

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

МАЙДАНЮК СЕРГІЙ ВОЛОДИМИРОВИЧ



УДК 621.914.28

**РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ ВІДРІЗНИХ ФРЕЗ
З РІЗНОНАПРАВЛЕНИМИ ЗУБЦЯМИ**

Спеціальність 05.03.01 – Процеси механічної обробки, верстати та
інструменти

Автореферат
дисертації на здобуття наукового
ступеня кандидата технічних наук

Житомир – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі конструювання машин Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, доцент
Охріменко Олександр Анатолійович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»
Міністерства освіти і науки України, м. Київ
професор кафедри технології машинобудування

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Клочко Олександр Олександрович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»
Міністерства освіти і науки України, м. Харків
професор кафедри технології машинобудування
та металорізальних верстатів

кандидат технічних наук, доцент
Балицька Наталія Олександрівна,
Державний університет «Житомирська політехніка»
Міністерства освіти і науки України, м. Житомир
доцент кафедри механічної інженерії

Захист відбудеться « 17 » « вересня » 2021 р. о 10⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 14.052.02 у Державному університеті «Житомирська політехніка» за адресою: 10005, м. Житомир, вул. Чуднівська, 103, ауд. 248.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Державного університету «Житомирська політехніка» за адресою: 10005, м. Житомир, вул. Чуднівська, 103.

Автореферат розісланий « 12 » « серпня » 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
К 14.052.02, к.т.н., доц.



О.А. Громовий

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Дискові відрізні фрези знайшли широке використання при відрізанні та розрізанні заготовок різного профілю та розмірів із різних матеріалів на ручних, напівавтоматичних і автоматичних відрізних верстатах.

Операції відрізання відносяться до операцій попереднього оброблення протекторів, з підвищенням вимог до продуктивності та якості оброблених поверхонь, виникла задача розробки дискових відрізних фрез які зможуть задовольнити такі вимоги.

Таким інструментом є відрізні фрези з різнонаправленими зубцями, у яких зубці розташовуються в шаховому порядку з різним за знаком кутом нахилу зубців. Завдяки різнонаправленості, зубці розташовуються з різним кутовим кроком, який сприяє підвищенню динамічної стійкості інструментів. Схема зрізання припуску таких фрез відповідає прогресивній схемі, завдяки чому зменшуються сили різання та підвищується якість оброблення.

Тому удосконалення конструкції відрізної фрези з різнонаправленими зубцями для забезпечення підвищення продуктивності та якості оброблення є актуальною проблемою та має наукове та практичне значення.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами. Робота виконувалась на кафедрі конструювання машин Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» у відповідності до тематичного плану науково-дослідних робіт Міністерства освіти і науки України і є частиною досліджень за держбюджетними темами: № 2914-Ф «Узагальнена теорія визначення геометричних параметрів різального інструменту» (№ державної реєстрації 0106U002603); № 2828-Ф «Основи теорії проектування різальних інструментів для високошвидкісної обробки» (№ державної реєстрації 01150002354).

Мета і завдання досліджень. *Метою роботи* є розробка конструкції та визначення раціональних геометричних параметрів різальної частини дискової відрізної фрези з різнонаправленими зубцями зі швидкорізальної сталі для забезпечення підвищення продуктивності та якості обробки при відрізанні металевих заготовок.

Завдання досліджень. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- провести аналіз конструкцій, області використання, умов роботи та завантаження різальної частини дискових відрізних фрез при відрізанні металевих заготовок;
- визначити геометричні параметри дискових відрізних фрез з різнонаправленими зубцями в процесі їх роботи;
- розробити методику та дослідити завантаження різальної частини дискових відрізних фрез з різнонаправленими зубцями, при відрізанні металевих заготовок прямокутного перерізу;
- визначити граничні режими різання які забезпечують підвищення якості оброблення металевих заготовок при відрізанні металевих заготовок дисковими відрізними фрезами з різнонаправленими зубцями;
- визначити та дослідити силові характеристики та параметри якості оброблених поверхонь при відрізанні металевих заготовок дисковими відрізними фрезами з різнонаправленими зубцями;
- розробити рекомендації по вибору геометричних параметрів та режимів різання

для забезпечення підвищення продуктивності та якості обробки при відрізанні металевих заготовок дисковими відрізними фрезами з різнонаправленими зубцями;

– провести експериментальні та виробничі дослідження процесу відрізання металевих заготовок дисковими відрізними фрезами з різнонаправленими зубцями та відрізними фрезами стандартної конструкції;

– розробити рекомендації щодо умов експлуатації дискових відрізнних фрез з різнонаправленими зубцями, реалізація яких забезпечить підвищення продуктивності та якості обробки при відрізанні металевих заготовок.

Об'єкт дослідження – процес відрізання деталей дисковими відрізними фрезами.

Предмет дослідження – дискові відрізнні фрези з різнонаправленими зубцями.

Методи дослідження. Виконані дослідження базуються на теорії проектування різальних інструментів, теорії формоутворення поверхонь, методах аналітичної та диференціальної геометрії, методах математичної статистики. Достовірність розроблених теоретичних положень перевірено шляхом лабораторно-промислових випробувань.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Удосконалено теоретичні положення по розробці конструкції та геометричних параметрів різальної частини дискової відрізної фрези з різнонаправленими зубцями для оброблення металевих заготовок, за рахунок отримання на оброблених поверхнях необхідної шорсткості.

2. Удосконалено визначення геометричних параметрів різальної частини дискових відрізнних фрез з різнонаправленими зубцями для оброблення металевих заготовок в процесі їх роботи.

3. Вперше, на основі аналітичного моделювання, отримано залежності аналітичного визначення завантаження різальної кромки дискових відрізнних фрез з різнонаправленими зубцями в процесі їх роботи.

4. Вперше визначено аналітичні залежності сил різання та шорсткості оброблених поверхонь при відрізанні металевих заготовок дисковими відрізними фрезами з різнонаправленими зубцями.

Практичне значення отриманих результатів.

На основі виконаних досліджень розроблено конструкцію відрізної фрези з різнонаправленими зубцями для відрізання металевих заготовок та встановлено її раціональні геометричні параметри, які забезпечують

Розроблено методикау визначення завантаження різальної частини дискової відрізної фрези з різнонаправленими зубцями, що дозволяє визначати параметри зрізуваного шару зубців фрез, у яких різальна кромка кожного окремого зубця в групі відрізняється від інших за формою та розташуванням.

Визначено граничні режими оброблення металевих заготовок відрізними фрезами з різнонаправленими зубцями з найкращою якістю оброблених поверхонь, з умови отримання поверхні деталі з мінімальним наклепом.

На основі експериментальних досліджень процесу відрізання фрезами з різнонаправленими зубцями за допомогою математичного моделювання методом групового врахування аргументів отримано аналітичні залежності для визначення зусиль різання та параметрів якості оброблення фрезами, оптимізація яких дозволила отримати рекомендації щодо вибору раціональних режимів різання та геометричних параметрів

дискових відрізних фрез з різнонаправленими зубцями для оброблення металевих заготовок, що дозволяють підвищити продуктивність та якість обробки при відрізанні металевих заготовок.

Розроблені відрізні фрези з різнонаправленими зубцями пройшли промислову перевірку на ТОВ з П «БІБУС Україна» м. Київ, ТОВ «БІБУС МЕТАЛС» м. Київ та ПП «Адамас» м. Полтава при відрізанні профілів з екструдованого алюмінію АД31Т квадратного перерізу, сталі 45 діаметром $\varnothing 80 \dots 100$ мм та прямокутного перерізу 40×60 мм. В результаті досягнуто підвищення продуктивності в 1,2–1,3 рази та якості поверхонь в 1,2–1,4 рази в порівнянні зі стандартними фрезами (акти про практичне використання).

Результати роботи впроваджені у навчальний процес при викладанні дисциплін «Теорія формоутворення поверхонь», «Комп'ютерне моделювання», «Методологія і теорія проектування різального інструмента» та при виконанні дипломних проектів на кафедрі конструювання машин КПІ ім. Ігоря Сікорського (акт використання).

Особистий внесок здобувача. В дисертаційній роботі представлені результати теоретичних і експериментальних досліджень, що отримані автором особисто: виконано аналіз літературних джерел з досліджуваної теми; розроблено конструкцію інструменту та встановлено її геометричні параметри; визначено статичні геометричні параметри вздовж різальної кромки зубців; розроблена методика визначення завантаження різальної частини фрези в процесі її роботи.

Математичні моделі лабораторних досліджень отримані самостійно за методикою та з використанням програм, розроблених співавтором.

Формулювання теми дисертації, постановка задач досліджень та формулювання основних положень роботи виконані з д.т.н., проф. Равською Н. С., опрацювання структури та змісту роботи виконані разом з науковим керівником і базується на результатах досліджень, що опубліковані.

