

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Машинобудівний факультет

(повне найменування інституту, назва факультету)

Металорізальних верстатів та інструменту

(повна назва кафедри)

## Пояснювальна записка

до дипломного проекту (роботи)

Магістр

(ступінь вищої освіти (освітній ступінь))

на тему Дослідження конструкції кінцевих фрез направлених на  
підбилення якості обробленої поверхні

Виконав: студент VI курсу, групи М-213м  
спеціальності (напряму підготовки)

133 Галузь машинобудування

(код і назва напряму підготовки, спеціальності)

Ермілов І.А.

(прізвище та ініціали)

Керівник Штаневич В.С.

(прізвище та ініціали)

Рецензент Комоскін М.С.

(прізвище та ініціали)

м.Запоріжжя

2018 рік

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Машинобудівний факультет

(повне найменування інституту, назва факультету)

Металорізальних верстатів та інструменту

(повна назва кафедри)

## Пояснювальна записка

до дипломного проекту (роботи)

Магістр

(ступінь вищої освіти (освітній ступінь))

на тему Дослідження конструкції кінцевих фрез направлений на  
збільшення якості обробленої поверхні

Виконав: студент VI курсу, групи М-213м  
спеціальності (напряму підготовки)

133 Галузь машинобудування

(код і назва напряму підготовки, спеціальності)

Ермілов І.А.

(прізвище та ініціали)

Керівник Штанцевич В.С.

(прізвище та ініціали)

Рецензент Комоскин М.С.

(прізвище та ініціали)

м.Запоріжжя

2018 рік

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
**Запорізький національний технічний університет**  
 (повне найменування вищого навчального закладу)

Кафедра Машинобудівничі факультет  
технічних верстатів та інструменту  
 Освіти (освітній ступінь) Магістр  
 спеціальності Галузь машинобудування  
 (код і назва)  
 № 133 Галузь машинобудування  
 (код і назва)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри Фролов М.В.

" 17 " 12 2018 року

**ЗАВДАННЯ**  
**НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТУ**

№ Андрієвич  
 (прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи) Дослідження конструкцій кінцевих фрез напрямних  
ішої обробленої поверхні

Автор роботи) Штанкевич Вікторія Сергіївна. Старший викладач  
 (прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Замовлено вищого навчального закладу від " 7 " листопада 2018 року № 340

Замовлено студентом проекту (роботи) грудень 2018 р

Тема проекту (роботи) Необхідність розробки та дослідження  
фрез напрямних на підвищення якості обробленої

Мета) функціоно-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно  
процесу фрезерування, класифікація та види кінцевих фрез,  
вплив кочивань при механічній обробці, методи зменшення  
характеристик та конструкційно-геометричних параметрів  
відносій процесу фрезерування, еволюція розвитку  
конструкцій.

Вимоги) ого матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

1) рівномірним скрученим кроком, фреза кінцева з  
нахилу різальних кромки, види кінцевих фрез,  
впливають на формування якості обробленої поверхні.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Запорізький національний технічний університет  
 (повне найменування вищого навчального закладу)

Інститут, факультет Машинобудівний факультет  
 Кафедра Металорізальних верстатів та інструменту  
 Рівень вищої освіти (освітній ступінь) Магістр  
 Спеціальність 133 Галузь машинобудування  
 (код і назва)  
 Рік підготовки 133 Галузь машинобудування  
 (код і назва)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри Фролов М.В.

" 17 " 12 2018 року

**ЗАВДАННЯ**  
**НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТУ**

Ермілов Ігор Андрійович  
 (прізвище, ім'я, по батькові)

Тема проекту (роботи) Дослідження конструкції кінцевих фрез направлених підвищення якості обробленої поверхні

Автор проекту (роботи) Штанкевич Вікторія Сергіївна, Старший викладач  
 (прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Відомі наказом вищого навчального закладу від " 7 " листопада 2018 року № 340  
 Термін подання студентом проекту (роботи) грудень 2018 р.

Відомі дані до проекту (роботи) Необхідність розробки та дослідження конструкції кінцевих фрез направлених на підвищення якості обробленої поверхні

Міст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розв'язати)  
 (Питання) Опис процесу фрезерування, класифікація та види кінцевих фрез, вплив вишкнень кривих при механічній обробці, методи зниження впливу характеристик та конструкційно-геометричних параметрів кінцевих фрез на вібраційний процес фрезерування, еволюція розвитку кінцевих фрез, розробка конструкцій.

Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)  
Кінцева з натуральним скрученим кроком, фреза кінцева з натуральним кутлом надливу різальних кромки, види кінцевих фрез, фактори що впливають на формування якості обробленої поверхні.

## 6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	при виконанні завдань
1-9	Старший викладач Штанкевич В.С.		
10	Шмирко В.І.		
Норма контр.	Гуцунко А.В.	14.12.18	

7. Дата видачі завдання вересень 2018 р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	При
1	Поняття якості поверхні	10.09.18	
2	Опис процесу фрезерування	17.09.18	
3	Класифікації та види кінцевих фрез	1.10.18	
4	Присутні виникнення коливань при мех обробці	12.10.18	
5	Методи згашення коливань	22.10.18	
6	Вплив конструкційних і геометричних параметрів на вібраційний процес фрезерування	29.10.18	
7	Еволюція розвитку кінцевих фрез	12.11.18	
8	Виробка конструкції кінцевих фрез	19.11.18	
9	Чисельний аналіз коливань кінцевих фрез	20.11.18	
10	Особона праці	3.12.18	

Студент

  
(підпис)Єрмілов І.А.  
(прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи)

  
(підпис)Штанкевич В.С.  
(прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

Магістерська робота складається: с., 24 рис., 25 табл., 27 джерел.

КІНЦЕВА ФРЕЗА, ЯКІСТЬ ПОВЕРХНІ, МЕХАНІЧНА ОБРОБКА,  
ШОРСТКІСТЬ ПОВЕРХНІ, ГЕОМЕТРІЯ ІНСТРУМЕНТА.

**Мета дослідження** – розробка конструкції кінцевої циліндричної фрези яка буде сприяти зменшенню негативного впливу коливань на якість обробленої поверхні.

**Об'єкт дослідження** – механічна обробка деталей при застосуванні кінцевих фрез зі змінною геометрією.

У роботі виконано аналіз впливу конструкційно-геометричних параметрів кінцевих фрез на якість обробленої поверхні. Запропоновано два виконання конструкції фрез, що будуть зменшувати інтенсивність вібрацій у процесі роботи, і як наслідок буде збільшуватися стійкість інструмента та якість обробленої поверхні. Проведено частотний аналіз конструкцій кінцевих фрез засобами програмного комплексу ANSYS.

## ABSTRACT

Master's work consists of: pp., 24 rice, 15 tables, 27 sources.

FINISH FROST, QUALITY FLOORING, MECHANICAL PROCESSING, SURFACE SURFACE, GEOMETRY OF THE TOOL.

The purpose of the study is the development of the design of the final cylindrical mill, which will help reduce the negative impact on the quality of the treated surface.

The object of the study is mechanical processing of parts with the use of end mills with variable geometry.

In the work the analysis of influence of constructional-geometrical parameters of end mills on the quality of the processed surface is made. Two implementations of the milling cutters are proposed, which will reduce the intensity of vibrations during the work process, and as a result, the stability of the tool and the quality of the treated surface will increase.

Frequency analysis of finisher mills by means of the ANSYS software complex has been carried out.

## ВСТУП

У машинобудуванні існує клас деталей, форма яких обмежена криволінійними поверхнями (лопатки турбін, моноколеса, кулачки). Деталі такого класу поширені в авіабудуванні, суднобудуванні і ін. Такі деталі є відповідальними деталями таких машин як турбогенератори, авіаційно-космічні двигуни та ін.

Від якості та точності виготовлення цих деталей залежить ефективність і надійність роботи всієї машини в цілому.

З метою підвищення ефективності та ККД, зниження енергоспоживання, деталі такого класу повинні мати невелику вагу, і їх виготовляють, як правило, зі спеціальних важко оброблюваних сталей і сплавів. Тому такі деталі досить складно обробити з високою точністю через їхню малу жорсткості і важко оброблюваності матеріалу.

Обробку таких деталей, як правило, здійснюють на верстатах з числовим програмним управлінням методом кінцевого фрезерування.

Кінцеві фрезерування в сучасному машинобудуванні має досить велике значення і в деяких випадках незамінне іншими способами обробки. Підтвердженням цього може служити все більша кількість різноманітних конструкцій кінцевих фрез, що розробляються і поставляються на світовий ринок провідними фірмами з виробництва інструменту.

Однак, у багатьох випадках, доводиться обмежувати режими різання при такому способі обробки внаслідок низької вібростійкості кінцевої фрези і оброблюваної деталі.

Підвищені вібрації призводять до погіршення якості обробленої поверхні, прискореного зносу фрези. Все це знижує продуктивність і якість кінцевого фрезерування нежорстких деталей складної криволінійної форми.

Тому актуальною є задача зниження негативного впливу вібрацій на якість оброблюваної поверхні.

**Мета дослідження** – розробка конструкції кінцевої циліндричної фрези яка буде сприяти зменшенню негативного впливу на якість обробленої поверхні .

**Об’єкт дослідження** – механічна обробка деталей при застосуванні кінцевих фрез зі змінною геометрією.

**Предмет дослідження** – закономірності впливу умов фрезерування і геометричних характеристик інструменту на якість обробленої поверхні.

**Комп’ютерне забезпечення.** При виконанні роботи використовувались програмні продукти *Microsoft Word, КОМПАС 3D V16, ANSYS.*

# ЗМІСТ

с.

Вступ

1 Поняття якості обробленої поверхні

2 Класифікація та види кінцевих фрез

3 Опис процесу фрезерування

4 Причини виникнення коливань при механічній обробці

5 Шляхи зниження коливань

6 Вплив конструкційно-геометричних характеристик кінцевих фрез на вібростійкість процесу фрезерування

7 Еволюція розвитку кінцевих фрез

8 Розробка конструкцій кінцевих фрез направлених на поліпшення якості обробленої поверхні

9 Частотний аналіз конструкцій кінцевих фрез засобами програмного комплексу ANSYS

10 Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях

Висновки

Перелік використаної літератури

## 1 ПОНЯТТЯ ЯКОСТІ ОБРОБЛЕННОЇ ПОВЕРХНІ

Якість машини чи іншої продукції — найважливіший показник не тільки для оцінки самого виробу, але і роботи машинобудівного заводу.

Під якістю продукції розуміють сукупність (суму) взаємопов'язаних властивостей, що визначають її придатність для використання за призначенням. Підвищення якості продукції має величезне значення.

Важливим показником якості продукції, від якого залежать багато експлуатаційні характеристики машин, є точність виробів. Під точністю деталі розуміють ступінь відповідності реальної деталі, отриманою механічною обробкою заготовки, по відношенню до деталі, заданої кресленням і технічними умовами на виготовлення, тобто відповідність форми, розмірів, взаємного розташування оброблених поверхонь, шорсткості поверхні обробленої деталі вимогам креслення.

Отже, якість - поняття комплексне, що включає всебічну оцінку відповідності реальної деталі по відношенню до заданої, в тому числі оцінку шорсткості поверхні.

Виходячи з аналізу літературних джерел можна зробити висновок, що геометрична похибка і втрата показників якості обробленої поверхні, обумовлені наступними причинами:

1. Втратою стійкості; тобто розвитком зносу інструменту, обумовленої різною інтенсивністю зношування окремих ріжучих лез фрези;
2. Технологічними режимами;
3. Геометричними параметрами фрези;
4. Властивостями оброблюваного матеріалу.

Для подальшого розгляду під якістю поверхні отриманої після обробки будемо приймати її шорсткість.

Параметри і характеристики шорсткості поверхні встановлені ГОСТ 2789-73.

Параметри, які використовуються для оцінки шорсткості поверхні обумовлені ГОСТами (ГОСТ 25142-82, ГОСТ 2789-73). На профілограмі поверхні (рис. 1.1) наведені всі характеристики профілю [1].

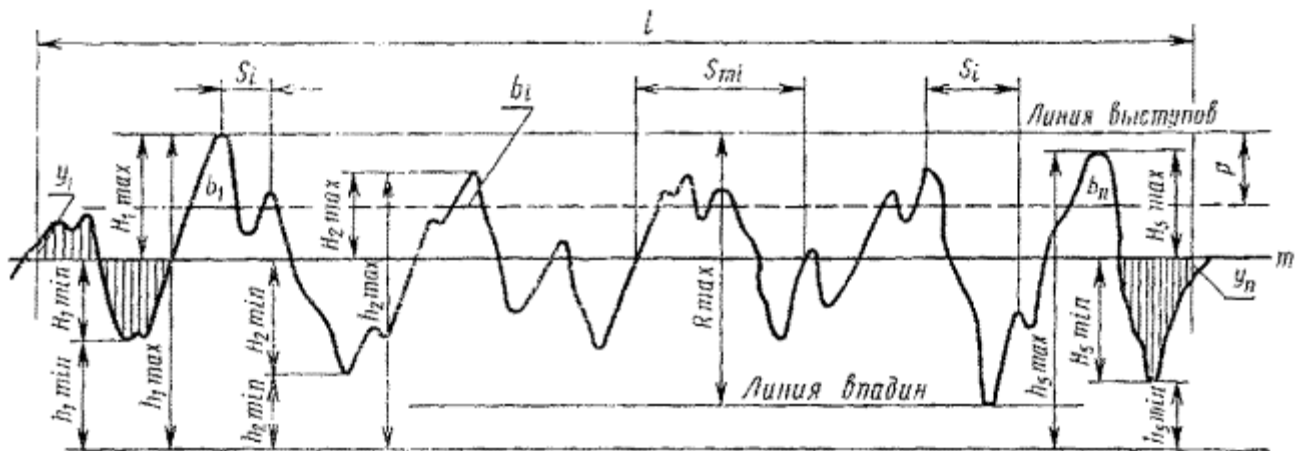


Рисунок 1.1 – Профілограма поверхні (ГОСТ 2789-73)

Шорсткість поверхні оцінюється за 6 параметрами:

1. Середнє арифметичне відхилення профілю –  $Ra$ ;
2. Висота нерівностей профілю за 10 точками –  $Rz$ ;
3. Найбільша висота нерівностей профілю –  $Rmax$ ;
4. Середній крок місцевих виступів профілю –  $S$ ;
5. Середній крок нерівностей профілю –  $S_m$ ;
6. Відносна опорна довжина профілю –  $t_p$ .

Числові значення параметрів шорсткості залежать від вимог до точності розміру і вимог до форми поверхні, тобто встановлюються співвідношення між квалітетом розміру, ступенем точності форми поверхні і її шорсткістю. У таблиці 1.1 наведена середня економічна точність обробки плоских поверхонь фрезеруванням.

Таблиця 1.1 – Середня економічна точність обробки плоских поверхонь фрезеруванням.

Найменування операції		Ra, мкм	Клас шорсткості	Точність
Фрезерування:				
циліндрове	Попереднє	25 – 3,2	2 – 5	12 та гр.
	Чистове	3,2 – 0,8	5 – 7	8
	Тонке	1,6 – 0,4	6 – 8	6
Торцове	Попереднє	25 – 3,2	2 – 5	12 та гр.
	Чистове	3,2 – 0,8	5 – 7	7 – 8
	Тонке	1,6 – 0,4	7 – 8	6

Як видно з вище наведеної таблиці, у результаті обробки, фрезеруванням можна забезпечити достатньо високу точність обробки до 6 квалитета точності і відповідно шорсткість поверхні до 0,4 мкм. А це свідчить про те, що в більшості випадків фрезеруванням буде забезпечуватися остаточна обробка виробу.

Якість обробленої поверхні при фрезеруванні визначається наступними факторами: режими різання, конструктивно-геометричні характеристики інструменту, властивості оброблюваного матеріалу.

Далі у роботі буде розглядатися вплив конструктивно-геометричних характеристики інструменту на якість обробленої поверхні.

## 2 КЛАСИФІКАЦІЯ ТА ВИДИ КІНЦЕВИХ ФРЕЗ

При впровадженні у виробництво оброблювальних центрів з ЧПУ, кінцеве фрезерування отримало ще більш широке застосування. За допомогою кінцевих фрез можна виконувати різні види робіт по обробці не тільки плоских, але і складних за формою поверхонь. Основні види робіт наведено на рис. 2.1.

Кінцеві фрези можна умовно розділити, в залежності від геометрії робочої частини, на циліндричні, сферичні і тороїдальні.

Кінцеві фрези бувають цільними (ріжучі зуби, виготовлені спільно з інструментом), або зі змінними пластинами. Для цільних фрез зазвичай використовують швидкорізальні сталі і тверді сплави на основі карбіду, в той час як у збірних, державка інструмента виготовляється зі сталі з керамічними або твердосплавними пластинками.

З малюнка видно, що у кінцевої фрези завжди можна розрізнити бокові ріжучі кромки на гвинтових зубцях, торцеві ріжучі кромки і перехідні радіусні ріжучі кромки для сферичних і тороїдальних кінцевих фрез. Останні види кінцевих фрез використовують при обробці складних за формою поверхонь.

