

ПОЛТАВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерно-технологічний
Кафедра механічної та електричної інженерії

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи на здобуття ступеня вищої освіти

магістр

на тему: «Комп'ютерний аналіз виготовлення пазів деталей
сільськогосподарської техніки дрібнозубими фрезами»

КРМ.133ГМмд_22.27.000 ПЗ

Виконав: здобувач вищої освіти
за освітньо-професійною програмою
*«Машини і засоби механізації
сільськогосподарського виробництва»*
спеціальності 133 *«Галузеве
машинобудування»*
ступеня вищої освіти *магістр*
групи 133ГМмд 22
ЧОРНОБРИВИЙ Олександр

Керівник: канд. техн. наук, доцент
ПОПОВ Станіслав

Полтава – 2023 року

ВСТУП

Одним з важливих завдань сучасного машинобудування є мінімізація матеріальних витрат на виготовлення та експлуатацію різального інструмента за рахунок підвищення його працездатності із забезпеченням стабільно високої якості та продуктивності обробки.

До інструментів недостатньої працездатності внаслідок низької жорсткості, належать круглі пили, відрізні та прорізні фрези.

Виробнича практика вказує на недостатню працездатність тонких прорізних фрез з дрібним зубом, про яку свідчить значний відсоток повної відмови в результаті руйнування їх диска. Це призводить до зростання витрат на інструмент та відсотку браку продукції, що, в свою чергу, підвищує її собівартість.

Наукові напрацювання та практичний досвід щодо недостатньої працездатності дискових фрез ґрунтуються переважно на дослідженні та аналізі динамічних характеристик процесу оброблення [1-10]. З огляду на особливості роботи прорізних фрез з дрібним зубом, а саме низьку швидкість різання, малі товщини зрізу, коротку дугу контакту тощо, як основний навантажувальний фактор доцільно розглядати силу різання. Проте на сьогоднішній день питання напружено-деформованого стану диска фрез, обумовленого одночасною дією окружної та радіальної сил різання з урахуванням радіального биття та зносу зубців, залишаються невирішеними. Таким чином, підвищення працездатності тонких прорізних фрез з дрібним зубом за рахунок досягнення такого їх стану, який не створює передумов до повної відмови, є актуальним науково-технічним завданням сучасного машинобудівного виробництва. Воно може бути вирішене реалізацією результатів досліджень напружено-деформованого стану диска прорізних фрез з дрібним зубом від дії сил різання.

					КРМ.133ГМмд_22.27.000 ПЗ	Аркуш
						6
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Конструктивні та геометричні параметри різальної частини прорізних фрез

Прорізні фрези являють собою дискові фрези та застосовуються для оброблення пазів. Відрізні та прорізні фрези для оброблення виробів із сталі та чорних металів виготовляють відповідно до ГОСТ 2679 [11], вони призначені для прорізання прямих шліців по ГОСТ 24669 [12], пазів та відрізних робіт. Відрізні та прорізні фрези (рисунок 1.1, а) виготовляють трьох типів: із дрібним (тип 1), середнім (тип 2) і крупним (тип 3) зубами. Фрези з дрібним та середнім зубом призначені для фрезерування неглибоких пазів та операцій відрізання. Фрези із крупним зубом – для прорізання глибоких та вузьких пазів. Багатозубі фрези за інших рівних умов забезпечують більш високу хвилинну подачу внаслідок більшого числа зубців.

Значення діаметрів і ширини фрез нормалізовані. Вони утворюють геометричний ряд зі знаменником прогресії $\varphi = 1,26$. Розміри дискових фрез змінюються в широких діапазонах: діаметр $D = 20 \dots 315$ мм, кількість зубців $Z = 32 \dots 200$ і діаметр посадкового отвору $d = 5 \dots 40$ мм. Основний розмір дискових фрез, що визначає ширину оброблюваного паза, $B = 0,20; 0,25; 0,30; 0,40; 0,5; 0,6; 0,8; 1,0; 1,2; 1,4; 1,6; 2,0; 2,5; 2,8; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0$ мм [1]. Кількість зубців прорізних фрез з дрібним зубом змінюється від 32 для діаметра 20 мм до 200 для діаметра 315 мм. Стандартні відрізні та прорізні фрези виготовляють із швидкорізальної сталі Р6М5.

Для фрез, виготовлених відповідно до стандарту [11], установлені наступні геометричні параметри: передній кут $\gamma = 0 \dots +10^\circ$ для фрез різної ширини; мінімальне значення заднього кута (для фрез з великим зубом) складає $\alpha = 20^\circ$; найменше значення допоміжного кута у плані $\varphi_1 = 5'$ для прорізних фрез малих

					КРМ.133ГМмд_22.27.000 ПЗ	Аркуш
						7
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

діаметрів, для фрез діаметром 315 мм – 30', найбільше – для фрез товщиною більше 2 мм діаметром 63 та 80 мм – 1° (рисунок 1.1, а).

Стандартні прорізні фрези з дрібним зубом мають прямий зуб з однією різальною кромкою, для якої кут в плані φ складає 90°, а кут нахилу різальної кромки $\lambda = 0^\circ$, у зв'язку з цим статичні геометричні параметри співпадають з інструментальними.

Для поліпшення умов різання за рахунок розподілу зрізуваного шару між суміжними зубами стандартні дискові фрези із середнім і великим зубами при ширині 1,6 мм і більше виготовляють з перехідними різальними кромками по формах I, II або III (рисунок 1.1, б).

Розміри кромок виконують у залежності від ширини фрези (рисунок 1.1, в): $C = 0,5...1,8$ мм, $C_1 = 0,15...0,6$ мм, $h = 0,12...0,5$ мм (менші значення — для фрез $B = 1,6$ мм; великі значення – для фрез $B = 6$ мм).

Задній кут тонких прорізних фрез з дрібним зубом, що виготовляються без смужки вздовж задньої поверхні, розраховується в залежності від кутів η та γ (рисунок 1.2). Кути ν та η пов'язані наступною залежністю [13]:

$$\eta = \nu - \varepsilon, \text{ де } \varepsilon = 360^\circ / z. \quad (1.1)$$

Для дрібнозубих прорізних фрез без смужки задній кут дорівнює (рисунок 1.2):

$$\alpha = 90^\circ - \gamma - \nu + \varepsilon. \quad (1.2)$$

Форма профілю зуба та стружкових канавок повинна забезпечувати міцність зуба, достатній простір для розміщення стружки та її відвід, допускати достатню кількість переточок, запобігати появі тріщин при термічній обробці. Профілі стружкових канавок виготовляють для кожного типу фрез різні (рисунок 1.1, в).

					КРМ.133ГМмд_22.27.000 ПЗ	Аркуш
						8
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Рисунок 1.1 – Фрези відрізнi і прорізнi за ГОСТ 2679:
а) загальний вигляд; б) форми зубів прорізних і відрізних фрез
із середнім і крупним зубом (I-II), з крупним зубом (III); в) профілі
стружкових канавок для фрез з дрібним зубом (I), з середнім зубом (II),
з крупним зубом (III)

					КРМ.133ГМмд_22.27.000 ПЗ	Аркуш
						9
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Рисунок 1.2 – Визначення заднього кута для прорізних фрез з дрібним зубом

Перший тип – з дрібним зубом має однокутову форму профілю. В залежності від діаметра і числа зубців прорізної фрези, радіус заокруглення впадини зуба коливається в межах 0,1...0,3 мм (для фрез діаметром до 100 мм), кут Θ профілю стружкової канавки приймається рівним 60° . Передні і задні поверхні є плоскими. При цьому фрези мають нераціонально завищений задній кут (більше 25° при $\gamma = 5^\circ$), що знижує міцність та зносостійкість різальної частини інструменту.

Фрези другого типу можуть мати профіль стружкової канавки такий як фрези першого типу або виконаний у вигляді трапеції із смужкою на задній поверхні, яка нахилена під заданим кутом α .

У фрез з крупним зубом використовується третій тип профілю зуба з ламаною спинкою зуба. При такому профілі зуб є дещо міцнішим, порівняно із другим типом, оскільки зменшується кут профілю стружкової канавки, який складає 55° . Але поряд із цим зменшується об'єм канавки і як наслідок погіршуються умови стружкоутворення, що особливо небажано для фрез із крупним зубом.

Відповідно до ГОСТ 2979 прорізні фрези мають плоску передню поверхню. Разом з тим рядом досліджень доведено, що при криволінійній передній поверхні працездатність фрез значно підвищується. Задача профілювання дискових фрез, у яких профіль зуба обмежений дугами кіл та двома відрізками прямих вперше вирішена в роботі [14], де автор також розглядає окремі випадки зі спрощеною формою профілю зуба. Проте дана конструктивна пропозиція не може бути застосована для тонких прорізних фрез з дрібним зубом у зв'язку із малою висотою їх зубців.

					КРМ.133ГМмд_22.27.000 ПЗ	Аркуш
						10
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Основні методи удосконалення конструкції відрізних та прорізних фрез з метою підвищення їх працездатності, що відомі на сьогоднішній день, наведені у таблиці 1.1, серед них: прогресивні схеми зрізання припуску, удосконалення профілю стружкових канавок, нерівномірний крок зубців, компенсаційні отвори та прорізи [2, 5, 6, 9, 15-24].

Таблиця 1.1 – Основні методи удосконалення конструкції відрізних та прорізних фрез

№	Метод	Переваги	Недоліки	Автори
1	2	3	4	5
1	Прогресивні схеми зрізання припуску	Розподіл стружки по ширині, робота на високих режимах різання, підвищення якості оброблення кромки	Нерівномірне навантаження на різні ділянки різальної кромки, і як наслідок нерівномірний знос зубців. Виникає осьова складова сили різання, що може стати причиною згинних коливань фрези	Равська Н.С., Родін Р.П., Панчук В.Г., Леонов І. Д., Райхельсон В.А. та ін.
2	Удосконалення профілю стружкових канавок	Покращення умов стружкоутворення	Послаблення зубця. Виникає осьова складова сили різання, що може стати причиною згинних коливань фрези. Ускладнення технології виготовлення. Неможливість застосування для дрібнозубих фрез.	Лорох Р., Євтихевич Н. І., Чайтанья К., Каладхар М. та ін.

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Продовження таблиці 1.1

1	2	3	4	5
3	Нерівномірний кутовий крок зубців	Підвищується динамічна стійкість. Зменшується рівень шуму	Ускладнення технології виготовлення інструменту. Нерівномірний знос зубців. Неможливість застосування для дрібнозубих фрез	Равська Н.С., Лорох Р., Семьонов О.В., Панчук В.Г та ін.
4	Компенсаційні прорізи та отвори	Підвищується динамічна стійкість. Компенсація температурних напружень. Зменшується рівень шуму	Наявність концентраторів напружень. Ускладнення технології виготовлення інструменту. Неможливість роботи на верстатах нормальної точності	Густовалова М.О, Стахієв Ю.М., Карпачев А.Ю., Кваянг Л. та ін.

Необхідно зазначити, що більшість з наведених методів удосконалення конструкції фрез виявляються проблематичними для застосування щодо тонких багатозубих прорізних фрез, оскільки одна частина з них зумовлює зменшення жорсткості конструкції, а інша – різке підвищення собівартості їх виготовлення. Окрім того, дослідження можливості застосування зазначених методів для вдосконалення конструкцій саме тонких прорізних фрез в діапазоні діаметрів 63...100 мм на сьогоднішній день ще не здійснювалося.

1.2 Особливості роботи тонких прорізних фрез із дрібним зубом

Оброблення тонкими прорізними фрезами з дрібним зубом відрізняється наступними особливостями:

- переривчастим характером оброблення;
- невідповідними умовами різання;

- малими глибинами фрезерування, які близькі до значення товщини фрези;
- відносно низькими швидкостями різання (20...80 м/хв.);
- низькими значеннями подачі на зуб (до 0,005 мм/зуб);
- змінною по дузі контакту товщиною зрізу;
- короткою різальною кромкою;
- малою кількістю зубців, що беруть участь у різанні;
- достатньо високими значеннями допусків зносу (рекомендоване ГОСТ 2679-93 [11] значення допуску фаски зносу по задній поверхні досягає 0,4 мм) та радіального биття зубців (до 0,16 мм), а також торцевого биття (до 0,4 мм);
- низькою жорсткістю технологічної обробляючої системи;
- значною величиною радіальної сили різання, яка порівняна із відповідними значеннями окружної сили різання;
- періодичними коливаннями сили різання.

Переривчастий характер оброблення прорізними фрезами, змінна по дузі контакту товщина зрізу та малі глибини фрезерування, що визначають нерівномірність процесу оброблення, а також високі значення радіального биття зубців викликають різкі коливання сил різання. Невільний процес різання прорізними фрезами разом із короткою довжиною різальної кромки створюють несприятливі умови стружкоутворення. Високі значення торцевого биття, перекид фрези на оправці разом із низькою жорсткістю технологічної обробляючої системи створюють умови до виникнення згинних коливань тонких прорізних фрез та їх заклинювання в пазу, що обробляється.

Як було зазначено вище, тонкі прорізні фрези працюють при відносно низьких режимах різання. Наряду з цим час робочого руху кожного зубця на протязі одного оберту фрези значно менший часу холостого руху, під час якого зуб охолоджується. Крім цього, низькі швидкості обертання фрез обумовлюють достатньо низькі значення відцентрових сил (порядку 0,5 Н.).

Таким чином, зважаючи на особливості оброблення тонкими прорізними фрезами з дрібним зубом, вплив температурного перепаду по радіусу фрези та

					КРМ.133ГМмд_22.27.000 ПЗ	Аркуш
						13
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

відцентрових сил є несуттєвим.

1.3 Види відмов прорізних фрез та фактори, що впливають на їх виникнення

Відмова – стан інструменту, який відповідає порушенню його працездатності. Безвідмовність, в свою чергу, є одним із показників надійності різального інструменту. Питання надійності різального інструменту досліджені в роботах [25-34].

Втрата працездатності прорізних фрез може наступати по причині поступової відмови в результаті втрати стійкості, виробничої відмови в результаті незадовільної якості та точності оброблення, часткової відмови в результаті несправності частини зубця, та повної відмови в результаті несправності тіла фрези [12]. При чому повна відмова є критичною і не передбачає можливості відновлення різальної здатності фрези. З огляду на це, постає задача визначення основних причин переходу прорізних фрез в критичний стан. Основні види несправності прорізних фрез наведені на рисунку 1.3.

Найбільш характерними видами несправності прорізних фрез є [35]: руйнування вершинної частини зуба (рисунок 1.3, а), обрив зубців по основі (рисунок 1.3, б), утворення тріщин (рисунок 1.3, в), повне руйнування диску (рисунок 1.3, г).

По значенню впливу на ресурс роботи зазначені несправності можуть бути розділені на дві групи. Першу групу складають несправності, які можуть бути усунені шляхом переточування зубців або збільшенням товщини сточування (руйнування вершинної частини зуба та обрив зубців по основі). Хоча ці пошкодження різко знижують ресурс роботи фрези, вони не вимагають негайного виводу її із експлуатації.

Крім того, ці пошкодження пов'язані переважно з дією непланових навантажень, обумовлених попаданням чужорідних тіл в зону різання або нерівномірністю подачі стола фрезерного верстата. Очевидно, що вплив

					КРМ.133ГМмд_22.27.000 ПЗ	Аркуш
						14
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

пошкоджень цієї групи на довговічність фрези може бути суттєво ослаблений підвищенням культури виробництва.

Рисунок 1.3 – Основні види несправності прорізних фрез:

- а) руйнування вершинної частини зуба; б) обрив зубців по основі;
- в) утворення тріщин; г) повне руйнування диску фрези

По своєму впливу на ресурс роботи фрези друга група несправностей, яку складають тріщини в полотні і повне його руйнування, виявляється найбільш значимою. Це обумовлюється не тільки тим, що фреза при наявності тріщин виводиться із експлуатації, але і тим, що у відсотковому відношенні повні відмови виявляються найбільшими.

