

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВЕТЕРИНАРНОЇ
МЕДИЦИНИ ТА БІОТЕХНОЛОГІЙ ІМЕНІ С. З. ГЖИЦЬКОГО
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ
ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА МАШИНОБУДУВАННЯ

К В А Л І Ф І К А Ц І Й Н А Р О Б О Т А

другого (магістерського) рівня вищої освіти

на тему: **«Дослідження впливу технологічних параметрів режиму різання
на ефективність процесу торцевого фрезерування»**

Виконав: студент VI курсу групи Маш-62

Спеціальності 133 «Галузево
машинобудування»

(шифр і назва)

Володимир ОБДИРКО
(Ім'я та прізвище)

Керівник: Сергій БАРАНОВИЧ
(Ім'я та прізвище)

Дубляни 2025

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА МАШИНОБУДУВАННЯ**

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Зав. кафедри _____
(підпис)

д.т.н., професор Власовець В.М.
“28” лютого 2025 р.

З А В Д А Н Н Я

на кваліфікаційну роботу студенту
Обдирку Володимиру Юрійовичу

1. Тема роботи: «Дослідження впливу технологічних параметрів режиму різання на ефективність процесу торцевого фрезерування»

Керівник роботи: Баранович Сергій Миколайович, к.т.н., доцент

Затверджена наказом по університету від 28.02.2025 року № 140/к-с.

2. Строк здачі студентом закінченої роботи 5.12.2025 року

3. Вихідні дані: Літературні джерела за тематикою кваліфікаційної роботи відомих технологічних процесів металообробних верстатів; матеріали навчальної, методичної довідкової та наукової літератури; методики визначення економічної ефективності впровадження нового технологічного рішення у виробництво.

4. Перелік питань, які необхідно розробити:

1. Огляд сучасного стану технології торцевого фрезерування;
 2. Теоретичні основи режимів різання на процес торцевого фрезерування;
 3. Методика та схема експериментальних досліджень;
 4. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях;
- Висновки і пропозиції;
Бібліографічний список.

5. Перелік ілюстративного матеріалу:

Ілюстративний матеріал представити у вигляді презентації у застосунку Microsoft PowerPoint.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата		Відмітка про виконання
		завдання видав	завдання прийняв	
1,2,3	Баранович С.М. к.т.н., доцент кафедри машинобудування			
4	Городецький І.М., к.т.н., доцент кафедри фізики, інженерної механіки та безпеки виробництва			

7. Дата видачі завдання: 28.02.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Відмітка про виконання
1.	<i>Виконання розділу: «Огляд сучасного стану технології торцевого фрезерування»</i>	28.02.25-28.03.25	
2.	<i>Виконання другого розділу: «Теоретичні основи режимів різання на процес торцевого фрезерування»</i>	31.03.25-2.05.25	
3.	<i>Виконання розділу: «Методика та схема експериментальних досліджень»</i>	5.05.25-28.06.25	
4.	<i>Виконання розділу: «Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях»</i>	1.09.25-7.11.25	
5.	<i>Завершення оформлення розрахунково-пояснювальної записки. Завершення роботи в цілому</i>	10.11.25-5.12.25	

Студент

_____ Володимир ОБДИРКО
(підпис)

Керівник роботи

_____ Сергій БАРАНОВИЧ
(підпис)

УДК 621.914

Дослідження впливу технологічних параметрів режиму різання на ефективність процесу торцевого фрезерування.

Обдирко Володимир Юрійович – Кваліфікаційна робота. Дубляни: Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С. З. Гжицького, 2025. 57с. текст. част., рис., 19 джерел.

У кваліфікаційній роботі наведено огляд сучасного стану технології торцевого фрезерування, розглянуто конструктивні особливості інструменту, режими різання та їх вплив на продуктивність, якість обробки й стійкість інструмента. Проаналізовано основні показники ефективності процесу та окреслено актуальні напрями наукових досліджень, спрямовані на оптимізацію режимів різання й підвищення стабільності та результативності механічної обробки.

Розглянуто теоретичні основи впливу режимів різання на процес торцевого фрезерування, зокрема механіку різання, силові й теплові процеси, зношування інструмента та закономірності формування шорсткості обробленої поверхні. Узагальнено сучасні підходи до математичного моделювання та оптимізації режимів різання, що забезпечують підвищення продуктивності, якості обробки й стійкості інструмента.

Представлено методику та схему експериментальних досліджень процесу торцевого фрезерування, що базується на системному аналізі впливу основних режимів різання на силові, теплові та якісні показники обробки. Обґрунтовано вибір керованих факторів і вихідних параметрів, а також наведено аналітичні підходи до оцінки температури, зносу інструмента та шорсткості поверхні. Отримані експериментальні результати підтверджують визначальний вплив швидкості різання і подачі на температурний режим, що безпосередньо пов'язаний зі стабільністю процесу та якістю обробки.

У розділі з охорони праці проаналізовано аварійні та травмонебезпечні ситуації, які можуть виникати під час виконання фрезерних робіт. Розглянуто заходи щодо захисту населення у випадку надзвичайних ситуацій.

ЗМІСТ

	ст.
Вступ	7
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД СУЧАСНОГО СТАНУ ТЕХНОЛОГІЇ ТОРЦЕВОГО ФРЕЗЕРУВАННЯ	9
1.1 Загальна характеристика процесу торцевого фрезерування	9
1.2 Конструктивні та технологічні особливості інструменту	10
1.3 Режими різання та їх вплив на ефективність процесу	13
1.4 Показники ефективності обробки торцевим фрезеруванням	15
Сучасні напрямки досліджень щодо торцевого фрезерування	17
Висновки до розділу	18
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РЕЖИМІВ РІЗАННЯ НА ПРОЦЕС ТОРЦЕВОГО ФРЕЗЕРУВАННЯ	19
2.1 Загальні положення механіки різання під час технологічної операції торцевого фрезерування	19
2.2 Сили різання та вплив режимів на силові характеристики	22
2.3 Теплові процеси під час технологічної операції торцевого фрезерування	24
2.4 Взаємозв'язок режимів різання та зносу інструмента	27
2.5 Теоретичні аспекти формування шорсткості поверхні під час торцевого фрезерування	29
2.6 Моделювання та оптимізація режимів різання для торцевого фрезерування	31
Висновки до розділу	35
РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА ТА СХЕМА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	36
3.1 Основи експериментального дослідження	36

3.2	Аналітичний вибір факторів та вихідних параметрів торцевого фрезерування	37
3.3	Методика оцінки технологічних параметрів торцевого фрезерування аналітичним методом	39
3.4	Загальна характеристика отриманих результатів	41
	Висновки по розділу	43
	РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	45
4.1	Обґрунтування можливих чинників травмонебезпечних ситуацій.	45
4.2	Умови і обставини виникнення небезпечних ситуацій та їх наслідки	47
4.3	Безпека в надзвичайних ситуаціях	50
	Висновки до розділу	53
	ВИСНОВКИ І ПРОПОЗИЦІЇ	54
	БІБЛЮГРАФІЧНИЙ СПИСОК	56

ВСТУП

Сучасний розвиток машинобудування неможливий без підвищення ефективності процесів механічної обробки, серед яких одне з провідних місць займає торцеве фрезерування. Цей процес широко застосовується під час виготовлення корпусних деталей, елементів з високими вимогами до точності, шорсткості поверхні та стабільності розмірних параметрів. Зростання вимог до продуктивності, якості та економічності обробки потребує удосконалення технології, оптимізації режимів різання та впровадження науково обґрунтованих методів вибору параметрів фрезерування.

Одним із ключових факторів, що визначає результативність процесу торцевого фрезерування, є комплекс технологічних параметрів: швидкість різання, подача, глибина та ширина фрезерування, геометрія інструменту, властивості заготовки та інші. Від поєднання цих параметрів залежить не лише якість обробленої поверхні, але також сили різання, теплонапруженість зони контакту, інтенсивність зношування ріжучих елементів і, відповідно, собівартість операції. Неправильно підібрані режими призводять до передчасного виходу інструменту з ладу, нестабільності процесу, вібрацій та нерівномірності шорсткості. Тому задача дослідження впливу технологічних параметрів на ефективність фрезерування є актуальною як у науковому, так і в практичному аспектах.

За останні роки з'явилися нові інструментальні матеріали, покриття та конструктивні рішення для торцевих фрез, що відкриває можливість значно підвищити продуктивність обробки. Проте потенціал цих технологій не може бути повністю реалізований без глибокого розуміння механізмів формування сил різання, температурних режимів та закономірностей зношування інструменту. Удосконалення математичних моделей, дослідження експериментальних залежностей і використання сучасних методів планування експерименту дозволяє визначати оптимальні режими обробки з мінімальними витратами часу та ресурсу.

Метою даної магістерської роботи є дослідження впливу технологічних параметрів режиму різання на ефективність процесу торцевого фрезерування та визначення оптимальних умов, що забезпечують підвищення якості та продуктивності обробки при зниженні витрат інструменту.

Для досягнення мети були визначені такі завдання:

- провести аналітичний огляд сучасних досліджень процесу фрезерування та критеріїв його ефективності;
- розробити теоретичні моделі, що описують взаємозв'язок між режимами різання та показниками якості;
- сформулювати методику експериментальних досліджень і виконати оцінку впливу основних параметрів на сили різання, знос інструменту та шорсткість поверхні;
- виконати статистичну обробку експериментальних даних і побудувати регресійні моделі;
- запропонувати оптимальні режими торцевого фрезерування та оцінити їх економічну ефективність.

Практична цінність роботи полягає у можливості використання отриманих результатів для вдосконалення технологічних процесів фрезерування в умовах виробництва, зниження інструментальних витрат та підвищення якості деталей.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД СУЧАСНОГО СТАНУ ТЕХНОЛОГІЇ ТОРЦЕВОГО ФРЕЗЕРУВАННЯ

1.1. Загальна характеристика процесу торцевого фрезерування

Торцеве фрезерування належить до високопродуктивних процесів механічної обробки матеріалів різанням і є одним із базових методів формування плоских поверхонь у сучасному машинобудуванні. Специфіка цього методу полягає у використанні фрез, активні ріжучі елементи яких зосереджені переважно на торцевій (фасонній) частині інструмента. Така конструктивна особливість забезпечує можливість інтенсивного зняття припуску по ширині оброблюваної поверхні та підвищує ефективність процесу в умовах серійного й масового виробництва (рис. 1.1).

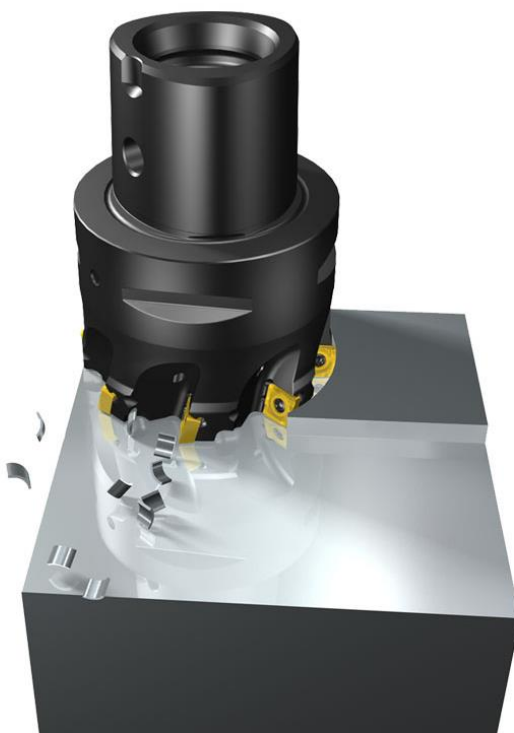


Рисунок 1.1 – Загальний вигляд фрезерування, як процес механічної обробки.

Завдяки поєднанню значної жорсткості інструмента, раціонального відведення стружки та можливості варіювання геометрії різальних пластин, торцеве фрезерування є придатним як для чорнових операцій з великим зняттям

матеріалу, так і для чистових проходів, де необхідно досягти високої точності та малої шорсткості поверхні. У порівнянні з іншими способами формоутворення плоских поверхонь, цей метод забезпечує підвищену стабільність процесу, рівномірність навантаження на інструмент та покращені експлуатаційні характеристики отриманих поверхонь.