У більшості випадків, головні ріжучі кромки зубів фрези, знімають більшу частину припуску, розташовані на бічній циліндричній поверхні фрези і для різних умов обробки (чорнова і чистова) можуть мати різну форму (табл. 2.1). Зубці фрези, розташовані на плоскому торці можуть мати ріжучу кромку в центрі, яка дозволяє фрезі працювати з врізанням під кутом або паралельно осі в умовах плунжерного фрезерування.

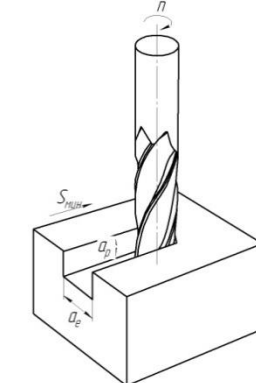
Контурне фрезерування	Фрезерування уступів і тонких стінок	Фрезерування уступів та площин	Фрезерування пазів
			
а	б	в	г
Фрезерування карманів	Фрезерування з врізанням під кутом	Плунжерне фрезерування з осьовим врізанням	Фрезерування складних поверхонь
			
д	е	ж	з

Рисунок 2.1. – Види робіт, що виконуються кінцевими циліндричними фрезами

Таблиця 2.1 – Різновиди різальних кромки у кінцевої циліндричної фрези

Тип	Форма	Умови використання
а) Бічна різальна кромка		
Звичайний зуб на циліндричній поверхні		Фрези з незмінною геометрією зуба, найбільш широко використовуються при чорновому і чистовому фрезеруванні контурів, обробці пазів і уступів
Зуб для чорнової обробки		У фрез чорнового типу ріжуча кромка має зубчасту форму або хвилясту, що дозволяє дробити стружку на дрібні частини. Низький опір різанню дозволяє застосовувати високі подачі при чорновій обробці. Переточування виконують по передній поверхні зуба.
б) Торцева різальна кромка		
Плоский торець фрези (з центровим отвором)		Застосовуються для фрезерування стінок, пазів уступів. Вертикальне врізання неможливе через центровий отвір, який служить для забезпечення точності при заточуванні і переточуванні інструменту
Плоский торець фрези (з ріжучим центром)		Застосовується для фрезерування стінок, пазів і уступів. Можливо вертикальне врізання, ефективність якого вище при меншій кількості зубів. Можливе переточування по задній поверхні.

У таблиці 2.2 наведені рекомендації по вибору інструментального матеріалу фрез при різних методах обробки.

Таблиця 2.2 - Вибір марки інструментального матеріалу фрез при різних методах обробки

Методи і характер обробки	Марка інструментального матеріалу при обробці					
	Вуглецева та легована сталі	Загартована сталь	Титан та сплави на його основі	Чавун	Кольорові метали та сплави на їх основі	Неметалічні матеріали
Фрезерування чорнове	P6M5	-	BK4	P6M5	BK4	BK3
	T5K10		BK8	BK6	BK6	BK4
				BK8	BK8	
Фрезерування чистове	P6M5	T30K4	BK4	P6M5	P6M5	BK3
	T15K6	T15K6	BK6	BK6	P18	
	T14K8	BK6	BK8	9XC	BK6	
		BK8		P18	BK4	

### 3 ОПИС ПРОЦЕСУ ФРЕЗЕРУВАННЯ

Під час фрезерування обертаючий інструмент рухається, щодо заготовки, з метою зняття матеріалу і отримання необхідної конфігурації і розмірів деталі.

Інструмент зазвичай встановлюється в оправку, яка закріплюється в шпинделі. Шпиндель забезпечує швидкість обертання інструменту, крутний момент і потужність. Щоб управляти положенням системи інструмент-оправка-шпиндель, щодо заготовки використовуються різні осі. Як мінімум, три лінійні осі, розташовані взаємно перпендикулярно; лінійні переміщення позначаються  $x$ ,  $y$  і  $z$  і в подальшому визначають осі інструменту.

Однак, також існують фрезерні верстати з додатковими осями обертання, для забезпечення можливості контурної обробки деталей з криволінійними поверхнями. В цьому випадку обертальні ступені свободи зазвичай позначаються  $A$ ,  $B$  і  $C$ , які позначають обертання навколо осей  $x$ ,  $y$  і  $z$  відповідно. Як і токарні верстати, фрезерні верстати можуть бути з ручним або числовим програмним керуванням.

На рисунку 3.1 показаний приклад розташування осей в трикоординатному фрезерному верстаті. Показано вертикальне розташування шпинделя, але також можливо і горизонтальне положення шпинделя. Горизонтальному розташуванню віддають перевагу при високошвидкісному фрезеруванні тому, що стружка падає з заготовки для подальшого накопичення.

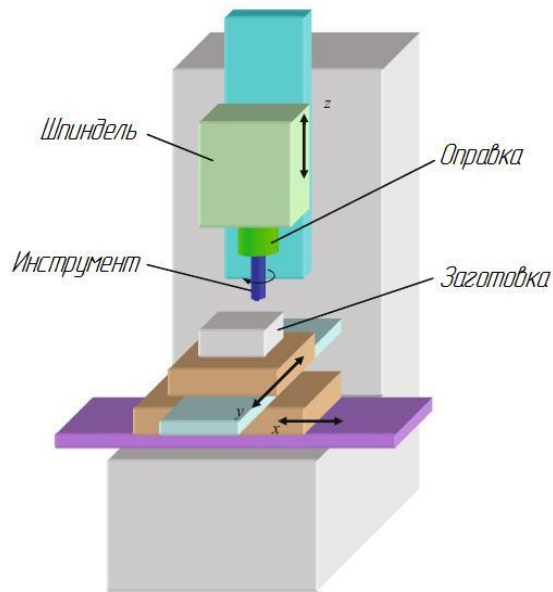


Рисунок 3.1 – схематичне зображення вертикально фрезерного верстата.

Розрізняють два основних види фрезерування:

1. Тангенціальне або циліндричне - при якому леза обертового циліндричного інструменту утворюють оброблену поверхню паралельно осі його обертання;
2. Радіальне або торцеве коли леза інструменту, що обертається, утворюють оброблену поверхню перпендикулярно до осі його обертання.

Як тангенціальне, так і радіальне фрезерування може здійснюватися двома способами: проти подачі, так зване зустрічне фрезерування, коли напрямок подачі протилежний напрямку обертання фрези, і фрезерування за подачею - попутне фрезерування, коли напрямок подачі і обертання фрези співпадають. Схема зустрічного і попутного фрезерування представлена на рисунку 3.2.

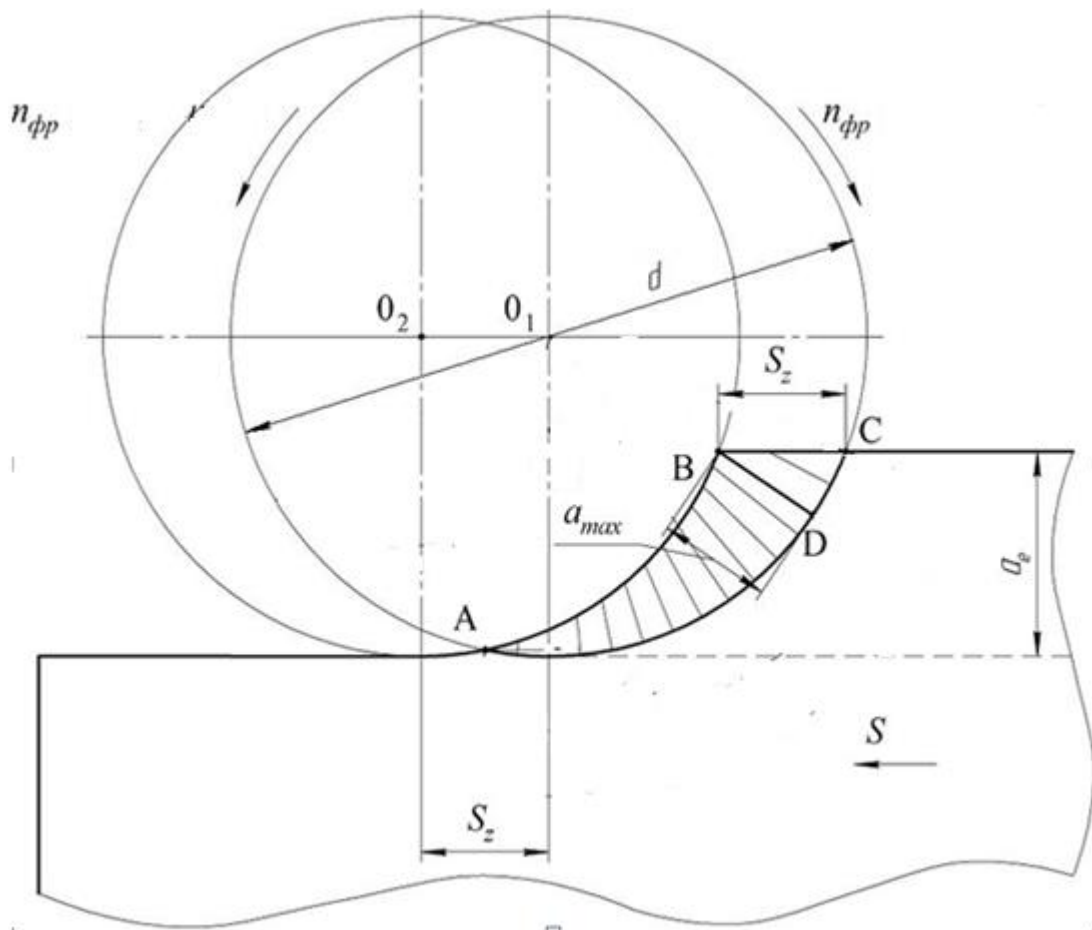


Рисунок 3.2 – Схема зустрічного і попутного фрезерування.

При зустрічному фрезеруванні навантаження на зуб зростає від нуля до максимуму, так як товщина шару, що зрізається змінюється від мінімального в точці А до максимального значення на ділянці ВС, в момент виходу зуба фрези з заготовки. При цьому зубці фрези, діючи на заготовку, прагнуть «відірвати» її від столу верстата або пристосування, в якому вона закріплена. Такий напрям сили викликає в ряді випадків (при великих пріпусках на обробку) пружні деформації в системі СПЗ, що, в свою чергу, призводить до вібрацій і збільшення шорсткості обробленої поверхні. Зубці фрез при цьому інтенсивно зношуються, так як в момент врізання в заготовку їх задні поверхні труться об зміцнену, вже оброблену поверхню, долаючи значну силу тертя.

Перевагою зустрічного фрезерування перед попутним є робота зубів фрези з-під корки. Леза в момент входу в зону крихкого металу підвищеної твердості (кірки) припиняють контакт своєї задньої поверхні з заготівкою на ділянці ВС так як відбувається скол стружки.

При попутному фрезеруванні зуб врізається в матеріал на ділянці ВС, починаючи працювати при максимальній товщині шару, що зрізається і найбільшому навантаженню, що виключає початкове прослизання зуба, а закінчує свою роботу в точці А. При попутному фрезеруванні отримують поверхню з меншою шорсткістю і більш високою точністю, так як зубцями фрези, під час обробки, заготівка притискається до столу верстата, що зменшує вібрацію.

Для успішного застосування попутного фрезерування необхідно без зазорне з'єднання ходового гвинта і маточної гайки столу верстата.

З огляду на переваги і недоліки розглянутих методів, попутне фрезерування використовують для попередніх і чистових робіт при відсутності корки, на жорстких верстатах з компенсаторами зазорів у вузлах столу. Зустрічне фрезерування рекомендується для попередньої обробки, і особливо при роботі по корці.

Відповідно можна зробити висновок про те, що продуктивність процесу різання взагалі, і особливо процесу фрезерування, в значній мірі пов'язана з вібраціями.

Вібрації, що виникають в процесі обробки призводять до погіршення якості обробленої поверхні.

Розвиток и виникнення коливання при різанні можуть бути обумовлені фізичними явищами, які залежать від характеристики системи верстат-прістосування-інструмент-деталь, режимів різання та інших факторів.

## 4 ПРИЧИНИ ВИНИКНЕННЯ КОЛИВАНЬ ПРИ МЕХАНІЧНІЙ ОБРОБЦІ

Під час механічної обробки різанням з різних причин можуть виникати коливання елементів системи СПЗ. Залежно від їх природи коливання поділяють на вимушені і автоколивання [2].

Вимушені коливання виникають під дією зовнішньої періодичної сили. До таких сил відносять сили пов'язані з процесом різання (преривчасте різання, утворення елементної стружки, виникнення і зрив наросту, нерівномірність припуску і ін.) та сили, що виникають поза зоною різання (неврівноваженість обертових частин верстата, деталі та інструменту, дефекти зубчастих і ремінних передач верстата і ін.). Частота вимушених коливань елементів технологічної системи (ТС) дорівнює частоті дії змушуючої сили. Для зменшення вимушених коливань необхідно знизити рівень сил, що їх викликають.

Автоколивання елементів ТС відрізняються від вимушених коливань тим, що їх частота дорівнює частоті власних коливань цих елементів і не залежить від режимів різання.

Автоколивання прийнято умовно розділяти на первинні, які виникають при першому проході інструменту, і вторинні, які виникають при зрізанні хвилястості, залишеної на поверхні різання при попередньому проході інструменту [3]. Поява первинних коливань дослідники пов'язують з різними причинами:

– «Падаючої» залежністю коефіцієнта тертя на передній поверхні інструменту від швидкості стружки, що переміщається по ній [4]. В англійській літературі автоколивання, що виникають з цієї причини, часто називають «frictional chatter» [5]. Проте дослідженнями [6] було встановлено, що нелінійна залежність сили тертя стружки від швидкості різання не може бути причиною виникнення вібрацій при різанні, так як залежність сили різання від швидкості вельми інерційна.

- відставання зміни сили різання від зміни товщини зрізаного шару [7].
- наявністю координатного зв'язку переміщень інструменту по взаємно перпендикулярних осях координат, яка призводить до коливального руху інструменту по замкнутій еліпсоподібній траєкторії [8].
- зміна кінематичних кутів інструменту при коливаннях [9].

Деякі з дослідників розглядають одну з перерахованих вище причин як єдину причину виникнення вібрацій. Інші ж виділяють одну з причин як основну, а решта як другорядні.

Вторинні причини виникнення автоколивань пов'язані з їх повторним збудженням періодично змінюючоюся товщиною стружки, викликані хвилястістю, що залишилася на поверхні різання при попередньому проході інструменту. Коливання, викликані цією причиною, називають регенеративними автоколиваннями (в англійській літературі - «regenerative chatter» [10]).

Фрезерування є переривчастим процесом механічної обробки і характеризується періодичним врізанням зубів в оброблюваний матеріал. Крім того, при фрезеруванні безперервно змінюється перетин зрізаємого шару. Таким чином, при фрезеруванні завжди існують умови для виникнення вимушених коливань.

## 5 ШЛЯХИ ЗНИЖЕННЯ КОЛИВАНЬ

Найбільш поширеними прийомами боротьби з вимушеними і автоколиваннями є зниження сил різання, а також підвищення жорсткості і демпфуючої здатності всіх елементів ТС [6]. Високу вібростійкість верстатів прагнуть досягти ще на стадії їх проектування [11]. Можливості підвищення жорсткості фрез зазвичай обмежені.

Наступний підхід підвищення вібростійкості фрезерування полягає в зниженні регенеративного ефекту, тобто впливу вібраційного сліду на поверхні різання, залишеного попереднім зубом. Цього досягають:

- застосовуючи фрези зі змінними по їх окружності конструктивно-геометричними параметрами зубів (окружним і радіальним розташуванням зубів, кутами їх нахилу, головними кутами в плані) або зі змінною жорсткістю [12,13].

- визначення таких режимів різання, які забезпечать вібростійкість обробки. Це може бути реалізовано тільки на верстатах з безступінчатим регулюванням частоти обертання. [14].

- змінна швидкість різання [11]. Перевагою методу є більш широка область технологічних параметрів, в порівнянні з перерахованими вище методами, в яких можна домогтися істотного зниження амплітуди коливань. Недоліком такого методу є складність оснащення металорізальних верстатів пристроями для створення змінної швидкості різання, а також недостатня вивченість можливості сучасних приводів з CNC керуванням.

- перспективним є використання адаптивних систем управління, які виявляють вібрації в процесі механічної обробки і в режимі реального часу вносять зміни до режиму різання або змінюють характеристики технологічної системи з метою зниження коливань [15]. Недоліком адаптивних систем є необхідність оснащення нею кожного верстата, що призводить до додаткових фінансових витрат і ускладнення самої

конструкції верстата, а також недосконалість алгоритмів управління, що є наслідком недостатності знань в області коливань при механічній обробці.

Зниженню вимушених коливань сприяє ретельне балансування оправок інструмента.

Колівання є одним з, лімітуючи, факторів підвищення продуктивності та якості обробленої поверхні. Одним з напрямків зниження коливань є удосконалення і створення різальних інструментів підвищеної вібростійкості.