Аналіз працездатності прорізних фрез вказує на те, що їх повні відмови в ряді випадків значно перевищують відмови, обумовлені зносом різальних кромek. Із наведеного слідує, що оцінка працездатності фрез лише за умовою зносу не є виправданою.

					КРМ.133ГМмд_22.27.000 ПЗ	Аркуш
						15
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Зазначені відмови є наслідком широкого комплексу причин, що мають тісні взаємозв'язки. Серед них можна виділити дві основні групи. Першу групу складають фактори, пов'язані з виготовленням і підготовкою інструмента до роботи. Другу групу складають фактори, безпосередньо пов'язані з процесом фрезерування.

Найбільш суттєвими факторами першої групи є: якість формування лінійних та кутових параметрів зубців фрез, шорсткість поверхонь заточки, формування початкового напруженого стану диску фрези, точність та жорсткість технологічної обробляючої системи, якість інструментального матеріалу. В певній мірі вони носять суб'єктивний характер, а їх вплив може бути значно знижений підвищенням культури виробництва на всіх етапах.

Друга група причин визначається силами різання в процесі оброблення. Їх аналіз являє собою основу вибору оптимальних режимних параметрів, конструктивних та геометричних параметрів інструменту, параметрів точності його виготовлення установки та ін., що задовольняють вимогам точності та якості фрезерування, продуктивності та надійності інструмента.

Зважаючи на особливості процесу оброблення неглибоких вузьких пазів до факторів, що здійснюють на фрезу найбільший вплив, відносять сили опору різанню. Температурний фактор та відцентрові сили мають другорядне значення, оскільки тонкі прорізні фрези працюють з відносно невеликими швидкостями різання. Інші фактори, що визначають працездатність фрези, (стійкість, коливання) є наслідком зовнішніх впливів і початкового стану диску.

Висновки до розділу 1

Вивчення особливостей процесу оброблення пазів прорізними фрезами, їх працездатності та видів відмов, огляд літературних джерел щодо відомих у даний час методів оцінки працездатності фрез та заходів по попередженню виникнення відмов дозволяє зробити наступні висновки.

					КРМ.133ГМмд_22.27.000 ПЗ	Аркуш
						16
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 Втрата працездатності прорізних фрез може наступати по причині поступової відмови в результаті втрати стійкості, виробничої відмови в результаті незадовільної якості та точності оброблення, часткової відмови в результаті несправності частини зубця, та повної відмови в результаті несправності тіла фрези. При чому повна відмова є критичною і не передбачає можливості відновлення різальної здатності фрези.

2 Зважаючи на особливості процесу оброблення пазів тонкими прорізними фрезами з дрібним зубом в якості основного навантажувального фактору, який визначає їх працездатність, доцільно розглядати силу різання.

Отже, **мета дослідження** – обґрунтування підходів до підвищення працездатності тонких прорізних фрез з дрібним зубом на основі врахування комплексної оцінки параметрів напружено-деформованого стану їх диска від дії сил різання у процесі обробки пазів. **Об'єктом** розробки є процес виготовлення пазів деталей сільськогосподарської техніки, а **предметом** – вплив технологічних факторів на обробку фрезеруванням.

Для вирішення поставленої мети необхідно розв'язати наступні **задачі**:

- виконати аналіз видів та причин відмов тонких дрібнозубих прорізних фрез в процесі оброблення пазів; надати обґрунтування пріоритетності силового фактора, що обумовлює виникнення повної відмови інструмента;

- визначити та дослідити силові характеристики тонких прорізних фрез з дрібним зубом у процесі оброблення пазів із урахуванням їх конструктивних, геометричних та режимних параметрів, радіального биття та зносу зубців, розмірів та розташування заготовки, властивостей оброблюваного матеріалу;

- визначити та дослідити напружено-деформований стан диска прорізних фрез від дії окружної та радіальної складових сили різання із урахуванням їх конструктивних та геометричних параметрів;

- розробити інженерну методику для розрахунку еквівалентних сумарних напружень та відповідного коефіцієнта запасу міцності в будь-якій точці диска тонких прорізних фрез з дрібним зубом із врахуванням концентрації напружень в

					КРМ.133ГМмд_22.27.000 ПЗ	Аркуш
						17
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зоні стружкових канавок;

- провести експериментальні дослідження з метою перевірки теоретичних результатів роботи;

- приділити увагу питанням охорони праці, економічної ефективності та захисту довкілля.

					КРМ.133ГМмд_22.27.000 ПЗ	Аркуш
						18
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Аналіз зусиль під час прорізного фрезерування

При фрезеруванні на деталь з боку зубців фрези діють сили різання. З боку деталі на фрезу діють сили опору різанню, рівні за величиною та протилежні за напрямом.

На рисунку 2.1 зображена схема сил, які діють на прямий зуб фрези при прорізанні пазів.

Рисунок 2.1 – Схема сил, що діють при роботі прямого зуба відрізної фрези [36]

Відрізнi фрези за ГОСТ 2679 мають кут нахилу різальних кромek $\lambda = 0$. Тому зусилля різання, спрямовані вздовж осі інструмента, будуть рівні нулю. Вектори зусиль різання будуть знаходитися в площинах, які перпендикулярні осі фрези. Сила різання містить дві складові, одна співпадає з вектором швидкості (P_o – окружна сила), друга розташована в площині, перпендикулярній до вектора швидкості різання і в площині сходу стружки (P_r – радіальна сила) [6, 7].

Рівнодійна сил P_o і P_r розкладається за двома напрямками: напрямком подачі (P_s – сила подачі) і напрямком, перпендикулярний напрямку подачі (P_n – сила відтиску). Відповідно до цього отримуємо три технологічні складові сили різання P_o , P_s і P_n .

					КРМ.133ГМмд_22.27.000 ПЗ	Аркуш
						19
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Всі три складові перемінні по величині, а окружна сила перемінна і по напрямку. Сила відтиску може змінювати свій знак в залежності від способу фрезерування: за подачею або проти неї. Таким чином при попутному фрезеруванні заготовка притискається до столу верстата і намагається зсунути її в напрямку подачі. При зустрічній схемі оброблення фреза намагається відірвати заготовку від столу верстата. Фрезерування із попутною подачею можливе тільки на верстатах із надійним пристроєм для вибирання зазорів в механізмі подачі стола. Це пояснюється тим, що при притисканні заготовки збільшується тертя в напрямних стола, а від дії окружної сили стіл верстата буде то пригальмовуватися, то намагатися швидко просунути вперед. Ці явища викликають стрибкоподібний рух стола, який негативно впливає на процес різання.

Процес оброблення прорізними фрезами характеризується ударними навантаженнями, викликаними врізанням в оброблюваний матеріал зуба фрези одразу по всій ширині, оскільки кут нахилу різальної кромки зубців дорівнює 0.

Встановлено, що найбільш суттєвими чинниками, що визначають силові показники процесу фрезерування є товщина зрізу та кількість зубців, що беруть участь у різанні. При чому товщина зрізу при фрезеруванні пазів - величина змінна і залежить від кутового положення зуба фрези (ψ) на дузі контакту (рисунок 2.2).

Рисунок 2.2 – Схема роботи прорізної фрези

					КРМ.133ГМмд_22.27.000 ПЗ	Аркуш
						20
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вона змінюється від значення, близького до нуля, до деякого максимуму. Результатом цього є перемінність силового навантаження і як наслідок, поява коливальних рухів елементів технологічної системи (вимушені коливання). Такі явища в процесі фрезерування руйнують різальні леза інструмента, знижують якість обробленої поверхні і здатні розлагодити верстат і знизити термін його служби.

Товщина зрізу при обробці прорізними фрезами визначається за відомою формулою:

$$a = S_z \cdot \sin \psi, \quad (2.1)$$

де S_z – подача на зуб, мм/зуб;

ψ – кут контакту, град.

Максимальне значення товщини зрізу можна обчислити за формулою [37]:

$$a_{\max} = 2 \cdot S_z \cdot \sqrt{\frac{t}{D} - \frac{t^2}{D^2}}; \quad (2.2)$$

де t – глибина різання, мм;

D – діаметр фрези, мм.

Проте розраховане значення товщини зрізу є теоретичним, оскільки не враховує радіального биття зубців фрези.

Найчастіше радіальне биття дискових фрез Δ обумовлюється ексцентричним розташуванням поверхні фрези відносно її осі обертання (рисунок 2.3).

Радіальне биття зубців фрези, встановленої на оправці буде складатися:

- із биття власне зубців фрези, що вимірюється на контрольній оправці;
- биття контрольної оправки;
- биття робочої оправки;
- биття шпиндельного отвору верстата.

Рисунок 2.3 – Радіальне биття дискової фрези [13]

В процесі оброблення величина радіального биття поверхні різальних кромek прорізних фрез може у декілька разів перевищувати подачу на зуб. Внаслідок цього кількість зубців, що беруть участь у різанні різко зменшується. Тобто деякі зубці при одному оберті фрези зовсім не беруть участь у різанні, деякі – лише дотикаються до оброблюваної поверхні і цим зміцнюють її, а інші – виконують обробку по зміцненій поверхні із збільшеною товщиною зрізу. Таким чином погіршуються умови оброблення, що призводить до нерівномірного завантаження різальних кромek фрези, і як наслідок до різких коливань сил різання, що в свою чергу викликає зменшення стійкості або і поломку інструменту [38].

Кількість зубців, які беруть участь у різанні, визначається кутом контакту та кутовим кроком зубців фрези.

Кут контакту (град):

$$\cos \psi = 1 - \frac{t}{R}. \quad (2.3)$$

Кутовий крок зубців (град.):

					КРМ.133ГМмд_22.27.000 ПЗ	Аркуш
						22
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\varepsilon = \frac{360}{z} \quad (2.4)$$

Кількість зубців, які беруть участь у різанні:

$$Z_0 = \frac{\Psi}{\varepsilon} + 1. \quad (2.5)$$

При одночасній роботі декількох зубців результуючі технологічні складові сили різання P_s і P_n отримуються в результаті сумування відповідних сил, що діють на кожний зуб фрези. Складніше визначити сумарну окружну силу, адже сумування необхідно виконувати за допомогою крутних моментів. При цьому точка прикладання сумарної окружної сили буде невідома.

Перемінність силового навантаження при фрезеруванні звичайно характеризується коефіцієнтом нерівномірності, який визначається відношенням максимальної миттєвої сумарної сили до середнього значення цієї сили на шляху різання. Найчастіше використовують коефіцієнти нерівномірності по окружній силі, значно рідше – по силі подачі і по силі віджимання.

На основі значень результуючих сил різання приймається рішення про вибір конструкції фрези, оправки, способу закріплення заготовки і потужності верстата.

Методи визначення сил різання при фрезеруванні поділяються на три групи: експериментальні, розрахунок сил за допомогою емпіричних формул і розрахунок сил за допомогою теоретичних формул.

При експериментальному визначенні сил використовується спеціальна апаратура – динамометри.

Емпіричні формули отримуються за допомогою математичної обробки результатів експериментів. Найчастіше при цьому використовуються емпіричні формули степеневого типу. Емпірична формула для розрахунку окружної сили різання при будь-якому виді фрезерування має вигляд [39]:

					КРМ.133ГМмд_22.27.000 ПЗ	Аркуш
						23
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$P_o = \frac{10 \cdot C_p \cdot t^x \cdot S_z^y \cdot B^v \cdot z}{D^q \cdot n^w} \cdot K_{MP} , \quad (2.6)$$

де C_p – коефіцієнт;

t – глибина різання, мм;

S_z – подача на зуб, мм/зуб;

B – ширина фрезерування, мм;

z – кількість зубців фрези, шт.;

D – діаметр фрези, мм;

n – частота обертання фрези, об/хв.;

x, y, v, q, w – показники степенів,

K_{MP} – поправний коефіцієнт на якість оброблюваного матеріалу.

Для відрізних фрез із швидкорізальної сталі при обробці конструкційної сталі (215 НВ) можна застосовувати спрощений варіант попередньої формули [36]:

$$P_o = 682 \cdot t^{0.86} \cdot B \cdot z \cdot S_z^{0.72} \cdot D^{-0.86} . \quad (2.7)$$

Значення окремих складових сили різання можна визначити приблизно, знаючи P_o [38].

При зустрічному фрезеруванні дисковими фрезами:

$$P_s \approx (1,0 \dots 1,2) P_o; \quad (2.8)$$

$$P_B \approx (0,2 \dots 0,3) P_o; \quad (2.9)$$

$$P_n \approx (0,35 \dots 0,4) P_o. \quad (2.10)$$

При попутному фрезеруванні:

					КРМ.133ГМмд_22.27.000 ПЗ	Аркуш
						24
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$P_s \approx (0,8 \dots 0,9) P_o; \quad (2.11)$$

$$P_v \approx (0,75 \dots 0,8) P_o; \quad (2.12)$$

$$P_p \approx (0,35 \dots 0,4) P_o. \quad (2.13)$$

Емпіричні формули хоча і не відображають фізики процесу різання, але прості в використанні. Однак вони дозволяють виконувати достатньо точні розрахунки лише для умов, в діапазоні зміни яких був виконаний експеримент і його математична обробка.

Теоретичним методам розрахунку сил різання при роботі дисковими фрезами та пилами присвячені роботи [1, 36, 40-45].

Робота [40] присвячена методології розрахунку зусиль різання при відрізці дисковими пилами як з рівномірним так і з нерівномірним кутовим кроком зубців. Автором пропонується при відрізанні фрезами в першому наближенні величини колового зусилля P_0 і радіального зусилля P_r розрахувати за формулами:

$$P_0 = C_p \cdot a^{0,85} \quad (2.14)$$

$$P_r = (0,6 \dots 0,8) P_0. \quad (2.15)$$

Відома формула О. М. Розенберга для розрахунку сил при фрезеруванні, виведена за допомогою залежності для питомого тиску різання при фрезеруванні. При цьому автор всі постійні коефіцієнти і показники степенів виразив через емпіричну величину "k" [1]:

$$\bar{P}_o = \frac{2^{1-k}}{\pi(2-k)} C_p \cdot S_z^{1-k} \cdot \left(\frac{t}{D}\right)^{1-k/2} \cdot B \cdot z, \quad (2.16)$$

					КРМ.133ГМмд_22.27.000 ПЗ	Аркуш
						25
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де "k" залежить від властивостей оброблюваного матеріалу, величини зносу різального інструмента, геометрії інструмента і т.д.

До формул розрахунку сил різання, отриманих за допомогою теоретичних моделей процесу різання, належать також теоретичні формули для розрахунку середніх сил при роботі циліндричних фрез з прямим зубом Ю. О. Розенберга [36].

Автор визначає середнє значення окружної сили:

$$\bar{P}_o = \frac{B \cdot t \cdot z}{\pi \cdot D} \left\{ C_{п.п.} S_z + (C_p k_p + C_h) \frac{\theta \cdot D}{2t} \right\}, \quad (2.17)$$

де $C_{п.п.}$ – сила, що діє на передню поверхню інструмента,

k_p – коефіцієнт, який можна визначити по наступним залежностям:

– при $a_{\max} \leq a_o$:

$$\bar{k}_p = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{a_{\max}}{a_o}}; \quad (2.18)$$

– при $a_{\max} > a_o$:

$$\bar{k}_p = 1 - \frac{1}{3} \cdot \frac{a_{\max}}{a_o}; \quad (2.19)$$

$a_o \approx 1,74 \rho$, ρ – радіус заокруглення різальної кромки.