Таким чином, торцеве фрезерування посідає ключове місце у технологічних маршрутах виготовлення деталей машин, оскільки поєднує високу продуктивність, універсальність та можливість забезпечення оптимальних параметрів точності й якості обробки.

Важливими параметрами, які впливають на процес, є: швидкість різання (V_c), подача на зуб (f_z), глибина різання (a_p) та геометрія інструмента. Рациональний вибір цих параметрів визначає продуктивність, якість поверхні, знос різального інструмента та енергетичну ефективність процесу. Регулювання параметрів режиму різання дозволяє оптимізувати процес за різними критеріями, зокрема за максимізацією продуктивності при збереженні допустимих значень шорсткості та тривалості служби інструмента.

1.2. Конструктивні та технологічні особливості інструменту

У сучасних умовах обробки матеріалів торцеві фрези представлені рядом конструктивних варіантів, серед яких звичайні багатозубі інструменти доповнюються спеціалізованими геометріями, такими як ступінчасті та інші модифіковані форми ріжучих кромek. Торцеві фрези належать до типу фрез, які мають ріжучі зубці як на торці, так і по периферії інструмента, що дозволяє реалізовувати як осьові, так і радіальні проходки під час фрезерування плоских і контурних поверхонь заготовок (рис. 1.2.).



Рисунок 1.2 – Загальний вигляд торцевої фрези

Особливо цікавими з точки зору забезпечення стабільності процесу та якості обробки є конструкції ступінчастих торцевих фрез. Така ступінчаста конфігурація різальних елементів передбачає послідовне включення ріжучих кромки, що розташовані на різних радіальних і осьових рівнях по довжині інструмента. Це сприяє поступовому зняттю припуску під час проходів, зменшенню перевантаження окремих кромки та розподілу сил різання між кількома ріжучими поверхнями, що, в свою чергу, позитивно впливає на стабільність процесу й зниження вібрацій.

У експериментальних дослідженнях показано, що застосування торцевих ступінчастих фрез (рис. 1.3) під час чистового фрезерування дозволяє ефективніше управляти складовими сили різання, зменшувати шорсткість обробленої поверхні та стабілізувати положення формоутворюючих різальних елементів у порівнянні зі стандартними геометріями. При цьому конструктивне розташування ступенів ріжучих кромки може бути оптимізоване через врахування кінематики процесу різання та механічних впливів на інструмент і заготовку.

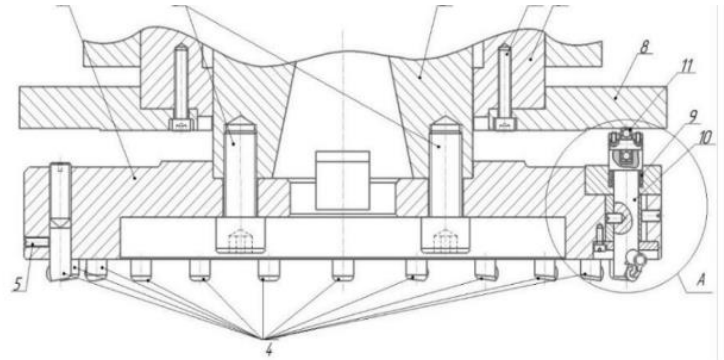
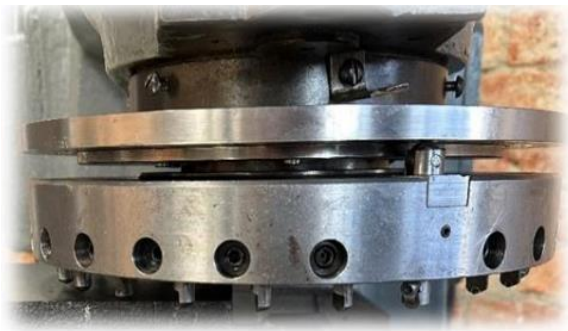


Рисунок 1.3 – Конструкція ступінчастої торцевої фрези

Застосування вставок із косокутною (просторово-змщеною) геометрією різальних крайок у поєднанні з використанням надтвердих матеріалів таких як кубічний нітрид бору, надтверді композиції або полі-кристалічний алмаз істотно трансформує тепловий та силовий баланс процесу різання (рис. 1.4). Подібні інженерні рішення сприяють формуванню стабільнішої термомеханічної взаємодії у зоні різання, оскільки оптимізоване просторове положення різальної кромки дає змогу зменшити локальні пікові температури, перерозподілити складові сили різання та знизити ризик виникнення передчасного зношування. Надтверді матеріали, зокрема, забезпечують вищу термостійкість і зносостійкість, що є критично важливим під час високошвидкісного або жорсткого режиму фрезерування.



Рисунок 1.4 – Конструкція торцевої фрези з вставками

Подальше вдосконалення конструктивних параметрів різального інструмента включно з модифікацією профілю різальних пластин, оптимізацією мікро- і макрогеометрії, корекцією кутів встановлення та впровадженням адаптивних ріжучих елементів є одним із пріоритетних напрямів підвищення продуктивності й надійності операцій фрезерування плоских поверхонь. Такі модернізаційні підходи дозволяють не лише зменшити енергетичні витрати процесу, а й підвищити якість обробленої поверхні, стабільність силових характеристик, стійкість інструмента та загальний ресурс технологічної системи при обробці конструкційних сталей, сплавів високої твердості й труднооброблюваних матеріалів.

1.3. Режими різання та їх вплив на ефективність процесу

Режими різання задаються комплексом технологічних показників швидкістю різання, подачею на зуб і глибиною різання (рис. 1.5). У сукупності ці параметри формують напружено-деформаційний та тепловий стани в зоні обробки, визначаючи величину сил різання, інтенсивність тепловиділення, характер формування поверхневого шару та динаміку зношування ріжучого інструменту. Їх узгоджений вибір є критичним для забезпечення стабільності процесу, підвищення точності обробки та досягнення оптимальної продуктивності.

Результати сучасних експериментальних і теоретичних досліджень свідчать, що раціональне узгодження окремих параметрів режиму різання може суттєво трансформувати характер протікання процесу знімання матеріалу. Зокрема, встановлено, що за умов збільшення подачі на зуб при одночасному зменшенні глибини різання формується специфічний кінематичний режим, відомий як високошвидкісне фрезерування з підвищеною подачею (high-feed milling). Такий підхід забезпечує істотне зростання об'ємної продуктивності обробки за рахунок інтенсифікації процесу стружкоутворення та ефективнішого використання геометрії різальної кромки, при цьому не

спричиняючи критичного погіршення параметрів шорсткості чи цілісності сформованого поверхневого шару.

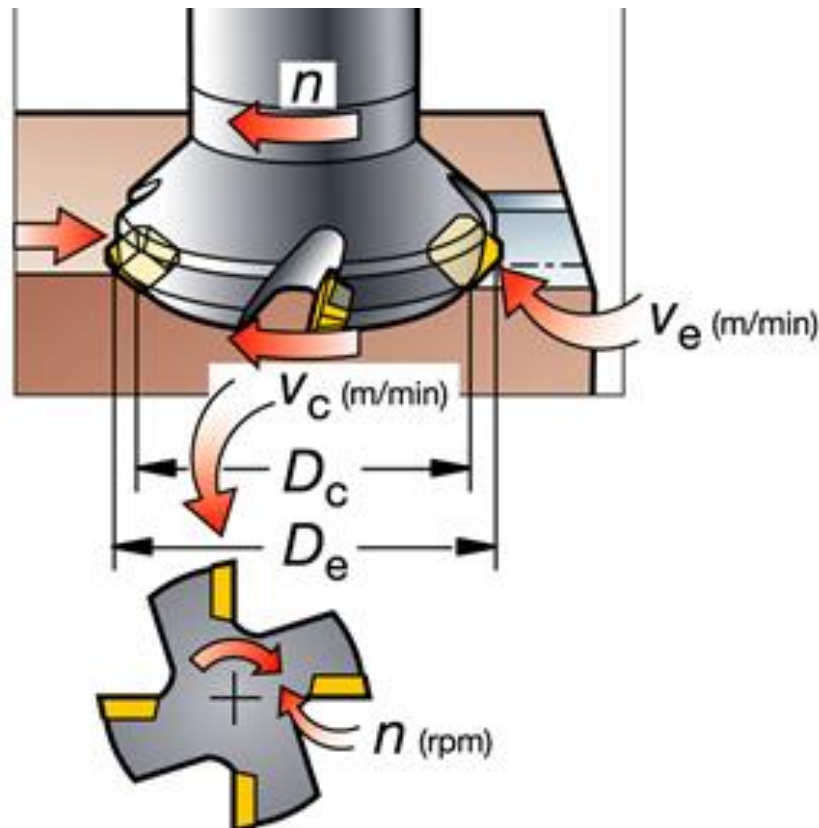


Рисунок 1.5 – Режими і параметри торцевого фрезерування

Водночас збільшення швидкості різання супроводжується зростанням величини нормальних та тангенціальних складових сили різання, динамічних навантажень і амплітуди коливальних процесів у зоні контакту інструмент–заготовка. Це загострює вимоги до аналізу та забезпечення динамічної стійкості технологічної системи, оскільки підвищена частота збурень та ризик резонансних явищ можуть істотно впливати як на точність, так і на стабільність процесу. Таким чином, коректний вибір і взаємоузгодження параметрів режиму різання набувають ключового значення для досягнення оптимального балансу між продуктивністю, енергоємністю процесу та якістю обробленої поверхні у високоефективних технологіях механічної обробки.

1.4. Показники ефективності обробки торцевим фрезеруванням

Основними показниками, за якими здійснюють комплексну оцінку ефективності процесу торцевого фрезерування, є низка взаємопов'язаних критеріїв, що визначають як технологічний результат, так і економічну доцільність застосовуваного режиму різання.

1. Якість сформованої поверхні. До цього критерію належать параметри шорсткості, мікрорельєфу та мікроструктури поверхневого шару, що визначають експлуатаційні властивості деталі зносостійкість, корозійну стійкість, контактну міцність і втомну довговічність. Особливе значення мають такі величини, як середнє арифметичне відхилення профілю (R_a), максимальна висота нерівностей (R_z) та оцінка хвилястості. Формування поверхневого мікрорельєфу залежить від кінематичних факторів, геометрії інструмента, динаміки процесу, а також від наявності вібрацій, які здатні істотно погіршити точність та однорідність поверхневого шару.

2. Продуктивність процесу (MRR Material Removal Rate). Об'ємна швидкість знімання матеріалу є ключовим інтегрованим показником, що характеризує загальну ефективність фрезерування з точки зору вихідної потужності та здатності обробного комплексу виконувати операції у мінімальні терміни. Продуктивність визначається добутком подачі, глибини та ширини різання, а також залежить від потужності верстата, стійкості інструмента і теплових процесів у зоні різання. Оптимізація MRR є одним із центральних завдань високоефективної механічної обробки, оскільки надмірне збільшення цього параметра може призвести до перевантаження інструмента, погіршення якості поверхні або втрати динамічної стабільності системи.

3. Інструментальна стійкість і трибологічні характеристики інструмента.

Тривалість служби ріжучих елементів визначається характером та інтенсивністю їх зношування (адгезійного, абразивного, дифузійного, термохімічного), що виникає під дією високих температур, контактних напружень і вібраційних перевантажень. Стійкість інструмента безпосередньо

пов'язана з економічністю обробки, частотою переналадки, стабільністю геометрії ріжучої кромки та можливістю підтримувати необхідні параметри поверхні протягом усього циклу роботи. Наукові дослідження показують, що оптимальні режими різання можуть значно мінімізувати швидкість зношування та підвищити ресурс ріжучого інструмента.