## 6 ВПЛИВ КОНСТРУКЦІЙНО-ГЕОМЕТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК КІНЦЕВИХ ФРЕЗ НА ВІБРОСТІЙКІСТЬ ПРОЦЕСУ ФРЕЗЕРУВАННЯ

Діаметр і кількість зубів фрези.

Діаметр і кількість зубів фрези істотно впливають на вібростійкість, через зміну характеристик їх жорсткості і часу контактування з деталлю. На рисунку 6.1 показано порівняння площі стружкових рівців  $F_k$  і площі серцевини фрези в залежності від числа зубів. При одному діаметрі фрези  $D$  зі збільшенням числа зубів збільшується діаметр серцевини -  $d$ , що підвищує міцність і твердість фрези, але погіршує умови розміщення стружки.

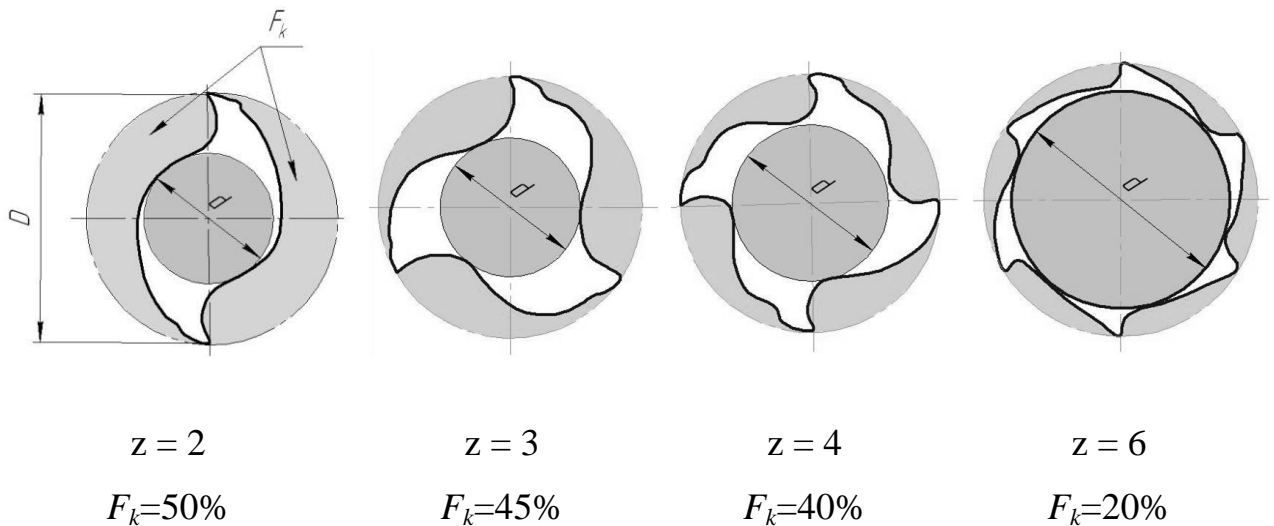


Рисунок 6.1 – Порівняння площі поперечного перерізу стружкових рівців  $F_k$  і діаметра серцевини фрези -  $d$  від кількості зубів -  $z$ .

У таблиці 6.1 наведені рекомендації щодо застосування і характеристики фрез в залежності від кількості зубів.

Таблиця 6.1 - Рекомендації щодо застосування і характеристики фрез в залежності від кількості зубів

Двухзубі фрези	Трихзубі фрези	Чотирьох і багатозубі фрези
Низька міцність на згин	Середня міцність на вигин	
Великий простір для стружки, відсутність пакетування (надійне видалення стружки)	Менший простір для стружки, ніж у 2-о зубої	Невеликий простір для стружки
Менша жорсткість в наслідок меншої площі перетину серцевини	Велика площа перетину серцевини, вище жорсткість, ніж у 2-о зубої	Висока жорсткість завдяки великій площі перетину серцевини
Низька якість обробленої поверхні	Краща якість обробленої поверхні	Висока якість обробленої поверхні
Обробка пазів і фрезерування в важких умовах	Універсальне застосування	Обробка по контуру, фрезерування уступів і неглибоких пазів

При виборі числа зубів фрези необхідно дотримуватися умови рівномірності фрезерування. Для фрез з прямими зубами ця умова забезпечується, якщо в роботі одночасно бере участь не менше двох зубів.

Коефіцієнт рівномірності:

$$\xi = \frac{\theta_m}{\varepsilon}$$

де  $\theta_m$  – центральний кут контакту;

$\varepsilon$  – окружний крок зубів фрези.

Центральний кут  $\Theta_m$ , який відповідає початку і кінцю робочого циклу зуба фрези, називають максимальним кутом контакту. Його величину можна визначити за формулою:

$$\cos\Theta_m = \frac{R-t}{R} = 1 - \frac{2t}{D}, \quad (6.2)$$

Необхідно відзначити, що через малу глибину різання, яка визначається за формулою  $t = \frac{D(1-\cos\Theta_m)}{2}$ , не завжди можна домогтися при заданих  $D$  і  $t$  рівномірності фрезерування, особливо для фрез з дрібним зубом.

При роботі спірального зуба немає миттєвого вривання і виходу усього зуба фрези з-під стружки, завдяки чому площа перетину стружки на зубі, окружне зусилля, крутний момент, досягнувши максимуму, падають поступово, що звільняє його від різких стрибків навантаження на фрезі. Диференціал площі перетину стружки  $df$  можна розрахувати за такими залежностями [16]:

$$df = a_x dx = a_x \frac{D}{2} \frac{d\Theta}{\sin \omega} = \frac{S_z D \sin \Theta}{2 \sin \omega} d\Theta, \quad (6.3)$$

$$\text{де } dx = \frac{D}{2} \frac{d\Theta}{\sin \omega}.$$

Тоді миттєвий поперечний переріз шару, що зрізається гвинтовим зубом фрези:

$$f = \int_{\Theta_1}^{\Theta_2} df = \frac{S_z D \sin \Theta}{2 \sin \omega} \int_{\Theta_1}^{\Theta_2} \sin \Theta d\Theta = \frac{S_z D}{2 \sin \omega} (\cos \Theta_1 - \cos \Theta_2) \quad (6.4)$$

З виразу 6.4 видно, що при русі зуба фрези по поверхні різання площа перетину зрізаного шару є змінною і залежить від кута  $\omega$ .

Оскільки одночасно в роботі може перебувати кілька зубів, то сумарний перетин шару(дивись рис. 6.2),, що зрізається одночасно  $m$  працюючими гвинтовими зубцями фрези, можна визначити за формулою:

$$F_{\Sigma} = \frac{S_z D}{2 \sin \omega} \sum_{i=1}^m (\cos \Theta_{1i} - \cos \Theta_{2i}), \quad (6.5)$$

де  $\Theta_{1i}, \Theta_{2i}$  – кути контакту двох крайніх точок  $i$ -й гвинтовий ріжучої кромки, які беруть участь у роботі;

$m$  – число зубів фрези, що одночасно знаходяться у контакті:

$$m = \frac{\Theta_m}{\delta_{\phi}} = \frac{\Theta_m z}{360^{\circ}}, \quad (6.7)$$

де  $\delta_{\phi} = 360^{\circ} / z$  – центральний кут між двома сусідніми зубцями фрези (кутовий крок).

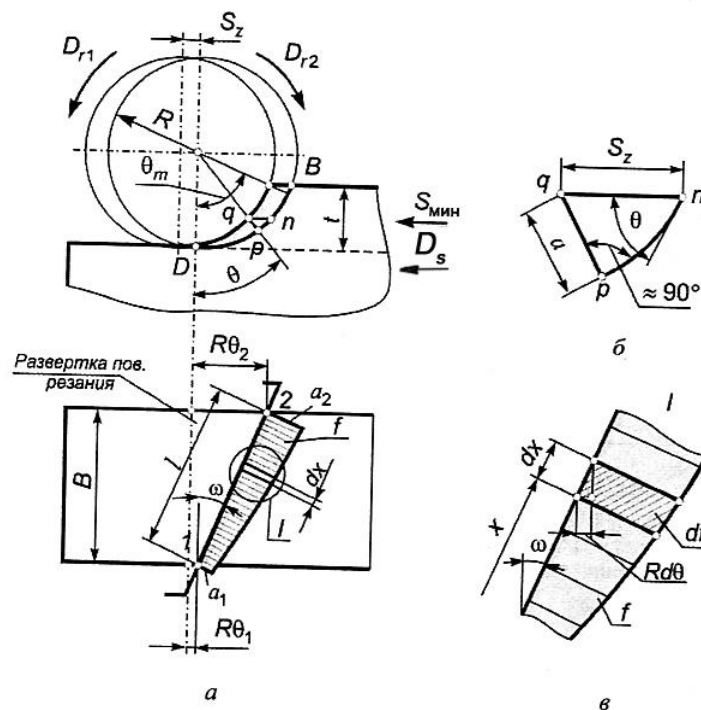


Рисунок 6.2 - Елементи режимів різання і параметри перетину зрізаного шару при фрезеруванні циліндричною фрезою з гвинтовим зубом.

А.М Розенберг [17,18] доказав, що при роботі циліндричної фрези з гвинтовими зубами можна задати такі умови, при яких сумарна на всіх, що одночасно знаходяться в роботі зубах перетин стружки залишатиметься постійним як за величиною, так і за формою. Виходячи з цього, сумарне окружне зусилля і крутний момент будуть також постійні, робота буде відбуватися абсолютно спокійно без коливань і поштовхів.

Роботу циліндричної фрези з гвинтовими зубами в таких умовах називають рівномірним фрезеруванням. Умову рівномірного фрезерування можна отримати, коли під стружкою знаходиться одночасно більше одного зуба (рис. 6.2) і виконується умова:

$$C = \frac{B}{h_{oc}} = \frac{Bz \operatorname{tg} \omega}{\pi D}, \quad (6.8)$$

де  $C$  – ціле число 1, 2, 3...;

$B = a_p$  – осьова глибина фрезерування;

$h_{oc}$  – осьовий крок фрези (відстань між сусідніми зубцями фрези, виміряне в напрямку осі фрези);

$z$  – кількість зубів фрези;

$\omega$  – кут нахили різальної кромки;

$D$  – діаметр фрези.

Необхідно намагатися призначати такі  $D$  і  $t$  щоб забезпечувалася умова рівномірного фрезерування. Якщо дотримуватися такої умови, то можна домогтися сталості сумарного перетину шару, що знімається на всіх працюючих зубах, не дивлячись на те, що кожен з цих зубів має змінний перетин. В результаті цього сумарна окружна сила і крутний момент також будуть постійні і фреза буде працювати рівномірно. Тобто буде забезпечуватися краща якість обробленої поверхні.

Форма зубів і западин

Форма зубів і западин повинні забезпечувати міцність зуба і достатній простір для розміщення стружки, її відведення із зони різання, а також максимальну кількість переточувань.

Для гостро заточених фрез найбільш поширена трапецеїдальних форма зуба (рис. 6.4, а), котра застосовується для чистових фрез. Зуб такої форми заточується по задній поверхні. Висота зуба  $h$  обирається в межах  $0,5 \dots 0,65$  от окружного кроку, а  $r=(0,5-2,0)$  мм.

Крупні зубці фрез виконуються згідно рис. 6.4,б,в. Форма зуба за рис. 6.1,б має подвійну прямолінійну спинку, де  $\alpha$  — робочий задній кут, отримується шляхом заточування, а  $\alpha_1 = 20 \dots 30^\circ$ . Зуб третьої форми (рис.6.4,в) має криволінійну спинку, при цьому  $R = (0,3 \dots ,45)D$ ,  $h = (0,3 \dots 0,45)t_{\text{окр}}$ ,  $f = 1 \dots 2$ мм,  $\gamma = (0,4 \dots 0,75)h$ , а  $\alpha_1 = \alpha + (10 \dots 15^\circ)$ . Таку форму зуба мають, наприклад, швидкорізальні кінцеві обдирні фрези.

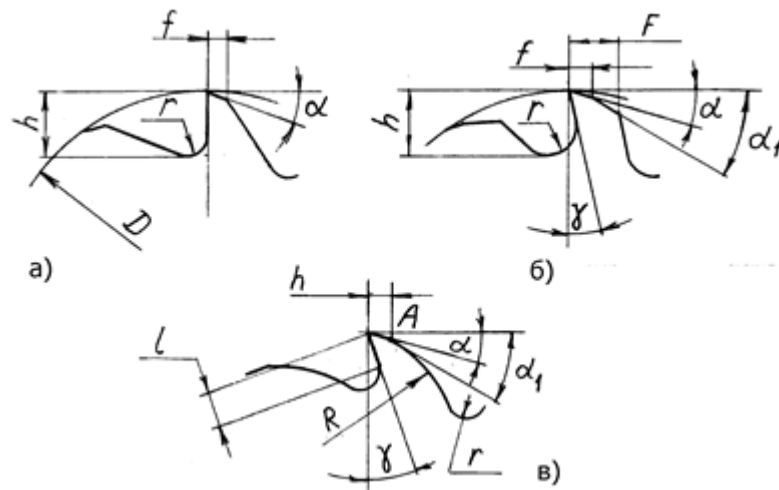


Рисунок 6.4– Форма гострокінцевих зубів

Форма зуба представлена на рис.6.4. б, отримала найбільше розповсюдження.

Кути різальної частини фрези.

Вибір оптимальних кутів ріжучих елементів фрез залежить головним чином від призначення фрези, властивостей оброблюваного матеріалу і технологічних умов обробки.

*Задній кут  $\alpha$ .*

Основне призначення заднього кута усунення тертя задньої поверхні зуба про оброблювану поверхню в процесі різання. При відсутності особливих вимог щодо точності і чистоти обробки, для фрез з дрібними зубами, як призначених для зняття невеликого шару металу, задній кут приймають рівним  $16^\circ$ , для фрез з великим зубом  $12^\circ$ .

Вибір великого заднього кута небажаний, так як він пов'язаний з ослабленням різальної кромки. Крім того, з підвищенням величини заднього кута зростає знос ріжучої кромки в радіальному напрямку. Точність обробки залежить від величини радіального зносу. Якщо необхідно отримати поверхню високої якості, необхідно, для фрез з твердого сплаву, знижувати величину заднього кута до  $5 - 8^\circ$  з метою забезпечення більшої міцності і стабільності різальної кромки зуба фрези.

*Передній кут  $\gamma$ .*

Передній кут призначений для зменшення роботи, що витрачається на пластичну деформацію стружки, яка видаляється в процесі різання. Він обирається в залежності від фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу і характеристик матеріалу інструменту. У таблиці 6.5 представлені рекомендації по вибору величини переднього кута.

Таблиця 6.5 - Значення переднього кута фрез

Оброблює мий матеріал		Значення кута $\gamma$ для фрез	
		швидкоріжучих	твердосплавних
Сталь	$\sigma_B$ до 600 МПа	20°	15°
	$\sigma_B = 600 \dots 1000$ МПа	15°	+5°...-5°
	$\sigma_B > 1000$ МПа	12°...10°	-10°...-15°
Чавун		5°...15°	+5°...-5°

Для фрез з гвинтовим зубом вибір переднього кута  $\gamma$  пов'язаний з кутом нахилу ріжучих зубів  $\omega$ . Зі збільшенням кута нахилу зубів різниця між фактичним переднім кутом  $\gamma_\phi$  і кутом в нормальній перетині  $\gamma_N$  різко зростає. Значення фактичного переднього кута можна визначити за формулою:

$$\sin \gamma_\phi = \sin^2 \omega + \frac{\cos^2 \omega \cdot \operatorname{tg} \gamma_N}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \omega + \operatorname{tg}^2 \gamma_N}}$$

де  $\omega$  – кут нахилу різальних зубів;

$\gamma_N$  – передній кут у нормальній перетині.

Кут  $\gamma_N$  можна обирати не значним [19] для фрез з  $\omega = 40 \dots 60^\circ$ . При цьому фактичний передній кут  $\gamma_\phi$  виявиться досить великим при мінімально допустимому ослабленні різальної кромки, що особливо важливо при конструюванні фрез для обробки високоміцних матеріалів. У таблиці 6.6 представлені значення фактичного переднього кута фрез.

Таблиця 6.6 – Значення фактичного переднього кута фрез

$\gamma_N$	Кут $\gamma_\phi$ при куті $w$						
	5°	10°	20°	30°	40°	50°	60°
5°	5°	6°30′	11°	17°50′	27°	37°30′	49°30′
10°	10°	11°20′	15°10′	21°20′	29°30′	39°15′	50°30′
15°	15°	16°10′	19°20′	24°50′	32°	41°	51°30′

*Головний кут в плані  $\phi$ .*

Подібно як і у різця кут  $\phi$  визначає співвідношення між товщиною і шириною шару, металу що знімається в залежності від глибини різання і подачі. Кут  $\phi$  може бути обраний від технологічних умов. Зі зменшенням кута  $\phi$  товщина зрізу зменшується, ширина збільшується, а разом з цим поліпшується відведення тепла із зони різання. В результаті стійкість фрези зростає і з'являється можливість підвищити величину подачі.