Апробація результатів роботи. Основні положення та результати дисертаційної роботи апробовано на конференціях: Загальноуніверситетська науково-технічна конференція молодих вчених та студентів, присвяченої дню Науки, 2013, 2014, 2015 р., Київ, Україна; Всеукраїнська молодіжна науково-технічна конференція "Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво", 2014 р., Суми, Україна; All Ukrainian Scientific and Practical Conference "Current Trends in Young Scientists' Researcher", 2015 р., Житомир, Україна; Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених та студентів "Інновації молоді - машинобудуванню", 2016 р., Київ, Україна; Міжнародна науково-технічна конференція "Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку", 2011, 2013, 2015, 2016, 2017 р., Краматорськ, Україна; Міжнародна науково-практична конференція «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем», 2016, 2017, 2018, 2019 р., Чернігів, Україна; Міжнародна науково-технічна конференція „Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта”, 2016 р., Одеса, Україна; Міжнародна науково-технічна конференція „Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта”, 2019р., Херсон, Україна; Міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених та студентів "Інновації молоді в машинобудуванні", 2019 р., Київ, Україна.

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 35 наукових праць, у тому

числі 14 статей у наукових фахових виданнях України (з них 1 стаття у фаховому виданні України категорії «А», 4 статті які додатково розкривають результати роботи), 3 статті у інших виданнях та 18 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

Обсяг і структура дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, 5 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків, викладена на 220 сторінках, включає 13 таблиць, 65 рисунків, додатки, список використаних джерел із 138 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульована мета роботи і визначені основні завдання, які необхідно вирішити для її досягнення. Визначено об'єкт, предмет і методи дослідження. Визначені наукова новизна, практичне значення отриманих результатів і особистий внесок здобувача.

У **першому розділі** проведено аналіз конструкцій різальної частини, області використання дискових відрізних фрез, та умов їх роботи, розглянуто шляхи удосконалення конструкції інструменту, особливості геометрії та завантаження різальної частини дискових відрізних фрез при відрізанні металевих заготовок.

Згідно аналізу, дискові відрізні фрези виготовляються різних конструкцій, проте стандартні конструкції відрізних фрез мають цілий ряд істотних недоліків, внаслідок чого процес стружко утворення, при різанні, проходить в складних умовах, що приводить до збільшення зусиль різання на зубцях фрези та, відповідно, поломки зубців та самої фрези.

Дослідженнями дискових відрізних та прорізних фрез присвячені роботи Лороха Р., Боронко О.О., Семьонова О.В., Панчука В.Г., Балицької Н.О. В роботах показано, що різання інструментом є переривчастим з непостійною та невеликою кількістю зубців, які одночасно працюють, з різкими коливаннями сил різання, ударними навантаженнями на зубець, що викликають згинні коливання інструменту. Таким чином, основним недоліком дискових відрізних фрез є їх невисока динамічна стійкість. Також відмічається, що з метою покращення динамічних характеристик фрез, слід зменшувати збуджуючу силу коливань, тобто силу різання, за рахунок застосування в конструкції інструмента нерівномірності кроку зубців.

В роботах Боронко О.О., Семьонова О.В., Панчука В.Г., Балицької Н.О. показано, що перспективним напрямом вдосконалення процесу відрізання заготовок дисковими фрезами, що забезпечує підвищення продуктивності та якості оброблення, є застосування прогресивної схеми зрізання припуску.

Відповідно до аналізу конструкцій різальної частини дискових відрізних фрез, складних умов їх роботи, для подальших досліджень було прийнято дискову відрізну фрезу з різнонаправленими зубцями, у яких зубці розташовуються з різним, вздовж різальної кромки, кутовим кроком, схема зрізання припуску відповідає прогресивній схемі різання, а умови роботи різальних зубців відповідають косокутному різанню.

На підставі зазначеного сформульована мета, основні завдання дисертаційного дослідження та напрямки їх вирішення.

У **другому розділі** на основі аналізу конструкцій та геометричних особливостей дискових відрізних фрез, проведена розробка конструкції та визначені геометричні параметри дискових відрізних фрез з різнонаправленими зубцями.

Проектування дискових відрізних фрез з різнонаправленими зубцями здійснюється на прикладі фрез з середнім та крупним зубцем для оброблення сталевих заготовок суцільного перерізу.

Першочерговою задачею при розробці конструкції дискової відрізної фрези є визначення її конструктивних та геометричних параметрів, які повинні контролюватися при виготовленні інструмента.

Конструктивні та геометричні параметри фрези, наведені на рис. 1, визначають розташування поверхонь різальної кромки зубця інструмента: передній γ та задній α кути, кути нахилу передньої τ_γ та задньої τ_α поверхонь до осі інструмента. Зазначені параметри проставляються на креслениках інструмента та слугують для його виготовлення та контролю.

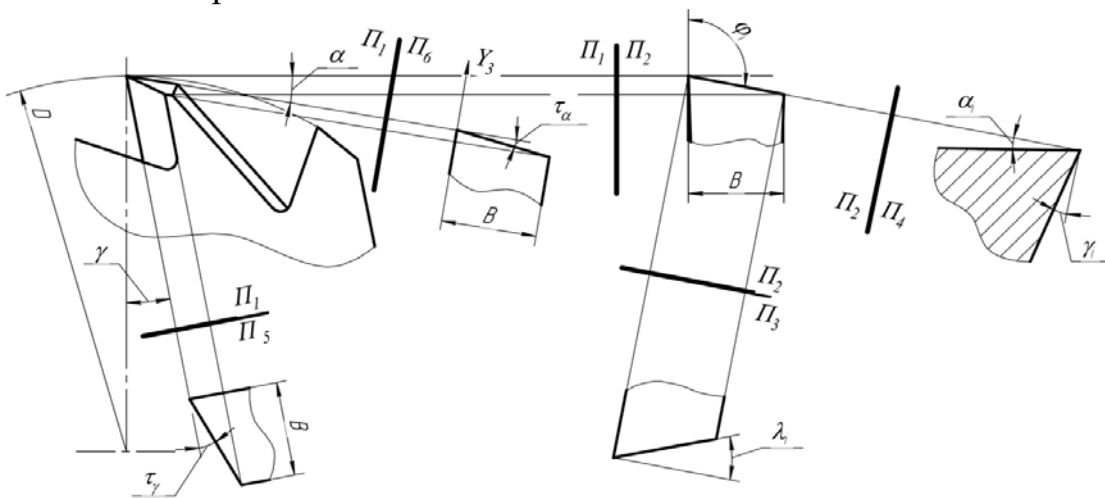


Рисунок 1– Конструктивні та геометричні параметри відрізної фрези з різнонаправленими зубцями

Особливістю фрез з різнонаправленими зубцями є розташування зубців таким чином, щоб на суміжних зубцях кут нахилу зубців ω до осі фрези мав різний знак, тобто зубці розташовуються в шаховому порядку, відповідно, вершина одного зубця знаходиться з одного торця фрези, а вершина суміжного – з іншого.

Таке розташування поверхонь дозволяє розташувати різальну кромку зубців фрези під кутами ϕ_i та λ_i , що позитивно впливає на процес різання. Розташування різальних кромки під кутом ϕ_i , причому на кожному зубці в різних напрямках, дозволяє розділити припуск на оброблення, реалізуючи прогресивну схему зрізання припуску, а під кутом λ_i – перейти від прямокутного різання до косокутного, яке дозволяє позбутися різання з тонкими зрізами, завдяки чому підвищується стійкість інструмента та покращується якість оброблених поверхонь. Таким чином дана конструкція різальної частини фрези націлена на зниження сил різання, підвищення динамічної стійкості та якості оброблених поверхонь.

Відповідно до ДСТУ 2249 та теорії проектування, геометрію інструмента визначають інструментальні головні передній γ_i та задній α_i кути, головний кут в плані ϕ_i та кут нахилу кромки λ_i (рис. 1), вплив яких на процес різання є визначеним для певних умов роботи, але не для відрізних фрез з різнонаправленими зубцями.

Геометричні параметри пов'язані між собою залежностями:

$$\operatorname{tg} \gamma = \cos \varphi_i \cdot \operatorname{tg} \lambda_i + \sin \varphi_i \cdot \operatorname{tg} \gamma_i$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\sin \alpha_i}{\cos \alpha_i \cdot \sin \varphi_i + \cos \varphi_i \cdot \sin \alpha_i \cdot \operatorname{tg} \lambda_i}$$

$$\operatorname{tg} \tau_\gamma = -\frac{\cos \varphi_i \sin \gamma_i - \cos \gamma_i \operatorname{tg} \lambda_i}{\sin \varphi_i}$$

$$\operatorname{tg} \tau_\alpha = \frac{\cos \alpha_i \cos \varphi_i - \sin \alpha_i \operatorname{tg} \lambda_i}{\sin \varphi_i}$$

Зубці фрези розташовуються таким чином, що кутовий крок є постійним в середньому перерізі фрези, що дало змогу реалізувати в конструкції інструмента нерівномірність кутового кроку зубців (рис. 2), що, як відмічалось вище, підвищує динамічну стійкість фрез в процесі їх роботи.

