердосплавных фрез [Электронный ресурс] / Дмитрий Михайлович // Научно-техническая статья. - 2018. - Режим доступа: <https://pitools.ru/articles/zatochka-tyvordosplavnyh-frez-statya.html>

15. Иванов С. Е., Гаврилин А. Н., Козырев А. Н., Мойзес Б. Б. Повышение эффективности фрезерной обработки путём снижения ударно-вибрационных нагрузок / С.Е. Иванов, А.Н. Гаврилин, А.Н. Козырев, Б.Б. Мойзес. // Научно-техническая статья. - Ползуновский вестник, 2018, № 1.

16. Каталог фирмы TAEGUTEC: Металлорежущий инструмент и инструментальная оснастка [Электронный ресурс] // Каталоги. - 2008. - Режим доступа: <http://lab2u.ru/katalog-taegutec-2008-instrument-i-osnastka-str-g112-0943-lab2u.html>

17. Кожевников Д. В. Металлорежущие инструменты / Д. В. Кожевников, С. В. Кирсанов - Томск : Изд-во Том. ун-та. - 2003. - 392 с.: ил. - ISBN 5-7511-1709-3.

18. Козлова Елена Борисовна. Подавление регенеративных автоколебаний при фрезеровании тонкостенного элемента детали концевыми цилиндрическими фрезами : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01 / Елена Борисовна Козлова. - Запорожье, 2017. - 220 с.

19. Криворучко Д. В., Залого В. О., Ємельяненко С. С. Ідентифікація режиму автоколивань в технологічній системі при фрезеруванні кінцевими фрезами / Д. В.Криворучко, В. О.Залого, С. С. Ємельяненко // Научно-техническая статья. - Труды Одесского политехнического университета, 2008, Вып. 1 (29).

20. Кузнецов С.Ф. Обеспечение устойчивости процесса фрезерования в условиях технологической системы мобильного оборудования : дис. ... канд. техн. наук : ? / Кузнецов Сергей Фёдорович. - Липецк, 2019. - 131 с.

21. Куклев Л. С., Тазетдинов М. М. Оснастка для обработки нежестких деталей высокой точности / Л. С. Куклев, М. М. Тазетдинов - Москва : Машиностроение, 1978. - 104 с. : ил.

22. Маталин А. А. Технология машиностроения / А. А. Маталин. - Ленинград : Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1985. - 496 с.

23. Овсеенко А. Н. Технологические основы методов снижения остаточных деформаций и обеспечения качества обработки высоконагруженных деталей энергомашин : автореф. дис. на соискание научн. степени д-ра техн. наук: спец. 05.02.08; 01.02.06 / А. Н. Овсеенко ; Моск. высш. техн. уч-ще им. Н. Э. Баумана. - Москва, 1986. - 32 с.

24. Основы металлообработки [Электронный ресурс] // Научно-техническая статья. - Информационно-аналитический электронный журнал Планета САМ. - 2015-2021. - № ФС 77-63083. - Режим доступа: <http://planetacam.ru/college/learn/2-1/>

25. Пат. UA 94974 Україна, МПК (2006) G01H11/00; G01M7/02. Стенд для дослідження коливань при кінцевому циліндричному фрезеруванні тонкостінних елементів деталей / Логомінов В. О., Гермашев А. І., Дядя С. І., Козлова О. Б.; заявник та власник патенту ЗНТУ. - №u201405981 ; заявл. 02.06.2014 ; опубл. 10.12.2014, Бюл. № 23.

26. Пат. UA 103031 Україна, МПК (2006) G01H11/00, G01M7/02. Стенд для оцінки коливального процесу деталі при циліндричному фрезеруванні / Внуков Ю. М., Гермашев А. І., Кучугуров М. В., Дядя С. І., Козлова О. Б.; заявник та власник патенту ЗНТУ. - №u201506355 ; заявл. 26.06.2015 ; опубл. 25.11.2015, Бюл. № 22.

27. Пат. UA 104343 Україна, МПК(2016.01) B23C 5/00; Фреза з регульованими кутами нахилу різальних кромek кожного зуба / Дядя С. І., Козлова О. Б.; заявник та власник патенту ЗНТУ. - №u201506918 ; заявл. 13.07.2015 ; опубл. 25.01.2016, Бюл. № 2.

28. Пат. UA 106901 Україна, МПК(2016.01) G01H 1/00; G01H 11/00. Спосіб аналізу коливань при кінцевому фрезеруванні тонкостінних деталей / Внуков Ю. М., Логомінов В. О., Гермашев А. І., Дядя С. І., Козлова О. Б.; заявник та власник патенту ЗНТУ. - №u201511268 ; заявл. 16.11.2015 ; опубл. 10.05.2016, Бюл. № 9.