Середній крутний момент на один оберт фрези:

$$\bar{M}_{кр} = \frac{B \cdot t \cdot z}{2\pi} \left\{ C_{п.п.} S_z + (C_p \bar{K}_p + C_h) \frac{\theta \cdot D}{2t} \right\}. \quad (2.20)$$

Середня сила подачі:

					КРМ.133ГМмд_22.27.000 ПЗ	Аркуш
						26
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\begin{aligned} \overline{P}_s = \frac{B \cdot z}{2\pi} \left\{ \frac{S_z}{2} [\pm C_{п.п.} \sin^2 \theta + U_{п.п.} (\theta - \sin \theta \cos \theta)] + \right. \\ \left. + \overline{K}_p [\pm C_p \sin \theta + U_p (1 - \cos \theta_o)] + [\pm C_h \sin \theta + U_h (1 - \cos \theta_o)] \right\}. \end{aligned} \quad (2.21)$$

Середня сила відтиску:

$$\begin{aligned} \overline{P}_n = \frac{B \cdot z}{2\pi} \left\{ \frac{S_z}{2} [\pm C_{п.п.} (\theta - \sin \theta \cos \theta) - U_{п.п.} \sin^2 \theta] + \right. \\ \left. + \overline{K}_p [\pm C_p (1 - \cos \theta_o) - U_p \sin \theta_o] + [\pm C_h (1 - \cos \theta_o) - U_h \sin \theta] \right\}. \end{aligned} \quad (2.22)$$

Для наближених розрахунків іноді користуються значеннями тиску p , під яким прийнято розуміти силу різання, що приходить на одиницю поперечного перерізу площі шару, що зрізується. Тиск залежить не тільки від механічних властивостей оброблюваного матеріалу, але і від найбільшої товщини стружки. Для більш тонких стружок тиск за інших рівних умов збільшується і зменшується для стружок більшої товщини.

В роботі [45] складові сил різання визначаються шляхом проектування на технологічні осі сили стружкоутворення і сил на задніх поверхнях зубців. Автор пропонує методику розрахунку сил різання прямозубої циліндричної фрези виходячи з умови вільного різання. Оскільки процес прорізання пазів відбувається в умовах невольного різання, застосування даної методики не забезпечить необхідної точності розрахунків.

В роботі [14] розроблені теоретичні основи проектування відрізних фрез. Автором розроблено методику та програмне забезпечення розрахунку часових залежностей складових сили різання під час оброблення відрізними фрезами довільної конфігурації із врахуванням конструкційних та геометричних параметрів інструменту та параметрів заготовки. Розрахунок сил різання було здійснено на основі методики, викладеної в роботі [36]. Автор отримав наступні вирази для розрахунку складових сили різання [14]:

					КРМ.133ГМмд_22.27.000 ПЗ	Аркуш
						27
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$P_{\sigma_i} = b \sum_{j=1}^m \left(C_{\text{ПП}ij} a_{\psi_{ij}} + \frac{C_{\text{ЗП}ij}}{\sin \varphi_{c_{ij}}} \right), \quad (2.23)$$

$$P_{r_i} = b \sum_{j=1}^m \left(U_{\text{ПП}ij} a_{\psi_{ij}} \sin(\varphi_c - \nu_2) + U_{\text{ЗП}ij} \right), \quad (2.24)$$

$$P_{a_i} = b \sum_{j=1}^m \left(U_{\text{ПП}ij} a_{\psi_{ij}} \cos(\varphi_c - \nu_2) + U_{\text{ЗП}ij} \operatorname{ctg} \varphi_c \right), \quad (2.25)$$

$$P_{s_i} = \sum_{j=1}^m (P_{\sigma_i} \cos \psi_{ij} + P_{r_i} \sin \psi_{ij}), \quad (2.26)$$

$$P_{n_i} = \sum_{j=1}^m (P_{\sigma_i} \sin \psi_{ij} - P_{r_i} \cos \psi_{ij}), \quad (2.27)$$

де $C_{\text{ПП}}$ і $U_{\text{ПП}}$ – питомі сили на передній поверхні інструмента;

$C_{\text{ЗП}ij}$ і $U_{\text{ЗП}ij}$ – питомі сили на задній поверхні інструмента;

b – довжина елементарної ділянки різальної частини фрези;

$a_{\psi_{ij}}$ – товщина зрізу i -го зубця в j -й точці різальної кромки;

ψ_{ij} – кут контакту i -го зубця в j -й точці різальної кромки;

φ_c – статичний кут в плані;

ν_2 – кут між проекцією рівнодійної сили різання на передній поверхні та нормаллю до головної різальної кромки

$$\nu_2 = \operatorname{arctg}(-\sin \lambda_c (1 - \operatorname{tg} \gamma_c)). \quad (2.28)$$

Сумарні сили при одночасній роботі q зубців фрези відповідно до [14]

					КРМ.133ГМмд_22.27.000 ПЗ	Аркуш
						28
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

визначаються за формулами:

$$P_o = b \sum_{i=1}^q P_{o_i}, \quad (2.29)$$

$$P_r = b \sum_{i=1}^q P_{r_i}, \quad (2.30)$$

$$P_a = b \sum_{i=1}^q P_{a_i}, \quad (2.31)$$

$$P_s = b \sum_{i=1}^q P_{s_i}, \quad (2.32)$$

$$P_n = b \sum_{i=1}^q P_{n_i}. \quad (2.33)$$

На основі отриманих залежностей для розрахунку сил різання в роботі [14] розроблено методику та програмне забезпечення визначення часових залежностей сил різання в процесі фрезерування дисковими фрезами.

2.2 Напружено-деформований стан диску прорізних фрез

Міцність фрези оцінюється по зональним напруженням (напруженням 1-го роду за класифікацією Н.Н. Давиденкова [46]), що врівноважуються в об'ємі, співрозмірному з розмірами тіла. Ці напруження поділяються на тимчасові та залишкові. Тимчасові напруження виникають в тілі фрези під час її експлуатації та виготовлення (від сил різання, температурного перепаду, відцентрових сил, в процесі термічної обробки) [2]. Залишкові напруження виникають в тілі фрези на різних етапах її виготовлення, вони формуються в основному при термообробці, шліфуванні та проковуванні.

Особливістю тонких прорізних фрез є робота з малими глибинами різання, які близькі до значення товщини фрези, відносно низькими швидкостями різання та

					КРМ.133ГМмд_22.27.000 ПЗ	Аркуш
						29
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

величинами подачі на зуб. Такі значення режимів різання дозволяють при визначенні напружено-деформованого стану тонких прорізних фрез як основний навантажувальний фактор розглядати лише сили різання.

Оснoву проблеми оцінки працездатності інструмента складає аналіз напружено-деформованого стану. У всіх випадках задача зводиться до побудови функціональних залежностей, які встановлюють зв'язок між напруженнями та факторами навантаження, які в свою чергу визначаються режимами різання, конструкцією фрези, якістю інструментального матеріалу, якістю підготовки фрези до роботи.

Побудова таких залежностей на основі точних рішень пов'язана із значними математичними труднощами. Це пояснюється складністю характеру навантажувальних факторів, які не завжди мають лінійний зв'язок з напруженнями в фрезі, із складністю геометричної форми різальної частини фрези. Ці обставини послужили причиною широкого застосування експериментальних методів (оптичних та тензометричних) визначення напружень [25]. При всій своїй значимості у вирішенні нових задач, розширенні знань в області вивчення основних закономірностей зміни напружень, вони не є достатньо точними. Це обумовлено тим, що тензометричні методи дають усереднені результати в великих об'ємах, а оптичні – не володіють достатньою роздільною здатністю. Крім того, експериментальні результати відповідають лише конкретному набору навантажувальних факторів та не мають достатньої спільності.

Для теоретичної оцінки напружено-деформованого стану диску прорізної фрези необхідно визначити розподіл напружень та величини переміщень окремих її точок при зовнішньому навантаженні. Дана задача може бути вирішена аналітично або наближено за допомогою методу скінченних елементів, який реалізований у ряді програмних продуктів (SolidWorks, ANSYS, LS-DYNA, MSK/NASTRAN, ABAQUS та ін.). Визначення напружено-деформованого стану диску фрези за допомогою методу скінченних елементів потребує створення комп'ютерної тривимірної твердотільної моделі фрези з конкретними

					КРМ.133ГМмд_22.27.000 ПЗ	Аркуш
						30
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

конструктивними та геометричними параметрами. Крім того метод скінченних елементів характеризується рядом похибок: похибками дискретизації, базисної функції, округлення та ін. При цьому точність визначення напружень виявляється меншою ніж точність визначення переміщень і в результаті цього похибки розрахунку можуть мати істотне значення. Таким чином, задача аналітичного визначення напружено-деформованого стану диску прорізної фрези від дії окружної та радіальної сил різання, є актуальною.

Питанням аналітичного визначення напружено-деформованого стану обертових дисків присвячені роботи [46-51]. Аналітичні роботи, що стосуються питань втрати працездатності дискових пил та фрез, пов'язані в основному з рішенням проблеми їх динамічної стійкості та коливань [1, 5-10, 14]. В роботах [2, 6-10, 14, 52] автори розглядають фрезу як диск з гладким зовнішнім контуром, навантаженим одиничною окружною силою. Питання ж, що стосуються аналітичного визначення напруженого стану диску фрези від одночасної дії окружної та радіальної сил різання, на сьогоднішній день залишаються недослідженими.

Розглянемо напружено-деформований стан диску прорізних фрез від дії окружної сили різання.

Математична модель напружено-деформованого стану диску прорізних фрез базується на моделі Мусхелішвілі М. І., як функції комплексної змінної [53]:

Крайові умови для функції Мусхелішвілі:

$$\begin{cases} \varphi(\sigma) + \frac{\omega(\sigma)}{\bar{\omega}(\sigma)} \bar{\varphi}'(\sigma) + \bar{\psi}(\sigma) = f \\ \varphi(\sigma) + \sigma \bar{\varphi}'(\sigma) + \bar{\psi}(\sigma) = f \end{cases} \quad (2.34)$$

Формула Колосова-Мусхелішвілі:

$$\begin{cases} \sigma_{\rho\rho} + \sigma_{\theta\theta} = 4\text{Re}\Phi(z) \\ \sigma_{\theta\theta} - \sigma_{\rho\rho} + 2i\tau_{\rho\theta} = 2[\bar{z}\Phi'(z) + \Psi(z)] \cdot e^{2i\theta} \end{cases} \quad (2.35)$$

В роботі [54] розглядається задача визначення напружено-деформованого стану круглої пластини одиничної товщини, жорстко закріпленої по центру, навантаженої силою, дотичною до границі. В розрахунку приймається допущення, що сила, прикладена до границі, врівноважується силою і моментом, прикладеним в центрі пластини. Таким чином розв'язується перша крайова задача для круглої пластини радіусом R , навантажена відповідно до схеми, що наведена на рисунку 2.4. Дану методику можна застосувати для визначення напружено-деформованого стану диску прорізної фрези, від дії окружної сили різання.

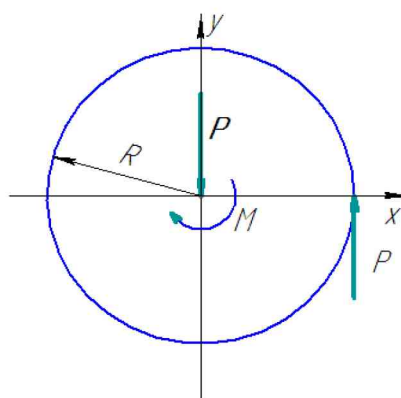


Рисунок 2.4 – Схема навантаження круглої пластини

Розглядається задача плоского деформованого стану. Оскільки диск знаходиться в рівновазі, то головний вектор і головний момент рівні нулю. Автори для вирішення поставленої задачі використовують метод із застосуванням теорії функцій комплексної змінної, розвинутий в роботах Мусхелішвілі М.І. [53]. Застосувавши конформне відображення круга:

$$z = \omega(\xi) \quad \omega(\xi) = R\xi \quad \omega'(\xi) = R, \quad M = P \quad (2.36)$$

отримують крайові умови для функції Мусхелішвілі у наступному вигляді:

$$\begin{cases} \varphi(\sigma) + \frac{\omega(\sigma)}{\bar{\omega}(\sigma)} \bar{\varphi}'(\sigma) + \bar{\psi}(\sigma) = f \\ \varphi(\sigma) + \sigma \bar{\varphi}'(\sigma) + \bar{\psi}(\sigma) = f \end{cases} \quad (2.37)$$

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Для вирішення задачі використовувались інтеграли типу Коші. Авторами були отримані наступні формули для визначення нормальних (σ_θ та σ_ρ) та дотичних напружень ($\tau_{\rho\theta}$) (рисунок 2.5) в довільній точці круглої пластини (диску) з полярними координатами ($\rho; \theta$) [54]:

$$\sigma_\theta = \frac{P}{2\pi} \left[\frac{-\sin 2\theta + 3\rho \sin \theta - \rho^2 \sin \theta}{(1 - 2\rho \cos \theta + \rho^2)^2} + \frac{6}{(1+\chi)} \rho \sin \theta + \frac{\chi - 1}{(1+\chi)} \frac{1}{\rho} \sin \theta + \frac{\sin 2\theta + \rho \sin \theta}{1 - 2\rho \cos \theta + \rho^2} \right], \quad (2.38)$$

$$\sigma_\rho = \frac{P}{2\pi} \left[\frac{2}{(1+\chi)} \frac{1}{\rho} \sin \theta - \frac{-\sin 2\theta + 3\rho \sin \theta - \rho^2 \sin \theta}{(1 - 2\rho \cos \theta + \rho^2)^2} + \frac{2}{(1-\chi)} \rho \sin \theta - \frac{1}{\rho} \sin \theta + \frac{-\sin 2\theta + 3\rho \sin \theta}{1 - 2\rho \cos \theta + \rho^2} \right], \quad (2.39)$$

$$\tau_{\rho\theta} = \frac{P}{2\pi} \left[\frac{1}{(1+\chi)} \frac{1}{\rho} \cos \theta + \frac{\cos 2\theta - 3\rho \cos \theta + 3\rho^2 - \rho^2 \cos \theta}{(1 - 2\rho \cos \theta + \rho^2)^2} - \frac{2+\chi}{(1+\chi)} \rho \cos \theta - \frac{\cos 2\theta - \rho \cos \theta}{1 - 2\rho \cos \theta + \rho^2} - \frac{1}{\rho^2} \right], \quad (2.40)$$

де P – значення окружної сили різання, Н;

χ – безрозмірний коефіцієнт, для тонкої пластинки $\chi = \frac{3-\nu}{1+\nu}$;

ν – коефіцієнт Пуассона, для сталі $\nu = 0,3$.

Рисунок 2.5 – Схема дії нормальних (а) та дотичних (б) напружень на елементарну ділянку круглої пластини (диску фрези)

Як було зазначено в п. 1.2. розділу 1, при обробці пазів прорізними фрезами виникає значна за величиною радіальна сила різання, яка порівняна із відповідним значенням окружної сили різання, постає задача визначення напружено-деформованого стану диску фрези від одночасної дії окружної та радіальної сил різання.

Висновки до розділу 2

Відсутність методики аналітичного визначення напружено-деформованого стану диску прорізних фрез від одночасної дії окружної та радіальної сил різання, який визначає працездатність інструменту, ускладнює вибір раціональних конструктивних та геометричних параметрів фрез, режимних параметрів процесу оброблення та ін.

Таким чином, розглянувши стан питання, проаналізувавши результати основних експериментальних та теоретичних досліджень, можна припустити, що досягнення такого стану прорізної фрези, який не створює передумов до повної відмови, є вирішуваною задачею.

					КРМ.133ГМмд_22.27.000 ПЗ	Аркуш
						34
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Програмне забезпечення для розрахунку зусиль різання

В результаті пошуку програмних продуктів, що дозволяють розраховувати величину складових сили різання в процесі оброблення пазів тонкими прорізними фрезами з дрібним зубом, було встановлено, що для дослідження напружено-деформованого стану диску фрез доцільно застосовувати модуль розрахунку сил різання пакету прикладних програм імітаційної моделі процесу оброблення дисковими фрезами В.Г. Панчука [55], оскільки зазначений продукт дозволяє отримувати миттєві значення складових сили різання, визначати статичну та динамічну їх складову, та кількість зубців фрези, що беруть участь в різання в даний момент часу.