4. Силкові та динамічні характеристики процесу. Ця група критеріїв охоплює величину та напрямок компонент сил різання, рівень механічних коливань, частотні характеристики системи «верстат–пристосування–інструмент–заготовка» (ВППЗ) та її здатність протидіяти самозбудженим вібраціям (чату). Силкові навантаження безпосередньо впливають на точність, формоутворення поверхні, енергоспоживання та стабільність параметрів обробки. Наявність вібрацій, перевищення критичних режимів або зниження жорсткості технологічної системи можуть призвести до погіршення мікрогеометрії, зростання шорсткості, прискореного зношування інструмента та нестабільності процесу загалом.

Таким чином, ефективність торцевого фрезерування визначається багатофакторною взаємодією геометричних, теплових, динамічних і трибологічних аспектів процесу різання. Комплексний аналіз усіх наведених критеріїв є необхідним для побудови оптимальних технологічних режимів, підвищення продуктивності та забезпечення високої якості оброблюваних поверхонь.

Підвищення значущих технологічних показників у процесі механічної обробки забезпечується не лише коректним добром режимів різання, а й широким упровадженням сучасних наукових підходів до аналізу та прогнозування поведінки системи «інструмент–заготовка–верстат». До цих підходів належить побудова детальних математичних моделей процесу різання, що дають змогу описати закономірності стружкоутворення, теплових потоків, силових взаємодій та динамічних ефектів. Такі моделі слугують основою для аналітичної оцінки впливу окремих технологічних параметрів на кінцеві результати обробки.

Крім того, важливою складовою сучасних досліджень є застосування методів статистичної обробки та інтерпретації експериментальних даних, які дозволяють ідентифікувати ключові фактори, визначити їхній взаємний вплив, а також узагальнити емпіричні залежності з високою достовірністю. У поєднанні з багатокритерійними методами оптимізації такими як метод поверхні відгуку, алгоритми еволюційного пошуку чи оптимізація на основі нечітких моделей це створює підґрунтя для формування комплексних стратегій керування режимами різання. Такі стратегії спрямовані на досягнення збалансованої взаємодії між якістю поверхні, продуктивністю, енергетичною ефективністю та стійкістю інструмента, що є визначальним для високоточної та високопродуктивної механічної обробки у сучасному машинобудуванні.

1.5. Сучасні напрямки досліджень щодо торцевого фрезерування

Здійснений огляд і систематизація сучасних наукових публікацій дозволяють зробити висновок про інтенсивний та багатоаспектний розвиток досліджень у сфері фрезерної обробки. Зокрема, значна увага приділяється проєктуванню інноваційних конструктивних рішень фрез, а також обґрунтуванню раціональних геометричних параметрів різальних пластин, що спрямовані на підвищення стабільності процесу різання, зменшення силових навантажень і збільшення ресурсу інструменту.

Вагомий масив досліджень зосереджений на аналізі динамічних характеристик технологічної обробної системи, включно з інструментом, заготовкою та верстатом, з метою запобігання виникненню автоколивань, зниження вібраційних проявів і забезпечення підвищеної точності та якості оброблених поверхонь.

Паралельно активно розвивається напрям оптимізації режимів різання, який базується на застосуванні сучасних методів математичного моделювання, планування багатфакторних експериментів та багатокритеріальних підходів,

що дозволяють одночасно враховувати продуктивність, енергетичні витрати, знос інструменту та якісні показники обробки.

Окреме місце у сучасних наукових дослідженнях займає впровадження інтелектуалізованих та автоматизованих систем керування процесом різання, які функціонують на основі сенсорного моніторингу та зворотного зв'язку. Такі системи забезпечують адаптивне коригування параметрів обробки в режимі реального часу, що сприяє підтриманню оптимальних умов різання, підвищенню надійності технологічного процесу та його загальної ефективності.

Висновки до розділу

Здійснено огляд технології торцевого фрезерування як одного з основних методів механічної обробки поверхонь. Виявлено ключові параметри процесу, їхній вплив на якість та продуктивність обробки, а також окреслено сучасні наукові підходи до оптимізації режимів різання та удосконалення конструкції інструменту. Встановлено, що ефективність торцевого фрезерування значною мірою залежить від раціонального поєднання технологічних параметрів та застосування сучасних методів дослідження.

РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РЕЖИМІВ РІЗАННЯ НА ПРОЦЕС ТОРЦЕВОГО ФРЕЗЕРУВАННЯ

2.1. Загальні положення механіки різання під час технологічної операції торцевого фрезерування

Торцеве фрезерування як технологічний процес відзначається дискретним характером контакту різальних елементів інструмента з оброблюваною поверхнею заготовки, що обумовлює періодичність навантаження у зоні різання. Така особливість призводить до циклічних коливань сил різання, непостійної товщини зрізаного шару та змінного характеру тепловиділення. На відміну від процесу точіння, для якого притаманна безперервна і відносно стабільна взаємодія різальної кромки з матеріалом, торцеве фрезерування супроводжується імпульсними навантаженнями, переривчастим формуванням стружки та виникненням інтенсивних високочастотних коливальних процесів. У результаті формується складна тривимірна кінематична схема стружкоутворення, а температурне поле в зоні різання набуває істотно нерівномірного та нестійкого характеру.

З позицій енергетичного підходу процес різання доцільно розглядати як складний механізм трансформації підведеної механічної енергії у теплову, яка генерується в зонах зсуву матеріалу та контактної взаємодії інструмента зі стружкою і заготовкою. Переважна частина витраченої енергії, що за різними оцінками сягає 80–90 %, переходить у тепло, визначаючи температурний режим процесу та істотно впливаючи на зносостійкість і міцність різальних кромок, а також на формування фізико-механічних властивостей поверхневого шару оброблюваної деталі.

Для торцевого фрезерування характерним є відносно інтенсивний відвід тепла зі стружкою, що частково знижує теплове навантаження на інструмент і заготовку. Водночас за умов підвищених швидкостей різання та зростання частоти входження різальних кромок у зону контакту ефективність природного

охолодження істотно зменшується. Це призводить до локального накопичення тепла в зоні різання, підвищення температури різального інструмента та інтенсифікації процесів термічного зношування, що потребує врахування при виборі раціональних режимів обробки та систем охолодження.

З позицій теорії різання металів силова взаємодія між різальним інструментом і оброблюваним матеріалом у процесі механічної обробки характеризується наявністю просторової системи сил, яку доцільно розкласти на три взаємно перпендикулярні складові (рис. 2.1). До таких складових належать тангенціальна (або головна) складова, що безпосередньо визначає витрати потужності на процес різання, радіальна складова, яка спричиняє відхилення інструмента та заготовки і впливає на жорсткість технологічної системи, а також осьова складова, що діє вздовж осі інструмента і істотно впливає на навантаження шпиндельного вузла та опорні елементи верстата. Величини та співвідношення зазначених компонентів формують загальну силову картину процесу та визначають його стабільність і точність.

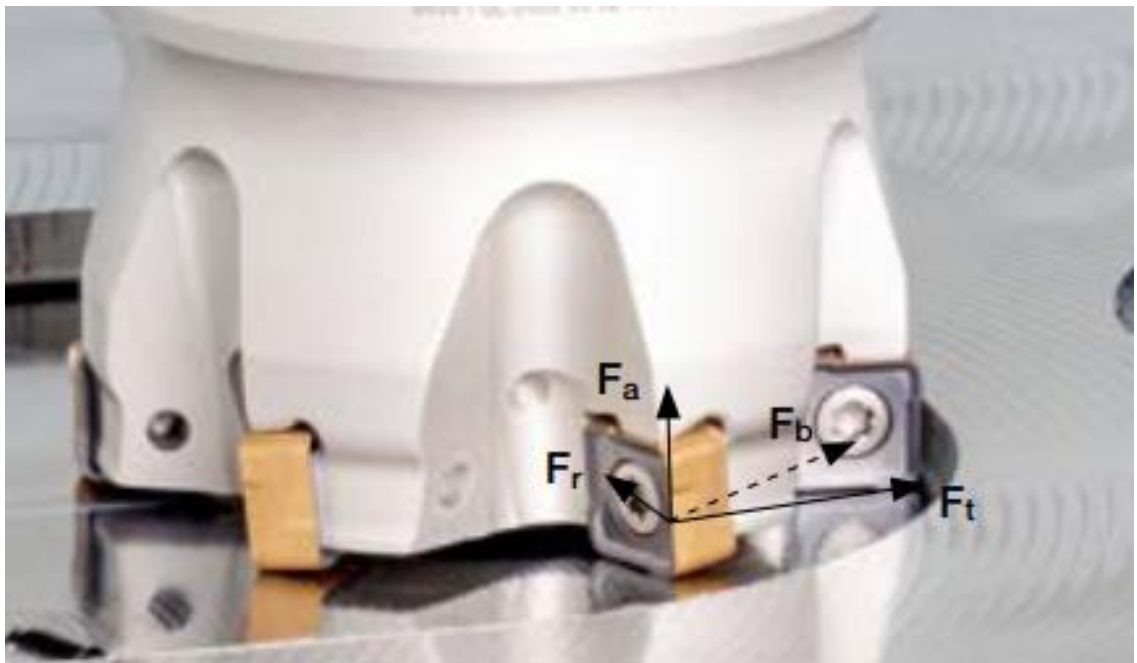


Рисунок 2.1 – Схема просторової системи сил під час операції торцевого фрезерування

Співвідношення між основною, радіальною та осьовою складовими сили різання є функцією комплексу факторів, серед яких провідну роль відіграють геометричні параметри різального інструмента, зокрема кути різання, нахил і форма різальної кромки, радіус при вершині зуба, а також конструктивні особливості фрези. Не менш суттєвий вплив мають технологічні параметри процесу, такі як подача на зуб, глибина та ширина різання, а також фізико-механічні властивості оброблюваного матеріалу. Зміна будь-якого з цих параметрів призводить до перерозподілу навантажень між складовими сили різання та може істотно вплинути на динамічну поведінку технологічної системи.

Збільшення подачі на зуб та глибини різання, як правило, супроводжується зростанням об'єму зрізуваного матеріалу за одиницю часу, що зумовлює майже пропорційне збільшення силових навантажень у зоні різання. Така закономірність пояснюється підвищенням опору матеріалу деформації та зростанням контактних напружень на різальній кромці. У результаті зростають як головна складова сили, що визначає енергетичні витрати процесу, так і радіальна та осьова складові, які впливають на відхилення інструмента, вібраційні прояви та точність обробки.

Вплив швидкості різання на величину сил різання має більш складний і нелінійний характер. З одного боку, підвищення швидкості сприяє зростанню температури в зоні різання, що призводить до зниження міцності та опору пластичній деформації оброблюваного матеріалу. З іншого боку, інтенсифікуються термомеханічні процеси, пов'язані зі зміною умов тертя на контактних поверхнях, формуванням вторинних зон деформації та особливостями стружкоутворення. У сукупності ці фактори можуть як зменшувати, так і збільшувати окремі складові сили різання, залежно від матеріалу заготовки, інструментального матеріалу та конкретних умов обробки.

Таким чином, силові характеристики процесу різання формуються під дією взаємопов'язаних геометричних, технологічних і фізико-механічних чинників, а їхній детальний аналіз є необхідною умовою для обґрунтованого

вибору режимів різання, забезпечення стійкості процесу та підвищення ефективності й надійності механічної обробки.

2.2. Сили різання та вплив режимів на силові характеристики

Силові параметри процесу різання належать до числа визначальних чинників, що обумовлюють як енергетичну ефективність механічної обробки, так і динамічну стійкість технологічної системи «верстат – інструмент – заготовка». Для торцевого фрезерування характерною є специфічна форма реалізації силового навантаження, зумовлена переривчастою взаємодією різальних зубів фрези з оброблюваним матеріалом. У процесі обертання інструмента кожен зуб періодично входить у зону різання та виходить із неї, внаслідок чого силове навантаження має імпульсний, циклічний характер і повторюється з частотою, пропорційною числу зубів та швидкості обертання шпинделя. Така особливість формує змінні за амплітудою і напрямком силові дії, які можуть виступати джерелом збудження вібрацій та автоколивань у технологічній системі.