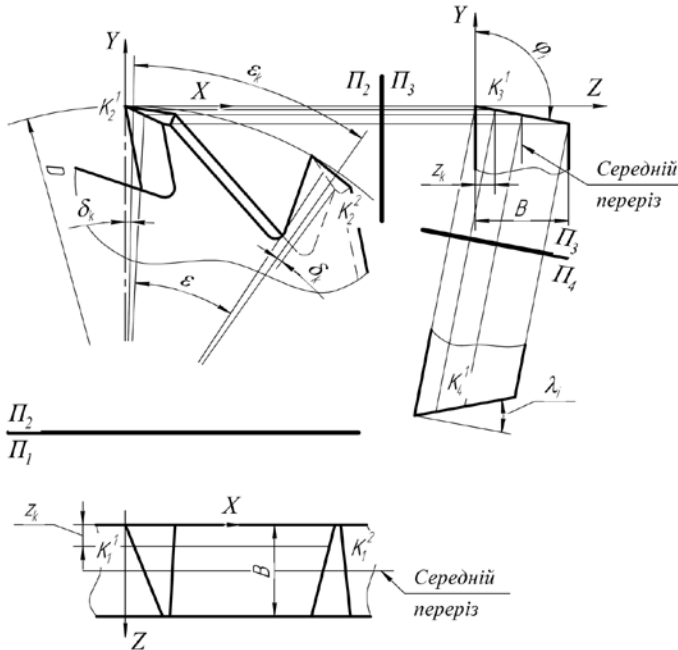


Рисунок 2 – Кутовий крок ε_k між зубцями

z_k – положення довільної точки кромки, координата різальної кромки вздовж осі фрези відносно вершини зубця, яка змінюється в межах $(0 \dots B)$.

$$\operatorname{tg} \delta_{зуб} = \frac{B \cdot \operatorname{tg} \lambda_i}{\left(\frac{D}{2} + B \cdot \operatorname{ctg} \varphi_i\right) \cdot \sin \varphi_i}$$

$$\operatorname{tg} \delta_k = \frac{z_k \cdot \operatorname{tg} \lambda_i}{\left(\frac{D}{2} + z_k \cdot \operatorname{ctg} \varphi_i\right) \cdot \sin \varphi_i}$$

Відповідно до рис. 2, величина кутового кроку на двох суміжних парах зубців буде збільшуватися між однією парою суміжних зубців та зменшуватися між іншою парою.

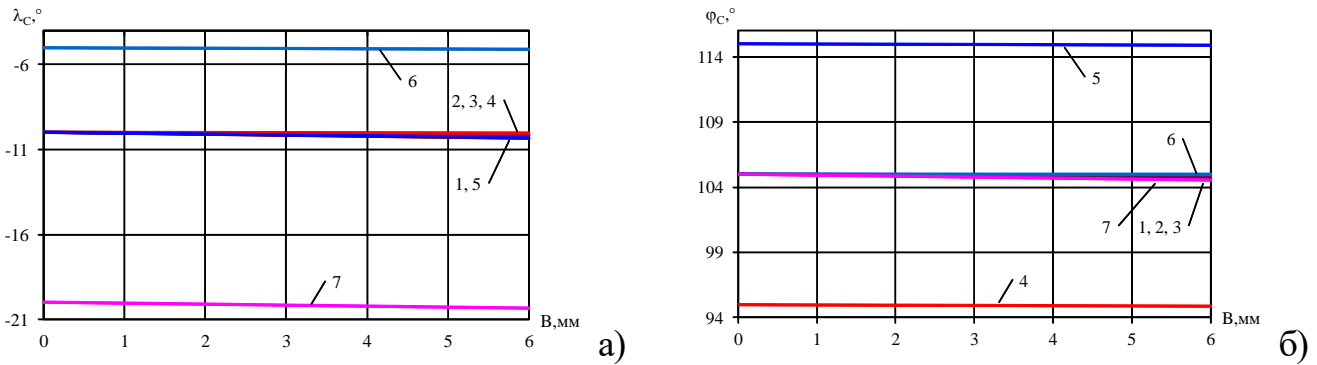
Аналіз різниці кутового кроку фрези показав, що збільшення діаметра D та кута в плані φ_i і зменшення кута нахилу кромки λ_i призводить до збільшення різниці між кутовими кутами суміжних зубців $\Delta \varepsilon_k$, тобто викликає активну зміну кроків, причому найбільше впливає кут λ_i , а найменше – кут φ_i .

Кутовий крок впливає на кількість зубців, розміри та об'єм стружкової канавки, які в свою чергу, залежать від об'єму зрізуваного шару.

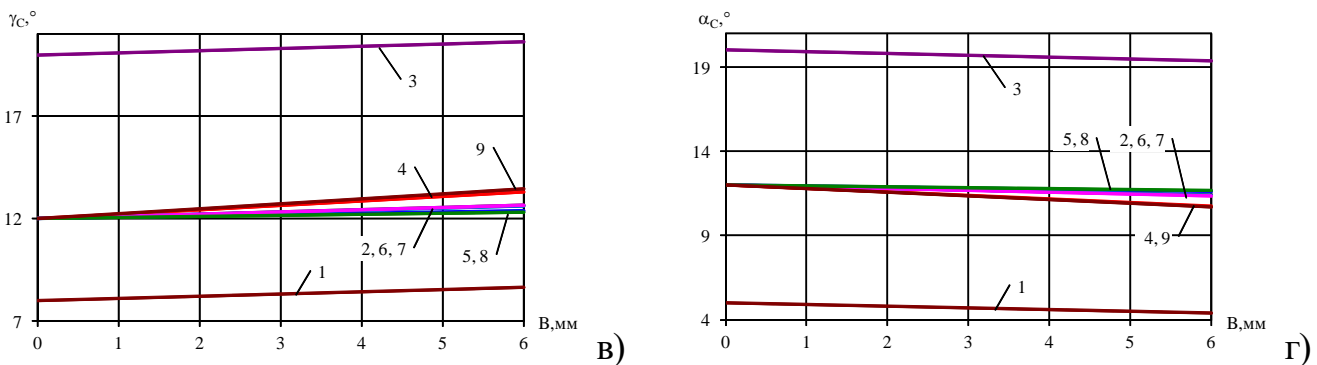
У **третьому розділі** розглянуто геометричні параметри різальної частини дискової відрізної фрези з різнонаправленими зубцями в процесі їх роботи. Оскільки швидкість руху подачі фрези незрівнянно мала, в порівнянні зі швидкості головного руху різання фрези, з достатньою точністю, можна обмежитися визначенням геометрії фрези в статичній системі координат (рис. 3).

Дослідження статичних геометричних параметрів (рис. 3) в залежності від конструктивних та геометричних параметрів фрези показали, що:

- діаметр фрези D майже не впливає на статичні геометричні параметри, в тому числі і вздовж різальної кромки фрези;
- зі збільшенням ширини фрези B збільшуються статичні геометричні параметри, що пов'язано зі збільшенням довжини різальної кромки;
- інструментальні геометричні параметри викликають пропорційне збільшення статичних геометричних параметрів, але вздовж різальної кромки фрези змінюються в межах поля допуску, що пов'язано з короткою довжиною різальної кромки.



№	1	2	3	4	5	6	7
$D, \text{мм}$	100	200	315	200			
$\varphi_i, ^\circ$	105			95	115	105	
$\lambda_i, ^\circ$	-10			-5			-20



№	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\gamma_i, ^\circ$	8	12	20	12					
$D, \text{мм}$	200		100	315	200				
$\varphi_i, ^\circ$	105			95	115	105			
$\lambda_i, ^\circ$	-10			-5			-20		

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\alpha_i, ^\circ$	5	12	20	12					
$D, \text{мм}$	200		100	315	200				
$\varphi_i, ^\circ$	105			95	115	105			
$\lambda_i, ^\circ$	-10			-5			-20		

Рисунок 3 – Статичні геометричні параметри

У четвертому розділі розглядаються питання визначення завантаження різальної кромки дискової відрізної фрези в процесі роботи.

Існуючі методики визначення параметрів зрізаного шару не дозволяють вирішити задачу для інструментів, які працюють за груповою прогресивною схемою зрізання припуску, тобто не враховують випадків, коли різальна кромка кожного окремого зубця в групі відрізняється від інших за формою та розташуванням.

Тому було розроблено методики визначення параметрів зрізаного шару на

основі 3D моделювання з використанням систем твердотільного геометричного моделювання та аналітичного моделювання.

В основі розроблених методик лежить визначення параметрів зрізуваного шару, що відокремлюється лезом за один цикл головного руху різання, з врахуванням роботи попередніх зубців.

Для визначення параметрів зрізів на основі 3D моделювання (рис. 4) вихідними даними є форма та положення різальних кромek досліджуваного та попередніх зубців. Будується об'ємна модель інструмента, вісь інструмента перпендикулярна площині XY та проходить через центр координат. Траєкторії руху досліджуваного та попереднього зубців визначаються за залежностями:

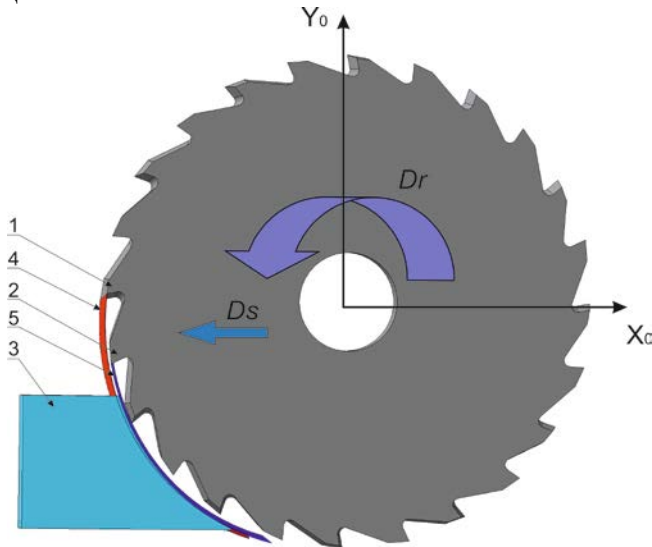


Рисунок 4 – Визначення параметрів зрізу:
1 – досліджуваний зубець; 2 – попередній зубець;
3 - заготовка; 4, 5 – поверхні різання досліджуваного та попереднього зубців.