Зазначене програмне забезпечення складається з трьох виконавчих модулів і включає в себе програмні засоби:

- 1) побудови комп'ютерної моделі різальної частини фрези довільної конфігурації;
- 2) визначення часових реалізацій сил різання при обробці дисковими фрезами;
- 3) аналізу динамічного стану процесу різання.

Першим етапом імітаційного моделювання є створення комп'ютерної моделі різальної частини фрези. На цьому етапі моделювання необхідно ввести інформацію про конструктивні розміри фрези (діаметр, товщина, кількість зубців, геометричні параметри).

На другому етапі необхідно встановити параметри моделювання, режимні параметри, параметри профілю заготовки, механічні властивості матеріалу оброблюваної деталі та параметри стружкоутворення.

Імітаційна модель визначає послідовні положення фрези відносно заготовки відповідно до заданих параметрів моделювання [56] та розраховує миттєві

					КРМ.133ГМмд_22.27.000 ПЗ	Аркуш
						35
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

значення сил різання. Отримані значення виводяться на екран монітору в графічному виді.

3.2 Напружений стан диску прорізних фрез в зоні стружкових канавок

Як було зазначено в п. 1.3 даної роботи, критичний стан прорізної фрези настає при руйнуванні її диску, тобто в результаті повної відмови. Повна відмова може бути наслідком згинних коливань фрези при кінематичному збудженні силами різання та надмірних напружень в диску від їх дії. Виробничою практикою встановлено, що поява тріщини в диску найчастіше спостерігається в зоні стружкових канавок. Це може пояснюватися різким зростанням в цій зоні місцевих напружень за рахунок їх концентрації.

Кількісною характеристикою концентрації напружень є коефіцієнт концентрації α , який дорівнює відношенню найбільшого місцевого напруження σ_{max} до номінального σ_n [57]:

$$\alpha = \sigma_{max} / \sigma_n. \quad (3.1)$$

Коефіцієнт концентрації напружень залежить від форми та розмірів концентратора.

Для прорізних фрез основними концентраторами напружень будуть стружкові канавки, менший вплив будуть спричиняти дефекти виготовлення зубчатого вінця: спотворення профілю впадин зубців; поперечні риски, які утворюються при неякісному заточуванні зубців; риски від шліфування торцевої поверхні диску фрези; тріщини, викликані термічною обробкою; тріщини, викликані при нарізанні зубців та ін.

За рахунок концентрації напружень в зоні стружкових канавок будуть зростати передусім нормальні напруження σ_θ .

Для розрахунку коефіцієнтів концентрації використовувався електронний

					КРМ.133ГМмд_22.27.000 ПЗ	Аркуш
						36
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

довідник КоКон (SCAD Soft), який ґрунтується на теоретичних розрахунках та численному аналізі [58].

Для випадку, зображеному на рисунку 3.1, що наближено відповідає конструкції прорізної фрези, отримані наступні значення коефіцієнтів концентрації напружень (таблиця 3.1).

Рисунок 3.1 – Схема навантаження до розрахунку коефіцієнта концентрації напружень

Таблиця 3.1 – Значення коефіцієнтів концентрації напружень для прорізних фрез різних типорозмірів

№ з.п.	Діаметр фрези, мм	Кількість зубців фрези	Висота зубця фрези, мм	Мінімально допустиме значення радіусу заокруглення стружкової канавки фрези, мм	Коефіцієнт концентрації напружень в зоні стружкової канавки
1	2	3	4	5	6
1	63	128	1	0,2	5,797
2		100	1,2	0,3	5,275
3		80	1,7	0,3	6,116
4	80	128	1,2	0,3	4,89
5		100	1,5	0,3	5,797
6		80	2	0,3	6,561

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Продовження таблиці 3.1

1	2	3	4	5	6
7	100	160	1	0,3	4,89
8		128	1,5	0,3	5,797
9		100	2	0,3	6,561
10	125	160	1,4	0,4	4,99
11		128	2	0,4	5,797
12		100	2,5	0,4	6,38

Як показують розрахунки, коефіцієнт концентрації напружень в зоні стружкової канавки для тонких прорізних фрез в діапазоні діаметрів від 63 до 125 мм знаходиться в межах від 4,89 до 6,561. При цьому коефіцієнт концентрації зменшується при збільшенні радіусу заокруглення впадин та при зменшенні висоти зубців.

Для підвищення міцності фрез за рахунок зменшення впливу концентрації напружень необхідно дотримуватись наступних рекомендацій: збільшувати радіус заокруглення впадин, зменшувати висоту зубців, застосовувати додаткову обробку впадин після заточування для усунення поперечних рисок. Однак, така зміна профілю стружкових канавок викликає зменшення об'єму канавок, що в свою чергу може призвести до переповнення їх стружкою.

3.3 Програмне забезпечення визначення напружень в диску фрези від дії сил різання

В практиці розрахунку міцності різальних інструментів визначальними є методи оцінки міцності, засновані на класичних теоріях настання небезпечного стану. Міцність прорізних фрез доцільно визначати міцністю в зоні стружкових канавок, оскільки руйнування в цій зоні можуть викликати подальше руйнування диску фрез. Оскільки загартована швидкорізальна сталь P6M5 має різний опір

розтягу та стиску [59], то умову міцності доцільно визначати за допомогою п'ятої теорії міцності. Отже, умова міцності прорізної фрези для випадку плоского напруженого стану за критерієм Мора отримує вигляд [60]:

$$\sigma_{\text{екв}} = \frac{\nu - 1}{2}(\sigma_{\rho} + \sigma_{\theta}) + \frac{\nu + 1}{2} \sqrt{(\sigma_{\rho} - \sigma_{\theta})^2 + 4\tau_{\rho\theta}^2} \leq [\sigma_{\varepsilon}] \quad (3.2)$$

$$\nu = \frac{\sigma_{\varepsilon}^{cm}}{\sigma_{\varepsilon}} \quad (3.3)$$

де $[\sigma_{\varepsilon}]$ – межа міцності інструментального матеріалу (для Р6М5 $\sigma_{\varepsilon} = 2780 \text{ МПа}$);

$\sigma_{\varepsilon}^{cm}$ – межа міцності при стисненні ($\sigma_{\varepsilon} = 5060 \text{ МПа}$);

σ_{ρ} , σ_{θ} , $\tau_{\rho\theta}$ – сумарні нормальні та дотичні напруження в довільній точці диску фрези з координатами $(\rho; \theta)$ від одночасної дії окружної та радіальної сил різання.

При відомих значеннях напружень від окремої дії окружної та радіальної сил різання, керуючись принципом незалежності дії сил, сумарні напруження отримуються як сума від розглянутих факторів відповідно.

Наведені залежності (3.2), (3.3) застосовуються для визначення еквівалентних сумарних напружень в довільній точці диску фрези від дії окружної та радіальної сил різання. На основі отриманих результатів була розроблена програма розрахунку напружень в диску прорізних фрез у середовищі MatLab [61]. Розрахунок напружень виконується на основі максимальних значень сил різання, отриманих за допомогою модуля розрахунку сил різання пакету прикладних програм імітаційної моделі процесу оброблення дисковими фрезами. Алгоритм роботи програми наведений на рисунку 3.2. Результатом розрахунку є окремі (від окремої дії окружної та радіальної сил різання), сумарні нормальні і дотичні

					КРМ.133ГМмд_22.27.000 ПЗ	Аркуш
						39
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

напруження, а також еквівалентні напруження в довільній точці диску фрези з координатами $(\rho; \theta)$ у вигляді матриці розмірності 121×56 . З розрахунку виключається зона зубчатого вінця.

Рисунок 3.2 – Алгоритм роботи програми розрахунку напружень в диску прорізних фрез від дії сил різання

Вхідними даними для програми розрахунку напружень є: значення окружної та радіальної сил різання, зовнішній діаметр та діаметр затискних фланців фрези, її товщина, діаметр стружкових канавок, допоміжний кут в плані, коефіцієнт концентрації напружень, максимальне допустиме напруження, коефіцієнт тертя [62].

Розроблена програма є одним із модулів пакета прикладних програм визначення напружень у диску прорізних фрез разом із модулями розрахунку сил різання та розрахунку коефіцієнта концентрації напружень (рисунок 3.3).

					КРМ.133ГМмд_22.27.000 ПЗ	Аркуш
						40
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Рисунок 3.3 – Структура пакета прикладних програм визначення напруженого стану диску прорізних фрез від дії сил різання

Пакет прикладних програм дає можливість розраховувати нормальні та дотичні напруження від окремої та одночасної дії окружної та радіальної сил різання в будь-якій точці диска фрези, визначати максимальне сумарне еквівалентне напруження та коефіцієнт запасу міцності, що йому відповідає, а також отримувати відповідні тривимірні графіки, що ілюструють поле напружень.

3.4 Дослідження складових сили різання

Оскільки в якості основного навантажувального фактору в роботі розглядається силовий фактор виникає необхідність експериментальної перевірки адекватності модулю розрахунку сил різання пакету прикладних програм імітаційної моделі процесу оброблення дисковими фрезами. Загальний вигляд лабораторного стенду для силових досліджень процесу оброблення пазів прорізними фрезами представлений на рисунку 3.4 До нього входять фрезерний

					КРМ.133ГМмд_22.27.000 ПЗ	Аркуш
						41
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

верстат мод. 6Б75ВФ, універсальний динамометр мод. УДМ-600, фреза, тензOMETричний аналогово-цифровий перетворювач, послідовно-паралельний реєстр, пристрій введення-виведення інформації РІО-D48 та персональний комп'ютер.

Рисунок 3.4 – Загальний вигляд лабораторного стенду для вимірювання силових характеристик процесу фрезерування пазів

Технічні характеристики фрезерного верстата відповідають паспортним даним та вимогам [63, 64]. Універсальний динамометр мод. УДМ-600 [65] має можливість сприйняття крутного моменту відносно вертикальної осі та трьох складових сили різання. Заготовка затискалася в динамометрі, який, в свою чергу, закріплювався на столі фрезерного верстата. В якості заготовки використовувався брусок із сталі 45 розміру 120×100×200 мм. Схема закріплення заготовки та

					КРМ.133ГМмд_22.27.000 ПЗ	Аркуш
						42
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

орієнтації складових сили різання наведена на рисунку 3.5.

Рисунок 3.5 – Схема закріплення заготовки та орієнтації складових сили різання

Приєм і зберігання інформації про миттєві значення сил різання, генерування керуючих послідовностей, налагодження параметрів вимірювальної системи здійснюються за допомогою керуючої програми, що функціонує в системі DOS. Результати вимірювання та дані налагодження записуються в спеціальний бінарний файл [55].

Тарування вимірювальної системи проводилося навантаженням і розвантаженням динамометра вздовж трьох осей за допомогою еталонного динамометра [66-72]. Отримані тарувальні графіки наведені на рисунку 3.6

					КРМ.133ГМмд_22.27.000 ПЗ	Аркуш
						43
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Рисунок 3.6 – Тарувальні графіки

					КРМ.133ГМмд_22.27.000 ПЗ	Аркуш
						44
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки до розділу 3

Таким чином, у даному розділі нами зроблено наступне.

- 1 Запропоновано програмне забезпечення для розрахунку зусиль різання.
- 2 Визначено методику розрахунку напруженого стану прорізних фрез у зоні стружкових канавок.
- 3 Запропоновано програмне забезпечення визначення напружень в диску фрези від дії сил різання.
- 4 Наведено методику дослідження складових сил різання.

					КРМ.133ГМмд_22.27.000 ПЗ	Аркуш
						45
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

4.1 Комп'ютерне моделювання процесу обробки пазу прорізною фрезою

Силові характеристики процесу оброблення пазів тонкими прорізними фрезами з дрібним зубом обумовлюють напружено-деформований стан їх диску, тому є основою аналізу працездатності цього інструменту.

Визначенню сил різання при фрезеруванні присвячені численні роботи [1, 36, 39-45, 55]. Встановлено, що найбільш суттєвими чинниками, що визначають силові показники процесу фрезерування є товщина зрізаного шару та кількість зубців, що беруть участь у різанні. При чому товщина зрізаного шару при фрезеруванні пазів – величина змінна і залежить від кутового положення зуба фрези на дузі контакту. Вплив швидкості різання, геометричних параметрів зубців, ступеня зносу, фізико-механічних властивостей інструментального та оброблюваного матеріалів, виду і розташування різальних кромek та інших факторів досліджені в роботах [41-42, 45, 52, 55].

В результаті пошуку програмних продуктів, що дозволяють розраховувати величину складових сили різання в процесі оброблення пазів тонкими прорізними фрезами з дрібним зубом, було встановлено, що для дослідження деформованого стану фрез доцільно застосовувати модуль розрахунку сил різання пакету прикладних програм імітаційної моделі процесу оброблення дисковими фрезами В.Г. Панчука [55], оскільки зазначений продукт дозволяє отримувати миттєві значення складових сили різання та кількість зубців фрези, що беруть участь в різанні в даний момент часу. Опис комп'ютерної програми розрахунку сил різання наведений в п.3.1.

Програму розрахунку сил різання пакету прикладних програм імітаційної моделі процесу оброблення дисковими фрезами було адаптовано до умов прорізання вузьких та неглибоких пазів фрезами, в результаті чого було здійснено комп'ютерне моделювання процесу прорізання пазу глибиною 0,5 мм прорізною

					КРМ.133ГМмд_22.27.000 ПЗ	Аркуш
						46
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

фрезою при схемі зустрічного фрезерування. Конструктивні параметри фрези: діаметр фрези $D=80$ мм, товщина фрези $B=0,5$ мм, кількість зубців $z=128$. Геометричні параметри: передній кут $\gamma=0^\circ$, задній кут $\alpha=32,81^\circ$; головний кут в плані $\varphi=90^\circ$, кут нахилу різальної кромки $\lambda=0^\circ$. Розглядається "ідеальний" процес різання, при якому радіальне та торцеве биття, знос зубців, похибки установки та закріплення фрези відсутні. Режими різання прийняті відповідно до вимог ГОСТ 2679-93 [11] щодо методів випробувань. Оброблюваний матеріал сталь 45.

На рисунку 4.1 наведені робочі панелі вікна вводу і редагування параметрів моделювання.

Рисунок 4.1 – Робочі панелі вікна вводу і редагування параметрів моделювання програми розрахунку сил різання

Для зазначених умов моделювання були отримані наступні часові реалізації сил різання (рисунок 4.2).

					КРМ.133ГМмд_22.27.000 ПЗ	Аркуш
						47
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Рисунок 4.2 – Часові реалізації сил різання при фрезеруванні пазу

Аналізуючи отримані часові реалізації сил різання у процесі фрезерування пазу можна зробити наступні висновки:

- максимальне значення окружної сили різання складає 8,3 Н;
- максимальне значення радіальної сили різання складає 6,9 Н;
- осьова сила відсутня, оскільки фреза має прямі зубці;
- участь в різанні беруть одночасно не більше 4 зубців;
- час врізання фрези в заготовку – близько 17 секунд (на 7-му оберті);
- статична складова окружної сили досягає 5,17 Н, радіальної – 4,25 Н;
- динамічна складова окружної сили складає 3,13 Н, радіальної – 2,65 Н.

Стандартні прорізні фрези з дрібним зубом відповідно до ГОСТ 2679 виготовляються з прямим зубом із однією різальною кромкою, для якої кут в плані φ складає 90° , а кут нахилу – $\lambda = 0^\circ$. У зв'язку з цим величина осьової складової сили різання крім режимів різання обумовлюється передусім зміщенням та

					КРМ.133ГМмд_22.27.000 ПЗ	Аркуш
						48
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

поворотом бічних поверхонь фрези, відносно серединної площини, внаслідок торцевого биття та перекосу фрези на оправці. Попередніми експериментальними дослідженнями встановлено, що величина осьової складової сили різання в процесі фрезерування вузьких неглибоких пазів при рекомендованих режимах різання не перевищує 1 Н. Тому зазначена складова сили різання справлятиме незначний вплив на напружено-деформований стан диска прорізної фрези.