Сумарна сила різання визначається комплексною взаємодією геометричних, технологічних і матеріалознавчих факторів. До основних з них належать площа зрізуваного шару, що визначається подачею на зуб, глибиною та шириною різання, фізико-механічні властивості оброблюваного матеріалу (міцність, твердість, пластичність, термічна чутливість), а також геометрія різального інструмента, включно з передніми і задніми кутами, кутами нахилу різальних кромок та конструктивними параметрами фрези. Сукупний вплив зазначених чинників формує як абсолютну величину сили різання, так і співвідношення між її складовими.

З огляду на складність аналітичного опису процесів деформації, тертя та стружкоутворення, що відбуваються в зоні різання, на практиці для оцінювання силових характеристик широко застосовуються емпіричні та напівемпіричні математичні моделі. Такі залежності, як правило, встановлюються на основі

експериментальних досліджень і пов'язують величину сили різання з основними параметрами режиму обробки та властивостями матеріалу заготовки. Використання емпіричних моделей дозволяє з достатньою для інженерних розрахунків точністю прогнозувати силові навантаження, обґрунтовувати вибір раціональних режимів різання та забезпечувати необхідний рівень надійності й стабільності процесу торцевого фрезерування:

$$F_c = k_c \cdot h_m \cdot b \quad (2.1)$$

де F_c основна сила різання,

k_c питомий коефіцієнт різання,

h_m середня товщина стружки,

b ширина зрізу.

При торцевому фрезеруванні середня товщина стружки визначається за формулою:

$$h_m = f_z \cdot \sin \varphi \quad (2.2)$$

де f_z подача на зуб,

φ миттєвий кут положення зуба.

Отже, величина подачі на зуб виступає одним із найбільш вагомих параметрів, що безпосередньо визначають рівень силових навантажень у процесі різання. Її збільшення приводить до зростання товщини зрізуваного шару та об'єму матеріалу, що деформується кожною різальною кромкою за один цикл взаємодії, унаслідок чого сила різання змінюється майже пропорційно. Саме така близька до лінійної залежність зумовлює високу чутливість силових характеристик процесу до змін подачі на зуб, що робить цей параметр ключовим регулятором при виборі та оптимізації режимів торцевого фрезерування з погляду забезпечення продуктивності, стабільності та допустимого рівня навантажень на елементи технологічної системи.

На відміну від подачі, вплив швидкості різання на величину сили різання має непрямий і більш складний характер. Зміна швидкості різання насамперед

призводить до істотної перебудови теплового режиму в зоні різання, що супроводжується підвищенням температури в зонах пластичної деформації та контактної взаємодії інструмента зі стружкою. За цих умов відбувається термічне пом'якшення оброблюваного матеріалу, зниження його опору зсуву та зміна коефіцієнтів тертя, що в сукупності може спричиняти зменшення окремих складових сили різання.

Водночас підвищені температури негативно впливають на стан різального інструмента, знижуючи його міцність, твердість і зносостійкість, а також інтенсифікуючи процеси адгезійного, дифузійного та окиснювального зношування. Таким чином, швидкість різання опосередковано впливає на силові характеристики процесу через складну взаємодію теплових і термомеханічних чинників, що потребує ретельного врахування при комплексній оптимізації режимів різання з метою досягнення балансу між зменшенням силових навантажень, підвищенням продуктивності та забезпеченням довговічності інструмента.

Глибина різання (a_p) пропорційно впливає на силу різання, оскільки визначає висоту зрізу та збільшує контактну площу між стружкою та ріжучою кромкою. Збільшення глибини понад допустимі значення призводить до переходу процесу в зону нестійкого різання.

2.3. Теплові процеси під час технологічної операції торцевого фрезерування

Температурний режим у зоні різання є одним із визначальних факторів, що комплексно впливають на перебіг процесу торцевого фрезерування та його кінцеві результати. Рівень і розподіл температури безпосередньо визначають інтенсивність і механізми зношування різального інструмента, збереження геометричної стабільності різальних кромek, особливості формування та відведення стружки, а також якісні показники обробленої поверхні, включно з

шорсткістю, залишковими напруженнями та структурно-фазовим станом поверхневого шару деталі.

Підвищення температури в зоні різання, як правило, призводить до інтенсифікації термічних і термомеханічних процесів, що прискорюють знос інструмента за рахунок адгезійних, дифузійних, окиснювальних і пластичних механізмів. Одночасно відбувається зниження стабільності геометрії різальної кромки внаслідок термічного пом'якшення інструментального матеріалу та розвитку мікродеформацій. Температурні умови також істотно впливають на процес стружкоутворення, змінюючи характер пластичної деформації матеріалу заготовки, форму та безперервність стружки, а в підсумку — на мікрогеометрію і фізико-механічні властивості обробленої поверхні.

Основними джерелами тепловиділення в процесі фрезерування є енергетичні витрати на пластичну деформацію зрізуваного шару в первинній зоні зсуву, тертя стружки об передню поверхню різального інструмента у вторинній зоні деформації, а також тертя задньої поверхні інструмента об оброблену поверхню деталі. Кожне з цих джерел формує власний внесок у загальний тепловий баланс процесу та визначає просторовий розподіл температур у зоні різання.

За умов високих швидкостей різання значна частина згенерованого тепла відводиться зі зони контакту разом зі стружкою, що, з одного боку, сприяє зменшенню термічного навантаження на різальний інструмент і заготовку. Проте при подальшому зростанні швидкості різання ефективність тепловідведення може знижуватися внаслідок так званого ефекту теплової ізоляції стружки, коли скорочення часу контакту та зміна умов теплообміну обмежують відведення тепла. У таких умовах температура в зоні різання різко зростає, що негативно позначається на працездатності інструмента.

Для кожної пари «інструмент — матеріал заготовки» існує критичне значення швидкості різання, перевищення якого призводить до інтенсивного зростання зношування через досягнення або перевищення температурної стійкості інструментального матеріалу. Зокрема, для твёрдосплавних різальних

пластин граничні температури, за яких відбувається різке погіршення експлуатаційних властивостей, зазвичай перебувають у межах приблизно 800–950 °С. Перехід за ці температурні пороги супроводжується прискореним руйнуванням різальних кромek і різким зменшенням ресурсу інструмента.

З теоретичної точки зору математичний опис температурного поля в зоні різання базується на рівняннях теплопровідності з урахуванням граничних умов теплообміну та характеристик тертя на контактних поверхнях. Однак через складність реальних процесів деформації, мінливість умов контакту та нерівномірність тепловиділення у практичних інженерних розрахунках перевага надається емпіричним або напівемпіричним залежностям, які пов'язують температуру різання з основними параметрами режиму обробки, геометрією інструмента та властивостями матеріалів. Такі моделі забезпечують достатню точність прогнозування температурних умов і широко застосовуються при оптимізації режимів торцевого фрезерування.

$$T = C \cdot V_c^m \cdot f^n \cdot a_p^p \quad (2.3)$$

де V_c швидкість різання,

f подача,

a_p глибина різання,

m, n, p емпіричні коефіцієнти.

З позицій теорії різання обґрунтований і науково вивірений підбір параметрів режиму обробки створює передумови для суттєвого підвищення ресурсу різального інструмента. Зокрема, оптимізація швидкості різання, подачі та глибини різання з урахуванням властивостей матеріалу заготовки й інструмента може забезпечити зростання періоду стійкості порівняно з нерационально обраними умовами обробки.

2.4. Взаємозв'язок режимів різання та зносу інструмента

Зношування різального інструмента є одним із визначальних чинників, що формують працездатність, надійність і довготривалу стабільність процесу торцевого фрезерування. Саме характер і швидкість розвитку зносу визначають допустиму тривалість безперервної роботи інструмента, стабільність геометричних параметрів різальних кромки, точність обробки та якість сформованої поверхні. Умови переривчастого різання, притаманні торцевому фрезеруванню, зумовлюють поєднання термічних, механічних і хімічних впливів, що сприяють одночасному розвитку кількох механізмів зношування.

Серед основних видів зносу, характерних для торцевого фрезерування, провідне місце займає знос задньої (флангової) поверхні різальної кромки, який переважно має абразивний характер і виникає внаслідок інтенсивного тертя інструмента об вже оброблену поверхню деталі. Даний тип зносу безпосередньо впливає на збільшення сил різання, погіршення якості поверхні та втрату точності. Не менш значущим є кратерний знос передньої поверхні інструмента, що формується в зоні контакту зі стружкою та обумовлений дифузійними, адгезійними і хімічними процесами, активізація яких відбувається за підвищених температур і тисків.

Особливістю торцевого фрезерування є також розвиток втомного зносу, який спричинений багаторазовою циклічною зміною механічних і термічних навантажень на різальну кромку внаслідок періодичного входження зубів у зону різання та виходу з неї. Такі умови призводять до накопичення мікропошкоджень у матеріалі інструмента та ініціювання тріщин втомного походження. Крім того, для фрезерування характерним є сколювання та локальні руйнування різальних кромки, які виникають під дією ударних навантажень, особливо на етапі входження зуба в різання або при обробці неоднорідних матеріалів і наявності переривчастих припусків.

Режими різання мають вирішальний вплив на інтенсивність і домінування того чи іншого механізму зношування. Зокрема, подача на зуб істотно визначає

рівень контактних напружень і величину циклічних навантажень, унаслідок чого її збільшення, як правило, призводить до прискорення розвитку флангового та втомного зносу. Швидкість різання, у свою чергу, значною мірою визначає тепловий стан зони різання, що безпосередньо впливає на активізацію дифузійних, хімічних та адгезійних процесів, відповідальних за формування кратерного зносу та термічну деградацію інструментального матеріалу. Збільшення глибини різання супроводжується зростанням площі контакту та контактних напружень, що сприяє інтенсифікації абразивного зношування і може призводити до нестабільної роботи інструмента за умов обмеженої жорсткості технологічної системи.

Для кількісної оцінки довговічності та стійкості різального інструмента в інженерній практиці широко застосовується емпіричний підхід, зокрема класичне рівняння Тейлора, яке встановлює функціональну залежність між швидкістю різання та періодом стійкості інструмента. Незважаючи на свою відносну простоту, дане рівняння дозволяє з достатньою точністю прогнозувати ресурс інструмента для заданих умов обробки та слугує базою для вибору раціональних режимів різання, забезпечення економічної доцільності процесу та підвищення його технологічної надійності. Для оцінки стійкості інструмента використовують рівняння Тейлора:

$$V_c \cdot T^m = C \quad (2.4)$$

де T стійкість,

m коефіцієнт, що характеризує матеріал інструмента.

Теоретично правильний вибір режимів дозволяє збільшити стійкість інструмента у 1,5–3 рази.

2.5. Теоретичні аспекти формування шорсткості поверхні під час торцевого фрезерування

Шорсткість поверхні, що утворюється в процесі торцевого фрезерування, є результатом комплексної взаємодії низки механізмів, кожен із яких вносить певний вклад у формування мікрогеометрії обробленої деталі. Перш за все, значну роль відіграє геометричний чинник, який обумовлений кінематичною траєкторією руху зубів фрези відносно оброблюваної поверхні. У цьому випадку шорсткість визначається такими параметрами, як крок зубів, радіус вершин різальних кромок, нахил зуба та величина подачі на зуб, що безпосередньо формує профіль мікронерівностей та періодичність виступів і западин на поверхні деталі.

Другим суттєвим чинником є динамічна складова шорсткості, яка виникає через коливальні процеси технологічної системи. Ці коливання можуть бути обумовлені як механічними вібраціями верстата та шпинделя, так і імпульсним характером навантаження від переривчастого контакту зубів фрези з матеріалом заготовки. В результаті динамічного впливу на поверхні можуть виникати додаткові нерівності та хвильовий рельєф, що суттєво погіршує якість обробки та може знижувати точність дотримання геометричних розмірів.