θ_0, θ_1 – кутові параметри, що відповідають положенню досліджуваного зубця та попереднього зубця і пропорційний кількості зубів z інструмента.

Будуються траєкторії руху досліджуваного та попереднього зубців та об'єми матеріалу, які знімаються кожним зубцем, обмежені контурами заготовки.

Віднімаючи об'єм матеріалу що знімається попереднім зубцем від об'єму матеріалу, що знімається досліджуваним зубцем, отримуємо шар матеріалу, що відокремлюється лезом за один цикл головного руху різання.

Розтинаючи отриманий шар матеріалу поверхнями (рис. 5), перпендикулярними до площини різання, визначаються параметри перерізу зрізуваного шару згідно ДСТУ 2249.

– досліджуваного зубця

$$X_0 = \frac{D}{2} \cos(t + \theta_0) + \frac{S_o}{2\pi} t$$

$$Y_0 = \frac{D}{2} \sin(t + \theta_0)$$

$$Z_0 = 0$$

– попередніх зубців

$$x_0 = \frac{D}{2} \cos(t + \theta_0) + \frac{S_o}{2\pi} t$$

$$y_0 = \frac{D}{2} \sin(t + \theta_0)$$

$$z_0 = B$$

де D, B – діаметр та ширина фрези,
 S_o – подача фрези, мм/об,

t – параметр, що відповідає за рух зубця по траєкторії при обробленні,

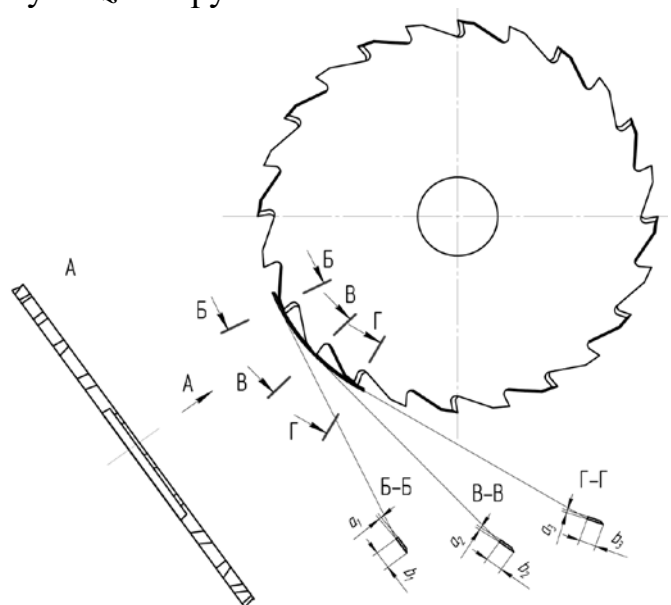


Рисунок 5 – Параметри зрізуваного шару

При визначенні параметрів зрізаного шару за допомогою аналітичного моделювання (рис. 6) необхідно знати положення різальної кромки досліджуваного та попереднього зубців фрези.

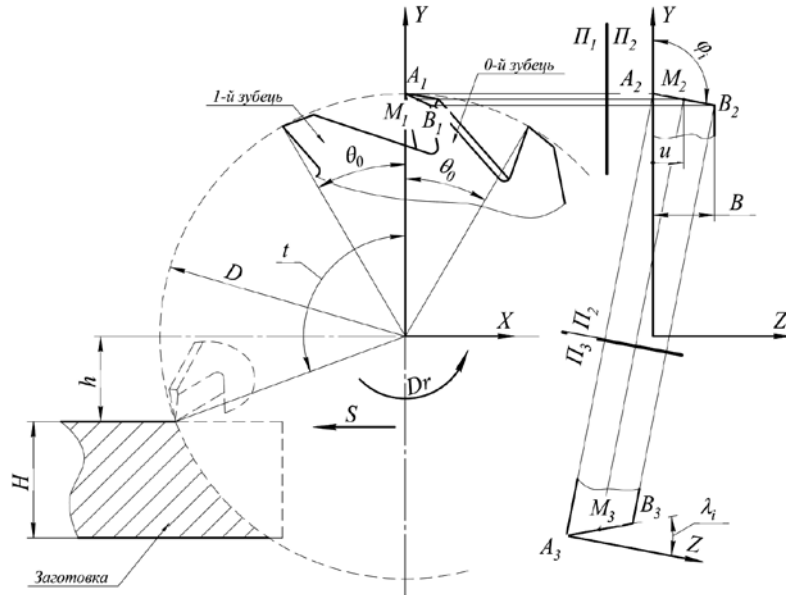


Рисунок 6 – Схема визначення параметрів зрізаного шару

Положення різальної кромки довільного зубця визначається залежністю:

$$K(u, n) = \begin{pmatrix} \frac{-u \cdot (-1)^n + B \cdot \frac{(-1)^n - 1}{2} \cdot \operatorname{tg} \lambda_i}{\sin(\varphi_i \cdot (-1)^n)} \\ \frac{D}{2} - \left(-u \cdot (-1)^n + B \cdot \frac{(-1)^n - 1}{2} \right) \cdot \operatorname{ctg} \varphi_i \\ u \\ 1 \end{pmatrix},$$

де u – параметр, що відповідає за положення точки на різальній кромці;

n – номер досліджуваного зубця, що здійснює різання.

Визначаються положення поверхонь різання, що утворюються різальними кромками зубців при їх русі в процесі різання:

$$P_n(u, t, n) = m_t(t, n) \cdot K(u, n),$$

де $m_t(t, n)$ – матриця, яка описує результуючий рух фрези в процесі роботи, обертальний рух та пов'язаний з ним поступальний рух.

Для знаходження товщини зрізаного шару в досліджуваній точці різальної кромки визначається вектор нормалі до поверхні різання. Знаючи рівняння поверхні різання при фіксованому номері досліджуваного зубця, нормаль визначається як векторний добуток рівняння поверхні різання з часткових похідних по незалежним параметрам u, t . Вектор нормалі повинен бути направлений, обов'язково, в тіло заготовки.

Рівняння нормалі до поверхні різання в довільній точці різальної кромки буде визначатися залежністю:

$$NP_n(u, t, n, l) = \begin{pmatrix} P_{nX}(u, t, n) + NP_{n0X}(u, t, n) \cdot l \\ P_{nY}(u, t, n) + NP_{n0Y}(u, t, n) \cdot l \\ P_{nZ}(u, t, n) + NP_{n0Z}(u, t, n) \cdot l \end{pmatrix},$$

де $P_{nX}(u, t, n)$, $P_{nY}(u, t, n)$, $P_{nZ}(u, t, n)$ – складові, по відповідним осям координат, поверхні різання досліджуваного зубця,

$NP_{n0X}(u, t, n)$, $NP_{n0Y}(u, t, n)$, $NP_{n0Z}(u, t, n)$ – складові, по відповідним осям координат, вектора одиничної нормалі до поверхні різання досліджуваного зубця,

l – параметр, що відповідає довжині нормалі до поверхні різання досліджуваного зубця.

Товщина зрізаного шару визначається як мінімальне значення параметру l , яке визначається з наступних залежностей:

$$a = \min(l_1, l_2, l_3, l_4) \Leftarrow \begin{cases} P_n(u_1, t_1, n+1) = NP_{n0}(u, t, n, l_1); \\ P_n(u_2, t_2, n+2) = NP_{n0}(u, t, n, l_2); \\ h = NP_{n0}(u, t, n, l_3); \\ h - H = NP_{n0}(u, t, n, l_4); \end{cases}$$

де $P_n(u, t, n)$ – рівняння поверхні різання, що утворюється різальною кромкою при її русі в процесі різання;

u_1, t_1, u_2, t_2 – незалежні параметри, що описують поверхні різання окремих зубців що приймали участь в процесі різання раніше.

Аналіз форми та товщини зрізаного шару зубцем в процесі роботи (рис. 7) показав, що зубець працює не всією довжиною різальної кромки, максимальна ширина різання складає $0,55B$.