Є і негативні фактори, зменшення кута  $\phi$  змінює співвідношення складових сили різання, викликаючи великий ріст радіальної і осьової складових. У зв'язку з цим фрези у яких величина кута в плані не велика (близько 20°) можуть бути використані тільки за умови жорсткої системи СПЗ, при цьому глибина різання не повинна перевищувати 3 мм. У разі необхідності підвищити глибину різання рекомендується кутову кромку виконувати під двома кутами  $\phi$  в межах 45-60° і  $\phi_0 = 20^\circ$ . Зазвичай кут  $\phi_0$  приймається рівним  $\frac{\phi}{2}$ . Висота кутової кромки повинна бути більше величини шару, що знімається за один прохід.

Если концевая фреза предназначена для обработки двух взаимно-перпендикулярных плоскостей, то угол принимается равным  $\phi = 90^\circ$ . Целью упрочнения вершины зуба рекомендуется снимать фаску под углом 45° на длине 0,5 – 1,5мм, которая в некоторой степени играет роль переходной кромки.

Якщо кінцева фреза призначена для обробки двох взаємно-перпендикулярних площин, то кут приймається рівним  $\varphi = 90^\circ$ . Метою зміцнення вершини зуба рекомендується знімати фаску під кутом  $45^\circ$  на довжині 0,5 - 1,5мм, яка в деякій мірі грає роль перехідної кромки.

*Допоміжний кут в плані  $\varphi_1$ .*

С уменьшением угла  $\varphi_1$  качество обрабатываемой поверхности улучшается, но одновременно возникают вибрации, которые могут вызвать выкрашивание режущих кромок.

Для уменьшения трения в процессе работы монолитные концевые фрезы изготовленные из быстрорежущей стали, имеют на торцевых зубьях угол  $\varphi_1$  (поднутрения) в пределах  $1-3^\circ$ . А в случае когда концевые цилиндрические фрезы лишены торцевых зубьев, угол  $\varphi_1$  может быть повышен до  $8-10^\circ$ .

Зі зменшенням кута  $\varphi_1$  якість оброблюваної поверхні поліпшується, але одночасно виникають вібрації, які можуть викликати викришування різальних крайок.

Для зменшення тертя в процесі роботи монолітні кінцеві фрези виготовлені з швидкорізальної сталі, мають на торцевих зубах кут  $\varphi_1$  (піднутрення) в межах  $1-3^\circ$ . А в разі коли кінцеві циліндричні фрези позбавлені торцевих зубів, кут  $\varphi_1$  може бути підвищений до  $8-10^\circ$ .

*Кут нахилу різальної кромки  $\lambda$ .*

Для кінцевих циліндричних фрез з гвинтовими або нахиленими зубцями кут нахилу їх  $\omega$  є кутом  $\lambda$ . Зазвичай у кінцевих фрез цей кут приймається рівним  $30-60^\circ$ .

*Кут нахилу гвинтових зубів  $\omega$ .*

Фрези з гвинтовими зубами мають цілу низку переваг у порівнянні з прямозубими. Гвинтові зубці відводять стружку в сторону, завдяки чому вона не потрапляє під наступний зуб, і тим самим різучі кромки застерігаються від непотрібного зношування. Плавність роботи сприяє зменшенню вібрацій фрези і поліпшенню чистоти оброблюваної поверхні.

Кількість зубів, що знаходяться одночасно в роботі, у фрез з гвинтовими зубами більше, ніж у прямозубих фрез. Це дозволяє в разі необхідності зменшити загальну кількість зубів і тим самим збільшити западини між ними для розміщення стружки.

Для фрез з гвинтовими зубами кут нахилу  $\omega$  значно впливає на напрямок відводу стружки, рівномірність фрезерування, продуктивність і стійкість фрези.

Існують терміни «великий кут нахилу» - значення кута  $\omega$  більш  $35^\circ$  і «малий кут нахилу» - значення кута  $\omega$  менш  $35^\circ$ . Гарним компромісом, між фрезами для чорнової і фінішної обробки, є інструменти з кутом нахилу  $\omega = 38^\circ$

Перевагами фрез з «великими кутами нахилу» є:

- ріжучі зусилля направлено в більшій мірі вертикально, що зменшує відхилення інструменту;
- швидке видалення стружки із зони різання;
- позитивний передній кут сприяє кращому зрушенню метала і зменшує зусилля різання, що дозволяє працювати з великими швидкостями подачі, при меншій потужності;
- діаметр серцевини інструменту більше, завдяки формі, отже, фреза міцніше.

Кінцеві фрези з «великими кутами нахилу» зазвичай застосовуються для обробки твердих матеріалів, так як мають більшу стійкість, в той же час таку фрезу можна використовувати і для обробки алюмінію.

Найбільшим недоліком фрез з «великими кутами нахилу» є те, що вони схильні до вібрацій, а відповідно буде погіршуватися якість обробленої поверхні.

Перевагами фрез з «малими кутами нахилу» є:

- менша ймовірність вібрацій;
- показують кращу продуктивність при роботі з м'якими матеріалами.

Недоліки фрез з «малими кутами нахилу» полягають, в тому, при роботі з твердими матеріалами, ріжучий інструмент працює при низьких швидкостях подачі, а, отже, з низькими швидкостями видалення матеріалу.

## 7 ЕВОЛЮЦІЯ РОЗВИТКУ КІНЦЕВИХ ФРЕЗ

Подальший порівняльний аналіз будемо проводити для кінцевих циліндричних фрез з циліндричним і конічним хвостовиками з конусністю 7:24.

### 7.1 Окружний крок зубів

Раніше конструктивні і геометричні параметри кінцевих фрез з циліндричним хвостовиком повинні були відповідати ГОСТу 17025-71, за яким фрези виготовляють двох типів (рис. 7.1): фрези з нормальним зубом тип 1 і фрези з великим зубом тип 2.

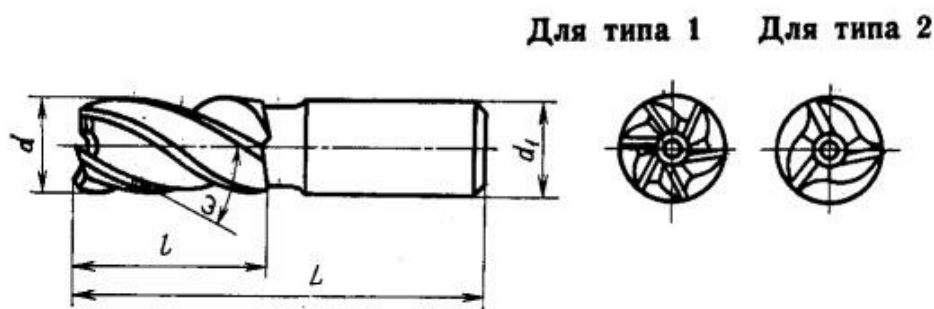


Рисунок 7.1 – Основні типи кінцевих фрез ГОСТ 17025-71

Тип 1 - фрези з нормальним зубом

Тип 2 - фрези з великим зубом

А конструктивні і геометричні параметри кінцевих фрез з конічним хвостовиком повинні були відповідати ГОСТу 17026-71, за яким фрези виготовляють двох типів (рис. 7.2): фрези з нормальним зубом тип 1 і фрези з великим зубом тип 2.

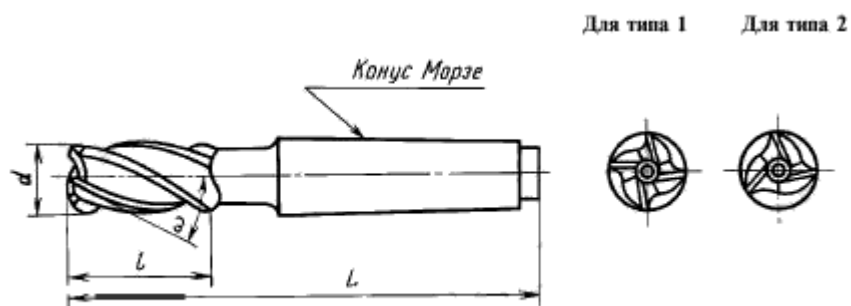


Рисунок 7.2 – Основні типи кінцевих фрез ГОСТ 17026-71

Тип 1 - фрезы з нормальним зубом

Тип 2 - фрезы з великим зубом

Основні розміри наведених вище фрез вказані в таблиці 7.1.

Таблиця 7.1 - Основні розміри фрез

	ГОСТ 17025 –71		ГОСТ 17026 – 71	
	Тип 1	Тип 2	Тип 1	Тип 2
$d, \text{мм}$	2 – 28	2 – 12	10 – 63	10 – 63
$z$	3 – 6	2 – 4	4 – 8	3 – 8
$\omega$	30° – 35°	35° – 45°	30° – 35°	35° – 45°

На даний час актуальним ГОСТом, який регламентує розміри кінцевих фрез з циліндричним, конічним хвостовиками і хвостовиками з конусністю 7:24 є ГОСТ 32831 - 2014 (дата введення 01.01.2016).

Основні розміри наведених вище фрез вказані в таблиці 7.2.

Таблиця 7.2 - Основні розміри фрез

	Цилиндрический хвостовик		Конический хвостовик	
	Тип 1	Тип 2	Тип 1	Тип 2
$d, \text{мм}$	2 – 71	2 – 71	6 – 63	6 – 63
$z$	3 – 8	2 – 4	4 – 8	3 – 8
$\omega$	30° – 35°	35° – 45°	30° – 35°	35° – 45°

Відповідно до представленого аналізу можна помітити, що за останні роки змінився розмірний ряд виготовляються фрез і в зв'язку з цим змінилась кількість зубів.

## 7.2 Окружний крок зубів

При введенні ГОСТ 17025-71 ГОСТ 17026-71 (01.01.73 р.) фрези повинні були виготовляти з нерівномірним окружним кроком, показаному на рис. 7.3 і табл. 7.3 з метою підвищення їх вібростійкості. Допускалося виготовлення фрез з рівномірним окружним кроком –  $\varphi$ . Однак, через 18 років зміною №5 Госту 17025-71 (дата введення з 01.09.91 р.) обов'язкові умови щодо виготовлення фрез з нерівномірним кроком були переведені в рекомендовані. У нині діючому ГОСТі ця рекомендація зберігається.

Згідно до представленого аналізу можна відмітити, що за останні роки змінився розмірний ряд виготовляються фрез і в зв'язку з цим змінилася кількість зубів.

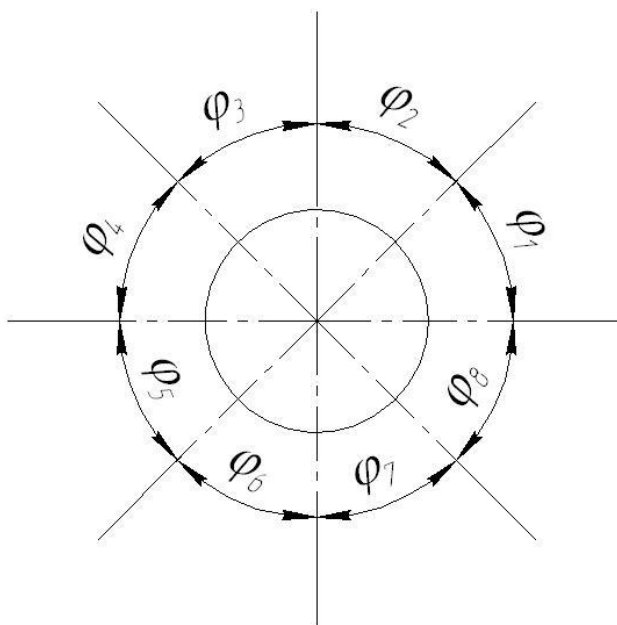


Рисунок 7.3 – Окружний крок многозубої фрези (ГОСТ 17025-71, ГОСТ 17026-71)

Таблиця 7.3 - Значення окружного кроку за ГОСТ 17025-71, ГОСТ 17026-71

Кількість зубців	$\varphi_1$	$\varphi_2$	$\varphi_3$	$\varphi_4$	$\varphi_5$	$\varphi_6$	$\varphi_7$	$\varphi_8$
3	110°	123°	127°	—	—	—	—	—
4	90°	85°	90°	95°	—	—	—	—
5	68°	72°	76°	68°	76°	—	—	—
6	57°	63°	57°	63°	57°	63°	—	—
8	42°	48°	42°	48°	42°	48°	42°	48°

Нерівномірний окружний крок фрези сприяє зменшенню вібрацій, що виникають при обробці, а це в свою чергу сприяє підвищенню стійкості інструменту.

Зменшення вібрацій при використанні фрез з нерівномірним окружним кроком пояснюється тим, що величина стружки неоднакова у суміжних зубів і як наслідок сили різання різні за величиною, сили різання викликають коливання системи верстат-заготівка-інструмент. Коливання при нерівномірному кроці зубів відбуваються з нерівномірною амплітудою. Відповідно наступні одне за іншим коливання не збігаються по фазі, тому найбільші величини коливань, що виникають від різних зубів, не складаються.

Таким чином, коливання (вібрації) при роботі фрезами з нерівномірним окружним кроком не досягають великої величини, як при роботі з рівномірним окружним кроком.

Тому стає не зрозуміло, чому обов'язкові умови по виготовленню фрез з нерівномірним кроком були переведені в рекомендовані.

На даний момент ряд сучасних зарубіжних інструментальних фірм пропонують ринку кінцевих фрези з нерівномірним окружним кроком. Перевагою рекламується їх висока вібростійкість. Однак сучасні виробники не оголошують, в яких межах змінюється окружний крок.

### 7.3 Циліндрична стрічка

Наступною характеристикою кожного типу фрези, є її виконання: з циліндричної стрічкою на задній поверхні зуба ( $f_n \leq 0,05$  мм) або зуба заточеного нагостро. Наявність стрічки і величина радіуса округлення різальної крайки істотно впливають на вібростійкість.

Причому для  $d \geq 8$  мм, рис. 7.4, зуб повинен бути затилованим і мати стрічку, а для  $d < 8$  мм заточку зуба виконують по площині у двох виконаннях (з стрічкою і нагостро).

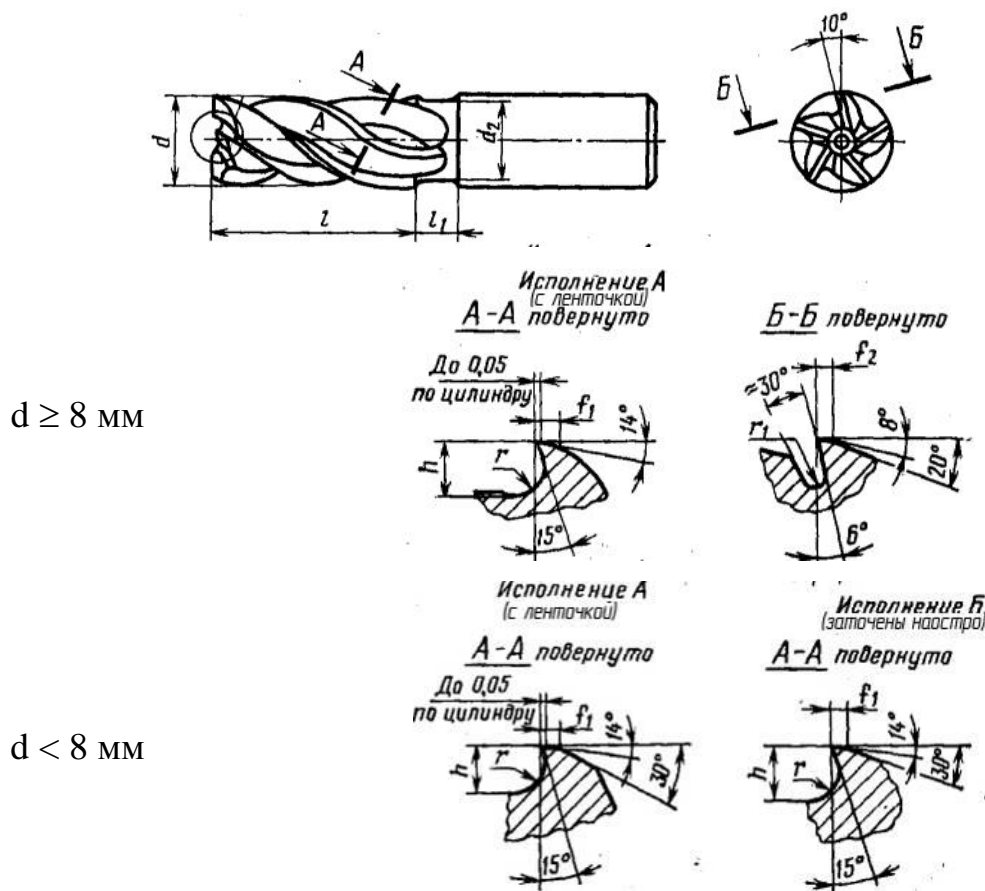


Рисунок 7.4 – Основні розміри і виконання фрез по ГОСТ 17025-71

Дана характеристика в нині діючому ГОСТ 32831 - 2014 теж переведена в рекомендовані.

#### 7.4 Кут нахилу гвинтових зубів

Раніше говорилося про вплив кута нахилу гвинтових зубів на якість оброблюваної поверхні.