Третя група чинників пов'язана з термомеханічними ефектами, які зумовлені пластичними деформаціями поверхневого шару матеріалу під дією високих локальних напружень і температур. Пластична течія, термічне розширення та повторювані цикли нагрівання і охолодження матеріалу ведуть до формування мікрорельєфу, що не відповідає чисто геометричній траєкторії зубів, і може включати появу слідів від мікроплинності, горбистих структур і локальних змін щільності поверхневого шару.

Не менш важливим є вплив зносу інструмента на формування шорсткості. В результаті експлуатаційного зношування різальні кромки втрачають початкову геометричну точність, утворюються мікросколуювання, задирки або

нерівномірне стирання кромки, що призводить до додаткових нерівностей на поверхні зрізу та збільшення середньої величини шорсткості.

З практичної точки зору, геометричну складову шорсткості під час торцевому фрезеруванні можна оцінити аналітично, використовуючи рівняння, яке враховує параметри подачі на зуб, крок зубів та радіус вершин різальної кромки. Такі математичні моделі дозволяють прогнозувати мікрогеометричні характеристики обробленої поверхні та обґрунтовано підбирати режими різання з метою досягнення заданих показників шорсткості, оптимізуючи баланс між продуктивністю обробки та якістю поверхні. Включення додаткових факторів динамічних коливань, термомеханічних ефектів та зносу інструмента дозволяє створити більш точну комплексну модель формування поверхневого шару, що застосовується в сучасному інженерному проектуванні процесів торцевого фрезерування.

Геометрична складова шорсткості може бути оцінена рівнянням:

$$R_a = \frac{f_z^2}{8R_e} \quad (2.4)$$

де f_z подача на зуб,

R_e радіус округлення різальної кромки.

Вплив режимів різання на формування шорсткості обробленої поверхні є багатофакторним і визначається взаємодією кінематичних, термомеханічних та експлуатаційних чинників. Зокрема, збільшення подачі на зуб призводить до пропорційного зростання товщини зрізуваного шару та величини виступів і западин на обробленій поверхні. Унаслідок цього геометрична складова шорсткості значно зростає, оскільки поверхня формується за більш грубим профілем руху зубів фрези, а коливальні ефекти технологічної системи можуть додатково підсилювати нерівності.

У той же час зростання швидкості різання чинить складний і здебільшого позитивний вплив на якість поверхні. Підвищення швидкості сприяє розвитку термопластичного ефекту в зоні контакту інструмента зі стружкою та

матеріалом заготовки, що проявляється у певному згладжуванні нерівностей на поверхні. Цей ефект виникає внаслідок локального нагрівання та пластичної течії матеріалу, коли стружка частково «підплавляє» виступи і западини, зменшуючи амплітуду мікрорельєфу. Водночас при надмірних швидкостях різання підвищується ризик інтенсивного термічного зносу інструмента, що може погіршити стан поверхні.

Додатковий вплив на шорсткість має експлуатаційний стан інструмента. Зношена або пошкоджена різальна кромка втрачає початкову геометричну точність, що призводить до нерівномірного зрізування матеріалу і формування додаткових виступів та заглиблень на обробленій поверхні. Такі зміни в геометрії кромки зумовлюють збільшення середніх параметрів шорсткості та погіршення стабільності процесу обробки.

Таким чином, шорсткість поверхні в торцевому фрезеруванні визначається комплексною взаємодією параметрів режиму різання, включно з подачею, швидкістю різання та станом інструмента, і для досягнення оптимальної якості обробки необхідно враховувати як геометричні, так і термомеханічні, а також експлуатаційні аспекти процесу.

2.6. Моделювання та оптимізація режимів різання для торцевого фрезерування

Для комплексного прогнозування ефективності та технологічної надійності процесу торцевого фрезерування широко застосовуються математичні моделі, що відтворюють ключові фізико-механічні та експлуатаційні аспекти обробки. Такі моделі дозволяють системно оцінювати взаємозв'язки між параметрами режиму різання, геометрією інструмента, властивостями оброблюваного матеріалу та характеристиками технологічної системи.

Зокрема, моделі сил різання забезпечують кількісне прогнозування величин тангенціальних, радіальних та осьових сил, що виникають у зоні

контакту зубів фрези із заготовкою, враховуючи вплив подачі, швидкості, глибини різання та стану ріжучих кромek. Ці дані є критично важливими для оцінки енергетичних витрат, вибору оптимальних режимів і попередження небажаних динамічних ефектів, таких як автоколивання.

Моделі температурного поля описують розподіл теплових потоків у зоні різання, включно з генеруванням тепла внаслідок пластичної деформації матеріалу, тертя стружки об передню поверхню інструмента та тертя задньої поверхні кромки об оброблювану поверхню. Такі моделі дозволяють оцінювати термічне навантаження на інструмент і заготовку, прогнозувати можливі термічні ушкодження та визначати критичні режими швидкості різання.

Моделі зношування інструмента відображають еволюцію геометрії різальних кромek під дією абразивного, кратерного, втомного та ударного зносу. Вони дають змогу прогнозувати ресурс інструмента, визначати критичні умови його експлуатації та коригувати режими обробки для забезпечення стабільності процесу.

Моделі шорсткості поверхні дозволяють оцінити мікрогеометричні характеристики обробленої поверхні з урахуванням геометричного руху зубів фрези, динамічних коливань технологічної системи, термомеханічних ефектів та стану зношення інструмента. Ці моделі критично важливі для забезпечення необхідної якості поверхні та відповідності технічним вимогам.

Моделі стійкості процесу аналізують потенціал виникнення вібрацій, автоколивань і нестабільних режимів, що впливають на точність обробки, довговічність інструмента та енергетичну ефективність. Комплексне застосування цих моделей дозволяє формувати науково обґрунтовані рекомендації щодо оптимізації режимів торцевого фрезерування, забезпечуючи баланс між продуктивністю, якістю обробки та експлуатаційною надійністю технологічної системи.

Для проведення аналітичного та інженерного дослідження процесів торцевого фрезерування застосовується широкий спектр математичних і статистичних інструментів, що дозволяють кількісно оцінювати вплив режимів

різання на технологічні показники та оптимізувати роботу технологічної системи.

Одним із основних підходів є використання **регресійних моделей**, які дозволяють формалізувати емпіричні залежності між параметрами режиму обробки (швидкістю, подачею, глибиною різання), геометричними характеристиками інструмента та технологічними результатами (силами різання, температурою, зносом інструмента, шорсткістю поверхні). Регресійний аналіз забезпечує побудову функціональних залежностей на основі експериментальних даних, що дозволяє прогнозувати поведінку системи у широкому діапазоні режимів та обґрунтовувати вибір оптимальних параметрів.

Для підвищення достовірності та ефективності експериментальних досліджень застосовуються **методи планування експерименту**, зокрема центрально-композиційні плани та факторні плани. Ці методи дозволяють систематично варіювати параметри режиму різання та досліджувати їхній вплив на результати обробки, мінімізуючи кількість експериментів та забезпечуючи статистичну значущість отриманих даних. Використання таких підходів забезпечує точне визначення впливу окремих факторів, їхніх взаємодій і нелінійних ефектів, що є критично важливим для моделювання складних технологічних процесів.

Крім того, для комплексної оцінки технологічних рішень застосовуються **методи багатокритеріальної оптимізації**, що дозволяють одночасно враховувати декілька суперечливих цілей, таких як забезпечення високої якості обробленої поверхні, підвищення продуктивності, мінімізація енергоспоживання та зменшення зносу інструмента. Використання багатокритеріальних підходів забезпечує збалансовану оптимізацію процесу, дозволяючи знайти компромісні рішення, які максимізують ефективність технологічної системи у цілому.

Сукупне застосування регресійного аналізу, методів планування експерименту та багатокритеріальної оптимізації створює науково обґрунтовану основу для прогнозування, моделювання та управління

процесами торцевого фрезерування, що дозволяє забезпечувати високу технологічну ефективність та надійність виробництва.

Процес оптимізації режимів торцевого фрезерування, як правило, передбачає пошук компромісного рішення між суперечливими технологічними цілями, що безпосередньо визначають ефективність та надійність процесу. Однією з ключових цілей є підвищення продуктивності, яке досягається шляхом збільшення величини подачі на зуб і глибини різання. Зростання цих параметрів дозволяє збільшити об'єм зняття матеріалу за одиницю часу, однак паралельно з цим підвищуються сили різання та контактні напруження, що може негативно впливати на точність обробки та ресурс інструмента.

Водночас забезпечення високої якості обробленої поверхні вимагає обмеження величини подачі та помірною підбору швидкості різання. Такі умови сприяють зменшенню амплітуди мікрорельєфу, підвищують точність формування профілю поверхні та знижують ризик утворення термічно деформованих зон у матеріалі заготовки. Цей аспект особливо критичний при обробці деталей з високими вимогами до шорсткості та геометричної точності.

Крім того, стійкість інструмента є важливим фактором, що визначає довговічність технологічної системи та економічну ефективність процесу. Підвищення швидкості різання збільшує теплове навантаження на ріжучі кромки, інтенсивність зносу та ризик термічного руйнування, тому оптимізація включає встановлення обмежень на максимально допустиму швидкість різання з метою підтримання працездатності інструмента та запобігання передчасному виходу його з ладу.

Таким чином, оптимізація режимів різання реалізується через комплексне балансування продуктивності, якості та стійкості інструмента, що вимагає врахування взаємозв'язків між механічними, термічними та експлуатаційними чинниками. Такий підхід дозволяє знаходити раціональні режими, які забезпечують максимальну ефективність технологічного процесу при мінімізації ризиків пошкодження інструмента та погіршення параметрів обробленої поверхні.

Висновки до розділу

Проведений системний аналіз теоретичних основ торцевого фрезерування дозволив комплексно оцінити механіку різання, силові та теплові процеси, закономірності зношування інструмента і формування шорсткості обробленої поверхні. Встановлено, що режими різання швидкість, подача на зуб і глибина різання є визначальними факторами, які безпосередньо впливають на сили різання, температурний режим, стійкість інструмента та якість обробленої поверхні, причому інтенсивність їх впливу різниться залежно від конкретного параметра.

Розроблені аналітичні та емпіричні моделі дозволяють кількісно описати ключові взаємозв'язки між режимами різання та технологічними показниками процесу, створюючи науково обґрунтовану основу для прогнозування ефективності обробки. Отримані результати слугують підґрунтям для подальших експериментальних досліджень, оптимізації режимів різання та підвищення продуктивності, якості поверхні й довговічності інструмента, що є критично важливим для забезпечення технологічної надійності та економічної ефективності виробничих процесів.

РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА ТА СХЕМА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1. Основи експериментального дослідження

Експериментальне вивчення процесу торцевого фрезерування ґрунтується на системному підході до цілеспрямованої варіації технологічних параметрів, що дозволяє встановлювати точні кількісні залежності між факторами режиму різання та основними показниками ефективності обробки, такими як сили різання, температура, знос інструмента та якість поверхні. Основна ідея аналітичного підходу полягає у формалізації всіх етапів побудови експерименту, що включає систематичний вибір факторів, визначення критеріальних показників, розробку оптимального плану експерименту, мінімізацію систематичних і випадкових похибок та подальший статистичний аналіз отриманих результатів.

Методологічна основа експериментального дослідження спирається на кілька ключових аналітичних принципів. Принцип контрольованої варіації факторів. У процесі дослідження змінюються виключно ті параметри, які підлягають вивченню, при цьому всі інші фактори утримуються на постійному рівні. Такий підхід забезпечує коректну оцінку впливу кожного окремого параметра на результати обробки і дозволяє уникнути спотворень, пов'язаних із взаємодією непідконтрольних змінних. Принцип репрезентативності експерименту. Експериментальні умови повинні максимально відтворювати реальні виробничі процеси, забезпечуючи адекватну відповідність між лабораторними дослідженнями та практичними умовами фрезерування. Репрезентативність гарантує достовірність отриманих залежностей та можливість їх застосування для прогнозування поведінки технологічної системи в реальних умовах. Принцип математичної обґрунтованості. Усі досліджувані параметри описуються формалізованими математичними моделями, що дозволяє здійснювати кількісну оцінку їх впливу на результати

процесу. Результати експерименту підлягають статистичній обробці, що забезпечує визначення точності та надійності отриманих даних, а також дозволяє виділити істотні фактори впливу. Принцип факторної декомпозиції. Складний технологічний процес розкладається на окремі фактори впливу, що дозволяє ізолювати та дослідити кожен елемент системи окремо. Такий підхід сприяє детальному розумінню механізмів впливу режимів різання на силові, теплові та експлуатаційні характеристики процесу.