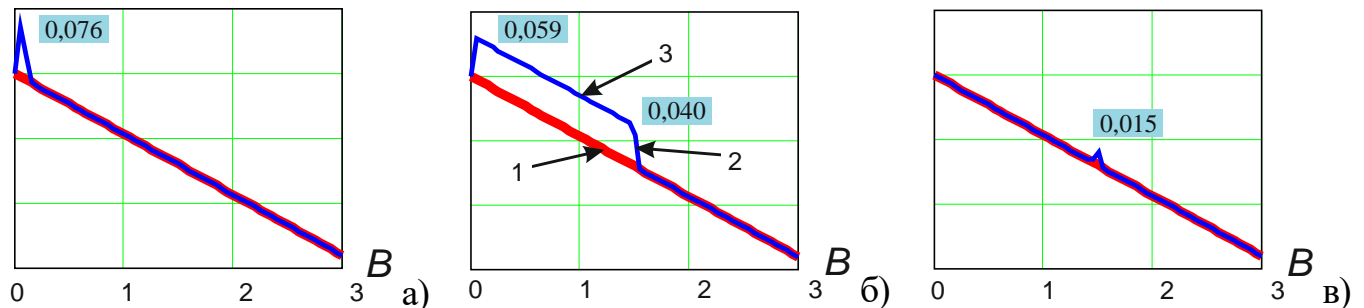


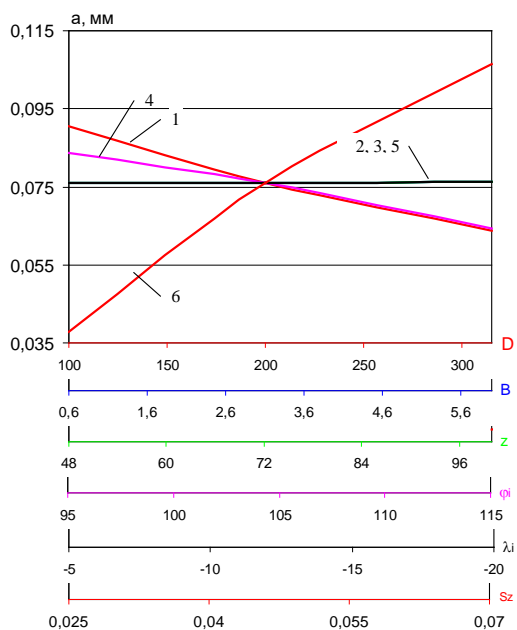
Рисунок 7 – Форма та товщина зрізаного шару зубцем фрези
 $D = 200\text{мм}$, $B = 3\text{мм}$, $z = 64$, $\varphi_i = 115^\circ$, $\lambda_i = -20^\circ$, $S_z = 0,05\text{мм/зуб}$:

а – на вході в заготовку; б – в середині заготовки; в – на виході із заготовки;
 1 – різальна кромка, 2 – границя зрізаного шару, сформована попереднім зубцем,
 3 – границя зрізаного шару, сформована другим попереднім зубцем.

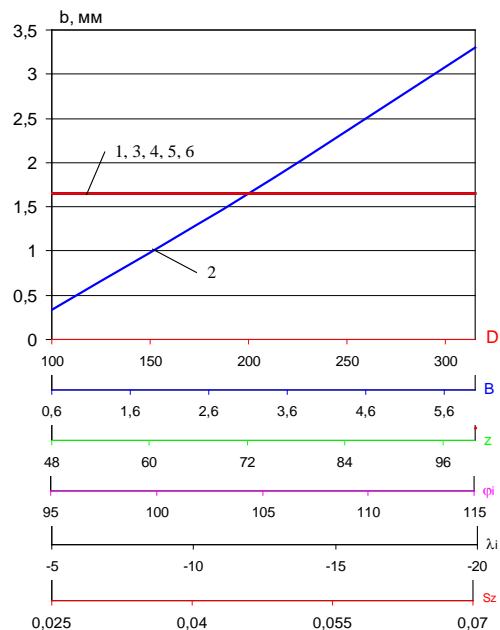
Аналіз параметрів зрізаного шару (рис. 8) показав, що:

- збільшення діаметра D фрези викликає зменшення товщини a та довжини L зрізаного шару та не впливає на об'єм v зрізаного шару;
- збільшення ширини B фрези викликає збільшення ширини b , незначне зменшення довжини L зрізаного шару, що загалом призводить до збільшення загального об'єму v зрізаного шару;
- збільшення кута в плані φ_i викликає зменшення товщини a , незначного зменшення довжини L та об'єму v зрізаного шару;
- кількість зубців z та кут нахилу кромки λ_i не впливають параметри зрізу;
- збільшення подачі S_z викликає значне збільшення товщини a та об'єму v

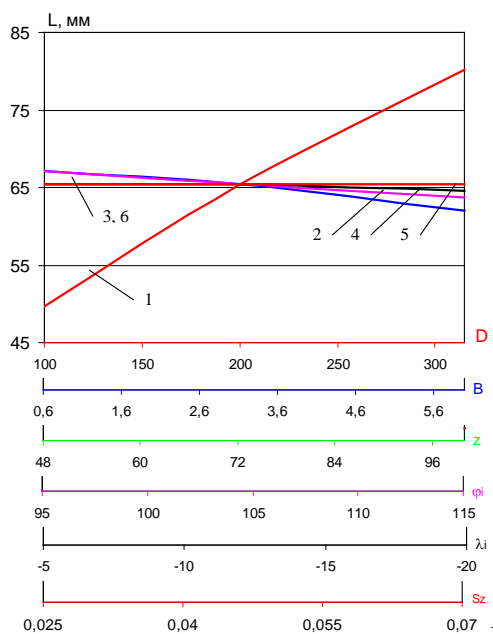
зрізуваного шару.



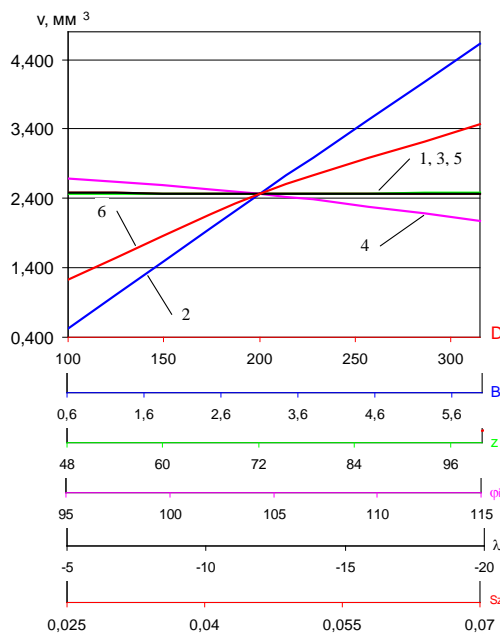
а)



б)



в)



г)

	1	2	3	4	5	6
D , мм	100...315	200	200	200	200	200
B , мм	3	0,6...6	3	3	3	3
z	64	64	48...100	64	64	64
φ_i , °	105	105	105	95...130	105	105
λ_i , °	-10	-10	-10	-10	-20...-5	-10
S_z , мм/зуб	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,025...0,07

Рисунок 8 – Параметри зрізуваного шару:
а – товщина; б – ширина; в – довжина; г – об'єм.

У зв'язку зі збільшенням вимог до якості оброблених деталей режими різання повинні бути оптимізовані з точки зору не тільки найвищої продуктивності, а і якості обробленої поверхні.

Так як практично всі метали в процесі деформації, навіть дуже малої, зміцнюються, режими різання необхідно вибирати з умови отримання поверхні деталі з мінімальним наклепом. Умова виконується за умови $\sigma_y = \sigma_{0,2}$, тобто коли напруження силового навантаження на задню поверхню дорівнюватимуть умовній межі текучості.

Виходячи з вище зазначеного, проведено оптимізацію залежностей режимів оброблення по відповідним параметрам, з метою встановлення граничних значень режимів оброблення $S_{z_{\min}}$ і V_{\max} та відповідних їм геометричних параметрів фрези при обробленні різних матеріалів.

В результаті розрахунків отримали режими різання при відрізанні заготовок:

- зі сталі 45 – $S_{z_{\max}} = \{0,035...0,057 \text{ мм/зуб}\}$, $V_{\max} = \{31,3...59,2 \text{ м/хв}\}$, при $\alpha_i = 25^\circ$, $\gamma_i = 8^\circ$, $\varphi_i = 95^\circ$, $\lambda_i = -5^\circ$;
- зі сплаву Д16 – $S_{z_{\max}} = \{0,076...0,102 \text{ мм/зуб}\}$, $V_{\max} = \{72,8...137,7 \text{ м/хв}\}$, при $\alpha_i = 25^\circ$, $\gamma_i = 8^\circ$, $\varphi_i = 95^\circ$, $\lambda_i = -5^\circ$.

У **п'ятому розділі** за результатами теоретичних досліджень завантаження різальної частини відрізних фрез та дослідження граничних режимів оброблення ними, проведено математичне моделювання процесу відрізання дисковими відрізними фрезами з різнонаправленими зубцями при обробленні металевих заготовок, окрім того, наведені результати лабораторних випробувань та виробничої перевірки результатів дослідження роботи дискових відрізних фрез з різнонаправленими зубцями.

Моделювання виконувалося для перевірки теоретичних досліджень та визначення взаємозв'язку конструктивних і геометричних параметрів та режимів оброблення.

Оскільки процес різання описується функцією великої кількості аргументів з невідомою структурою залежностей, а кількість дослідів обмежена, то в якості методу математичного моделювання процесу відрізання фрезами, використано один з методів евристичної самоорганізації – метод групового врахування аргументів (МГВА), відповідно до якого визначені вхідні, досліджувані фактори та вихідні параметри.