Оскільки режими різання, як було зазначено раніше, чинять значний вплив на силові характеристики процесу фрезерування, постає задача оцінки цього впливу на максимальні значення складових сили різання.

Вплив режимів різання на силові характеристики процесу обробки пазів прорізними фрезами

З метою оцінки впливу основних параметрів режиму різання на максимальні значення складових сили різання при фрезеруванні пазів був проведений обчислювальний експеримент для двох типорозмірів прорізних фрез з дрібним зубом: 1) діаметр 80 мм, товщина 0,5 мм, 128 зубців; 2) діаметр 80 мм, товщина 1 мм, 100 зубців. Конструктивні та геометричні параметри фрез відповідно до ГОСТ 2679 [11]. Результати експерименту наведені на рисунку 4.3.

Таким чином, серед досліджуваних режимів різання, найбільший вплив на величину сил різання в процесі оброблення пазів чинять подача та глибина фрезерування, вплив частоти обертання інструменту виявляється неістотним, що узгоджується із загальновідомими положеннями.

Як було зазначено вище від впливу радіального биття зубців погіршуються умови обробки, що призводить до нерівномірного завантаження різальних кромки фрези, і як наслідок до різких коливань сил різання, що в свою чергу викликає зменшення стійкості або і поломку інструменту [73]. Ще одним чинником, який призводить до різкого зростання сил різання та може викликати відмову фрези є знос зубців.

					КРМ.133ГМмд_22.27.000 ПЗ	Аркуш
						49
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Рисунок 4.3 – Вплив режимів різання на силові характеристики процесу оброблення пазів прорізними фрезами з дрібним зубом: а) вплив подачі, б) вплив глибини фрезерування, в) вплив частоти обертання фрези

Режими різання: а) $n = 160$ об/хв, $t = 0,5$ мм; б) $S_z = 0,001$ мм/зуб, $t = 0,5$ мм; в) $S_z = 0,001$ мм/зуб, $t = 0,5$ мм, (радіальне биття зубців складає 0,01 мм)

Таким чином постає задача дослідження впливу радіального биття та зносу різальних кромки фрези на величини сил різання.

					КРМ.133ГМмд_22.27.000 ПЗ	Аркуш
						50
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вплив радіального биття та зносу зубців прорізної фрези на силові характеристики процесу обробки пазів

Прорізні фрези діаметром 80 мм відповідно до ГОСТ 2679 [11] мають діаметр посадкового отвору 22 мм і встановлюються на верстатах за допомогою оправок. Допуск радіального биття двох протилежних зубців прорізних фрез відносно осі отвору для фрез зазначеного діаметру складає 0,1 мм і вимірюється за допомогою контрольної оправки, допуск радіального биття якої не повинен перевищувати 0,01 мм на довжині 100 мм [11]. Проте обробка проводиться при встановленні фрез на оправки, допуск радіального биття яких значно перевищує допуски для контрольних оправок. Обробка вузьких пазів може здійснюватися як на пазофрезерних, так і на універсальних фрезерних верстатах, що значно більше розповсюджені. Відповідно до ГОСТ 15068 [74] оправка діаметром 22 мм має довжину циліндричної частини 470 мм. Згідно з ГОСТ 17166 [75] довгі фрезерні оправки з цапфою або підтримуючою втулкою та конічними хвостовиками конусів Морзе і 7:24 повинні відповідати вимозі: допуск радіального биття оправки відносно осі центрових отворів при довжині її циліндричної частини 400...500 мм дорівнює 0,025 мм. Тобто допуск радіального биття цих оправок в 2,5 рази перевищує відповідний допуск для контрольних оправок.

Допуск радіального биття центрувальної шийки шпинделя консольно-фрезерного універсального верстату моделі 6Р81 відповідно до його паспорту дорівнює 0,01 мм.

Для зазначених умов максимально допустиме значення реального радіального биття поверхні різальних кромок фрези дорівнюватиме 0,125 мм, що в 12,5 разів перевищує мінімальне значення подачі на зуб для прорізних фрез діаметром 80 мм.

При умові точного налагодження фрези на оправці верстата за допомогою індикатора, тобто при компенсуванні максимально допустимих значень радіального биття, що можливо лише для фрез без шпонкового пазу, допустиме значення реального радіального биття дорівнюватиме 0,055 мм. Це ж значення для фрез із шпонковим пазом складає 0,075 мм.

					КРМ.133ГМмд_22.27.000 ПЗ	Аркуш
						51
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Тобто, допуск реального радіального биття поверхні різальних кромek прорізної фрези без шпонкового пазу за умови точного налагодження фрези на оправці верстата за допомогою індикатора дорівнюватиме 0,055 мм, що в 5,5 разів перевищує мінімальне значення подачі на зуб для прорізних фрез діаметром 80 мм. Отже, при точному налагодженні інструменту на оправці є можливість суттєво зменшити радіальне биття.

Допуски радіального биття двох протилежних зубців та зносу по задній поверхні відрізних та прорізних фрез згідно технічних вимог ГОСТ 2679 у всьому діапазоні конструктивних розмірів наведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1– Допуски радіального биття двох протилежних зубців та зносу по задній поверхні відрізних та прорізних фрез згідно з технічними вимогами ГОСТ 2679

Діаметр фрези, мм	Допуск радіального биття, мм	Допустимий знос, мм
20-40	0,08	0,2
50-63	0,1	
80-125		0,4
160-250		
315		

З метою оцінки впливу радіального биття та зносу зубців прорізних фрез на максимальні значення складових сили різання при обробці пазів був проведений обчислювальний експеримент для умов оброблення пазу глибиною 0,5 мм фрезою діаметром 80 мм товщиною 0,5 мм із 128 зубцями. Конструктивні та геометричні параметри фрези відповідають ГОСТ 2679-93 [11]. Значення радіального биття та зносу зубців відповідають максимально допустимим значенням згідно ГОСТ 2679 та з врахуванням биття оправки і шпиндельного отвору фрезерного верстата.

Режим різання: $n = 160$ об/хв., $S_z = 0,001$ мм/зуб, $t = 0,5$ мм. Результати експерименту наведені в таблиці 4.2 та в графічному вигляді представлені на рисунках 4.4-4.6.

Таблиця 4.2 – Вплив радіального биття та зносу зубців на силові характеристики прорізної фрези

Радіальне биття, мм	Знос, мм	Кількість зубців, що беруть участь в різанні	Окружна сила P_o^{\max} , Н.	Радіальна сила P_r^{\max} , Н.	Зростання, (раз.)	
					P_o^{\max}	P_r^{\max}
0	0	4	8,3	6,9	-	-
0,1	0	1	93,1	94,7	11,22	13,72
0	0,4	4	197	63,4	23,73	9,19
0,1	0,4	1	423	194	50,96	28,12

Отримані графічні залежності вказують на різке збільшення всіх складових сили різання під впливом максимально допустимого значення радіального биття зубців фрези. Отже, максимальне значення окружної сили складає 93,1 Н (збільшення в 11,22 рази);

- максимальне значення радіальної сили складає 94,7 Н (збільшення в 13,72 рази);

- участь в різанні бере лише 1 зуб (зменшення в 4 рази);

- час врізання фрези в заготовку – близько 36 секунд (збільшення в 2,13 рази);

- динамічна складова сил різання досягає їх максимальних значень.

Рисунок 4.4 – Часові реалізації сил різання при фрезеруванні пазу із врахуванням радіального биття зубців 0,125 мм

Таким чином, за допомогою комп'ютерного моделювання доводиться твердження про вкрай небезпечний вплив на працездатність прорізних фрез радіального биття їх зубців, яке викликає різке зростання сил різання та зменшення кількості зубців, що беруть в ньому участь. Такі силові характеристики процесу фрезерування можуть обумовити складний напружено-деформований стан диску фрези. Наряду з цим різке зростання динамічної складової сил різання визначатиме складний динамічний стан диску фрези в процесі оброблення пазів.

Ще одним чинником, який призводить до значного зростання сил різання, є знос зубців фрези. Відповідно до ГОСТ 2679 [11] критерієм затуплення є допустимий знос по задній поверхні, який для фрез діаметром вище 63 мм дорівнює 0,4 мм (таблиця 4.1). На рисунку 4.5 наведені часові реалізації сил різання при фрезеруванні пазу прорізною фрезою діаметром 80 мм товщиною 0,5 мм із 128 зубцями. Із врахуванням зносу зубців фрези (знос 0,4 мм) та без врахування їх радіального биття. Режими різання: $S_z = 0,001$ мм/зуб, $t = 0,5$ мм, $n = 160$ об/хв. Оброблюваний матеріал – сталь 45.

					КРМ.133ГМмд_22.27.000 ПЗ	Аркуш
						54
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Рисунок 4.5 – Часові реалізації сил різання при фрезеруванні пазу із врахуванням зносу зубців фрези та без врахування їх радіального биття

Як видно з рисунку 4.5 знос зубців прорізної фрези приводить до різкого зростання значень передусім окружної сили різання, а саме:

- максимальне значення окружної сили складає 197 Н (збільшення в 23,73 рази);

- максимальне значення радіальної сили складає 63,4 Н (збільшення в 9,19 рази);

- участь в різанні беруть одночасно не більше 4 зубців (без змін);

- час врізання фрези в заготовку – близько 17 секунд (без змін);

- статична складова окружної сили досягає 145 Н, радіальної – 43 Н;

- динамічна складова окружної сили складає 50 Н, радіальної – 19 Н.

Отже, знос зубців викликає різке збільшення сил різання без зміни кількості зубців, що одночасно виконують обробку.

Необхідно визначити значення сил різання, що будуть виникати при одночасній дії максимально допустимих значень цих двох факторів при зазначених умовах оброблення. Отримані часові реалізації наведені на рисунку 4.6.

					КРМ.133ГМмд_22.27.000 ПЗ	Аркуш
						55
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Рисунок 4.6 – Часові реалізації сил різання при фрезеруванні пазу із врахуванням
максимально допустимих значень зносу зубців фрези
та їх радіального биття

Аналізуючи рисунок 4.6, маємо:

- максимальне значення окружної сили складає 423 Н (збільшення в 50,96 рази);
- максимальне значення радіальної сили складає 194 Н (збільшення в 28,12 рази);
- участь у різанні бере лише 1 зуб (зменшення в 4 рази);
- час врізання фрези в заготовку - близько 36 секунд (збільшення в 2,13 рази);
- динамічна складова сил різання досягає їх максимальних значень.

Таким чином, комп'ютерне моделювання процесу обробки пазу прорізною фрезою виявило різке збільшення сил різання (до 50,96 рази) під впливом максимально допустимих за стандартом значень радіального биття та зносу зубців фрези. При цьому також встановлено, що радіальне биття зубців викликає різке зменшення кількості зубців, які одночасно беруть участь в різанні, та різке зростання динамічної складової сил різання. Проте, вплив радіального биття зубців фрези на окружну та радіальну силу різання виявляється нерівномірним, оскільки

					КРМ.133ГМмд_22.27.000 ПЗ	Аркуш
						56
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

дещо більше зростання значень властиве для радіальної сили. Знос зубців обумовлює різке зростання статичної складової окружної сили різання. Всі ці наслідки негативно впливають на процес фрезерування пазів і можуть призвести до повної відмови інструменту за рахунок збудження згинаючих коливань та виникнення надмірних напружень в диску фрези від дії сил різання.

Вплив характеристик оброблюваного матеріалу на величину та співвідношення складових сили різання

Відповідно до математичної моделі процесу оброблення дисковими фрезами [55] на значення сил різання впливають такі механічні властивості матеріалу заготовки як дійсна межа міцності при розтягу, межа текучості, умовна межа міцності на розтяг, відносне видовження при розтягу та ін. З метою дослідження впливу характеристик оброблюваного матеріалу на величину рівнодійної сил різання був проведений обчислювальний експеримент для умов оброблення пазу в заготовках із сталей Ст3, Ст25, 40Х, 45, А3 та 14Х17Н2 прорізною фрезою діаметром 80 мм товщиною 0,5 мм із 128 зубцями. Значення радіального биття та зносу зубців змінюються в діапазоні максимально допустимих значень. Режим різання: $n = 160$ об/хв., $S_z = 0,001$ мм/зуб, $t = 0,5$ мм. Результати експерименту в графічному вигляді представлені на рисунку 4.7.

В результаті обчислювального експерименту встановлено, що найбільші значення рівнодійної сили різання характерні для оброблення пазів в заготовках із сталі 14Х17Н2, при чому знос здійснює більший вплив на силу різання ніж радіальне биття зубців.

Вище було досліджено вплив радіального биття та зносу зубців прорізної фрези на силові характеристики процесу оброблення пазів та встановлено, що дані фактори виявляють нерівномірний вплив на окружну та радіальну складові сили різання. Відповідно до таблиці 3.2 радіальне биття зубців викликає дещо більше зростання радіальної сили різання, а знос зубців – істотне зростання окружної сили. У зв'язку з цим виникає задача дослідження впливу цих факторів на співвідношення складових сили різання P_o/P_p . З цією метою був проведений

					КРМ.133ГМмд_22.27.000 ПЗ	Аркуш
						57
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

обчислювальний експеримент для умов оброблення пазу в заготовках із сталей Ст3, Ст25, 40Х, 45, А3 та 14Х17Н2 прорізною фрезою діаметром 80 мм товщиною 0,5 мм із 128 зубцями.

Рисунок 4.7 – Залежність значення рівнодійної сили різання від радіального биття (а) та величини фаски зносу (б) зубців при обробленні пазів прорізними фрезами в заготовках із сталей різних марок

Значення радіального биття та зносу зубців змінюються в діапазоні максимально допустимих значень. Режим різання: $n = 160$ об/хв., $S_z = 0,001$ мм/зуб, $t = 0,5$ мм. Результати експерименту в графічному вигляді представлені на рисунку 4.8.

					КРМ.133ГМмд_22.27.000 ПЗ	Аркуш
						58
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Рисунок 4.8 – Залежність співвідношення окружної та радіальної сил різання від величини радіального биття та зносу зубців при обробці пазів в заготовках із сталей різних марок

Аналізуючи отримані результати, можна зробити наступні висновки:

- при збільшенні радіального биття зубців більш інтенсивно зростає радіальна сила різання; проте для умов оброблення сталі 14X17H2 інтенсивність зростання радіальної сили значно менша, ніж для інших досліджуваних марок сталей;

- при збільшенні зносу зубців від 0 до 0,1 мм найбільш інтенсивно зростає окружна сила різання, на ділянці зносу від 0,1 до 0,2 мм інтенсивність зростання окружної сили зменшується, при подальшому зростанні зносу співвідношення сил мало змінюється; такий характер зміни співвідношення складових сили різання властивий для всіх досліджуваних марок сталей.

Отже, у діапазоні досліджуваних сталей найбільші значення сил різання спостерігаються при обробці пазів у заготовках із сталі 14X17H2, крім того для цього матеріалу інтенсивність зростання радіальної сили під впливом радіального биття зубців фрези значно менша, ніж для інших досліджуваних марок сталей. Це пояснюється найбільшими значеннями для цієї сталі порівняно з іншими марками

					КРМ.133ГМмд_22.27.000 ПЗ	Аркуш
						59
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

дійсної межі міцності при розтягу, межі текучості та умовної межі міцності на розтяг.

Вплив схеми фрезерування на силові характеристики процесу оброблення пазів

У попередніх пунктах було досліджено силові характеристики процесу обробки вузьких пазів при зустрічній схемі фрезерування. Відомо, що при зустрічній схемі фрезерування навантаження на зуб зростає поступово відповідно до зміни товщини зрізу на дузі контакту. Таку схему фрезерування використовують при роботі по необробленій поверхні. Для попутного фрезерування характерні ударні навантаження на зуб фрези, що вступає в обробку відразу з максимальним значенням товщини зрізу, проте при цій схемі оброблення заготовка притискається до столу верстата, завдяки чому підвищується жорсткість інструменту та якість обробленої поверхні. Попутне фрезерування рекомендується виконувати на верстатах, що мають достатню жорсткість на вібростійкість, та відсутність зазору у спряженні ходовий гвинт-гайка поздовжньої подачі стола.