Дотримання цих принципів дозволяє формувати універсальну аналітичну схему експериментального дослідження, яка забезпечує комплексну оцінку процесу торцевого фрезерування, підвищує точність і відтворюваність результатів та слугує методологічною основою для подальшої оптимізації режимів обробки і науково обґрунтованого прийняття рішень у виробничих умовах.

3.2. Аналітичний вибір факторів та вихідних параметрів торцевого фрезерування

У процесі торцевого фрезерування ефективність обробки визначається багатьма взаємопов'язаними факторами, проте для цілеспрямованого аналізу та оптимізації технологічного процесу доцільно виділяти **ключові параметри**, які формують найбільш суттєву частку впливу на загальну варіацію результатів обробки. Аналітичний підхід передбачає не просто реєстрацію всіх факторів, а систематичну класифікацію та пріоритизацію тих змінних, які відіграють визначальну роль у формуванні силових, теплових та експлуатаційних характеристик процесу, а також на якості обробленої поверхні.

Для структурованого аналізу всі фактори прийнято поділяти на такі категорії:

- основні керовані фактори:
 - швидкість різання V_c ;
 - подача на зуб f_z ;

- глибина різання a_p ;
- допоміжні некеровані фактори:
 - пружні властивості системи;
 - тепловий стан;
 - матеріал заготовки та інструмента;
 - мікрогеометрія різальної кромки.

Вихідними параметрами є характеристики, що відображають ефективність процесу:

- сили різання;
- стабільність процесу (вібраційні ознаки);
- шорсткість поверхні;
- знос інструмента;
- температура зони різання;
- продуктивність (MRR);
- енергоспоживання.

Кожний вихідний показник технологічного процесу має формалізований аналітичний критерій оцінювання, що дозволяє кількісно характеризувати його значення та порівнювати результати експериментів. Наприклад, для оцінки шорсткості поверхні застосовується параметр R_a , що визначає середнє арифметичне відхилення профілю обробленої поверхні; для характеристики зносу інструмента використовується VB ширина зношеної кромки; а для аналізу механічного навантаження в зоні різання визначаються компоненти сили різання, такі як F_c . Використання таких аналітичних критеріїв забезпечує точне та об'єктивне вимірювання результатів, дозволяє систематизувати дані та формує науково обґрунтовану основу для побудови моделей взаємозв'язку між режимами різання та ключовими параметрами ефективності процесу.

3.3. Методика оцінки технологічних параметрів торцевого фрезерування аналітичним методом

У межах аналітичного підходу акцент робиться не на конкретних приладах чи засобах вимірювання, а на принципах збору, обробки та інтерпретації даних, що забезпечує універсальність методики та можливість порівняння результатів у різних експериментальних умовах.

Сили різання. У рамках аналітичної схеми процес реєстрації сил різання розглядається як формування повного часового ряду навантажень, на основі якого проводиться комплексний аналіз динамічних характеристик процесу. Визначаються такі параметри: середні значення сил різання, що відображають базовий рівень навантаження на інструмент; амплітудно-частотні характеристики, що дозволяють оцінити спектральний склад коливань; показники стабільності силової дії, які характеризують рівномірність навантаження протягом обробки.

Аналітична оцінка сил різання дозволяє встановлювати: рівномірність динамічної роботи системи; наявність та інтенсивність автоколивань, здатних впливати на точність обробки; навантаження на інструмент і потенційні джерела його прискореного зносу.

Шорсткість обробленої поверхні. Аналітичне визначення шорсткості здійснюється через отримання профілограм, що дозволяють виділяти ключові параметри: Ra середнє арифметичне відхилення профілю; Rz максимальна висота нерівностей; параметри хвилястості, що відображають макрогеометричні коливання поверхні.

В аналітичному підході до вимірювання шорсткості особлива увага приділяється: проведенню вимірювань у трьох взаємно перпендикулярних напрямках для врахування анізотропії поверхні; аналізу центрованих ділянок обробленої поверхні для забезпечення репрезентативності; оцінці впливу напрямку подачі на форму профілю та розподіл мікронерівностей.

Знос інструмента. Аналітичне визначення зносу інструмента базується на класифікації основних видів пошкоджень: фланговий знос (VB) ширина або площа зношеної кромки; кратерний знос (KT) глибина кратера на передній поверхні інструмента; зношування по радіусу (RE) зміна радіуса округлення кромки.

Оцінка зношування виконується через аналітичну обробку отриманих зображень, що включає: візуальну сегментацію та виділення контурів зношеної кромки; вимірювання геометричних параметрів у формалізованому вигляді.

Знос інструмента розглядається як функціональна залежність від технологічних факторів:

$$VB=f(V_c, f_z, a_p, T) \quad (3.1)$$

де V_c швидкість різання,

f_z подача на зуб,

a_p глибина різання,

T час обробки.

Температура в зоні різання. Аналітичний підхід до оцінки температурного режиму передбачає: отримання повного температурного поля у зоні контакту інструмента із заготовкою; визначення локальних максимальних термічних піків, що впливають на знос інструмента та властивості поверхневого шару; оцінку ефективності теплопровідності стружки та відведення тепла від ріжучої кромки.

Отримані температурні дані підлягають інтерпретації через математичні моделі теплопередачі, що дозволяє кількісно оцінювати термічні навантаження, прогнозувати критичні режими та розробляти рекомендації щодо оптимізації режимів різання з урахуванням температурної стійкості інструмента та якості обробленої поверхні.

3.4. Загальна характеристика отриманих результатів

У ході експериментального дослідження було отримано масив даних, що характеризують вплив основних технологічних параметрів режиму різання подачі на оберт S_p , швидкості різання v , на показники ефективності процесу торцевого фрезерування.

Аналіз температурних процесів. Температура в зоні різання відіграє ключову роль у формуванні зносу інструмента, силових характеристик та шорсткості.

Зміна температури залежно від подачі визначається за наступною формулою:

$$T_c(S_p) := \frac{(\sqrt{2} + 1) \cdot \sqrt{\lambda_1 \cdot C_1 \cdot \rho_1} \cdot f \cdot (C_{pt} \cdot t \cdot S_p^{0.75} \cdot v^{-0.15}) \cdot v \cdot d \cdot 10^5}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{\lambda_1 \cdot C_1 \cdot \rho_1} + \sqrt{\lambda_2 \cdot C_2 \cdot \rho_2} \cdot 2 \cdot A_r \cdot \lambda_2} \quad (3.2)$$

Отримано графік (рис. 3.1) залежності температури від подачі.

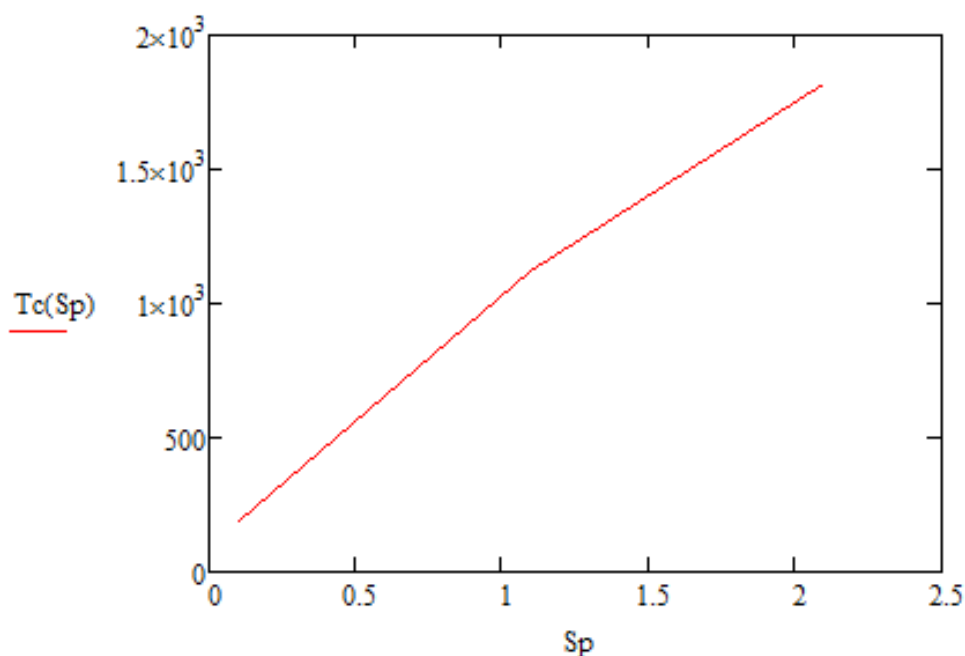


Рисунок 3.1. Графік залежності температури T_c в зоні різання від величини подачі S_p у процесі торцевого фрезерування.

З графіка рисунок 3.1. бачимо що за збільшення подачі S_p температура T_c у зоні різання зростає досить інтенсивно. Це пов'язано з тим, що більша подача призводить до збільшення обсягу зрізуваного матеріалу за одиницю часу, що в свою чергу спричиняє зростання механічних навантажень та тепловиділення. Нелінійний характер зростання свідчить про те що зі збільшенням подачі від початкових значень до приблизно 1 мм зростання температури є більш поступовим, однак при подачах, близьких до 2мм і вище, спостерігається значне прискорення температурного підйому. Такий нелінійний характер зміни може бути обумовлений збільшенням тертя та пластичних деформацій у зоні різання, а також погіршенням відводу тепла через зменшення ефективності охолодження або через утворення більш товстої та міцнішої стружки.

Залежність температури від швидкості різання визначається за такою залежністю:

$$T_c(v) := \frac{(\sqrt{2} + 1) \cdot \sqrt{\lambda_1 \cdot C_1 \cdot \rho_1 \cdot f} \cdot (C_{pt} \cdot t \cdot S_p^{0.75} \cdot v^{-0.15}) \cdot v \cdot d \cdot 10^5}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{\lambda_1 \cdot C_1 \cdot \rho_1} + \sqrt{\lambda_2 \cdot C_2 \cdot \rho_2} \cdot 2 \cdot A_r \cdot \lambda_2} \quad (3.3)$$

Отримано графік (рис. 3.2) залежності температури від швидкості різання.

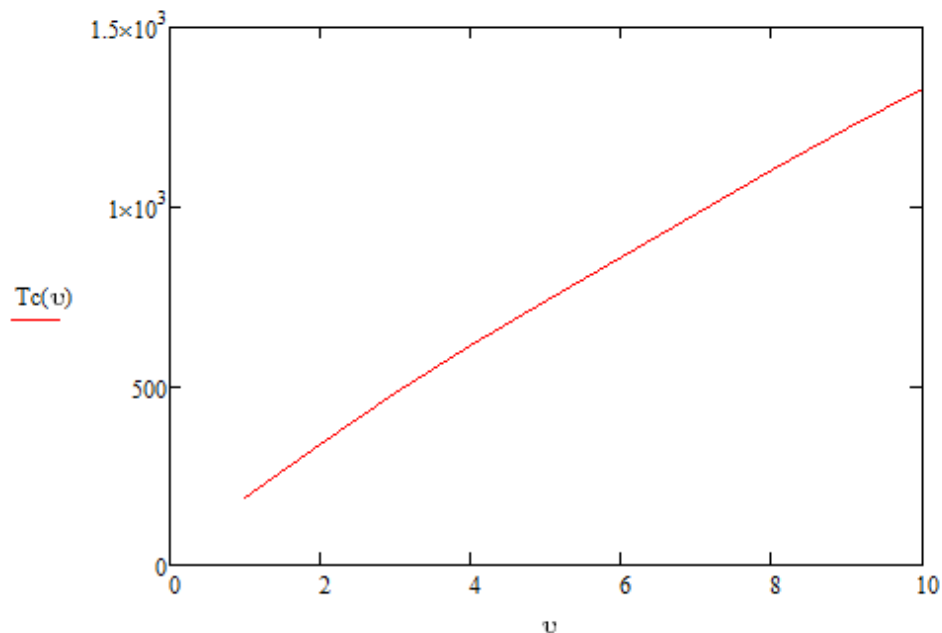


Рисунок 3.2. Графік залежності температури T_c в зоні різання від швидкості v у процесі торцевого фрезерування.