Моделювання здійснювалося при відрізанні заготовок зі сталі 45 та Д16 дисковими відрізними фрезами з різнонаправленими зубцями зі швидкорізальної сталі Р6М5 діаметром $D = 160$ мм, шириною $B = 1,6$ мм, числом зубців $z = 80$.

В якості вхідних факторів, прийняті геометричні параметри фрези, які характеризують конструкцію інструменту: інструментальні передній кут γ_i , задній кут α_i , кут в плані φ_i , кут нахилу кромки λ_i та режими різання: подача S_z , швидкість різання V . Вибір наведених параметрів обумовлено конструкцією інструмента та характеристиками процесу оброблення.

Діапазони зміни досліджуваних факторів при моделюванні обиралися на основі обмежень за рекомендаціями виробників фрез, нормативами режимів оброблення та знаходилися в межах: геометричні параметри $\alpha_i = 5...25^\circ$, $\gamma_i = 8...25^\circ$, $\lambda_i = -5...-20^\circ$, $\varphi_i = 95...115^\circ$; режими оброблення: для сталі 45 – $V = 15...40 \text{ хв}^{-1}$, $S_z = 0,025...0,07 \text{ мм/зуб}$, а для Д16 – $V = 90...500 \text{ хв}^{-1}$, $S_z = 0,03...0,07 \text{ мм/зуб}$.

План проведення досліджень складався з 30 серій дослідів та охоплював усю досліджувану область.

В якості вихідних параметрів процесу відрізання прийняті:

– сили різання, які визначалися за складовими (рис. 9): сила подачі P_s , що навантажує механізм подачі верстата; вертикальна сила відтискання P_n , що направлена перпендикулярно до стола верстата та бокова сила P_a , що направлена вздовж осі інструменту;

– параметрів якості процесу оброблення: величина задирок на торцевих поверхнях деталі; шорсткість оброблених поверхонь.

У відповідності до розробленої методики, відрізання проводилося на універсально-фрезерному верстаті 6Б75ВФ1.

Сили різання, які виникають в процесі оброблення, вимірювалися багатоканальним модулем вимірювання сили різання, який розроблено на основі універсального чотирикомпонентного динамометра моделі УДМ-600 конструкції ВНДІ.

Параметри шорсткості поверхонь контролювалися на комп'ютеризованому комплексі по вимірюванню шорсткості поверхонь, який розроблено на основі профілометра моделі 296 заводу "Калибр".

В результаті оброблення отриманих експериментальних даних, з використанням спрощеного алгоритму МГВА, отримано залежності для визначення складових сили різання та якості оброблених поверхонь.

В результаті оптимізації режимів оброблення відрізними фрезами, отримано рекомендовані геометричні параметри та режими оброблення. Віршувалося дві задачі визначення режимів різання: перша – з метою мінімального силового навантаження на інструмент, друга – з метою підвищення продуктивності оброблення.

В результаті розрахунків отримано значення режимів різання, що забезпечують:

- мінімальне силове навантаження на інструмент: сталі 45 ($V = 40$ м/хв, $S_z = 0,025$ мм/зуб), Д16 ($V = 400$ м/хв, $S_z = 0,03$ мм/зуб);
- підвищення продуктивності обробки в 2–2,25 рази: сталі 45 ($V = 40$ м/хв, $S_z = 0,05$ мм/зуб), Д16 ($V = 450$ м/хв, $S_z = 0,06$ мм/зуб).

Лабораторні дослідження силових характеристик відрізання заготовок зі сталі 45 та Д16 відрізними фрезами з різнонаправленими зубцями показали, що вертикальна сила P_n та сила подачі P_s на 40–60% менші, в порівнянні зі стандартними фрезами, за рахунок раціональної схеми різання, геометричних параметрів та режимів різання.

Аналіз якості оброблених поверхонь показав, що шорсткість при відрізанні заготовок зі сталі 45 та Д16 відрізними фрезами з різнонаправленими зубцями зменшується на 30–40%, величина задирок – на 20–25%. Підвищення продуктивності оброблення, режимів різання, призводить до незначного, на 15–20%, збільшення шорсткості та зменшення на 40–45% величини задирок.

Промислові випробування мали на меті визначення перспективності процесу

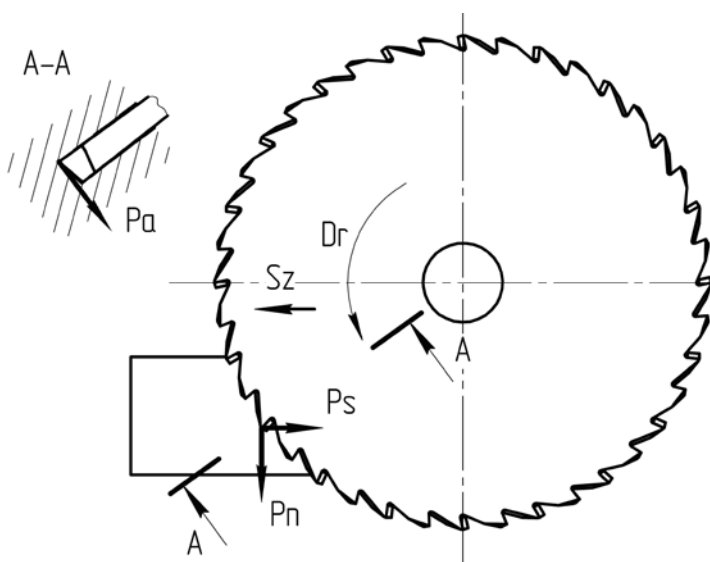


Рисунок 9 – Схема дії складових сили різання

відрізання дисковими відрізними фрезами з різнонаправленими зубцями.

Промислові випробування проводилися при відрізанні фрезами:

– екструдованого алюмінію – $D = 350 - 450$ мм, $B = 3 - 5$ мм, $z = 96$ із $\alpha_i = 20^\circ$, $\gamma_i = 10^\circ$, $\varphi_i = 95^\circ$, $\lambda_i = -20^\circ$;

– сталі 45 діаметром $\varnothing 80 \dots 100$ мм – $D = 250 - 315$ мм, $B = 2,5 - 4$ мм, $z = 100$ із $\alpha_i = 20^\circ$, $\gamma_i = 8^\circ$, $\varphi_i = 115^\circ$, $\lambda_i = -20^\circ$,

– сталі 45 прямокутного перерізу 40×60 мм – $D = 160 - 250$ мм, $B = 2 - 4$ мм, $z = 100$ із $\alpha_i = 5^\circ$, $\gamma_i = 25^\circ$, $\varphi_i = 115^\circ$, $\lambda_i = -20^\circ$.

В результаті проведених випробувань отримали підвищення продуктивності оброблення на 20–25% та якості оброблених поверхонь на 35–40% при обробленні відрізними фрезами з різнонаправленими зубцями, в порівнянні з фрезами стандартної конструкції, що використовуються на підприємстві.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. На основі проведеного аналізу конструкцій, області використання, умов роботи та завантаження різальної частини дискових відрізнних фрез при відрізання металевих заготовок розроблено конструкцію дискової відрізної фрези з різнонаправленими зубцями, яка забезпечує підвищення продуктивності та якості обробки при відрізання металевих заготовок, за рахунок конструктивного виконання різальної частини інструмента за прогресивною схемою різання, розташування поверхонь зубців для забезпечення косокутного різання що забезпечує сприятливі умови для процесу стружкоутворення та стружковідведення, зменшує сили різання та підвищує якість оброблення.

2. У результаті досліджень геометричних параметрів дискових відрізнних фрез з різнонаправленими зубцями, з врахуванням умов експлуатації при відрізання металевих заготовок, встановлено, що геометричні параметри фрези в процесі її роботи змінюються в межах допуску на виготовлення геометричних параметрів, за рахунок того, що довжина різальної кромки набагато менше діаметру фрези.

3. Розроблена методика визначення завантаження різальної частини дискових відрізнних фрез з різнонаправленими зубцями, яка дозволила дослідити параметри зрізуваного шару в залежності від умов роботи інструмента, в результаті чого встановлено, що:

- збільшення діаметра фрези викликає зменшення товщини та збільшення довжини зрізуваного шару;

- збільшення кута в плані викликає зменшення товщини та довжини зрізуваного шару;

- збільшення подачі викликає збільшення товщини зрізуваного шару.

Встановлено, що дискові відрізнні фрези з різнонаправленими зубцями працюють лише частиною різальної кромки, максимальна ширина зрізуваного шару зубцем складає 55% від ширини фрези. Доведено, що кількість зубців, їх крок та розміри стружкової канавки дискової відрізної фрези з різнонаправленими зубцями залежать від режимів оброблення, геометричних параметрів фрези та розмірів заготовки.

4. З умови отримання поверхні деталі з мінімальним наклепом, що відповідає мінімальній шорсткості обробленої поверхні при обробленні дисковою відрізною фрезою з різнонаправленими зубцями при обробленні металевих заготовок, з урахуванням їх

конструктивних і геометричних параметрів, визначено граничні значення режимів оброблення, за яких будуть отримано поверхні найкращої якості:

- для сталі 45 – $S_{z\max} = \{0,035...0,057 \text{ мм/зуб}\}$, $V_{\max} = \{31,3...59,2 \text{ м/хв}\}$;
- для Д16 – $S_{z\max} = \{0,076...0,102 \text{ мм/зуб}\}$, $V_{\max} = \{72,8...137,7 \text{ м/хв}\}$.