У зв'язку із несприятливими умовами різання при фрезеруванні пазів, а саме, негативним фактичним значенням переднього кута в результаті заокруглення леза різальної кромки при малих значеннях товщини зрізу, обробку вузьких пазів рекомендовано проводити на попутній схемі фрезерування при умові відповідності характеристик верстата наведеним вище вимогам.

Таким чином, виникає необхідність дослідження впливу схеми фрезерування на силові характеристики процесу оброблення пазів. З цією метою було проведено комп'ютерне моделювання процесу оброблення пазу глибиною 0,5 мм прорізною фрезою діаметром 80 мм товщиною 0,5 мм із 128 зубцями для умов попутного фрезерування. Режим різання: $n = 160$ об/хв., $S_z = 0,001$ мм/зуб, $t = 0,5$ мм. Оброблюваний матеріал – сталь 45.

Результати експерименту наведені на рисунку 4.9.

					КРМ.133ГМмд_22.27.000 ПЗ	Аркуш
						60
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Рисунок 4.9 – Часові реалізації сил різання при попутному фрезеруванні пазу із врахуванням максимально допустимих значень зносу зубців фрези (0,4 мм) та їх радіального биття (0,125 мм)

Як видно при порівнянні рисунків 4.9 та 4.6 при зміні схеми фрезерування напрямок сил подачі та відтиску змінюється на протилежний, при цьому абсолютне значення сил різання залишається незмінним, що повністю відповідає відомим твердженням.

4.2 Дослідження напруженого стану диску прорізних фрез

В роботі [54] розглядається задача визначення напружено-деформованого стану круглої пластини одиничної товщини, жорстко закріпленої по центру, навантаженої силою, дотичною до границі. Дану методику можна застосувати для визначення параметрів напружено-деформованого стану диску прорізної фрези, що обумовлений дією окружної сили різання.

Для визначення напруженого стану диску прорізних фрез від дії радіальної сили різання застосовуємо методику, що наведена у [62].

Напружений стан диску прорізних фрез від дії окружної сили різання

З метою визначення та дослідження напруженого стану диску прорізних фрез від дії окружної сили різання за допомогою програми розрахунку напружень був

					КРМ.133ГМмд_22.27.000 ПЗ	Аркуш
						61
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

проведений обчислювальний експеримент. Результати розрахунку представлені на рисунку 4.10 у вигляді поля розподілу напружень по диску фрези діаметром 80 мм, товщиною 0,5 мм, з кількістю зубців 128 при навантаженні окружною силою 8,3 Н, яка виникає під час «ідеального» процесу оброблення (без врахування радіального биття та зносу зубців фрези). При розрахунку концентрація напружень не враховувалася.

Як видно з рисунку 4.10 всі напруження різко зростають по мірі наближення до точки прикладення сили, тобто вони локалізовані в малій області, яка в певних умовах може бути небезпечною.

Рисунок 4.10 – Графік розподілу напружень по диску фрези
($D = 80$ мм, $B = 0,5$ мм, $z = 128$) при навантаженні окружною силою 8,3 Н:
а) тангенціальні напруження σ_{θ} ; б) радіальні напруження σ_r ;
в) дотичні напруження $\tau_{r\theta}$

					КРМ.133ГМмд_22.27.000 ПЗ	Аркуш
						62
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

При цьому тангенціальні напруження (розтягувальні та стискаючі) досягають максимуму в розмірі 5,51 МПа, радіальні (розтягувальні та стискаючі) – 1,37 МПа, дотичні (переважно стискаючі) – 1,72 МПа, тобто переважаючими при навантаженні окружною силою є тангенціальні напруження. При цьому екстремальні значення дотичних напружень складають 31,2%, а екстремальні значення радіальних напружень – 24,9% від відповідних значень тангенціальних напружень.

На рисунку 4.11 наведений графік розподілу еквівалентних напружень від дії окружної сили різання по диску фрези зазначеного типорозміру.

Рисунок 4.11 – Графік розподілу еквівалентних напружень по диску фрези ($D = 80$ мм, $B = 0,5$ мм, $z = 128$) при навантаженні окружною силою 8,3 Н

Максимальні еквівалентні напруження відповідно до розрахунків досягають значення 12,43 МПа.

Напружений стан диску прорізних фрез від дії радіальної сили різання

На рисунку 4.12 наведений графік розподілу напружень по диску фрези діаметром 80 мм, товщиною 0,5 мм, з кількістю зубців 128 при навантаженні радіальною силою 6,9 Н.

Як і в попередньому випадку всі напруження різко зростають по мірі наближення до точки прикладення сили. При цьому тангенціальні напруження є розтягувальними і досягають максимуму в розмірі 1,29 МПа, радіальні

					КРМ.133ГМмд_22.27.000 ПЗ	Аркуш
						63
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

(розтягувальні) – 1,36 МПа, дотичні (розтягувальні та стискаючі) – 1,12 МПа. Радіальні та тангенціальні напруження мають однаковий симетричний характер розподілу, який відрізняється від розподілу напружень для випадку навантаження окружною силою (рисунок 4.10).

Графік розподілу еквівалентних напружень по диску фрези зазначеного типорозміру від дії радіальної сили має наступний вигляд (рисунок 4.13).

Максимальні еквівалентні напруження від дії радіальної сили (6,9 Н) відповідно до розрахунків дорівнюють 4,01 МПа, що в 3,1 рази менше ніж відповідні напруження від дії окружної сили (8,3 Н).

Рисунок 4.12 – Графік розподілу напружень по диску фрези ($D = 80$ мм, $B = 0,5$ мм, $z = 128$) при навантаженні радіальною силою 6,9 Н: а) тангенціальні напруження σ_{θ} ; б) радіальні напруження σ_r ; в) дотичні напруження $\tau_{r\theta}$

					КРМ.133ГМмд_22.27.000 ПЗ	Аркуш
						64
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Рисунок 4.13 – Графік розподілу еквівалентних напружень по диску фрези ($D = 80$ мм, $B = 0,5$ мм, $z = 128$) від дії радіальної сили $6,9$ Н

Таким чином, можна зробити висновок, що за наведених умов оброблення окружна сила справляє визначальний вплив на напружений стан прорізної фрези. Проте дією радіальної сили нехтувати недопустимо, оскільки її вплив також є істотним.

Отже, радіальна та окружна сили різання характеризуються різним ступенем впливу на напружений стан диска фрези. Від дії радіальної сили переважаючими є радіальні напруження, а від дії окружної сили – тангенціальні. Більші еквівалентні напруження (в $3,1$ рази) викликає окружна сила різання.

Напружений стан диску прорізних фрез від одночасної дії радіальної та окружної сил різання

На рисунку 4.14 наведений графік розподілу еквівалентних сумарних напружень від одночасної дії окружної та радіальної сил різання по диску фрези.

Максимальні еквівалентні напруження від одночасної дії окружної ($8,3$ Н) та радіальної ($6,9$ Н) сил різання із врахуванням концентрації напружень (коефіцієнт концентрації напружень $k_{\text{конц}} = 4,89$) відповідно до розрахунків дорівнюють $54,24$ МПа. При цьому необхідно звернути увагу на зміну характеру розподілу напружень, який не є симетричним відносно площини, що проходить через вісь фрези і точку прикладення сил.

					КРМ.133ГМмд_22.27.000 ПЗ	Аркуш
						65
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Рисунок 4.14 – Графік розподілу еквівалентних сумарних напружень по диску фрези ($D = 80$ мм, $B = 0,5$ мм, $z = 128$) при одночасному навантаженні окружною ($8,3$ Н) та радіальною силами ($6,9$ Н)

Отже, при розгляді «ідеального» процесу оброблення тонкого пазу в диску фрези виникають еквівалентні сумарні напруження від дії сил різання, екстремальні значення яких досягають $54,24$ МПа. Такі значення напружень не можуть викликати настання небезпечного стану та руйнування диску фрези, оскільки значно менші за допустимі напруження (2780 МПа) [59, 76, 77]. В даному випадку фактичний коефіцієнт запасу міцності дорівнюватиме $51,25$.

Вплив радіального биття зубців прорізних фрез на напружений стан їх диску

Реальний процес різання від «ідеального» відрізняється тим, що супроводжується великою кількістю явищ, які чинять вплив на технологічну обробляючу систему. Серед них: радіальне биття, знос зубців, температурні впливи та ін.

Раніше було розглянуто вплив радіального биття та зносу зубців на силові характеристики процесу фрезерування тонких пазів, де було встановлено, що максимально допустиме радіальне биття викликає значне зменшення кількості одночасно працюючих зубців (до 1) та різке зростання окружної та радіальної сил різання (до 13 разів). Визначено, що максимально допустимий знос зубців викликає різке зростання окружної та радіальної сил різання (до 24 разів), проте не призводить до зменшення кількості одночасно працюючих зубців. Також був

					КРМ.133ГМмд_22.27.000 ПЗ	Аркуш
						66
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

досліджений одночасний вплив максимально допустимих значень радіального биття та зносу зубців фрези на силові характеристики процесу різання. При цьому встановлено, що при одночасній дії цих факторів зростання значень складових сили різання може досягати 51 разу, при цьому спостерігається різке зменшення кількості одночасно працюючих зубців (до 1).

З огляду на вищезазначене виникає необхідність дослідження впливу радіального биття та зносу зубців фрези на її напружений стан.

Визначено, що при допустимому значенні радіального биття (0,125 мм) максимальне значення окружної сили прорізної фрези ($D = 80$ мм, $B = 0,5$ мм, $z = 128$) складає 93,1 Н, максимальне значення радіальної сили – 94,7 Н, участь в різанні бере лише 1 зуб. На рисунку 4.15 наведений графік розподілу еквівалентних сумарних напружень від одночасної дії окружної та радіальної сил по диску фрези зазначеного типорозміру.

Рисунок 4.15 – Графік розподілу еквівалентних сумарних напружень по диску фрези ($D = 80$ мм, $B = 0,5$ мм, $z = 128$) при одночасному навантаженні окружною (93,1 Н) та радіальною силами (94,7 Н) різання, які обумовлені радіальним биттям зубців (0,125 мм)

У даному випадку максимальні еквівалентні напруження від одночасної дії окружної та радіальної сил різання із врахуванням концентрації напружень відповідно до розрахунків дорівнюють 706,12 МПа, що в 13,02 рази перевищує

					КРМ.133ГМмд_22.27.000 ПЗ	Аркуш
						67
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

відповідне значення напружень для зазначених умов оброблення, проте без врахування радіального биття. При цьому фактичний коефіцієнт запасу міцності дорівнюватиме 3,94.

Дослідження впливу зносу зубців прорізних фрез на напружений стан їх диску

Визначимо вплив зносу зубців на напружений стан фрези зазначеного типорозміру для аналогічних умов оброблення. Раніше визначено, що збільшення зносу зубців (знос 0,4 мм) фрези приводить до кардинального зростання значень складових сил різання, а саме: максимальне значення окружної сили складає 197 Н, максимальне значення радіальної сили – 63,4 Н. Таким чином переважає окружна сила різання. На рисунку 4.16 наведений графік розподілу еквівалентних сумарних напружень по диску фрези від дії сил різання, що обумовлені зносом зубців.

Рисунок 4.16 – Графік розподілу еквівалентних сумарних напружень по диску фрези ($D = 80$ мм, $B = 0,5$ мм, $z = 128$) при одночасному навантаженні окружною (197 Н) та радіальною силами (63,4 Н), які викликані зносом зубців

Для зазначеного випадку максимальні еквівалентні напруження від одночасної дії окружної та радіальної сил різання із врахуванням концентрації напружень відповідно до розрахунків дорівнюють 1290,8 МПа, що в 23,8 рази перевищує відповідне значення напружень для зазначених умов оброблення, проте без врахування зносу зубців. При цьому фактичний коефіцієнт запасу міцності дорівнюватиме 2,15, що менше за прийнятий коефіцієнт для загального

					КРМ.133ГМмд_22.27.000 ПЗ	Аркуш
						68
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

машинобудування (2,5) [57, 78]. Таким чином, при зазначених умовах фреза працюватиме з пониженим запасом міцності, що може призвести до руйнування зубця і викликати поломку диску фрези. Це виявляється недопустимим з огляду на питання безпеки виробництва.

Отже, був досліджений окремий вплив на напружений стан тонкої прорізної фрези радіального биття та зносу зубців. Виникає необхідність визначення напруженого стану фрези при одночасній дії цих двох факторів.

Дослідження одночасного впливу радіального биття та зносу зубців прорізних фрез на напружений стан їх диску

Комп'ютерне моделювання процесу оброблення пазу прорізною фрезною ($D = 80$ мм, $B = 0,5$ мм, $z = 128$) виявило різке збільшення сил різання (до 51 разу) під впливом максимально допустимих за стандартами значень радіального биття та зносу зубців фрези. При цьому максимальне значення окружної сили складає 423 Н, максимальне значення радіальної сили складає 194 Н, участь в різанні бере лише 1 зуб.

На рисунку 4.17 наведений графік розподілу еквівалентних сумарних напружень по диску прорізної фрези від дії окружної та радіальної сил різання при одночасному впливі радіального биття та зносу зубців.

Рисунок 4.17 – Графік розподілу еквівалентних сумарних напружень по диску фрези ($D=80$ мм, $B=0,5$ мм, $z=128$) при одночасному навантаженні окружною (423 Н) та радіальною силами (194 Н), які викликані одночасним впливом радіального биття та зносу зубців

					КРМ.133ГМмд_22.27.000 ПЗ	Аркуш
						69
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

В даному випадку максимальні еквівалентні напруження від одночасної дії окружної та радіальної сил різання із врахуванням концентрації напружень відповідно до розрахунків дорівнюють 2857,5 МПа, що в 54,13 рази перевищує відповідне значення напружень для зазначених умов оброблення, проте без врахування радіального биття і зносу зубців. При цьому фактичний коефіцієнт запасу міцності дорівнюватиме 0,973, тобто в зоні стружкових канавок виникнуть напруження, які перевищують межу міцності інструментальної сталі. Отже, за даних умов оброблення фреза втрачатиме працездатність внаслідок руйнування (таблиця 4.3).

Таблиця 4.3 – Вплив радіального биття та зносу зубців на напружено-деформований стан диску прорізної фрези (D=80 мм, B=0,5 мм, z=128, $S_z = 0,001$ мм/зуб, n = 160 об/хв., t = 0,5 мм, заготовка сталь – 45)

№ з/п	Радіальне биття зубців, мм	Знос зубців, мм	Максимальні еквівалентні напруження, МПа	Коефіцієнт запасу міцності
1	0	0	54,24	51,25
2	0,125	0	706,12	13,02
3	0	0,4	1290,8	2,15
4	0,125	0,4	3200	0,86

Вплив величини зношування фрези

Критерієм затуплення відповідно до ГОСТ 2679 [11] є фаска зносу по задній поверхні зубців прорізних фрез, максимально допустиме значення якої для фрез діаметром до 63 мм складає 0,2 мм, для фрез діаметром більше 63 мм – 0,4 мм. Критерій затуплення за стандартом визначається лише діаметром фрези і не враховує її товщини та кількості зубців.

Нами був досліджений напружений стан диску прорізних фрез від впливу сил різання із врахуванням радіального биття та зносу зубців. Розрахунки показали, що

					КРМ.133ГМмд_22.27.000 ПЗ	Аркуш
						70
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

при одночасному впливі зазначених факторів в межах їх допустимих значень в зоні стружкових канавок диска фрези можуть виникати напруження, які значно перевищують граничні, що в свою чергу може викликати повну відмову інструменту. Таким чином, постає задача уточнення критерію зносу прорізних фрез в залежності від радіального биття зубців.

За допомогою запропонованого методу визначення напруженого стану диску прорізних фрез був проведений розрахунок еквівалентних напружень в зоні стружкових канавок фрез різних типорозмірів для різних умов оброблення.