Графік (рис. 3.2) показує, що з ростом швидкості різання температура в зоні різання зростає значно і відчутно. Це пояснюється тим, що збільшення швидкості веде до збільшення механічної роботи, яка перетворюється у тепло в зоні контакту інструмент–заготовка. Температура зростає не лінійно, а з певним прискоренням, особливо у верхньому діапазоні швидкостей. Це пов'язано з декількома фізичними факторами: збільшення тертя між стружкою та інструментом за високих швидкостей; зменшення ефективності відведення тепла через скорочення часу контакту з охолоджувальною рідиною; поява теплової «подушки», що знижує тепловіддачу.

Отримані дані свідчать, що: підвищення швидкості різання найбільше впливає на ріст температури; подача збільшує температуру непропорційно менше, ніж швидкість різання, оскільки підвищує інтенсивність теплоутворення, але збільшує відведення теплоти через стружку; збільшення глибини різання призводить до локального перегріву зони різання через ріст контактної площі.

Виявлено, що температура має чітку кореляцію з рівнем зносу інструмента та шорсткістю обробленої поверхні.

Висновки до розділу

Температура в зоні різання є критичним показником, що суттєво залежить від основних технологічних параметрів процесу торцевого фрезерування швидкості різання та подачі. Зі зростанням швидкості різання відбувається нелінійне підвищення температури, що зумовлено збільшенням механічного навантаження та зниженням ефективності тепловідведення, що, у свою чергу, призводить до прискореного термічного зносу інструмента та можливих змін у структурі поверхневого шару. Подача на зуб також спричиняє значне збільшення теплового навантаження, оскільки збільшується об'єм зрізуваного матеріалу, що генерує додаткове тепло; залежність температури від подачі має виразний нелінійний характер, що потребує ретельного контролю для підтримки оптимальних режимів обробки. Взаємодія швидкості різання та

подачі формує складний температурний режим, який визначає стабільність, продуктивність і якість процесу, що обґрунтовує необхідність комплексної оптимізації технологічних параметрів з урахуванням теплових ефектів.

РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Обґрунтування можливих чинників травмонебезпечних ситуацій.

Під час виконання технологічної операції фрезерування в металообробці працівник як суб'єкт трудового процесу здійснює обробку заготовки за допомогою металорізального верстата та ріжучого інструменту фрези. Взаємодія людини з верстатним обладнанням відбувається в умовах дії комплексу виробничих середовищ: механічного, теплового, електричного, фізичного та хімічного. Людський організм здатний без негативних наслідків витримувати вплив цих чинників лише за умови, що їх інтенсивність і тривалість не перевищують установлених нормативних значень. Перевищення допустимих параметрів призводить до виникнення травм, гострих або хронічних ушкоджень здоров'я, що класифікуються як нещасні випадки на виробництві [5].

У процесі фрезерування на оператора діють небезпечні та шкідливі виробничі чинники, характерні для металообробного виробництва. До небезпечних чинників належать: обертові ріжучі елементи фрези, рухомі частини верстата, затискні пристрої, механізми подач, можливий виліт стружки або фрагментів інструменту, а також руйнування заготовки при порушенні режимів різання. Дія цих чинників у певних умовах може спричинити механічні травми, порізи, удари або защемлення.

Серед шкідливих виробничих чинників, що супроводжують операцію фрезерування, виділяють підвищений рівень шуму та вібрації, локальне тепловиділення в зоні різання, загазованість і запиленість повітря робочої зони, а також аерозолі мастильно-охолоджувальних рідин. Значна кількість металевої стружки, що утворюється під час різання, створює додаткову небезпеку травмування та потребує застосування захисних огорожень і засобів індивідуального захисту.

Для кожного з виробничих чинників встановлюється гранично допустимий рівень, за якого його дія протягом нормованого робочого часу не викликає порушень здоров'я працівника ні в процесі виконання робіт, ні в післяробочий період. Виробнича небезпека під час фрезерування виникає у разі невідповідного технічного стану верстата, відсутності огорожень, порушення режимів різання або недотримання вимог охорони праці.

Основним завданням безпечного виконання операції фрезерування є забезпечення справного стану металорізального обладнання, правильного встановлення та закріплення заготовки і фрези, а також дотримання оператором вимог інструкцій з охорони праці. Безпечна експлуатація фрезерних верстатів забезпечується використанням машин, що відповідають чинним нормативам, і залученням персоналу з відповідною професійною підготовкою та допуском до роботи.

Під час фрезерування оператор піддається впливу несприятливих мікрокліматичних умов, зокрема підвищеної температури в зоні різання та недостатньої вентиляції робочого простору. Для зменшення негативного впливу виробничого пилу, аерозолів і парів МОР застосовують місцеву витяжну вентиляцію, герметизацію зони різання, а також засоби індивідуального захисту захисні окуляри, екрани, спецодяг та респіратори.

Особливу увагу під час виконання фрезерних робіт приділяють електробезпеці, оскільки металорізальні верстати оснащені електроприводами та системами керування. Заходи безпеки включають організаційні перевірку кваліфікації персоналу, оформлення допуску до робіт, контроль за дотриманням інструкцій та технічні, такі як захисне заземлення, занулення, ізоляція струмопровідних частин, застосування блокувальних пристроїв і автоматичного вимикання.

Захист від ураження електричним струмом забезпечується комплексним використанням ізолюючих, огорожувальних і сигнальних засобів, оскільки лише їх поєднання дозволяє створити безпечні умови праці. Системний підхід

до охорони праці є обов'язковою умовою зниження виробничих ризиків під час виконання технологічної операції фрезерування в металообробці.

4.2. Умови і обставини виникнення небезпечних ситуацій та їх наслідки

Під час виконання фрезерних робіт у металообробному виробництві в окремих випадках, зокрема за аварійних або нестандартних режимів роботи, дія небезпечного виробничого чинника може суттєво виходити за межі заздалегідь визначеної небезпечної зони. У таких умовах ризик травмування оператора виникає навіть поза межами робочої зони фрезерного верстата, яка вважається безпечною за нормальної експлуатації. Саме тому працівник, що обслуговує фрезерний верстат, повинен чітко усвідомлювати характер можливих небезпек і шляхи їх реалізації.

У загальному випадку оператор, допускаючи небезпечну дію, потрапляє в небезпечні обставини, за яких на нього починає впливати небезпечний виробничий фактор за наявності небезпечних умов. Сукупність цих подій формує небезпечну ситуацію, яка може призвести до аварії обладнання або травмування персоналу.

Усі складові процесу формування небезпечної ситуації небезпечні умови, небезпечні дії, небезпечні ситуації та їх наслідки мають імовірнісний характер. Це означає, що як виникнення аварії, так і отримання травми під час фрезерування не є детермінованими подіями, а залежать від поєднання технічних, організаційних і людських факторів.

Аналіз процесів виникнення травмонебезпечних та аварійних ситуацій під час операції фрезерування металів здійснюється шляхом систематизації небезпек за такими ознаками: технічний стан верстата, особливості технологічного процесу, умови праці, дії оператора та організація робочого місця. Для цього використовують таблиці аналізу виробничих небезпек, у яких

відображаються можливі небезпечні умови, небезпечні дії, потенційні наслідки та заходи запобігання для конкретного типу фрезерного обладнання.

Після кожного опису небезпечної ситуації доцільно подавати графічну модель (блок-схему) процесу її формування, яка відображає послідовність переходу від небезпечних умов до аварії або травми. Основною метою таких схем є виявлення найбільш уразливих елементів технологічного процесу фрезерування та розроблення ефективних профілактичних заходів.

Найбільш поширеними способами запобігання виникненню аварійних і травмонебезпечних ситуацій під час фрезерування є: контроль технічного стану фрезерних верстатів, оснащення їх захисними огороженнями та блокувальними пристроями, застосування засобів індивідуального захисту, а також регулярне проведення інструктажів з охорони праці.

Аналіз блок-схеми формування небезпечних подій свідчить, що оператор, здійснюючи небезпечну дію, потрапляє в умови, за яких активізується небезпечний виробничий фактор, що за наявності несприятливих умов призводить до небезпечної ситуації. Усі ланки цього ланцюга мають певну ймовірність виникнення, а наслідком можуть бути як аварія обладнання, так і травмування працівника або ж відсутність негативних наслідків за сприятливого збігу обставин.

Під час експлуатації фрезерних верстатів можливий розвиток ланцюга небезпечних умов. Наприклад, конструктивна або експлуатаційна несправність фрези (НУ1) може спричинити її дисбаланс (НУ2), що призводить до підвищеної вібрації (НУ3). Подальший розвиток подій викликає прискорене зношування шпиндельних підшипників і кріпильних елементів, що врешті-решт може спричинити аварійну ситуацію — руйнування інструменту або викидання його фрагментів із зони різання. Наслідками такої ситуації можуть бути пошкодження верстата або травмування оператора.

Подібний механізм формування небезпечних подій характерний і для інших металообробних операцій, зокрема при роботі на заточувальних і

свердлильних верстатах. У загальному вигляді послідовність таких подій можна подати як:

$$НУ_1 \rightarrow НУ_2 \rightarrow НУ_3 \rightarrow \dots \rightarrow НС \rightarrow А / Т.$$

Існуюча небезпечна умова або така, що виникла в процесі фрезерування, може спонукати оператора до виконання неправильних або ризикованих дій. У цьому випадку розвиток подій відбувається за схемою:

$$НУ \rightarrow НД \rightarrow НС \rightarrow А / Т.$$

Наприклад, заклинювання заготовки або накопичення стружки в зоні різання є небезпечною умовою, яка може змусити оператора втрутитися в роботу верстата без його повної зупинки. Такі дії, хоча й викликані виробничою необхідністю, є небезпечними і можуть призвести до тяжких травм. У подібних ситуаціях усунення ризику повинно досягатися не лише навчанням персоналу, а й удосконаленням конструкції верстата — застосуванням автоматичних стружковідвідників, блокувань і захисних екранів.

Можливі також випадки, коли послідовність помилкових дій оператора призводить до аварії. Потік подій у таких ситуаціях має вигляд:

$$НД_1 \rightarrow НД_2 \rightarrow НС \rightarrow А / Т$$

або

$$НД_1 \rightarrow НД_2 \rightarrow НД_3 \rightarrow НС \rightarrow А / Т.$$

Прикладом може бути перевищення допустимих режимів різання, подальша спроба компенсувати це різкою зміною подачі та ігнорування сигналів вібрації, що зрештою призводить до руйнування фрези або зриву заготовки з кріплення.

Отже, під час виконання операції фрезерування в металообробці формування небезпечних ситуацій має багатофакторний і ймовірнісний характер, а ефективне управління ризиками можливе лише за умови комплексного підходу до організації безпечної праці.

4.3 Безпека в надзвичайних ситуаціях

Відповідно до чинного законодавства України у сфері цивільного захисту, надзвичайна ситуація розглядається як істотне порушення звичних умов життєдіяльності населення на певній території або об'єкті, спричинене аваріями, катастрофами, небезпечними природними явищами, пожежами, епідеміями, а також наслідками застосування засобів ураження. Такі події створюють реальну або потенційну загрозу життю і здоров'ю людей, призводять до людських жертв, значних матеріальних втрат та шкоди довкіллю [9].

Аварія є раптовою подією техногенного характеру, внаслідок якої виникає небезпека для населення, руйнуються будівлі, споруди, виробниче обладнання чи транспорт, порушується робота підприємств, інженерних мереж або систем життєзабезпечення. У сучасних умовах України аварії часто мають ускладнений характер через зношеність інфраструктури та воєнні пошкодження об'єктів промисловості й енергетики.