Аналіз режимів різання показує, що різальні зубці дискової відрізної фрези з різнонаправленими зубцями витримують підвищені режими різання при обробленні металевих заготовок.

5. Математичне моделювання методом групового врахування аргументів за експериментальними даними процесу відрізання металевих заготовок дисковими відрізними фрезами з різнонаправленими зубцями отримано аналітичні залежності силових характеристик та параметрів якості оброблених поверхонь.

Аналіз сил різання та шорсткості оброблених поверхонь показав, що:

- збільшення режимів різання викликає зменшення сил різання та шорсткості;
- збільшення кута нахилу кромки, за абсолютним значенням, викликає збільшення сили відтискання, шорсткості поверхонь та зменшення бокової сили;
- збільшення кута в плані викликає зменшення сили відтискання та бокової сили;
- збільшення заднього кута викликає збільшення шорсткості.

6. На основі аналізу аналітичних залежностей силових характеристик та параметрів якості оброблених поверхонь при відрізання дисковими відрізними фрезами з різнонаправленими зубцями металевих заготовок встановлено режими різання та геометричні параметри фрез, що відповідають:

- для оброблення з найменшими зусиллями різання: сталі 45 ($V = 40 \text{ м/хв}$, $S_z = 0,025 \text{ мм/зуб}$), Д16 ($V = 400 \text{ м/хв}$, $S_z = 0,03 \text{ мм/зуб}$);
- для підвищення продуктивності обробки в 2...2,25 рази: сталі 45 ($V = 40 \text{ м/хв}$, $S_z = 0,05 \text{ мм/зуб}$), Д16 ($V = 450 \text{ м/хв}$, $S_z = 0,06 \text{ мм/зуб}$).

7. На підставі лабораторних випробувань встановлено, що при відрізання металевих заготовок дисковими відрізними фрезами з різнонаправленими зубцями, в порівнянні зі стандартними фрезами:

- сили різання на 30-45% менші, а шорсткість поверхонь на 15-30% менша;
- для підвищення продуктивності в 1,5-2 рази: сили різання на 15-30% менші, а шорсткість оброблених поверхонь на 5-12% більша.

8. В результаті проведених випробувань отримали підвищення продуктивності оброблення на 20–25% та якості оброблених поверхонь на 35–40% при обробленні відрізними фрезами з різнонаправленими зубцями, в порівнянні з фрезами стандартної конструкції, що використовуються на підприємстві.

9. Розроблено рекомендації щодо умов експлуатації дискових відрізних фрез з різнонаправленими зубцями при відрізання металевих заготовок, які забезпечують підвищення продуктивності та якості обробки.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у фахових виданнях України:

1. Okhrimenko, O.; Vovk, V.; Maidaniuk, S.; Lashyna, Y. Determining the width of a layer cut with saws with multidirectional teeth. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, [S. l.], v. 3, n. 1 (111), p. 14–20, 2021.

2. Равская Н. С., Панчук В. Г., Майданюк С. В. Геометрические параметры режущей части дисковых отрезных фрез. // *Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – Краматорськ – ДДМА, вип. №18, 2005. – С. 73–82.*

3. Панчук В. Г., Майданюк С. В. Графічне визначення статичних геометричних параметрів різальної частини відрізних фрез з різнонаправленими зубцями і стружковими канавками змінної висоти. // *Прогресивні технології і системи машинобудування. Міжнар. зб. наук. Праць - Донецьк: ДонНТУ, 2007. Вип. 34. С. 167-177.*

4. Майданюк С. В., Панчук В. Г. Вплив конструктивних та інструментальних геометричних параметрів на статичні кути відрізних фрез з різнонаправленими зубцями і стружковими канавками перемінної глибини. // *Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія "Технічні науки" – Житомир, 2007. № 4(43)- С. 36-41.*

5. Майданюк С. В., Панчук В. Г., Рублюк О. В. Теоретичні дослідження динамічного стану відрізних фрез з різнонаправленими зубцями. // *Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – Краматорськ, вип. №24, 2009. – С. 320–325.*

6. Майданюк С. В. Вплив геометричних параметрів на статичні геометричні параметри різальної частини відрізних фрез з різнонаправленими кромками. // *Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – Краматорськ, вип. №29, 2011. – С. 19–23.*

7. Равська Н. С., Охріменко О. А., Майданюк С. В. Визначення параметрів зрізаного шару багатозубих дискових інструментів та торцевих фрез за допомогою комп'ютерних систем 3D проектування. // *Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць- Краматорськ, вип. №32, 2013 -С.20-29.*

8. Майданюк С. В., Іванюк В. М. Товщина зрізу при роботі дисковими відрізними фрезами з різнонаправленими зубцями. // *Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – Краматорськ, вип. №36, 2015. –С.26-30.*

9. Майданюк С. В. Визначення кута контакту відрізних фрез з різнонаправленими зубцями. // *Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія "Технічні науки" : науковий збірник / Черніг. нац. технол. ун-т. – Чернігів : Черніг. нац. технол. ун-т, 2015. – № 2 (78). – С. 128–133.*

10. Ковальова Л. І, Майданюк С. В. Моделювання зусиль різання круглими пилками з різнонаправленими зубцями. // *Технічні науки та технології : науковий журнал Черніг. нац. технол. ун-т. – Чернігів : Черніг. нац. технол. ун-т, 2016. – № 1 (3). – С. 49–54.*

Статті у фахових виданнях України, які додатково розкривають результати дисертаційної роботи:

11. Бабенко А. Е., Равская Н. С., Боронко О. А., Майданюк С. В. Полуаналитический метод определения собственных форм и собственных частот круглой кольцевой пилочки. // *Вестник национального технического университета Украины" Киевский политехнический институт". Машиностроение. – Киев, вып. №45, 2004. – С. 11–12.*

12. Майданюк С. В., Плівак О. А., Бекмурадов Р. А. Модуль для вимірювання фасонних профілів. // *Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія "Технічні науки". – Житомир, 2007. № 2(41). – С. 15–18.*

13. Катрук О. В., Плівак О. А., Майданюк С. В. Визначення шорсткості поверхні тонкостінних деталей алюмінієвого сплаву. // *Вісник СевНТУ: зб. наук. праць. Серія:*

Машиноприладобудування та транспорт. – Севастополь, 2012. Вип. 129. – С. 100–106.

14. Майданюк С.В.; Плівак О.А. Модуль вимірювання сил різання. // *Вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". Серія : Машинобудування. – Київ, № 2, 2016. – С. 15 – 22.*

Статті у інших виданнях:

15. Ковальова Л. І, Майданюк С. В. Моделювання сил різання при розрізанні алюмінієвих сплавів. // *Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – Краматорськ, вип. №38, 2016. – С. 99-103.*

16. Майданюк С. В. Визначення та моделювання параметрів якості оброблення дисковими відрізними фрезами з різнонаправленими зубцями // *Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць - Краматорськ, вип.. 42, 2018.*

17. Равська Н. С., Охріменко О. А., Майданюк С. В. Визначення параметрів зрізу зрізуваного шару дисковим інструментом з різнонаправленими зубцями // *Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – Краматорськ, вип. 40, 2017. - С. 3-9.*

Доповіді на конференціях:

18. Майданюк С. В. Вплив геометричних параметрів на статичні геометричні параметри різальної частини відрізнних фрез з різнонаправленими кромками. // *IX Міжнародна науково-технічна конференція " Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку", 31 травня – 3 червня 2011 р., Краматорськ, Україна.*

19. Равська Н. С., Охріменко О. А., Майданюк С. В. Визначення завантаження різальної частини багатозубих дискових інструментів допомогою комп'ютерних систем 3D проектування. // *XI Міжнародна науково-технічна конференція " Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку", 4 – 6 червня 2013 р., Краматорськ, Україна.*

20. Майданюк С. В. Дослідження зусиль різання дисковими відрізними фрезами з різнонаправленими зубцями. // *XIV Всеукраїнська молодіжна науково-технічна конференція "Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво", 27–31 жовтня 2014 р., Суми, Україна.*

21. Levyc'kyu V., Maydanjuk S., Stavytska I. Staggered Tooth Cut-off Milling Cutter for Structural Materials' Machining. // *Current Trends in Young Scientists' Researcher. All Ukrainian Scientific and Practical Conference, April 16, 2015, Zhytomyr, Ukraine.*

22. Майданюк С. В., Іванюк В. М. Завантаження дискових відрізнних фрез. // *XIII Міжнародна науково-технічна конференція " Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку", 2 – 4 червня 2015 р., Краматорськ, Україна.*

23. Левицький В. Ю., Майданюк С. В. Зусилля різання круглими пилками з різнонаправленими зубцями. // *Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених та студентів «Інновації молоді – машинобудуванню», 19 квітня – 24 травня 2016 р., Київ, Україна.*

24. Майданюк С. В., Плівак О. А. Вибір датчиків та методів живлення для вимірювання сил різання. // *Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених та студентів «Інновації молоді – машинобудуванню», 19 квітня – 24 травня 2016 р., Київ, Україна.*

25. Ковальова Л. І., Майданюк С. В. Визначення зусиль різання круглими пилками з

різнонаправленими зубцями. // *VI Міжнародна науково-практична конференція "Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем"*, 26–29 квітня 2016 р., Чернігів, Україна.