29. Применение технологических сред при фрезеровании тонкостенных деталей : монографія / Внуков Ю. Н., Гермашев А.И., Мозговой В.Ф. [та ін.]. - Запорожье : ЗНТУ. - 2016. - 187 с. - ISBN 978-617-529-156-6.

30. Проблемы развития технологии машиностроения / Сателъ Э.А. (ред.) - Москва : Машиностроение, 1968. - 592 с. : ил.

31. Сенькин Е. Н. Основы теории и практики фрезерования материалов / Е. Н. Сенькин, В. Ф. Истомина, С. А. Журавлев, А. И. Федотов (ред.) [та ін.]. - Ленинград : Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1989. - 103 с. : ил. - ISBN 5-217-00579-3.

32. Фомичев Е. О. Разработка способов восстановления моноколес газотурбинных двигателей : автореф. дис. на соискание учен. степени кан-та техн. наук: спец. 05.02.10.; 15.11.13 / Е. О. Фомичев; МГУ ПС (МИИТ). - Москва, 2013. - 19 с.
33. Фреза концевая [Электронный ресурс] / Дмитрий Михайлович // Научно-техническая статья. - 2018. - Режим доступа: <https://pitools.ru/articles/end-mills.html>
34. Фрезерный инструмент : навч. посіб. / Морозов В. В., Григорьев С. Н., Схиртладзе А. Г., Шинаков И. В., Новикова Е. А. [та ін.]. - Владимир : Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. Изд-во ВлГУ, 2014. -214 с. - ISBN 978-5-9984-0480-1.
35. Fitzgerald R. W. Mechanics of materials / Robert W. Fitzgerald. - Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company Inc. - 1982. - 2nd edition. - 132p.
36. Hung C. Y. Effects of cutting conditions on dynamic cutting factor and process damping in milling / C. Y. Hung. J.–J. Junz Wang // Internation jornal of Machine Tools and Manufacture 51, 2011, P. 320-330.
37. Izamshah R. Hybrid Deflection Prediction for Machining Thin-Wall Titanium Alloy Aerospace Component. Dissertation / Raja Izamshah Raja Abdullah. - RMIT University. - 2011. - 199 p.
38. Structural Analysis and Design of Airplanes Engineering Division. - McCook Field Watchmaker Publishing. - 2005. - 332p.
39. Yang G. Elastic and plastic mechanics. - People Education Published Inc., PRC. - 1980.
40. Yusoff, A. R. Optimizations of variable helix end milling tools. Submitted for the degree of Doctor of Philosophy The University or Sheffield, PhD, 22/09/2010. - 204 p.
41. Экономическая эффективность режущих [Электронный ресурс] // Научно-техническая статья. - Высокие технологии. Журнал. Сайт. Блог. - 20???. - Режим доступа: <http://vys-tech.ru/2017/07/10/zapis-1-mashinostroenie/>

42. Михалкина, В. А., Марусич, К. В., Кравцов, А. Г. Расчёт экономической эффективности от внедрения инструмента из твёрдого сплава / В. А. Михалкина, К. В. Марусич, А. Г. Кравцов // Научно-техническая статья. - Оренбургский государственный университет, 2017, ISBN: 978-5-7410-1639-8. - Режим доступа: <http://elib.osu.ru/handle/123456789/2288>

43. Жарков И. Г. Вибрации при обработке лезвийным инструментом / И. Г. Жарков. - Ленинград : «Машиностроение» Ленингр. отд-ние, 1986. - 184 с. : ил.

44. Каталог фирмы TAEGUTEC: Металлорежущий инструмент и инструментальная оснастка [Электронный ресурс] // Каталоги. - 2008. - Режим доступа: <https://ocean.biz.ua/frezy-smennye-plastiny/frezy-koncevye/freza-smoxh-st90-ax06-d16-w16-l120-z04-h>

45. Белов С. В. Безопасность производственных процессов: Справочник / С. В. Белов (ред.), В. Н. Бринза, Б. С. Векшин [и др.]. - Москва : Машиностроение, 1985. - 448 с.: ил.

46. Технічний регламент безпеки машин від 30 січня 2013 р. № 62 [Электронный ресурс] // Законодавство України. - 1994-2021. - Режим доступа: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/62-2013-%D0%BF#Text>

47. Меклер В. Я., Овчинников П. А. Промышленная вентиляция и кондиционирование воздуха / В. Я. Меклер, П. А. Овчинников. - Москва : Стройиздат, 1978. - 312 с. : ил.

48. Правила улаштування електроустановок [Электронный ресурс] // Міненерговугілля України. - 2017. - Режим доступа: <https://art-energetyka.com.ua/Правила-улаштування-електроустановок.pdf>.