У роботах [20,21] наведені результати досліджень зі зменшення вібрацій в результаті незначних змін ( $\Delta\omega \leq 4^\circ$ ) кутів нахилу  $\omega$  сусідніх зубів циліндричної фрези. На рис. 7.5 показано, що різниця в кутах нахилу сусідніх зубів на  $2^\circ$  збільшує ширину безвібраційних фрезерування в 2 рази, а на  $4^\circ$  в 3,5 рази. Якщо наділі збільшувати різниці в кутах нахилу  $\omega$  сусідніх зубів, то це буде призводити до незначного підвищення вібростійкості. Аналогічні дослідження були виконані і в Україні (м.Маріуполь) А. С. Крепаком [22, 23] та інш.(1972 р). В яких розглядали процес різання жароміцних сталей кінцевими фрезами з різнопохилими зубами. На підставі цих досліджень в СРСР були розроблені галузеві стандарти ОСТ 1.52760-85, ОСТ 1.52761-85 «Фрезы концевые с чередующимися разнонаклонными режущими зубьями» (введені з 01.01.87 р). ОСТи визначали конструкції, розміри і технологічні вимоги для кінцевих фрез зі швидкорізальних сталей для обробки жароміцних і титанових сплавів.

Фрезы виготовляли двох типів:

1 – Фрезы з крупним зубом,  $z = 4$  ( $\omega_1 = 38^\circ 8'$  и  $\omega_2 = 36^\circ 12'$ ),  $d = 10-25$  мм.

2 – Фрезы з нормальним зубом,  $z = 6$  ( $\omega_1 = 38^\circ 8'$  и  $\omega_2 = 34^\circ 54'$ ),  $d = 10-25$  мм.

У поперечному перерізі на  $\frac{1}{2}$  довжини робочої частини фрези окружний крок  $\varphi$  для усіх зубців однаковий.

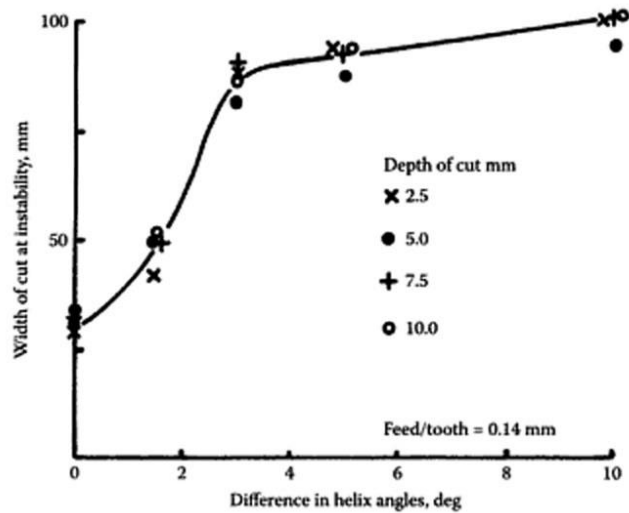


Рисунок 7.5 – Залежність вібростійкості циліндричних фрез від відмінності в кутах нахилу різальних кромки у сусідніх зубів [24]

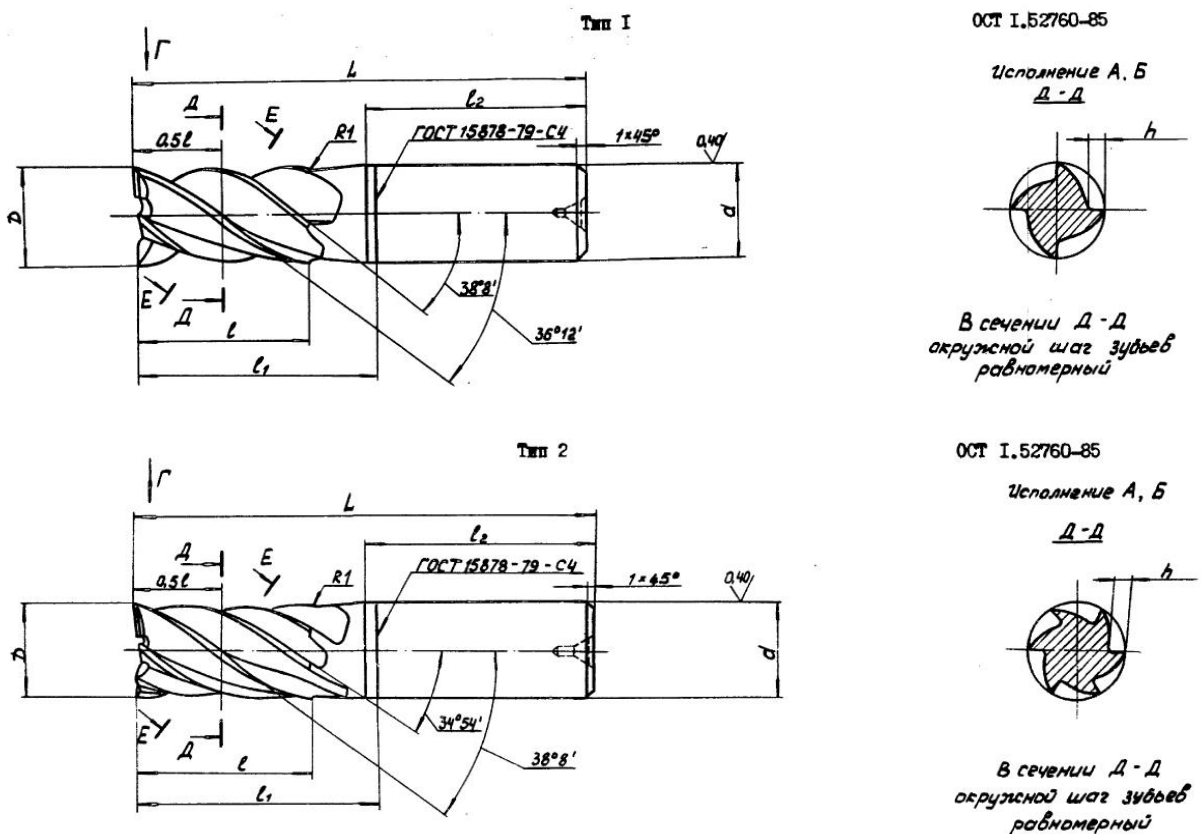


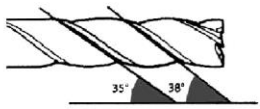
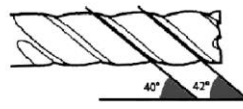
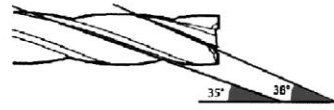
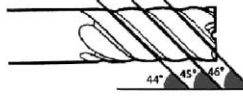
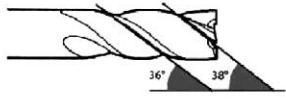
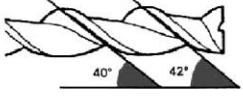
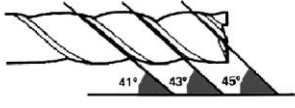
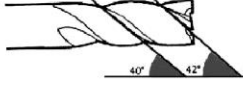
Рисунок 7.6 – Фрезы кінцеві з чергуючимися різнопохилими ріжучими зубами (ОСТ 1.52760-85, ОСТ 1.52761-85)

На даний момент ряд сучасних зарубіжних інструментальних фірм [6-12] пропонують ринку широкий вибір кінцевих фрез, у яких основною

перевагою рекламується їх висока вібростійкість в результаті переходу від виготовлення рівнонахилених гвинтових зубів до різнопохилих.

Фірма GUHRING (табл. 7.4) і ряд інших зарубіжних фірм (табл. 7.5) пропонують різне поєднання кутів нахилу зубів кінцевих фрез  $\omega$  від  $35^\circ$  до  $45^\circ$  з різницею в кутах нахилу у сусідніх зубів  $\Delta\omega = 2 - 4^\circ$ .

Таблиця 7.4 - Кінцеві фрези з різнопохилими стружковими рівцями -  $\omega$  і рекомендовані області їх застосування. Фірма GUHRING [25]

<p>RF 100 U (Тип N)</p> 	<p>Спираль <math>35^\circ/38^\circ</math>. Обработка канавок, черновая и чистовая обработка стали, высоколегированной и закаленной стали: - предел прочности на разрыв <math>1600 \text{ Н/мм}^2</math> - твердость 48 HRC</p> <p><math>\Delta\omega=3^\circ</math></p>	<p>RF 100F (Тип NH)</p> 	<p>Спираль <math>40^\circ/42^\circ</math>. Обработка канавок, черновая и чистовая обработка мягких и вязких сталей, а также прочих длинностружечных материалов: - предел прочности на разрыв <math>850 \text{ Н/мм}^2</math>; - твердость 25 HRC.</p> <p><math>\Delta\omega=2^\circ</math></p>
<p>RF 100 Ti (Тип N)</p> 	<p>Спираль <math>35^\circ/38^\circ</math> с угловым радиусом. Обработка канавок, черновая обработка титановых сплавов.</p> <p><math>\Delta\omega=3^\circ</math></p>	<p>RF 100 SF (Тип NH)</p> 	<p>Спираль <math>44^\circ/45^\circ/46^\circ</math>. Чистовая обработка HSC. Полушершневая обработка с шириной до <math>0,3D</math> и черновой обработки HPC по всей длине режущей кромки стандартной стали, чугуна, цветных металлов и высоколегированных материалов.</p> <p><math>\Delta\omega=1-2^\circ</math></p>
<p>RF 100 VA (Тип N)</p> 	<p>Спираль <math>36^\circ/38^\circ</math>. Обработка канавок, черновая и чистовая обработка нержавеющей материалов.</p> <p><math>\Delta\omega=2^\circ</math></p>	<p>RF 100 A (Тип W)</p> 	<p>Спираль <math>40^\circ/42^\circ</math>. Обработка канавок, черновая и чистовая обработка алюминия, алюминиевых сплавов, длинностружечных материалов и цветных металлов.</p> <p><math>\Delta\omega=2^\circ</math></p>
<p>RF 100U (Тип N) 3 лезвия</p> 	<p>Спираль <math>41^\circ/43^\circ/45^\circ</math>. Обработка канавок, черновая и чистовая обработка высоколегированных и закаленных сталей: - предел прочности на разрыв <math>1400 \text{ Н/мм}^2</math> - твердость 44 HRC В 3 лезвийном исполнении для сверхбольших глубин резания.</p> <p><math>\Delta\omega=2-4^\circ</math></p>	<p>RF 100 H (Тип H)</p> 	<p>Спираль <math>40^\circ/42^\circ</math> и увеличенной сердцевиной. Черновая обработка до <math>1xD</math> в материалах твердостью до 54 HRC, для чистовой обработки по всей длине режущей кромки в материалах твердостью до 60 HRC. Пригодна для черновой обработки материалов твердостью более 60HRC.</p> <p><math>\Delta\omega=2^\circ</math></p>

Таблиця 7.5 - Аналіз сучасних каталогів виробників кінцевих фрез з різнопохилими спіральними зубами

№п/п	Производитель фрез	Число зубьев, z	Угол наклона режущей кромки, $\omega_1, \omega_2$	Обрабатываемый материал	Примечания, $\Delta\omega$
1	ООО "Инстроника", Россия	4	35/38	Сталь, чугун, цветные сплавы	3
		3	33/35/37	Сталь, чугун, цветные, титановые, жаропрочные сплавы	2
		4	41/44	Нержавеющая сталь, цветные, титановые, жаропрочные сплавы	3
2	ООО "Техтрейд", Россия	4	35/38	Материалы выше 60 HRC	3
3	Mauckstag, Австрия	3	34/36	Труднообрабатываемые материалы, титановые сплавы выше 50 HRC	2
		4	35/38		3
		4	39/42		3
4	MITSUBISHI, Япония	4	37/40	Сталь, чугун, цветные, титановые, жаропрочные сплавы	3
5	ARNO, Германия	4	35/38	Сталь, чугун, цветные сплавы	3
		4	26/30		4
		5	35/38		3
6	PARA Tooling, Европа	4	35/38	Сталь, чугун, цветные сплавы	3

Аналіз таблиць 7.4 і 7.5 показує, що рекомендації фірм виробників твердосплавних кінцевих фрез з різнопохилими ріжучими зубами, по областям їх ефективного застосування, не відображають особливостей чорнової і чистової обробки, а також відмінності у властивостях оброблюваних матеріалів. Одну геометрію фрези рекомендують при обробці сталі, чавуну, кольорових сплавів, титанових і жароміцних сплавів. Швидкісні режими, що застосовуються при обробці цих матеріалів в умовах чорнового і чистового фрезерування, дуже відрізняються через різну швидкості фрез. Тому в кожному рекомендованому випадку оптимальна швидкість різання буде різною. Для кінцевої фрези це означає, що її частота обертання також буде різною.

Зміна частоти обертання і кількості ріжучих зубів безпосередньо впливає на вібрації, що виникають при обробці, а відповідно і на якість оброблюваної поверхні.

В одних випадках, конструкції фрез з різнопохилими зубами можуть бути дуже ефективними для підвищення вібростійкості.

В інших випадках, застосування фрез з різнопохилими зубами може бути не ефективним, тобто сприяти невірноваженості процесу

фрезерування. Вивчення цього питання є важливим для розробки рекомендацій щодо ефективних умов застосування кінцевих фрез з різнопохилими зубами.

## 8 РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЙ КІНЦЕВИХ ФРЕЗ НАПРАВЛЕНИХ НА ПОЛПШЕННЯ ЯКОСТІ ОБРОБЛЕНОЇ ПОВЕРХНІ

### 8.1 Основні розміри і конструкція

Згідно ГОСТ 32831 - 2014, який регламентує розміри кінцевих фрез з циліндричним, конічним хвостовиками і хвостовиками з конусністю 7:24, для подальшого дослідження виконаємо дві кінцеві циліндричні фрези з конічним хвостовиком, наступних конструкцій.

Основні розміри:

Зовнішній діаметр  $d = 32\text{мм}$ ;

Довжини ріжучої частини  $l_p = 55\text{мм}$ ;

Загальна довжина фрези  $L = 180\text{мм}$ ;

Кількість зубців  $z = 4$ ;

Хвостовик – конус Морзе №4.

На рисунку 8.1 наведені параметри зуба у торцьовому перерізі.

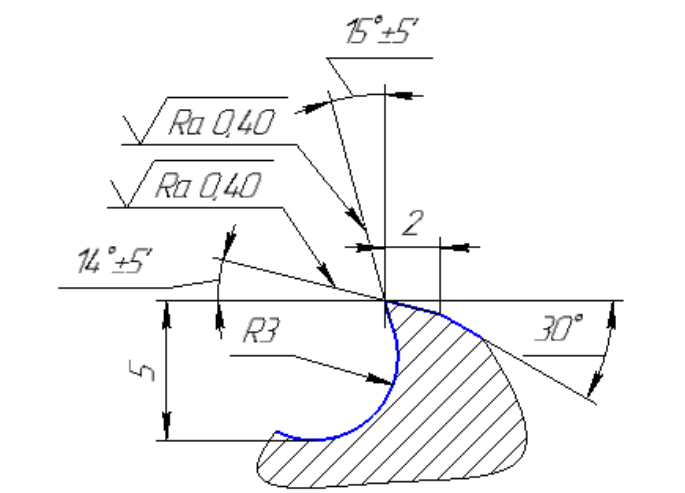


Рисунок 8.1 – Параметри зуба у торцьовому перерізі.

На рисунку 8.2 наведені параметри зуба у циліндричному перерізі.

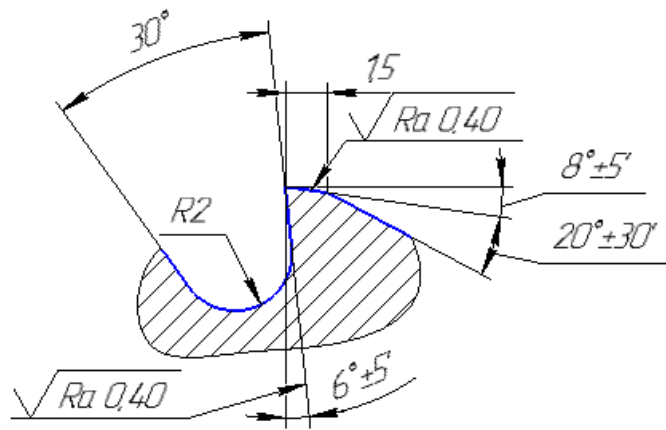


Рисунок 8.2 – Параметри зуба у циліндричному перерізі.

У фрези першої конструкції кут нахилу гвинтових зубів  $\omega = 35^\circ$ , окружний крок зубів перемінний (рис.8.3).

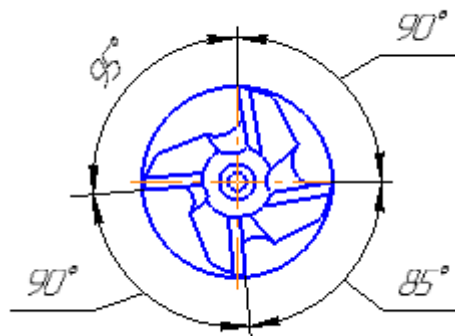


Рисунок 8.3 – Окружний крок зубів фрези

У фрези другої конструкції кут нахилу гвинтових зубів перемінний  $\omega_1 = 35^\circ, \omega_2 = 38^\circ$ , окружний крок зубів постійний  $\phi = 90^\circ$ .