Катастрофа це масштабна надзвичайна подія з особливо тяжкими наслідками, яка істотно змінює умови існування людей і довкілля. Вона може бути наслідком різкого порушення природних, техногенних або соціально-економічних процесів і супроводжується дією потужних уражаючих факторів. За масштабом впливу катастрофи поділяють на локальні, регіональні та глобальні. У сучасній Україні до катастрофічних подій можуть бути віднесені великі техногенні аварії, масштабні пожежі, руйнування гідротехнічних споруд, а також наслідки бойових дій.

Сьогодні Україна перебуває в умовах підвищеного рівня ризиків виникнення надзвичайних ситуацій, зумовлених поєднанням природних чинників, техногенних загроз і воєнних дій. Щороку фіксується значна кількість надзвичайних ситуацій, які супроводжуються загибеллю людей, руйнуванням інфраструктури та значними економічними збитками. Зростання складності та масштабів таких подій становить серйозну загрозу національній

безпеці, стабільності економіки й екологічній безпеці держави та потребує залучення значних людських, матеріальних і технічних ресурсів.

Відповідно до чинної класифікації, надзвичайні ситуації в Україні поділяються за характером походження на чотири основні класи:

- техногенного;
- природного;
- соціального;
- воєнного характеру.

Надзвичайні ситуації техногенного характеру виникають унаслідок аварій на промислових підприємствах, транспорті, енергетичних об'єктах, пожеж, вибухів, руйнування будівель і споруд, витоків небезпечних хімічних або радіоактивних речовин, а також пошкодження об'єктів критичної інфраструктури.

Надзвичайні ситуації природного характеру зумовлені небезпечними метеорологічними, геологічними та гідрологічними явищами, пожежами в природних екосистемах, епідеміями, масовими ураженнями рослин і тварин, деградацією ґрунтів і водних ресурсів.

Надзвичайні ситуації соціального характеру пов'язані з протиправними діями, зокрема терористичними актами, диверсіями, масовими заворушеннями, незаконним обігом зброї та вибухових пристроїв.

Надзвичайні ситуації воєнного характеру виникають унаслідок бойових дій, застосування ракетного, артилерійського та іншого озброєння, що призводить до руйнування промислових, енергетичних і транспортних об'єктів, виникнення вторинних уражаючих факторів — пожеж, хімічного та радіаційного забруднення.

За масштабом поширення та рівнем наслідків надзвичайні ситуації поділяються на: загальнодержавні; регіональні; місцеві; об'єктові.

Запобігання виникненню надзвичайних ситуацій є найефективнішим способом мінімізації втрат для держави, суспільства та кожної окремої людини. Воно передбачає реалізацію комплексу правових, організаційних, технічних,

економічних і санітарно-гігієнічних заходів, спрямованих на зниження ризиків, своєчасне виявлення загроз та оперативне реагування на них.

В Україні ці функції реалізуються в межах єдиної державної системи цивільного захисту, яка об'єднує органи державної влади, місцевого самоврядування, підприємства, установи та організації незалежно від форми власності. Основною метою цієї системи є захист населення, територій і довкілля, а також забезпечення стійкого функціонування економіки в умовах надзвичайних ситуацій і воєнних загроз.

До ключових завдань системи цивільного захисту належать:

- розроблення та впровадження нормативно-правових актів у сфері безпеки;
- забезпечення готовності органів управління та сил цивільного захисту;
- навчання населення діям у надзвичайних ситуаціях;
- прогнозування та оцінка можливих наслідків НС;
- створення і використання резервів матеріальних і фінансових ресурсів;
- інформаційне забезпечення та психологічна підтримка населення.

Громадяни України мають гарантоване державою право на захист життя і здоров'я від наслідків надзвичайних ситуацій. Реалізація цього права забезпечується шляхом завчасного планування захисних заходів, створення систем оповіщення, підготовки укриттів, організації евакуації та надання необхідної допомоги постраждалим.

Ліквідація наслідків надзвичайних ситуацій спрямована на відновлення життєдіяльності населення і функціонування об'єктів економіки та включає проведення аварійно-рятувальних робіт, гасіння пожеж, медичне забезпечення, відновлення інфраструктури, дезактивацію і знезараження територій.

Таким чином, у сучасних умовах України система цивільного захисту є одним із ключових елементів національної безпеки, а її ефективне

функціонування має вирішальне значення для збереження життя людей і сталого розвитку держави.

Висновки до розділу

Проведений аналіз показав, що під час виконання технологічної операції фрезерування в металообробці на оператора діє комплекс небезпечних і шкідливих виробничих чинників, які за перевищення допустимих рівнів або порушення вимог охорони праці можуть призводити до травм і аварій. Формування небезпечних ситуацій має імовірнісний, багатофакторний характер і залежить від технічного стану верстата, умов праці, організації робочого місця та дій оператора. Тому зниження виробничих ризиків під час фрезерування можливе лише за умови системного підходу, що поєднує технічні, організаційні та індивідуальні заходи безпеки.

Надзвичайні ситуації в сучасних умовах України мають різне походження та масштаб, становлять серйозну загрозу життю людей, економіці й довкіллю, а їх кількість і складність зростають під впливом техногенних і воєнних чинників. Запобігання НС та мінімізація їх наслідків забезпечуються завдяки функціонуванню єдиної державної системи цивільного захисту, яка координує превентивні заходи, реагування та захист населення.

ВИСНОВКИ І ПРОПОЗИЦІЇ

Здійснено огляд технології торцевого фрезерування як одного з основних методів механічної обробки поверхонь. Виявлено ключові параметри процесу, їхній вплив на якість та продуктивність обробки, а також окреслено сучасні наукові підходи до оптимізації режимів різання та удосконалення конструкції інструменту. Встановлено, що ефективність торцевого фрезерування значною мірою залежить від раціонального поєднання технологічних параметрів та застосування сучасних методів дослідження.

Проведений системний аналіз теоретичних основ торцевого фрезерування дозволив комплексно оцінити механіку різання, силові та теплові процеси, закономірності зношування інструмента і формування шорсткості обробленої поверхні. Встановлено, що режими різання швидкість, подача на зуб і глибина різання є визначальними факторами, які безпосередньо впливають на сили різання, температурний режим, стійкість інструмента та якість обробленої поверхні, причому інтенсивність їх впливу різниться залежно від конкретного параметра.

Розроблені аналітичні та емпіричні моделі дозволяють кількісно описати ключові взаємозв'язки між режимами різання та технологічними показниками процесу, створюючи науково обґрунтовану основу для прогнозування ефективності обробки. Отримані результати слугують підґрунтям для подальших експериментальних досліджень, оптимізації режимів різання та підвищення продуктивності, якості поверхні й довговічності інструмента, що є критично важливим для забезпечення технологічної надійності та економічної ефективності виробничих процесів.

Температура в зоні різання є критичним показником, що суттєво залежить від основних технологічних параметрів процесу торцевого фрезерування швидкості різання та подачі. Зі зростанням швидкості різання відбувається нелінійне підвищення температури, що зумовлено збільшенням механічного навантаження та зниженням ефективності тепловідведення, що, у свою чергу, призводить до прискореного термічного зносу інструмента та можливих змін у

структурі поверхневого шару. Подача на зуб також спричиняє значне збільшення теплового навантаження, оскільки збільшується об'єм зрізуваного матеріалу, що генерує додаткове тепло; залежність температури від подачі має виразний нелінійний характер, що потребує ретельного контролю для підтримки оптимальних режимів обробки. Взаємодія швидкості різання та подачі формує складний температурний режим, який визначає стабільність, продуктивність і якість процесу, що обґрунтовує необхідність комплексної оптимізації технологічних параметрів з урахуванням теплових ефектів.

Проведений аналіз показав, що під час виконання технологічної операції фрезерування в металообробці на оператора діє комплекс небезпечних і шкідливих виробничих чинників, які за перевищення допустимих рівнів або порушення вимог охорони праці можуть призводити до травм і аварій. Формування небезпечних ситуацій має імовірнісний, багатофакторний характер і залежить від технічного стану верстата, умов праці, організації робочого місця та дій оператора. Тому зниження виробничих ризиків під час фрезерування можливе лише за умови системного підходу, що поєднує технічні, організаційні та індивідуальні заходи безпеки.

Надзвичайні ситуації в сучасних умовах України мають різне походження та масштаб, становлять серйозну загрозу життю людей, економіці й довкіллю, а їх кількість і складність зростають під впливом техногенних і воєнних чинників. Запобігання НС та мінімізація їх наслідків забезпечуються завдяки функціонуванню єдиної державної системи цивільного захисту, яка координує превентивні заходи, реагування та захист населення.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Бочков В.М., Сілін Р.І. Обладнання автоматизованого виробництва. Вид.ДУ «Львівська політехніка», 2000. 380 с.
2. Бочков В.М., Сілін Р.І., Гаврильченко В. Металорізальні верстати : Навчальний посібник.- Львів : Видавництво НУ «Львівська політехніка», 2015. 405 с.
3. Бочков В.М., Сілін Р.І., Гаврильченко В. Металорізальні верстати : Навчальний посібник. Львів : Видавництво НУ «Львівська політехніка», 2009. 268 с.
4. Булей І. А. Проектування підприємств з виробництва і ремонту сільськогосподарських машин. – К.: Вища школа, 1993. – 288с.
5. Бутко Д.А., Луценков В.Л., Лехман С.Д. Практикум з охорони праці. – К.: Урожай, 1995. – 144 с.
6. Гайворонський, В. А. Програмування автоматизованого обладнання. Технологічні основи обробки корпусних деталей : навчальний посібник // В. А. Гайворонський. – К. : Кондор, 2007. – 290с. – ISBN 978-966- 8251-85-6.
7. Гряник Т.М. та ін. Охорона праці. – К.: Урожай, 1997. – 272 с.
8. Губський А.І. Цивільна оборона, К: Міністерство освіти, 1996, 216с.
9. Депутат О. П., Коваленко І. В., Мужик І. С. Цивільна оборона. – Львів. : Афіша, 2001. – 236 с.
10. Іванченко Ф.К. Підйомно-транспортні машини. – К.: Вища школа, 1993.- 413 с.
11. Когут М.С. Механоскладальні цехи та ділянки у машинобудуванні. Підручник. – Львів: Львівська політехніка, 2000. – 352с.
12. Конструктивні особливості та основи програмування верстатів з числовим програмним керуванням Ковальов В.А., Гаврушкевич А.Ю., Гаврушкевич Н.В.
(https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/36433/1/IOAV_verstaty_ChPK.pdf).
13. Маслак О. І. Економіка промислового підприємства навч. посіб. / О. І. Маслак, Л. Д. Воробйова. К. : ЦУЛ, 2016. 172 с.

14. Мельник А. В., Курило О. П. Теорія різання металів: навчальний посібник. – Чернігів: ЧНТУ, 2018. – 228 с.
15. Попович В. В. Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство: [підручник для студ. вищ. навч. закл.] / В. В. Попович, В. В. Попович. Львів: Світ, 2006. 624 с.
16. Правила пожежної безпеки в Україні / Укр. НДПБ МВС України. – Київ: “Укрархбудінформ”, 1995. – 197 с.
17. Технологія конструкційних матеріалів: Підручник / М. А. Сологуб, І. О. Рожнецький, О. І. Некоз та ін.; За ред. М. А. Сологуба. 2-ге вид., перероб. і допов. К.: Вища школа, 2002. 374 с.
18. Основи методології та організації наукових досліджень : навч. Посібник для студентів, курсантів, аспірантів і ад’ютантів ; за ред.. А. Є. Конверського. – К. : Центр учбової літератури, 2010. – 352 с.
19. Системи автоматизованого програмування верстатів з ЧПК :навчальний посібник / С. Л. Міранцов, В. І. Тулупов, С. Г. Онищук, Ю. Б. Борисенко, Є. В. Мішура, О. С. Ковалевська – Краматорськ : ДДМА, 2011. – 152 с. ISBN 978-966-379-549-2.