На рисунку 4.18 наведений графік залежності максимальних еквівалентних напружень від величини зносу зубців при різних значеннях їх радіального биття для прорізної фрези ($D = 80$ мм, $B = 0,5$ мм, $z = 128$), розрахунки виконані для умов обробки, які рекомендовані ГОСТ 2679-93 [11] для випробувань. Штриховою лінією на графіку позначено граничне допустиме значення еквівалентних напружень, яке визначене із умови забезпечення запасу міцності у розмірі 2,5.

Аналізуючи отриману графічну залежність, можна зробити наступні висновки про взаємний вплив зносу та радіального биття зубців на напружений стан в зоні стружкових канавок фрези зазначеного типорозміру:

- при відсутності радіального биття зубців максимальні еквівалентні напруження в зоні стружкових канавок диска фрези досягають граничного допустимого значення при величині зносу по задній поверхні 0,3 мм;
- при розмірі радіального биття 0,02 мм максимальні еквівалентні напруження досягають граничного допустимого значення при величині зносу 0,16 мм;
- при розмірі радіального биття 0,04 мм – при величині зносу 0,12 мм;
- при розмірі радіального биття 0,06 мм – при величині зносу 0,11 мм;
- при розмірі радіального биття 0,08 мм – при величині зносу 0,1 мм;
- при розмірі радіального биття 0,1 мм – при величині зносу 0,95 мм;
- при розмірі радіального биття 0,125 мм – при величині зносу 0,09 мм.

					КРМ.133ГМмд_22.27.000 ПЗ	Аркуш
						71
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Рисунок 4.18 – Залежність максимальних еквівалентних напружень від величини зносу зубців при різних значеннях їх радіального биття для прорізної фрези
($D = 80$ мм, $B = 0,5$ мм, $z = 128$)

Таким чином, тонка прорізна фреза зазначеного типорозміру може втрачати працездатність в результаті руйнування раніше ніж досягне критичного значення критерію зносу зубців (0,4 мм).

Проведені розрахунки свідчать про необхідність врахування дійсного значення радіального биття під час експлуатації тонких прорізних фрез для визначення допустимого значення зносу.

На рисунках 4.19 та 4.20 наведені графіки залежності максимальних еквівалентних напружень в зоні стружкових канавок від величини зносу зубців при різних значеннях їх радіального биття для прорізних фрез різних типорозмірів.

На основі отриманих результатів можна зробити наступні висновки.

Для прорізної фрези ($D=80$ мм, $B=1,0$ мм, $z=100$.) виходячи із умови міцності диску в зоні стружкових канавок при різних значеннях радіального биття зубців величина фаски зносу зубців повинна знаходитися в межах від 0,1 до 0,34 мм (рисунок 4.19, а), що менше критичного значення фаски зносу зубців, що

					КРМ.133ГМмд_22.27.000 ПЗ	Аркуш
						72
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

рекомендоване стандартом (0,4 мм).

Для прорізної фрези ($D=80$ мм, $B=2,0$ мм, $z=40$), що належить до типу 2 (з середнім зубом) (рисунок 4.19, б) відповідна величина фаски зносу зубців не повинна бути меншою за 0,19 мм. Таким чином, критичне значення фаски зносу зубців (0,4 мм) відповідає умові міцності лише при величині радіального биття зубців до 0,02 мм.

Рисунок 4.19 – Залежність максимальних еквівалентних напружень в зоні стружкових канавок від величини зносу зубців при різних значеннях їх радіального биття для прорізних фрез різних типорозмірів:

- а) $D = 80$ мм, $B = 1,0$ мм, $z = 100$; б) $D = 80$ мм, $B = 2,0$ мм, $z = 40$;
- в) $D = 100$ мм, $B = 0,5$ мм, $z = 160$; г) $D = 100$ мм, $B = 1,0$ мм, $z = 128$

					КРМ.133ГМмд_22.27.000 ПЗ	Аркуш
						73
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Рисунок 4.20 – Залежність максимальних еквівалентних напружень в зоні стружкових канавок від величини зносу зубців при різних значеннях їх радіального биття для прорізних фрез різних типорозмірів:

а) $D = 63$ мм, $B = 0,3$ мм, $z = 128$; б) $D = 63$ мм, $B = 1,0$ мм, $z = 100$;

в) $D = 63$ мм, $B = 2,0$ мм, $z = 40$

Для прорізної фрези ($D=100$ мм, $B=0,5$ мм, $z=160$) (рисунок 4.19, в) допустиме значення фаски зносу зубців повинне знаходитися в межах від 0,08 до 0,28 мм. Таким чином, відповідно до умови міцності навіть при відсутності радіального биття зубців допустиме значення фаски зносу складає 70% від відповідного критичного значення (0,4 мм).

					КРМ.133ГМмд_22.27.000 ПЗ	Аркуш
						74
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для прорізної фрези ($D=100$ мм, $B=1,0$ мм, $z=128$) (рисунок 4.19, г) величина фаски зносу зубців повинна знаходитися в межах від 0,1 до 0,28 мм.

Для прорізної фрези ($D=63$ мм, $B=0,3$ мм, $z=128$) (рисунок 4.20, а) величина фаски зносу зубців повинна знаходитися в межах від 0,015 до 0,2 мм. Тобто, критичне значення фаски зносу зубців (0,2 мм) відповідає умові міцності лише при відсутності радіального биття зубців, що є практично неможливим.

Для прорізної фрези ($D=63$ мм, $B=1,0$ мм, $z=100$) (рисунок 4.20, б) відповідна величина фаски зносу зубців повинна дорівнювати 0,03 мм і більше. Таким чином, критичне значення фаски зносу зубців (0,2 мм) задовольняє умову міцності при відсутності радіального биття зубців.

Для прорізної фрези ($D=63$ мм, $B=2,0$ мм, $z=40$) (тип 2, з середнім зубом) (рисунок 4.20, в) максимально допустиме значення фаски зносу зубців складає 0,12 мм і більше. Таким чином, критичне значення фаски зносу зубців (0,2 мм) задовольняє умову міцності при величині радіального биття зубців до 0,04 мм.

Отже, аналізуючи вплив радіального биття та зносу зубців на міцність диску прорізних фрез в зоні стружкових канавок, можна прийти до висновку, що міцність диску фрези наряду із режимами різання визначається також її конструктивними параметрами. Чутливість до впливу зазначених чинників збільшується із зростанням діаметру, зменшенням товщини диску та збільшенням кількості зубців, тобто в найбільш несприятливих умовах працюють тонкі фрези з дрібним зубом. Вони можуть втрачати працездатність в результаті руйнування значно раніше ніж досягнуть критичного значення критерію зносу зубців. У зв'язку з цим необхідно призначати критерії зносу зубців, які б враховували чутливість фрез до радіального биття. При умові неможливості компенсування радіального биття різальних кромek зубців (фрези з шпонковим пазом, неточність технологічної обробляючої системи та ін.) такий спосіб підвищення працездатності прорізних фрез є найбільш простим і ефективним.

Запропоновані критичні значення критеріїв зносу були розраховані на основі дослідження напруженого стану диску прорізних фрез в зоні стружкових канавок

					КРМ.133ГМмд_22.27.000 ПЗ	Аркуш
						75
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

від впливу сил різання. Проте необхідно звернути увагу на досить високі значення радіальних сил, що виникають під час роботи фрези. Як відомо, тонкі диски здатні втрачати плоску форму рівноваги від впливу радіальної сили. У зв'язку з цим постає задача визначення критичного значення радіальної сили різання, яка здатна викликати втрату фрезою стійкості.

Визначення напруженого стану прорізних фрез в зоні стружкових канавок методом скінченних елементів

З метою перевірки адекватності отриманих аналітичних залежностей для визначення напружень в зоні стружкових канавок диску прорізної фрези від дії сил різання було здійснене комп'ютерне моделювання напруженого стану в цій зоні за допомогою програми SolidWorks Simulation, що ґрунтується на методі скінченних елементів.

Раніше було визначено, що під впливом максимально допустимих значень радіального биття кількість зубців, що беруть участь у різанні в процесі оброблення пазів тонкими прорізними фрезами з дрібним зубом, може зменшуватися до 1, при цьому зростання сил різання може досягати 13 разів. Таким чином, все зусилля різання буде прикладене до одного зубця. Результат моделювання напруженого стану диску фрези ($D=80$ мм, $B=0,5$ мм, $z=128$) в зоні стружкових канавок при рекомендованих режимах різання наведений на рисунку 4.21 (а).

З рисунку 4.21, а, видно, що еквівалентні напруження в зоні стружкових канавок при навантаженні незношеного зуба прорізної фрези окружною силою у розмірі 93,1 Н та радіальною силою 94,7 Н досягають значення 616,44 МПа. При цьому відносне відхилення між значеннями, що отримані аналітичним та численним методами складає 9,9%.

Також раніше було показано, що максимально допустимі значення фаски зносу зубців викликають різке зростання значень складових сили різання. Для цього випадку поле розподілу напружень в зоні стружкової канавки найбільш навантаженого зубця отримає вигляд (рисунок 4.21, б). З рисунку видно, що при

					КРМ.133ГМмд_22.27.000 ПЗ	Аркуш
						76
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

навантаженні зношеного зуба (фаска зносу 0,4 мм) прорізної фрези ($D=80$ мм, $B=0,5$ мм, $z=128$) окружною силою у розмірі 197 Н та радіальною силою 63,4 Н еквівалентні напруження в зоні стружкової канавки досягають значення 1126,87 МПа. При цьому відносне відхилення між значеннями, що отримані аналітичним та численним методами складає 12,7%.

Рисунок 4.21 – Напружений стан прорізної фрези ($D=80$ мм, $B=0,5$ мм, $z=128$):
а) при радіальному битті зубців 0,125 мм; б) при фасці зносу зубців 0,4 мм;
в) при радіальному битті зубців 0,125 мм та фасці зносу зубців 0,4 мм

					КРМ.133ГМмд_22.27.000 ПЗ	Аркуш
						77
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

При одночасному впливі максимально допустимих значень радіального биття та зносу зубців напружений стан прорізної фрези ($D=80$ мм, $B=0,5$ мм, $z=128$) в зоні стружкових канавок матиме вигляд (рисунок 4.21, в). В цьому випадку величина напружень в зазначеній області складає 2841,6 МПа, а відносне відхилення між значеннями, що отримані аналітичним та численним методами, при цьому складає 11,2 %.

Таким чином, отримані за допомогою програми SolidWorks значення напружень узгоджуються із значеннями, отриманими за допомогою методик визначення напружень в диску прорізної фрези. Відносне відхилення при цьому не перевищує 12,7%.

Необхідно зазначити, що математичний апарат програми SolidWorks забезпечує розрахунок напружень за критерієм Мізеса, який не враховує таку властивість загартованої інструментальної сталі Р6М5, як різні значення межі міцності на розтяг і стиск. Крім того, як було зазначено вище метод скінченних елементів є наближеним методом розрахунку і характеризується цілим рядом похибок. З огляду на це, адекватність отриманих аналітичних залежностей для визначення напружень в довільній точці диску прорізної фрези можна вважати підтвердженою.

4.3 Експериментальні дослідження складових сили різання в процесі оброблення пазів прорізними фрезами

Вимірювалися сила подачі P_s та сила відтиску P_n (таблиця 4.4), векторна сума яких дорівнює векторній сумі окружної та радіальної сил різання. В експерименті брали участь стандартні фрези з дрібним зубом діаметром 63 та 80 мм товщиною від 0,3 до 1 мм (всього 18 фрез шести типорозмірів).

Умови оброблення обиралися відповідно до рекомендацій розділу 6 "Методи випробувань" ГОСТ 2679 [11]. Було проведено 3 серії паралельних дослідів з фіксацією фактичних значень сумарного радіального биття зубців.

					КРМ.133ГМмд_22.27.000 ПЗ	Аркуш
						78
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Експериментальні значення складових сили різання визначалися як середнє арифметичне за паралельними дослідями.

Таблиця 4.4 – Результати експериментальних досліджень

№ дослідю	Умовне позначення фрез	Режими різання				δ , мм	Сили різання					
		n, об/хв	S_{xv} , мм/хв	S_z , мм/зуб	t, мм		$P_{не}$, Н	$P_{пр}$, Н	$\epsilon_{пр}$, %	$P_{се}$, Н	$P_{сп}$, Н	$\epsilon_{сп}$, %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	1	200	28	0,001	0,3	0,45	22,3	20,2	9,42	19,8	19,2	3,03
2						0,42	21,6	19,8	8,33	21,1	18,9	10,43
3						0,44	19,8	20	1,01	18,7	19	1,6
4	2	200	28	0,0014	0,6	0,43	79,7	76,3	4,27	95,1	90,4	4,94
5						0,4	78,2	75,7	3,2	95	87,7	7,68
6						0,44	81,4	78,9	3,07	97,3	92,2	5,24
7	3	200	45	0,0023	1,0	0,46	124,9	130,2	4,24	157,2	168,3	7,06
8						0,44	121,1	128,3	5,95	150,7	160,1	6,24
9						0,43	116,6	118,8	1,89	143,4	147,4	2,79
10	4	160	28	0,0014	0,5	0,53	82,5	77,4	6,18	80,7	74,3	7,93
11						0,5	80,7	78,1	3,22	79,4	77,1	2,9
12						0,59	86,4	76,3	11,68	83,5	78,8	5,63
13	5	200	110	0,004	0,8	0,40	80,2	78,6	2	114,1	106,7	6,49
14						0,49	88,7	77,2	11,9	120,3	112,5	6,48
15						0,46	86,4	79,9	7,52	118,4	108,3	8,53
16	6	250	160	0,0064	1,0	0,52	86,9	90,4	4,03	130,7	145,2	11,1
17						0,48	82,6	88,2	6,78	122,9	131,4	6,92
18						0,45	78,3	85,9	9,7	112,4	117,8	4,8

Порівняння розрахункових та експериментальних значень сил різання

здійснювалося за їх середніми значеннями протягом періоду усталеного фрезерування. Результати експерименту наведені на рисунку 4.22.

Рисунок 4.22 – Результати розрахункового та експериментального визначення сил різання в процесі оброблення пазів прорізними фрезами

(P_s – сила подачі, P_n – сила відтиску): 1 – Ø 63 мм, $B = 0,3$ мм, $z = 128$;
 2 – Ø 63 мм, $B = 0,6$ мм, $z = 100$; 3 – Ø 63 мм, $B = 1$ мм, $z = 100$; 4 – Ø 80 мм,
 $B = 0,5$ мм, $z = 128$; 5 – Ø 80 мм, $B = 0,8$ мм, $z = 128$;
 6 – Ø 80 мм, $B = 1$ мм, $z = 100$.

Відносні відхилення розрахункових та експериментальних значень сили подачі та сили відтиску визначалися за формулами [55]:

$$\varepsilon_{n_p} = \frac{2 \cdot |P_{n_e} - P_{n_p}|}{(P_{n_e} + P_{n_p})} \cdot 100\%, \varepsilon_{s_p} = \frac{2 \cdot |P_{s_e} - P_{s_p}|}{(P_{s_e} + P_{s_p})} \cdot 100\%. \quad (4.1)$$

					КРМ.133ГМмд_22.27.000 ПЗ	Аркуш
						80
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

В результаті експерименту була підтверджена адекватність модулю розрахунку сил різання пакету прикладних програм імітаційної моделі процесу оброблення дисковими фрезами, оскільки відносне відхилення між розрахунковими та експериментальними усередненими значеннями сил різання не перевищувало 11,9%. Таке значення відхилення можна вважати задовільним з огляду на складність процесу різання та велику кількість факторів, що на нього впливають.

Висновки до розділу 4

1 На силові характеристики процесу оброблення пазів тонкими прорізними фрезами з дрібним зубом при рекомендованих умовах експлуатації найбільший вплив чинять радіальне биття зубців, що може викликати зменшення кількості одночасно працюючих зубців до 1, та їх знос. В результаті комп'ютерного моделювання процесу фрезерування пазів в деталях з конструкційних сталей встановлено, що при максимально допустимих стандартами значеннях радіального биття (до 0,125 мм) та зносу зубців (до 0,4 мм) в залежності від режимів різання зростання значення окружної сили різання може досягати 51 разу, радіальної сили – 28 разів. При сумісному впливі на зусилля різання радіального биття та зносу зубців, на інтенсивність зростання радіальної сили більший вплив чинить величина радіального биття, а окружної сили – величина фаски зносу зубців.