Так як зовнішній діаметр фрез прийнятий рівним 32мм, відповідно фрези будуть виконані зварної конструкції.

## 8. 2 Хімічний склад і властивості матеріалу

Ефективність ріжучого інструменту, що визначається його працездатністю при максимально можливоїстійкості, залежить головним чином від матеріалу робочої частини.

Інструментальні матеріали відіграють вирішальну роль в підвищенні ріжучих властивостей інструменту і продуктивності праці, у формуванні точностних параметрів і якісних характеристик оброблюваних деталей. Для отримання інструментів з високими ріжучими властивостями інструментальні матеріали повинні відповідати таким основним вимогам:

- 1) мати високу теплостійкість і зносостійкість;
- 2) бути високотвердими і міцними;
- 3) мати можливість оброблятися в холодному та нагрітому стані;
- 4) володіти достатньою теплопровідністю, малою чутливістю до циклічних коливань температури;
- 5) бути економічними.

Застосування того чи іншого інструментального матеріалу в конкретних виробничих умовах обумовлюється службовим призначенням верстата і ріжучого інструменту, необхідної ефективністю процесу обробки, необхідною якістю і точністю оброблюваних поверхонь, матеріалом і виглядом заготовок.

У даній роботі необхідно спроектувати кінцеві фрези, конструкція яких буде спрямована на покращення якості оброблюваної поверхні.

Припустимо, що в якості матеріалу оброблюваної заготовки буде використовуватися вуглецева або легвана сталь. Дані матеріали можна обробляти інструментом, виготовленим з наступних швидкорізальних сталей: P6M5, P18, P6M5K5, P9, P12.

Основна перевага швидкорізальної сталі [30] - висока теплостійкість. Інструмент з цієї сталі зберігає високу твердість при нагріванні до 600 – 640°C і допускає у 3 - 5 разів більше продуктивні режими різання.

P18 – найбільш поширена, універсальна марка швидкорізальної сталі. Хімічний склад наведений у таблиці 8.1. Застосовується для виготовлення ріжучих інструментів (фрез, довбачів, протяжок, мітчиків, шеверів) для чорнової і чистової обробки конструкційних сталей з міцністю до 900Н/мм<sup>2</sup>. У зв'язку з дефіцитом вольфраму останнім часом набули поширення

вольфрамомолибденовые сталі. З цих сталей переважно застосування має сталь Р6М5.

Р6М5 - швидкоріжуча сталь з підвищеним вмістом молибдену (Мо), нормальної теплостійкості. Хімічний склад представлений в таблиці 8.1. Сталь Р6М5 близька по ріжучим властивостям до сталі Р18, але має підвищену схильність до знеуглецювання при нагріванні. Вона значно дешевше сталі Р18. Її широко застосовують для виготовлення ріжучих інструментів, використовуваних при обробці деталей з конструкційних матеріалів з міцністю до  $900\text{Н} / \text{мм}^2$ , а також для інструменту, що працює при ударних навантаженнях і резьбонарізного інструменту.

Р6М5К5 – хімічний склад наведено в таблиці 8.1, деякі механічні властивості в таблиці 8.2. Дана сталь відноситься до групи швидкорізальних сталей з підвищеною продуктивністю . Вона перевершує Р18 по теплостійкості ( $630 - 640^\circ\text{C}$ ), твердості ( $\text{HRC} \geq 64$ ) і зносостійкості, але поступається по міцності і пластичності.

Таблиця 8.1 - Хімічний склад деяких сталей,% маси

	C	W	Cr	Mo	V	Co
Р6М5К5	0,84 – 0,92	5,7 – 6,7	3,8 – 4,3	4,8 – 5,3	1,7 – 2,1	4,7 – 5,2
Р18	0,7 – 0,8	17,0 – 18,5	3,8 – 4,4	1,0	1,0 – 1,4	
Р6М5	0,80 – 0,88	5,5 – 6,5	3,8 – 4,4	5,0 – 5,5	1,7 – 2,1	

Примітка. Зміст постійних і випадкових домішок обмежена у наведених сталях наступними межами %: 0,4Mn; 0,5Si; 0,4Ni; 0,03S; 0,035P.

Таблиця 8.2 – деякі механічні властивості сталі P6M5K5

Межа короткочасної витривалості, $\sigma_B$	Відносне подовження, $\delta$	КСУ
МПа	%	кДж/м <sup>3</sup>
850	12	180

Дані переваги сталі P6M5K5 досягаються за рахунок введення кобальту і молібдену (див. Таблицю 1.1). Також даний матеріал дозволяє працювати інструменту на більш високих режимах при незначному зниженні стійкості.

Так як оброблюємих матеріал сталевий, то в якості матеріалу ріжучої частини фрез приймаємо сталь P6M5K5. Вона володіє більш високими ріжучими властивостями, ніж леговані сталі, допускає велику швидкість різання, має високу зносостійкість і теплостійкість.

Хвостовики фрез виконують зазвичай із наступних конструкційних сталей: 35,40,40Х.

Для виготовлення хвостовиків проєктуємих фрез обираємо сталь 40Х. Хімічний склад сталі наведений у таблиці 8.3

Таблиця 8.3 – Хімічний склад сталі 40Х ГОСТ4543-71 % маси

С	Si	Mn	Cr	Ni	S	P	Cu
					не більше		
0,40	0,20	0,5	1	0,3	≤0,035%		

Так як ця сталь містить легируючий елемент – хром, який служить для зниження критичної швидкості загартовування, що дозволить уникнути можливих тріщин деталей при термічних операціях.

Висновки. Розглянуті фрези мають по чотири зуба, отже володіють більшою жорсткістю, завдяки більшій площі серцевини. Отже, в порівнянні з фрезами аналогічної конструкції, але з меншою кількістю зубів, будуть забезпечувати більш високу якість обробленої поверхні.

Фреза першої конструкції має кут нахилу гвинтових зубів  $\omega = 35^\circ$  і змінний окружний крок зубів. Нерівномірний окружний крок фрези сприяє зменшенню вібрацій, що виникають при обробці, і, як наслідок, сприяє збільшенню стійкості інструменту і якості обробленої поверхні.

Фреза другої конструкції має змінний кут нахилу гвинтових зубів  $\omega_1 = 35^\circ, \omega_2 = 38^\circ$ , але рівний окружний крок. Згідно з приведенням вище дослідження наявність змінного кут нахилу гвинтових зубів також сприяє зменшенню вібрацій, що виникають при обробці, і, як наслідок, сприяє збільшенню стійкості інструменту і якості обробленої поверхні.

Обробка по контуру, фрезерування уступів і неглибоких пазів.

## 9 ЧАСТОТНИЙ АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ КІНЦЕВИХ ФРЕЗ ЗАСОБАМИ ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСА ANSYS

Багато завдань, з якими доводиться нині стикатися дослідникам і інженерам, не піддаються аналітичному рішенню або вимагають величезних витрат на експериментальну реалізацію. Часто єдиною можливістю швидкого і ефективного аналізу інженерної проблеми є комп'ютерне моделювання. Прогрес в розробці чисельних методів дозволив істотно розширити круг завдань, доступних аналізу. Отримані на основі цих методів результати використовуються практично в усіх галузях науки і техніки.

У аналізі конструкцій знаходить своє найбільш важливе застосування метод скінченних елементів. Причому в конструкційному аналізі під конструкціями розуміються мости, будівлі, корпуси морських суден, вузли літаків, деталі машин, інструменти - словом, будь-які інженерні конструкції.

Первинними змінними, які обчислюються в ході конструкційного аналізу, є переміщення. Надалі, виходячи з вичислених переміщень у вузлах сітки, визначаються і інші важливі параметри - такі як напругу, пружна або пластична деформація і ін.

Програма ANSYS є комп'ютерною системою для проектування і виконання пов'язаного міждисциплінарного аналізу методом скінченних елементів. Вона використовується на етапі проектування, щоб з'ясувати, як виконувана проектна розробка поводитиметься в експлуатаційному режимі навантаження. Також програму ANSYS можна використати для оптимізації геометрії, описаної в параметричному виді.

Програма ANSYS працює в середовищі усіх популярних операційних систем (WindowsXX, UNIX) і на усіх поширених комп'ютерних платформах: від PC до суперкомп'ютерів. Особливістю програми є файлова сумісність продуктів сімейства ANSYS для усіх використовуваних платформ. Багатоцільова спрямованість програми (реалізація в ній засобів для розрахунку відгуку системи на дії різної фізичної природи) дозволяє

використати одну і ту ж сіткову модель для вирішення таких міждисциплінарних завдань, як міцність при тепловому вантаженні, взаємодію потоку з конструкцією та ін. Модель, створена на РС, може використовуватися на суперкомп'ютері і робочій станції. Це забезпечує усім пользо вателям програми зручні можливості для вирішення широкого кола інженерних завдань.

Програма пропонує широкий перелік розрахункових засобів, які враховують різноманітні конструктивні нелінійності; дають можливість вирішити найзагальніший випадок контактного завдання для поверхонь; допускають наявність великих деформацій і кутів повороту; дозволяють виконати оптимізацію і аналіз впливу електромагнітних полів, отримати рішення завдань гідрогазодинаміки і інше - включаючи параметричне моделювання, адаптивну перебудову сітки.

ANSYS має засоби зв'язку з усіма CAD- системами за допомогою імпорту файлів у власних форматах CAD, в стандартних і універсальних графічних форматах. Є також версії ANSYS, інтегровані з усіма основними CAD- системами (включаючи Pro-Engineer, CADDSS, Unigraphics, AutoCAD та інші), де розрахункова технологія ANSYS застосовується для аналізу і оптимізації проектних розробок.

*Призначення та область застосування модального аналізу.*

Модальний аналіз застосовується для обчислення частот власних коливань (ЧВК) і форм коливань моделі.

Якщо передбачається, що модель піддаватиметься залежним від часу і/або коливальним/вібраційним навантаженням, її реакцію на власні частоти можна побачити, виконавши будь-який динамічний аналіз: динамічний тимчасових характеристик, динамічний частотний, динамічних випадкових дій або динамічної дії. Для визначення частот і мод власних коливань конструкції застосовується частотний аналіз. Знання параметрів власних коливань стає важливим в умовах динамічного вантаження, при моделюванні вібрацій і перехідних процесів в конструкціях. Частотний аналіз є лінійним і

може враховувати ефекти загасання, але ігнорує пластичну течію матеріалу і контактну жорсткість.

Модальний аналіз виконується у разі потреби вичислити наступні величини:

- власні або резонансні частоти (власні значення) моделі;
- відносні зміщення геометрії при вібрації моделі на цих частотах (моди або власні вектори).

Зазвичай інженерам треба знати ці власні частоти у випадках, коли структура піддається дії збуджуючої сили. В цьому випадку деталь може резонувати і зруйнуватися, якщо частоти збудження співпадуть з власними частотами структури. Навіть якщо частота збудження зміщена відносно власної частоти, вона може бути досить близька до неї за величиною для виникнення небажаних коливань.

У модальному аналізі важливо точно змоделювати розподіл маси і жорсткості. Малі конструктивні елементи, важливі для аналізу статичної напруги (дозволяють уникнути накопичення напруги), для модального аналізу не такі істотні.

При виборі чинників, які необхідно враховувати в аналізі, треба брати до уваги наступні аспекти моделі.

- Масу деталі.
- Кількість мод коливань, які необхідно вичислити.
- Діапазон частот, який необхідно вибрати.
- Модельований стан обмеження. Для визначення параметрів власних коливань конструкції необхідно задати умови її закріплення в точках, ребрах, поверхнях або, якщо модель розбита на кінцеві елементи, - у вузлах і елементах.

- Іноді також важливо враховувати в аналізі вплив попередньої напруги. Наприклад, при вивченні коливань структури в умовах навантаження на розтягування. В цьому випадку можна удатися до переднапруженого модального аналізу.

В даній роботі проведено порівняльний частотний аналіз двох різних конструкцій спроектованих металорізальних інструментів – кінцевих фрез.

Аналіз виконано в наступній послідовності:

1. В графічному редакторі КОМПАС - 3D побудовано дві геометричні 3-D моделі кінцевих фрез, в яких враховано всі конструктивні відмінності: конструкція фрези із різними кутами нахилу гвинтової стружечної канавки  $\omega_1=35^\circ$ ,  $\omega_2=38^\circ$ ,  $\omega_3=35^\circ$ ,  $\omega_4=38^\circ$  (рисунок 9.1 а); конструкція фрези із змінним окружним кроком зубців  $\omega_1=90^\circ$ ,  $\omega_2=85^\circ$ ,  $\omega_3=90^\circ$ ,  $\omega_4=95^\circ$  (рисунок 9.1 б).

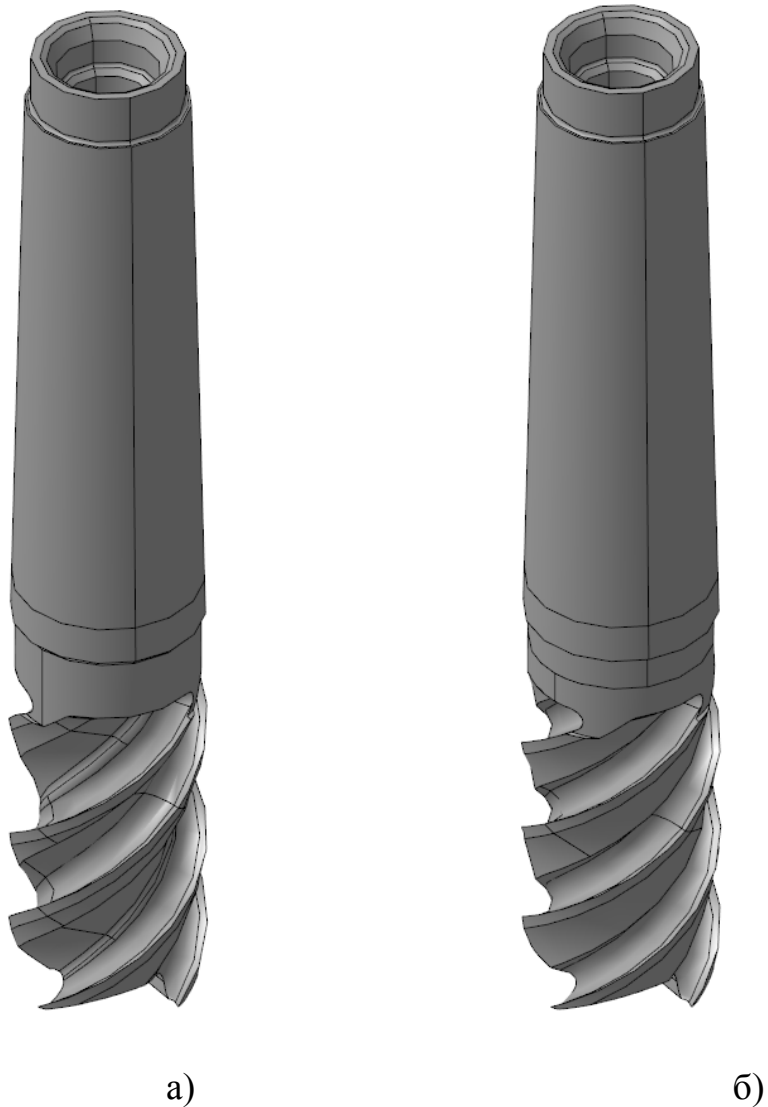


Рисунок 9.1 - 3-D моделі кінцевих фрез

Для спрощення розбиття даних моделей на скінченні елементи із розрахунку було виключено центрові отвори, крім того прийняте значення допоміжних кутів в плані  $\varphi_1=0$ .

2. Імпортовано геометричні моделі до програмного комплексу методу скінчених елементів ANSYS.

Імпорт моделей було здійснено за допомогою формату \*.x\_t (Parasolid). Можливості графічного редактора КОМПАС - 3D дозволяють експортувати дані в цьому форматі. Імпортовані моделі представлені на рисунку 9.2.

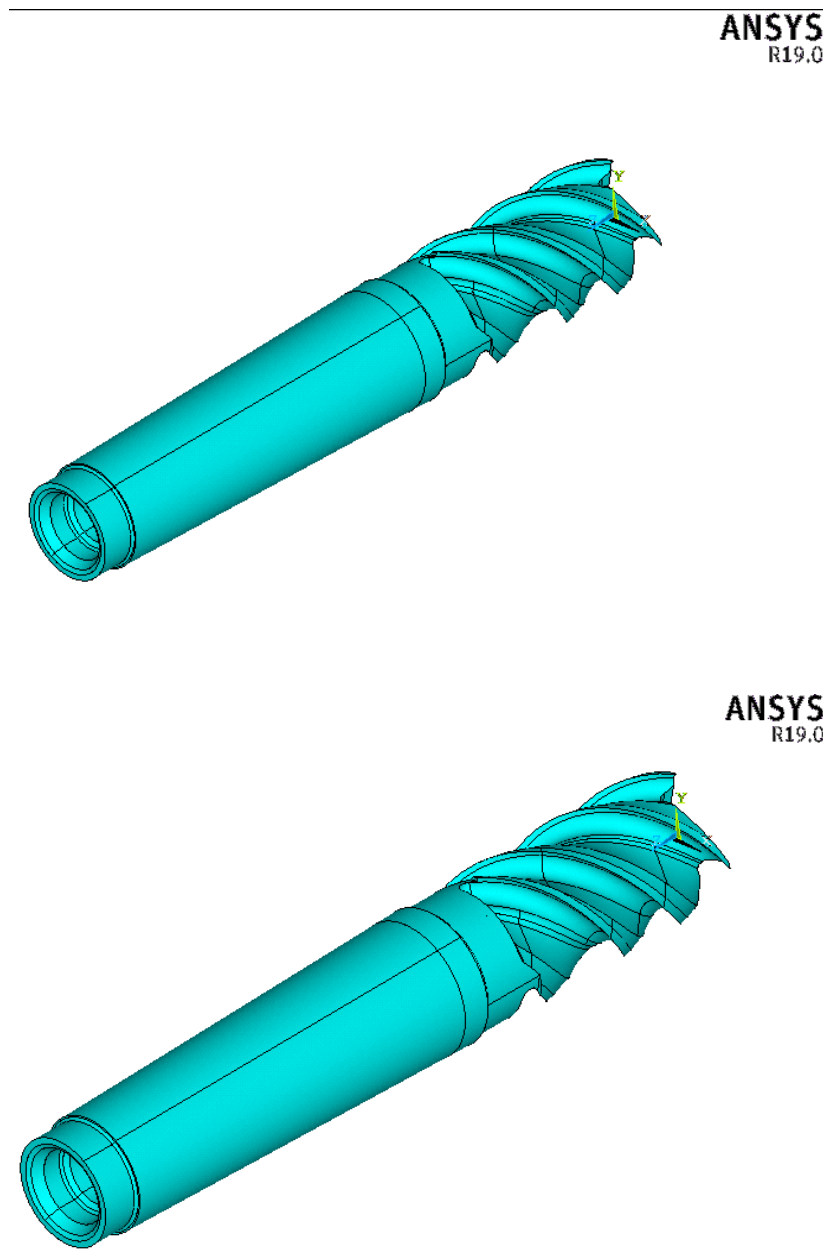


Рисунок 4.21 - Імпортовані моделі інструментів

3. Задано вид аналізу, властивості матеріалу, встановлено тип скінченного елемента для виконання модального аналізу.

Для виконання модального аналізу в настройках обираємо вид аналізу «modal». Призначаємо тип скінченного елемента SOLID185.

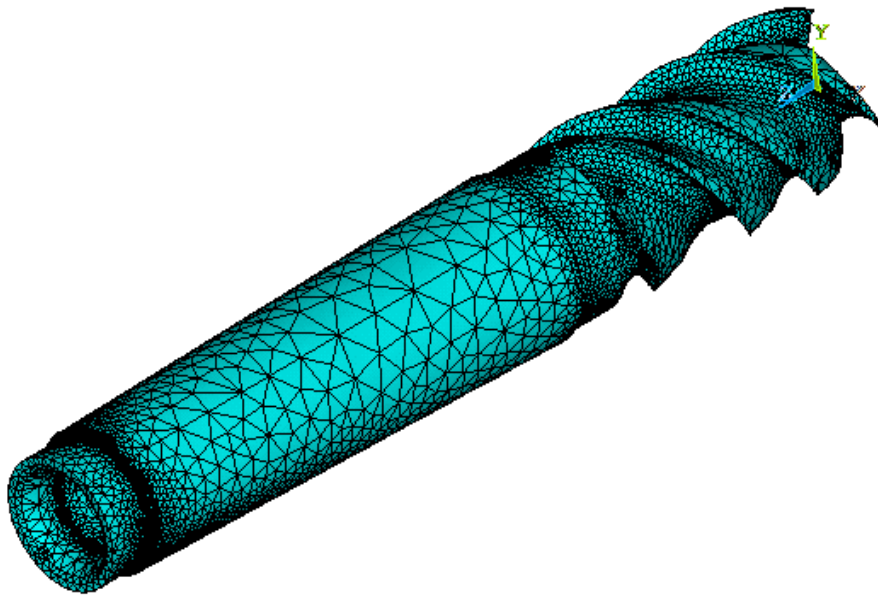
Призначені властивості матеріалу (сталь Р6М5К5) наведені в таблиці 9.1.

Таблиця 9.1 - Властивості матеріалу

Показник	Значення						
Щільність (DENS)	7800 кг/м <sup>3</sup>						
При температурі °C	20	100	200	300	400	500	600
Показник							
Модуль пружності, мПа (EX)	2.04E11	1.9E11	1.73E11	1.55E11	1.37E11	1.19E11	1.01E11
Питома теплоємність Дж/кг°C (C)	420	440	470	500	550	580	670
Коефіцієнт теплопровідності Вт/м°C (KXX)	26	27	28	29	30	32	36
Коефіцієнт теплового розширення °C <sup>-1</sup> (ALPX)	1.05E-5	1.05E-5	1.12E-5	1.19E-5	1.26E-5	1.28E-5	1.31E-5

4. Виконано розбивку імпортованих геометричних моделей на елементи (рисунок 9.3).

**ANSYS**  
R19.0



**ANSYS**  
R19.0

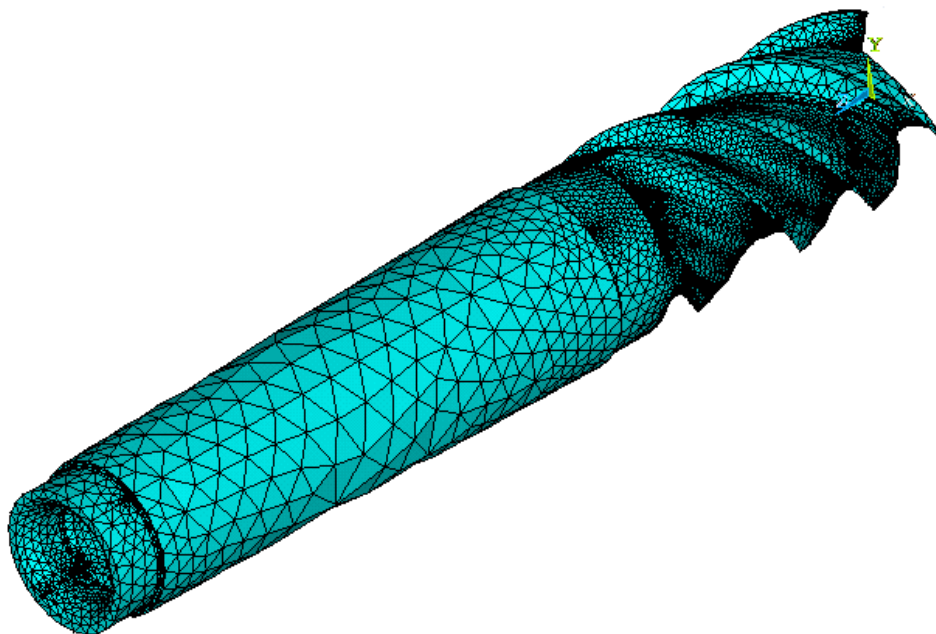


Рисунок 9.3 - Моделі інструментів із сіткою елементів

Результатом генерації сітки є:

- для першої фрези 295877 елементів, зв'язаних 56579 вузлами;
- для другої фрези 271152 елементів, зв'язаних 50067 вузлами.

4. Прикладено навантаження.

В якості навантажень призначаємо місце закріплення корпусу в шпинделі верстата – поверхню конуса хвостовика – визначивши його нульовим переміщенням.

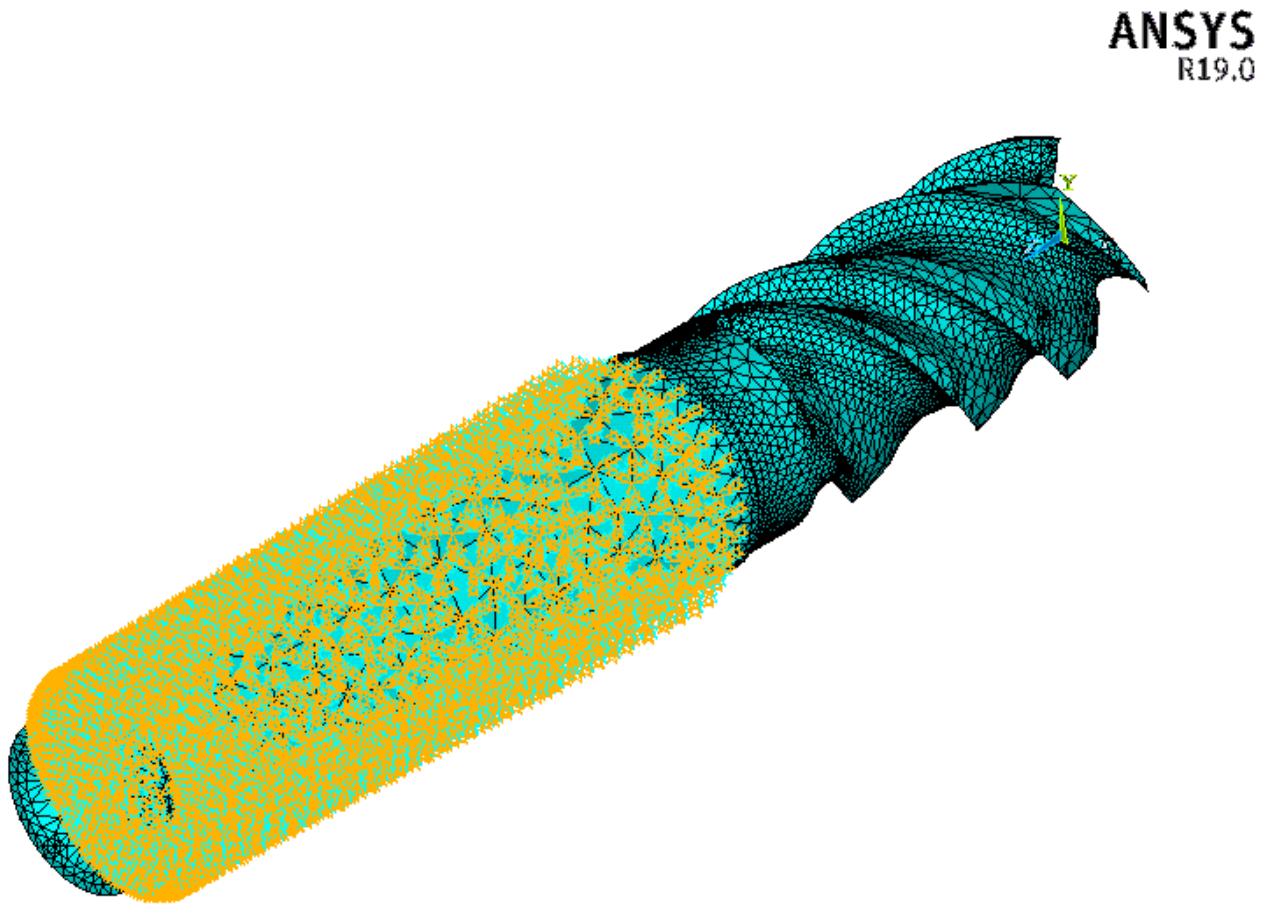


Рисунок 9.4 – Відображення місць закріплення з заданими нульовими переміщеннями

Після запуску розрахунку отримуємо звіт по отриманим частотам власних коливань для п'яти мод кожної фрези. Система дозволяє зберегти ці звіти у вигляді текстових файлів (рисунок 9.5 а, б)

\*\*\*\*\* INDEX OF DATA SETS ON RESULTS FILE \*\*\*\*\*

SET	TIME/FREQ	LOAD STEP	SUBSTEP	CUMULATIVE
1	3383.8	1	1	1
2	15002.	1	2	2
3	16640.	1	3	3
4	24570.	1	4	4
5	30979.	1	5	5

a)

\*\*\*\*\* INDEX OF DATA SETS ON RESULTS FILE \*\*\*\*\*

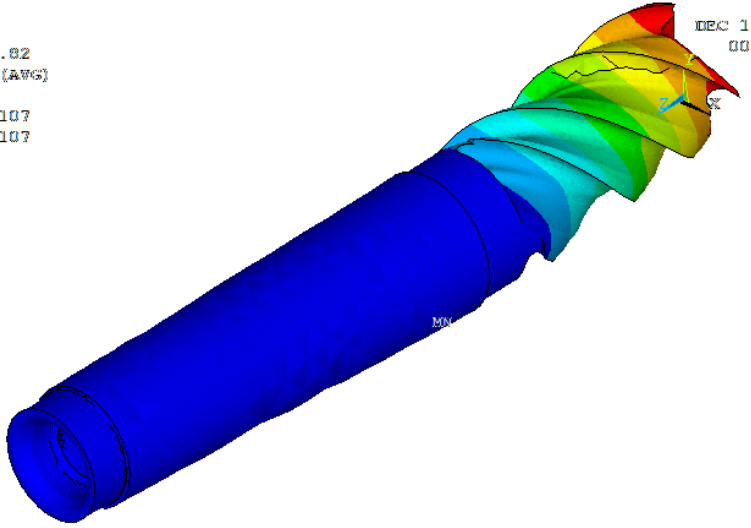
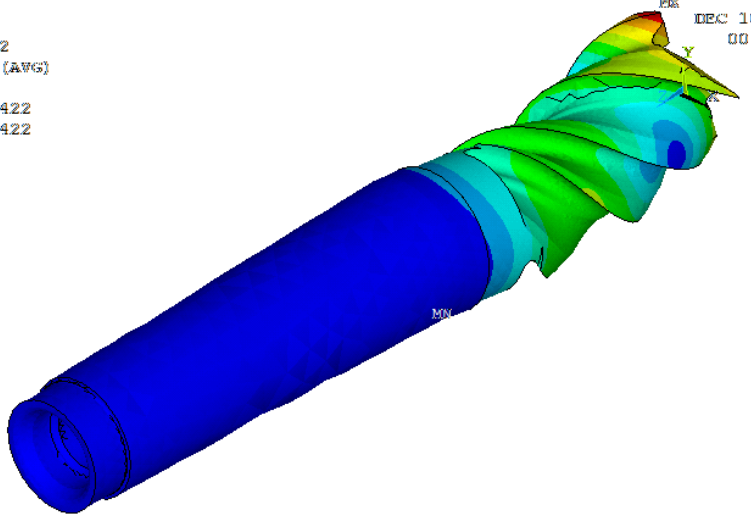
SET	TIME/FREQ	LOAD STEP	SUBSTEP	CUMULATIVE
1	3355.1	1	1	1
2	3493.5	1	2	2
3	10750.	1	3	3
4	14602.	1	4	4
5	14918.	1	5	5

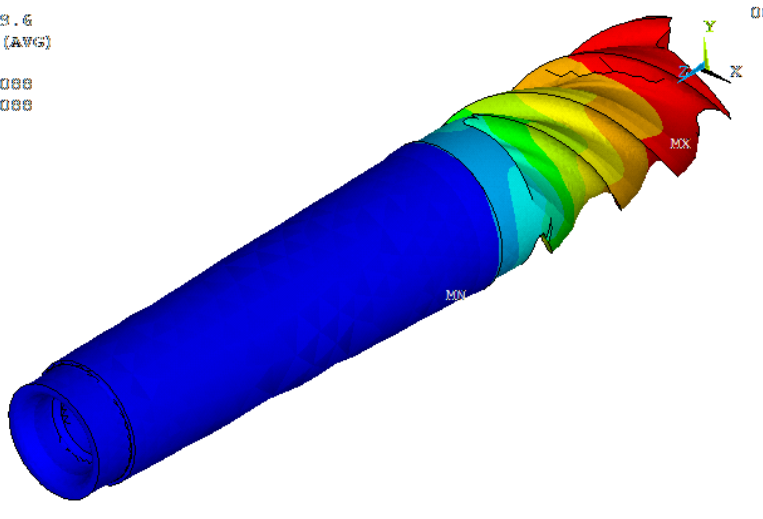
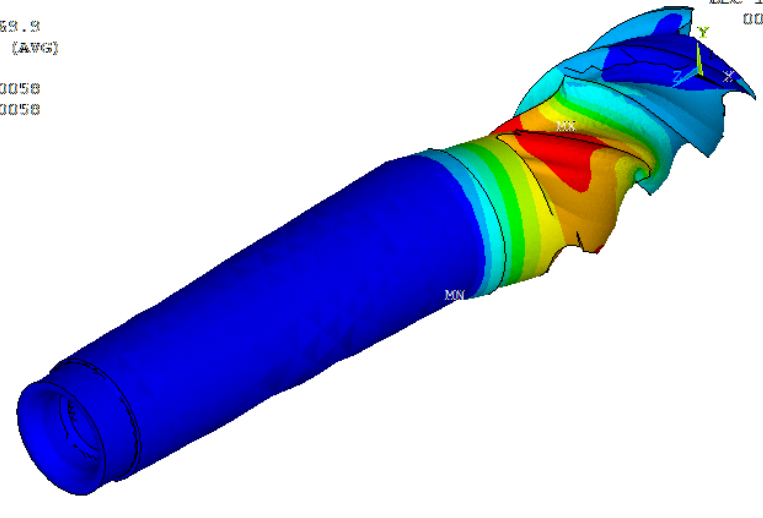
б)

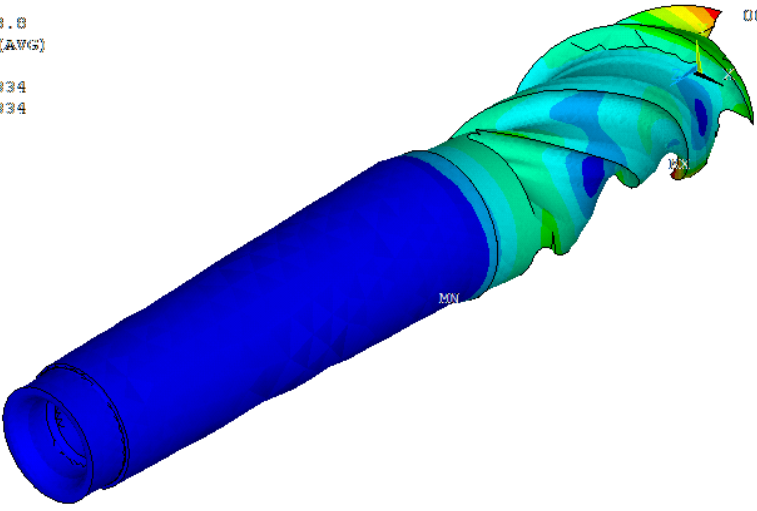
Рисунок 9.5 – Звіти по отриманим частотам власних коливань

Картини переміщень вузлових точок робочої частини фрези із різними кутами нахилу гвинтової стружечної канавки, відповідно розрахованих ЧВК, представлені в таблиці 9.2.