2 За допомогою інженерної методики визначення напружень в диску фрези від одночасної дії окружної та радіальної сил різання визначено розрахункові значення нормальних, дотичних, еквівалентних та сумарних еквівалентних напружень в довільній точці диска прорізної фрези.

3 На основі моделювання процесу оброблення пазів прорізними фрезами показано, що параметри напружено-деформованого стану диску прорізних фрез від дії сил різання залежать від конструктивних та геометричних параметрів фрези, режимів різання, зносу та радіального биття зубців, фізико-механічних

					КРМ.133ГМмд_22.27.000 ПЗ	Аркуш
						81
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

властивостей матеріалу оброблюваної деталі.

4 Запропоновано програмне забезпечення для розрахунку напружень в диску тонкої прорізної фрези, що обумовлені дією окружної та радіальної сил різання, яке враховує концентрацію напружень в зоні стружкових канавок.

5 У результаті обчислювального експерименту на основі дослідження параметрів напружено-деформованого стану прорізних фрез обґрунтовано допуск фаски зносу по задній поверхні зубців для фрез різних типорозмірів із врахуванням радіального биття зубців.

6 Встановлено, що значення напружень в довільній точці диску прорізної фрези, що визначені за допомогою отриманих аналітичних залежностей, узгоджуються з результатами, отриманими за допомогою численних методів.

7 В результаті лабораторної перевірки підтверджена адекватність модулю розрахунку сил різання пакету прикладних програм імітаційної моделі процесу оброблення дисковими фрезами. Відносне відхилення між експериментальними та розрахунковими значеннями сил різання не перевищує 11,9%.

					КРМ.133ГМмд_22.27.000 ПЗ	Аркуш
						82
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 5. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РОЗРОБОК

5.1 Економічна ефективність впровадження результатів досліджень

Головними факторами з точки зору економічної ефективності від впровадження запропонованої методики у виробництво є: скорочення термінів і витрат на освоєння нової техніки, зменшення витрат, пов'язаних з відпрацюванням технологічних процесів виготовлення деталей і складання виробів, підвищення надійності, довговічності та експлуатаційної придатності виробів (таблиця 5.1). Скорочення термінів створення нової техніки має важливе економічне значення. Тривалі терміни розробки та освоєння нової продукції знижують ефективність суспільного виробництва.

По-перше, подовження термінів впровадження нових розробок у виробництво знижує ефективність вкладених коштів, заморожує їх, зменшує можливий приріст національного доходу.

По-друге, уповільнення періоду освоєння нової техніки призводить до того, що ця техніка застаріває ще до того, як починається її експлуатація, вона не дає очікуваного економічного ефекту.

По-третє, подовження строків освоєння наукових досягнень веде до того, що народне господарство не має того потенційного економічного ефекту, який міг би бути отриманий при своєчасному впровадженні нової техніки.

Зосереджуючи значні трудові, матеріальні та грошові ресурси, сфера підготовки виробництва впливає на ефективність роботи підприємств за рахунок кращого використання цих ресурсів, забезпечення високих темпів створення нових видів техніки при мінімальних витратах живої та уречевленої праці.

Підготовка виробництва впливає на рівень ефективності суспільного виробництва тим, що створює нову високоефективну продукцію та методи її виготовлення.

					КРМ.133ГМмд_22.27.000 ПЗ	Аркуш
						83
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 5.1 – Порівняння методів роботи технологів із точки зору їх ефективності

Основні фактори, що впливають на економічну ефективність	Традиційний метод роботи технолога	Застосування комп'ютерного аналізу
	1 варіант	2 варіант
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
Продуктивність праці технолога	нижче	вище
Якість розробки технологічних процесів (зменшення технологічних помилок)	нижче	вище
Оптимізація технологічних процесів (режими різання та інші технологічні умови обробки)	звичайно не виконуються	можлива
Зниження термінів технологічної підготовки виробництва нових деталей та виробів	ні	так
Терміни проектування та виготовлення зразків нової продукції	більше	менше
Витрати на гарантійний ремонт виробів, що уведені в експлуатацію	більше	менше
Гнучке керування ходом технологічного процесу	не передбачено	передбачено
Витрати часу на відпрацювання та перевірку режимів різання для нових деталей	значні, часто потрібна пробна партія	менше, пробна партія може не виготовлятися

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Продовження таблиці 5.1

1	2	3
Кількість баракової продукції та продукції, що потребує операції доведення	більше	менше
Особливості процесу складання виробів	тривалість процесу, необхідність підбору деталей, пригонка, проблеми стабільності деталей при експлуатації	висока продуктивність, без необхідності, пригонка, виключення проблем стабільності деталей під час експлуатації
Зниження трудомісткості робіт при впровадженні методик автоматизованих розрахунків у виробництво	До 40%	

Розглянемо в чому виражається ефект від впровадження розрахункової методики в існуючі САПР системи і її використання в процесі технологічної підготовки виробництва. Припустимо, що на підприємстві вже є автоматизоване робоче місце технолога, оснащене необхідним обладнанням і програмним забезпеченням. Економічну ефективність від вдосконалення організації підготовки виробництва за рахунок окремих факторів, слід визначити розрахунками.

Економічний ефект від зниження витрат на підготовку виробництва E може бути визначений за наступною формулою:

$$E = \frac{P \cdot L \cdot t}{100} - \left(K_e + \frac{H}{100} \right) \cdot K, \quad (5.1)$$

де P – кількість працівників, зайнятих підготовкою виробництва, осіб;

L – середньорічна заробітна плата працівника з нарахуваннями, грн.;

t – зниження трудомісткості підготовки виробництва, %;

K_e – нормативний коефіцієнт економічної ефективності;

H – амортизація обладнання, %;

K – додаткові капітальні вкладення на здійснення заходів щодо удосконалення підготовки виробництва.

Розрахуємо передбачувану економічну ефективність від впровадження розробленої методики в процес технологічної підготовки виробництва для однієї деталі-представника. У відповідності з формулою (5.1) приймаємо наступні значення параметрів: $P = 1$ – так як розрахунок проводимо для одного робочого місця технолога; $L = 135600$ грн.; $t = 40$ % – у відповідності до таблиці 5.1, $K_e = 0,1$; $H = 13$ % – амортизація обчислювальної техніки; $K = 25000$ грн. – витрати на оснащення автоматизованого робочого місця технолога. В результаті розрахунку отримуємо

$$E = \frac{1 \cdot 135600 \cdot 40}{100} - \left(0,1 + \frac{13}{100} \right) \cdot 25000 = 48490 \text{ (грн.)}$$

Як було зазначено раніше, економічний ефект досягається шляхом механізації та автоматизації інженерної праці з використанням систем автоматизованого проектування. Основну роль при цьому відіграє зниження собівартості продукції за рахунок умовно-постійних витрат, що припадають на один виріб, внаслідок збільшення випуску нових виробів за рахунок умовно-змінних витрат, внаслідок зниження трудомісткості в період підготовки та освоєння виробництва, а також скорочення кількості браку, обсягу доводочних і ремонтних робіт. Враховуючи,

					КРМ.133ГМмд_22.27.000 ПЗ	Аркуш
						86
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

що кількість типорозмірів деталей на виробництві може досягати декількох десятків, загальний економічний ефект буде досягати декількох сотень тисяч гривень.

Впровадження розробленої методики в процес технологічної підготовки виробництва дозволить скоротити терміни і витрати на освоєння нової техніки, зменшити витрати, пов'язані із обробкою технологічних процесів виготовлення деталей та складання виробів, підвищити надійність, довговічність та експлуатаційну придатність виробів.

5.2 Безпечність праці під час виконання фрезерних робіт

Серед фрезерних верстатів найбільш поширеними є консольно-фрезерні верстати. В універсально-фрезерних консольних верстатах, а також верстатах, що мають хрестовий стіл, верстатах із програмним керуванням операція закріплення інструмента повинна бути механізована. Для кріплення інструмента засоби, що керують приводом, повинні бути розміщені у зручному положенні. У верстатах із хрестовим столом та універсальних конструкціях зупинка шпинделя без інструмента повинна не перевищувати 6 с після його вимкнення.

Задня частина шпинделя на верстатах фрезерної групи та виступаючий кінець гвинта закріплення інструмента, кінець фрезерної оправки необхідно огороджувати швидкоз'ємними кожухами. На вертикально-фрезерних верстатах під час фіксації різального інструменту необхідно застосовувати штрелелі та шомполи. Це спеціальні механічні пристосування. У разі необхідності заміни фрезерного різального інструмента доступ до таких пристосувань повинен бути доволі зручним та швидким.

Якщо вести мову про конструкції складальних інструментів, то вона повинна передбачити належну фіксацію твердосплавних пластин у корпусі. Їх випадіння під час робочого процесу неприпустиме. На початку монтажу фрези перевіряють її цілісність, правильність заточки пластин. Останні не повинні мати сколів, тріщин,

					КРМ.133ГМмд_22.27.000 ПЗ	Аркуш
						87
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

слідів припалювання. Різальні крайки повинні бути обов'язково гострими. Під час монтажу різального інструменту на фрезерному верстаті, а також заміни, необхідно застосовувати спеціальні пристосування. Вони унеможливають процес травмування рук робітника. При монтажі фрези на оправку зубці розташовуються у шаховій послідовності. Застосування еластичних прокладок є необхідним у випадку вибивання фрези зі шпинделя. Незахищеною рукою здійснювати підтримку фрези суворо забороняється.

Для запобігання прокручування шпинделя оправку чи фрезу закріплюють після вимкнення коробки швидкостей за допомогою спеціального ключа. Затиск та відтиск різального інструмента ключем на оправці вмиканням електродвигуна, залишати ключ безпосередньо на головці болта, що затягує, заборонений. Величина радіального та торцевого биття після встановлення фрези на верстат повинна не перевищувати значення 0,1 мм.

Фрезерний верстат повинен мати кінцеві вимикачі, призначені для вимикання каретки у встановленому положенні. Під час швидкісного фрезерування обов'язковим є огороження та пристосування для видалення стружки, прозорі екрани та індивідуальні засоби захисту, якими є окуляри та щитки.

Під час обробки наявна стружка, що відлітає. Її розміри можуть бути різними, так само як і температура. Відстань відльоту становить до 6 м. Тому необхідно передбачати безпеку робітника, що обслуговує фрезерний верстат, а також поруч працюючих робітників.

Для захисту від стружки при фрезеруванні необхідно застосовувати стружконапрямні пристрої, огорожі, ширми, ґрати. Для вертикально-фрезерного верстата можливе використання ланцюгового захисного пристрою. Він буде захищати робочу зону від стружки, що відлітає. У такому випадку стружка збиратиметься у певному секторі, де вона не завдасть ніякої шкоди.

Також на вертикально-фрезерних верстатах можливе застосування захисного пристрою підйомного типу, що базується на використанні двох щік з роликками. Щічки фіксуються на корпусі коробки швидкостей.

					КРМ.133ГМмд_22.27.000 ПЗ	Аркуш
						88
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Обличчя працюючого також можливо захистити екраном із органічного скла, що фіксується на кронштейні.

Заготовка, що оброблятиметься, повинна бути закріплена в місцях поближче до поверхні обробки. Для закріплення використовуються лещата та верстатні пристосування із насічкою на губках, що притискають. При використанні пневматичних, гідравлічних чи електромагнітних приводів потрібно приділяти увагу захисту трубок робочого середовища від механічних уражень.

Під час заміни, проміжного чи остаточного вимірювання обов'язково є зупинка металорізального верстату із безпечним відведення інструменту, що ріже. Робота із неогородженою фрезою можлива тільки в окулярах зі щитками. Чималу увагу необхідно приділити стружці. Вона не повинна накопичуватися на інструменті, а також оправці. Стружку необхідно періодично видаляти гачком із довжиною ручки до 250 мм.

5.3 Комплексна переробка сировини та відходів виробництва

В області технологій переробки відходів доцільно переходити на комплексні, композитні технології. Їх сутність полягає у суміщенні двох чи більше відходів в одній продукції, коли використання одного компонента у поєднанні із іншим компонентом допомагає досягти необхідної позитивної якості кінцевої продукції. Наприклад, суміщення магнезійних та алюмомістких відходів після термічної обробки дозволяє отримати якісну шпинельну продукцію.

Значні запаси промислових відходів дають можливість широко регулювати властивості композитної продукції. Комплексне використання сировини є необхідною умовою організації безвідходного виробництва продукції. Технологія цього виробництва наступна:

- видобуток сировини;
- його збагачення із розподілом на основну і вторинну;

					КРМ.133ГМмд_22.27.000 ПЗ	Аркуш
						89
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- використання основної та вторинної сировини за окремими технологічними лініями;
- Виробництво основної і вторинної продукції.

При цьому отримують наступні відходи виробництва:

- в атмосфері – вловлювання викидів, очищення димових газів та ін.;
- у гідросфері – очищення виробничої води при замкненому циклі водо обігу;
- у літосфері – відходи основного та вторинного виробництва.

Усі зазначені відходи спрямовують на виробництво нової екологічно чистої продукції високої якості за безвідходними технологіями. Зберігання промислових відходів у відвалах, шламосховищах, полігонах, закачування до надр землі повністю усувається. Не допускається забруднення поверхневих та глибинних шарів землі.

Економічно та морально заохочується впровадження безвідходних екологічно чистих технологій та використання існуючих на даний час відходів для виробництва високоякісної продукції на повністю безвідходних виробництвах.

Відомо, що для кожного виду відходів існує своя, найбільш оптимальна технологія переробки відходів.

Висновки до розділу 5

Розглянуто економічну ефективність від упровадження результатів досліджень. Визначено особливості безпечного виконання фрезерних робіт. Приділено увагу питанням захисту довкілля.

					КРМ.133ГМмд_22.27.000 ПЗ	Аркуш
						90
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

Отже, відповідно до отриманого завдання на кваліфікаційну роботу здобувача вищої освіти та за результатами її виконання зроблено наступні висновки.

1 Проведено аналіз різновидів та причин відмов тонких прорізних фрез з дрібним зубом в процесі оброблення пазів. Зважаючи на особливості роботи тонких прорізних фрез (низьку швидкість різання, малі товщини зрізу, коротку дугу контакту тощо), обґрунтовано при оцінці їх працездатності пріоритетність силового фактору, що обумовлює напружено-деформований стан диска інструменту в процесі оброблення.

2 У результаті дослідження силових характеристик процесу прорізання вузьких пазів прорізними фрезами з дрібним зубом встановлено, що під впливом максимально допустимих значень радіального биття та зносу зубців при рекомендованих режимах різання зростання значень сил різання може досягати 51 разу. При цьому кількість зубців, що беруть участь в різанні зменшується до 1, а час врізання зростає на 89%.

3 Здійснено математичне моделювання напружено-деформованого стану диску прорізних фрез від дії окружної та радіальної складових сили різання.

4 Розроблено інженерну методику визначення напружень в диску фрези, яка дозволила визначити розрахункові значення нормальних, дотичних, еквівалентних та сумарних напружень в довільній точці диска прорізної фрези. На основі моделювання процесу оброблення пазів прорізними фрезами показано, що напружено-деформований стан прорізних фрез від дії сил різання залежить від конструктивних та геометричних параметрів фрези, режимів різання, зносу та радіального биття зубців, фізико-механічних властивостей матеріалу оброблюваної деталі.

5 Використано програмне забезпечення для розрахунку напружень та фактичного коефіцієнта запасу міцності в диску тонкої прорізної фрези, що обумовлені дією окружної та радіальної сил різання, яке враховує концентрацію

					КРМ.133ГМмд_22.27.000 ПЗ	Аркуш
						91
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		