Таблиця 9.2 – Результати модального аналізу

№ з/п	ЧВК	Границі переміщень	Ескіз
1	2	3	4
1	3383.8	1,04	<p>1</p> <p>MODAL SOLUTION</p> <p>STEP=1 SUB =1 FREQ=3383.82 USUM (AVG) RSYS=0 MAX =1.04107 MIN =1.04107</p> <p>ANSYS R19.0 DEC 10 2016 00:52:01</p>  <p>0 .115674 .231349 .347023 .462697 .578371 .694046 .80972 .925394 1.04107</p> <p>File: E:\ANSYS_H-213\FC1-35-38-90.x_t</p>
2	15002	1,35	<p>1</p> <p>MODAL SOLUTION</p> <p>STEP=1 SUB =2 FREQ=15002 USUM (AVG) RSYS=0 MAX =1.35422 MIN =1.35422</p> <p>ANSYS R19.0 DEC 10 2016 00:52:28</p>  <p>0 .150469 .300937 .451406 .601874 .752343 .902812 1.05328 1.20375 1.35422</p> <p>File: E:\ANSYS_H-213\FC1-35-38-90.x_t</p>

1	2	3	4
3	16640	1,00	<p>1</p> <p>MODAL SOLUTION</p> <p>STEP=1 SUB =3 FREQ=16639.6 USUM (AVG) RSYS=0 DMX =1.00088 SMX =1.00088</p>  <p>ANSYS R19.0 DEC 10 2018 00:52:44</p> <p>0 .111209 .222418 .333627 .444835 .556044 .667253 .778462 .889671 1.00088</p> <p>File: E:\ANSYS_M-213\FCL-35-38-90..x_t</p>
4	24570	1,00	<p>1</p> <p>MODAL SOLUTION</p> <p>STEP=1 SUB =4 FREQ=24569.9 USUM (AVG) RSYS=0 DMX =1.00058 SMX =1.00058</p>  <p>ANSYS R19.0 DEC 10 2018 00:52:56</p> <p>0 .111175 .222351 .333526 .444701 .555876 .667052 .778227 .889402 1.00058</p> <p>File: E:\ANSYS_M-213\FCL-35-38-90..x_t</p>

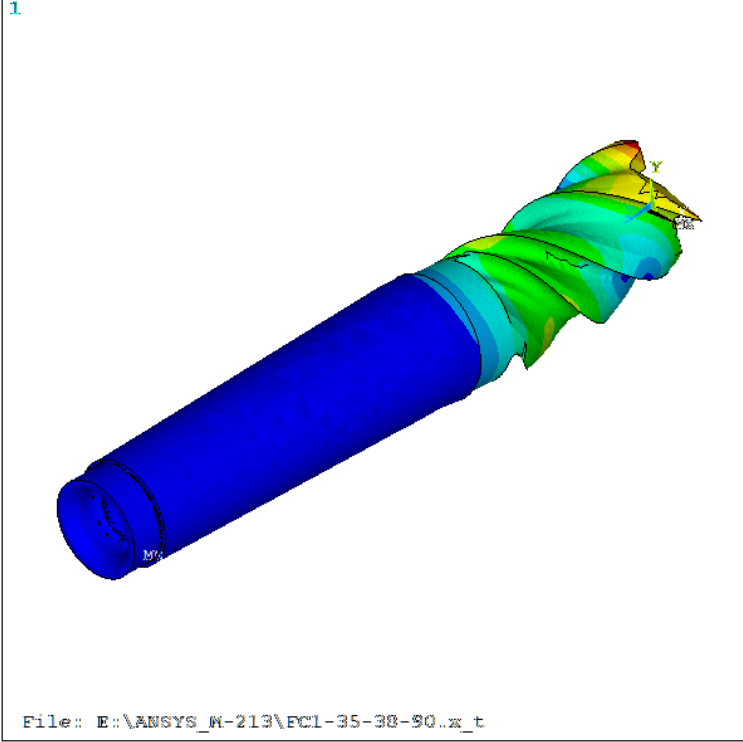
1	2	3	4
5	30979	1,26	<div data-bbox="544 293 1538 1025"> <p>1</p> <p>MODAL SOLUTION</p> <p>STEP=1 SUB =5 FREQ=30978.8 USUM (AVG) RSYS=0 DAX =1.26334 SMX =1.26334</p> <p style="text-align: right;"><b>ANSYS</b> R19.0 DEC 10 2018 00:53:12</p>  <p style="text-align: center;">MM</p> <p>0    .140372    .280743    .421115    .561487    .701858    .84223    .982602    1.12297    1.26334</p> <p>File: E:\ANSYS_M-219\FCL-35-38-90.k_t</p> </div>

Картини переміщень вузлових точок робочої частини фрези із змінним окружним кроком зубців, відповідно розрахованих ЧБК, представлені в таблиці 9.3.

Таблиця 9.3 – Результати модального аналізу

№ з/п	ЧВК	Границі переміщення	Ескіз
1	2	3	4
1	3355.1	1,06	<div data-bbox="555 539 1270 1249"> <p>ANSYS Release 19.0 Build 19.0 DEC 10 2018 Q1:12:38 NODAL SOLUTION STEP=1 SUB =1 FREQ=3355.14 USUM (AVG) RSYS=0 PowerGraphics EFACET=1 AVRES=Max DMX =1.10597 SMX =1.10597 0 ..122885 ..245771 ..368656 ..491542 ..614427 ..737312 ..860198 ..983083 1.10597</p> <p>File: E:\ANSYS_M-213\FCL-35-38-90..x_t</p> </div>
2	3493.5	1,11	<div data-bbox="555 1308 1270 2018"> <p>ANSYS Release 19.0 Build 19.0 DEC 10 2018 Q1:14:30 NODAL SOLUTION STEP=1 SUB =2 FREQ=3493.51 USUM (AVG) RSYS=0 PowerGraphics EFACET=1 AVRES=Max DMX =1.10632 SMX =1.10632 0 ..122924 ..245848 ..368772 ..491696 ..61462 ..737543 ..860467 ..983391 1.10632</p> <p>File: E:\ANSYS_M-213\FCL-35-38-90..x_t</p> </div>

1	2	3	4
3	10750	1,00	<div data-bbox="555 300 1257 1003"> <p>1</p> <p>ANSYS Release 19.0 Build 19.0 DEC 10 2018 01:14:40 MODAL SOLUTION STEP=1 SUB =3 FREQ=10750.2 USDM (AVG) RSYS=0 PowerGraphics EFACET=1 AVRES=Max DMX =1.00112 SMX =1.00112</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>0</li> <li>..111236</li> <li>..222471</li> <li>..333707</li> <li>..444942</li> <li>..556178</li> <li>..667413</li> <li>..778649</li> <li>..889884</li> <li>1.00112</li> </ul> <p>File: E:\ANSYS_M-213\FCL-35-38-90..x_t</p> </div>
4	14602	1,40	<div data-bbox="555 1052 1257 1756"> <p>1</p> <p>ANSYS Release 19.0 Build 19.0 DEC 10 2018 01:14:57 MODAL SOLUTION STEP=1 SUB =4 FREQ=14601.8 USDM (AVG) RSYS=0 PowerGraphics EFACET=1 AVRES=Max DMX =1.40455 SMX =1.40455</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>0</li> <li>..156061</li> <li>..312123</li> <li>..468184</li> <li>..624245</li> <li>..780307</li> <li>..936368</li> <li>1.09243</li> <li>1.24849</li> <li>1.40455</li> </ul> <p>File: E:\ANSYS_M-213\FCL-35-38-90..x_t</p> </div>

1	2	3	4
5	14918	1,38	<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="flex: 1;">  </div> <div style="flex: 0.5; font-size: 0.8em; padding-left: 10px;"> <p>ANSYS Release 19.0 Build 19.0 DEC 10 2018 01:15:15 MODAL SOLUTION STEP=1 SUB =5 FREQ=14917.6 USUM (AVG) RSYS=0 PowerGraphics EFACET=1 AVRES=Mat DNX =1.37635 SNX =1.37635</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>0</li> <li>.152927</li> <li>.305855</li> <li>.458782</li> <li>.611709</li> <li>.764637</li> <li>.917564</li> <li>1.07049</li> <li>1.22342</li> <li>1.37635</li> </ul> </div> </div> <p style="font-size: 0.7em; margin-top: 10px;">File: E:\ANSYS_M-213\FCL-35-38-90.x_t</p>

Проаналізувавши результати розрахунків можна зробити наступні висновки:

Мінімальні частоти власних коливань фрез, на яких можливе виникнення резонансних коливань  $w_{n1}=3383.8$  Гц та  $w_{n2}=3355.1$  Гц. Ці частоти значно менші, ніж робочі частоти входу зубців фрез в матеріал  $F_{фр}=4,66$  Гц, при розрахунковій швидкості різання  $V=28,13$  м/мин, на якій застосовуються досліджувані інструменти в умовах виробництва.

## ВИСНОВКИ

У процесі виконання роботи були розглянуті питання якості ябробленної поверхні, представлена класифікація кінцевих фрез, був описаний процес фрезерування, розглянуті причини виникнення коливань, які впливають на якість обробленої поверхні при механічній обробці фрезеруванням, зроблений аналіз шляхів зниження коливань.

За результатами літературного огляду висвітлена еволюція розвитку кінцевих фрез та розглянутий вплив конструкційно-геометричних параметрів кінцевих фрез на якість обробленої поверхні.

Були запропоновані кінцеві фрези двох конструкцій, які направлені на зниження інтенсивності автоколивань.

Зроблений частотний аналіз запропонованих конструкцій кінцевих фрез засобами програмного комплексу ANSYS. За результатами якого було визначено мінімальні частоти власних коливань фрез, на яких можливе виникнення резонансних коливань  $w_{n1}=3383.8$  Гц та  $w_{n2}=3355.1$  Гц. Ці частоти значно менші, ніж робочі частоти входу зубців фрез в матеріал  $F_{фр}=4,66$  Гц, при розрахунковій швидкості різання  $V=28,13$  м/мин, на якій застосовуються досліджувані інструменти в умовах виробництва.

## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. ГОСТ 25142–82 Шероховатость поверхности – Государственный комитет СССР по стандартам. – Введ. 1983.01.01. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 22 с.
2. Розенберг Ю.А. Резание материалов: Учебник для техн. вузов / Ю.А. Розенберг. – Курган: Изд-во ОАО «Полиграфический комбинат» Зауралье, 2007. – 294 с.
3. Подураев В.Н. Резание труднообрабатываемых материалов / В.Н. Подураев. – М.: Высшая школа, 1974. – 587 с.
4. Мурашкин Л.С. Прикладная нелинейная механика станков / Л.С. Мурашкин, С.Л. Мурашкин. – Л.: Машиностроение, 1977. – 192 с.
5. Армарего И. Д. Обработка металлов резанием: Пер. с англ. / И. Д. Армарего, Р. Х. Браун – М.: Машиностроение, 1977. – 325 с.
6. Жарков И.Г. Вибрации при обработке лезвийным инструментом / И.Г. Жарков. – Л.: Машиностроение. Ленингр. Отд-ние, 1986. – 184 с.
7. Кудинов, В.А. Динамика станков / В.А. Кудинов. – М.: Машиностроение, 1967. – 360 с.
8. Опитц Г. Современная техника производства. Пер. с нем. / Г. Опитц. – М. Машиностроение, 1975 г. – 280 с.
9. Ильницкий И.И. Колебания в металлорежущих станках и пути их устранения / И.И. Ильницкий. – Москва-Свердловск: Машгиз, 1958. – 145 с.
10. Faassen R. Prediction of Regenerative Chatter by Modeling and Analysis of High Speed Milling / R. Faassen, N. van de Wouw, J. Oosterling, H. Nijmeijer // Int. J. Machine Tools and Manufacture. – 2003 – Vol. 43. – pp. 1437-1446.
11. Свинин В.М. Управление регенеративными автоколебаниями при фрезеровании на основе модуляции скорости резания: Дис. ... д-ра техн. наук: 05.03.01 / Свинин Валерий Михайлович. – Иркутск, 2008. – 342 с.

12. А.с. 1247191 СССР, МПК В23С5/06. Режущий инструмент / Л.А. Васин, С.А. Васин, О.Л. Дмитриева (СССР). 3878899; Заявлено 25.02.85; Оpubл. 30.07.86. – Бюл. №28, 1986. – 3 с.
13. А.с. 625848 СССР, МПК В23С5/10. Концевая фреза / В.В. Чебоксарова, Ю.Ф. Огнев (СССР). 2450620-08; Заявлено 09.02.77; Оpubл. 30.09.77. Бюл. №36. – 2 с.
14. Шишов Г.Я. Исследование зависимости частоты и амплитуды автоколебаний от частоты вращения фрезы / Г.Я. Шишов // Станки и инструмент. – 1985. – №7. – С. 6-7.
15. Розенберг А. М. Теория работы цилиндрической фрезы со спиральным зубом / А. М. Розенберг, В. В. Суднишников // Вестник металлопромышленности, 1933. №4, С.36–48.
16. Розенберг А. М. Динамика фрезерования / Розенберг А. М. – М.: Советская наука. – 1945. – 360 с.
17. Розенберг А. М. Работа цилиндрической фрезы / А. М. Розенберг // Известия Томского индустриального института [Известия ТИИ]. — 1936. — Т. 55, [Вып. 1–3]. — С. 128–165.
18. СЕМЕНЧЕНКО, И.И. ПРОЕКТИРОВАНИЕ МЕТАЛЛОРЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА [ТЕКСТ] / И.И. СЕМЕНЧЕНКО, В.М. МАТЮШИН, Г.Н. САХАРОВ. – М.: Машгиз, 1952. – 952 с.
19. Budak E. An Analytical Design Method for Milling Cutters With Nonconstant Pitch to Increase Stability, Part 2: Application / E. Budak // ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2003. – Vol. 125. – P. 35–38.
20. Budak E. Analytical Prediction of Chatter Stability Conditions for Multi-Degree of Systems in Milling. Part I: Modeling / E. Budak, Y. Altintas // Transactions of ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control. – 1998. – Vol. 120. – P. 22–30.
21. Крепак А. С. Влияние угла наклона зубьев концевых фрез на их стойкость / А. С. Крепак // Станки и инструменты.– 1971.– №3.– С.39–42.

22. Крепак А. С. Исследование процесса резания жаропрочных сталей концевыми фрезами с разнонаклонными зубьями: автореф. дис. на соискание научн. степени канд. техн. наук: спец. 05.171 «Теория обработки резанием» / А. С. Крепак – Тула, 1972. – 23 с.

23. Boothoyd G. Fundamentals of Metal Machining and Maching Tools / G. Boothoyd, W. A. Knight – [Taylor & Francis Inc.](http://www.tandf.co.uk) Third Edition – 2005. – 608 p.

24. Каталог фирмы Gühring – Режим доступа: [www.guehring.kiev.ua](http://www.guehring.kiev.ua).

25. Каталог фирмы ООО «Техтрейд» – Режим доступа: <http://www.techtrade.su/>

26. Каталог Janpro – Режим доступа: <http://www.cutters.com.tw>

27. Каталог фирмы ARNO <http://www.arnoru.ru/>