26. Ковальова Л. І, Майданюк С. В. Моделювання сил різання при розрізанні алюмінієвих сплавів круглими пилками з різнонаправленими зубцями. // *XIV Міжнародна науково-технічна конференція "Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку"*, 31 травня – 3 червня 2016 р., Краматорськ, Україна.

27. Майданюк С. В., Плівак О. А. Модуль визначення сил різання. // *XVII Міжнародна науково-технічна конференція "Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта"*, 21 – 24 червня 2016 року, Одеса, Україна.

28. Охріменко О. А., Майданюк С. В. Визначення товщини зрізаного шару круглими пилками з різнонаправленими зубцями. // *VII Міжнародна науково-практична конференція "Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем"*, 24–27 квітня 2017 р., Чернігів, Україна.

29. Равська Н. С., Охріменко О. А., Майданюк С. В. Визначення товщини зрізаного шару дисковими відрізними фрезами з різнонаправленими зубцями. // *XV Міжнародна науково-технічна конференція "Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку"*, 30 травня – 1 червня 2017 р., Краматорськ, Україна.

30. Майданюк С. В. Моделювання якості оброблення дисковими відрізними фрезами з різнонаправленими зубцями. // *VIII Міжнародна науково-практична конференція "Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем"*, 10–12 травня 2018 р., Чернігів, Україна.

31. Майданюк С. В. Дослідження параметрів якості оброблення дисковими відрізними фрезами. // *XVI Міжнародна науково-технічна конференція "Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку"*, 29–31 травня 2018 р., Краматорськ, Україна.

32. Колупаєв Д. В., Майданюк С. В. Вибір дискової відрізної фрези для розрізання алюмінієвих профілів. // *Міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених та студентів "Інновації молоді в машинобудуванні"*, 7 – 31 травня 2019 р., Київ, Україна.

33. Колупаєв Д. В., Майданюк С. В. Оптимізація відрізання алюмінієвих профілів дисковими відрізними фрезами з різнонаправленими зубцями. // *Міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених та студентів "Інновації молоді в машинобудуванні"*, 7 – 31 травня, 2019 р., Київ, Україна.

34. Майданюк С. В. Оптимізація оброблення дисковими відрізними фрезами з різнонаправленими зубцями. // *IX Міжнародна науково-практична конференція "Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем"*, 14–16 травня 2019 р., Чернігів, Україна.

35. Равська Н. С., Родін Р. П., Івановський О. А., Майданюк С. В. Розширення області застосування дискових відрізнних фрез з різнонаправленими зубцями. // *XX Міжнародна науково-технічна конференція "Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта"*, 10 – 13 вересня 2019 р., Херсон, Україна.

Анотація

Майданюк С.В. Розробка конструкції відрізнних фрез з різнонаправленими зубцями – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за

спеціальністю 05.03.01 – «Процеси механічної обробки, верстати та інструменти» – Державний університет «Житомирська політехніка», Міністерство освіти і науки України, Житомир, 2021.

Дисертація присвячена питанням підвищення продуктивності та якості оброблення при відрізанні металевих заготовок за рахунок розробки конструкції дискових відрізних фрез з різнонаправленими зубцями та встановлення раціональних режимів оброблення.

На основі загальних положень теорії різання та проектування різальних інструментів розроблена конструкція інструменту та досліджені геометричні параметри різальної частини в процесі її роботи. На основі теорії формоутворення поверхонь, розроблені методики визначення параметрів зрізуваного шару за допомогою 3D моделювання з використанням систем твердотільного геометричного моделювання та аналітичного моделювання. Досліджено параметри зрізуваного шару, на основі яких визначено теоретичні геометричні параметри інструмента та режими його роботи.

Проведені лабораторні випробування, спрямовані на перевірку теоретичних досліджень, дали змогу отримати аналітичні залежності характеристик процесу оброблення та якості отриманих деталей. Оптимізація отриманих залежностей дозволила отримати рекомендовані геометричні параметри та режими оброблення, на основі яких визначено геометричні параметри інструменту та уточнено параметри стружкової канавки та кількість зубців. Виробнича перевірка результатів досліджень підтвердила результати теоретичних досліджень.

Ключові слова: дискові відрізні фрези, різнонаправлені зубці, геометричні параметри, зрізуваний шар, 3D моделювання, математичне моделювання, режими різання, сили різання, шорсткість поверхні.

Аннотація

Майданюк С.В. Разработка конструкции отрезных фрез с разнонаправленными зубьями - Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.03.01 – «Процессы механической обработки, станки и инструменты» – Государственный университет «Житомирская политехника», Министерство образования и науки Украины. Житомир, 2021.

Диссертация посвящена вопросам повышения производительности и качества обработки при отрезке металлических заготовок за счет разработки конструкции дисковых отрезных фрез, определения рациональных геометрических параметров режущей части и режимов обработки.

На основе общих положений теории резания и теории проектирования режущих инструментов разработана конструкция дисковой отрезной фрезы с разнонаправленными зубьями. Фреза обеспечивает повышение производительности и качества обработки при отрезке металлических заготовок, за счет конструктивного исполнения режущей части инструмента по прогрессивной схеме резания. Расположение поверхностей зубьев обеспечивает косоугольное резание создающее благоприятные условия стружкообразования и стружковыведения. Все это направлено на уменьшение сил резания и повышение качества обработанных поверхностей.

В результате исследований геометрических параметров дисковых отрезных фрез с разнонаправленными зубьями, с учетом условий эксплуатации при отрезании

металлических заготовок, установлено, что геометрические параметры фрезы в процессе работы меняются в пределах допуска на изготовление геометрических параметров, за счет того, что длина режущей кромки гораздо меньше диаметра фрезы

На основе теории формообразования поверхностей, на основе 3D моделирования с использованием систем твердотельного геометрического моделирования и аналитического моделирования, разработаны методики определения загрузки режущей части дисковых отрезных фрез с разнонаправленными зубьями. Исследования параметров срезаемого слоя в зависимости от условий работы инструмента показали, что:

- с увеличением диаметра фрезы уменьшается толщина и увеличивается длина срезаемого слоя;
- увеличение угла в плане приводит к уменьшению толщины и длины срезаемого слоя;
- увеличение подачи приводит к увеличению толщины срезаемого слоя.

Также установлено, что дисковые отрезные фрезы с разнонаправленными зубьями работают только частью режущей кромки, максимальная ширина срезаемого слоя зубом составляет 55% от ширины фрезы.

С целью повышения производительности обработки проведены исследования теоретических зависимостей режимов обработки дисковыми отрезными фрезами с разнонаправленными зубьями, с учетом их конструктивных и геометрических параметров. Исследованиями получены максимальные режимы резания, которые обеспечивают наилучшее качество обработки, из условия получения поверхности детали с минимальным наклепом, которые составляют:

- для стали 45 – $S_{z\max} = \{0,035...0,057 \text{ мм/зуб}\}$, $V_{\max} = \{31,3...59,2 \text{ м/хв}\}$;
- для Д16 – $S_{z\max} = \{0,076...0,102 \text{ мм/зуб}\}$, $V_{\max} = \{72,8...137,7 \text{ м/хв}\}$.

Математическим моделированием, методом группового учета аргументов по экспериментальным данным, процесса отрезки металлических заготовок дисковыми отрезными фрезами с разнонаправленными зубьями получены аналитические зависимости силовых характеристик и параметров качества обработанных поверхностей.

Анализ сил резания и шероховатости поверхности показал, что:

- увеличение режимов резания вызывает уменьшение сил резания и шероховатости поверхности;
- увеличение угла наклона кромки, по абсолютному значению, вызывает увеличение силы отжима, шероховатости поверхности и уменьшения боковой силы;
- увеличение угла в плане вызывает уменьшение силы отжима и боковой силы;
- увеличение заднего угла вызывает увеличение шероховатости поверхности.

На основе анализа аналитических зависимостей силовых характеристик и параметров качества обработанных поверхностей при отрезке дисковыми отрезными фрезами с разнонаправленными зубьями металлических заготовок установлены режимы резания и геометрические параметры фрез:

- для обработки с наименьшими усилиями резания: стали 45 ($V = 40 \text{ м/хв}$, $S_z = 0,025 \text{ мм/зуб}$), Д16 ($V = 400 \text{ м/хв}$, $S_z = 0,03 \text{ мм/зуб}$);
- для повышения производительности обработки в 2...2,25 раза: стали 45 ($V = 40 \text{ м/хв}$, $S_z = 0,05 \text{ мм/зуб}$), Д16 ($V = 450 \text{ м/хв}$, $S_z = 0,06 \text{ мм/зуб}$).

Лабораторные испытания при отрезке металлических заготовок дисковыми отрезными фрезами с разнонаправленными зубьями на рекомендованных режимах резания, в сравнении со стандартными фрезами, показали, что:

- при работе с режимами резания для получения наименьших усилий резания – силы резания меньше на 30-45%, а шероховатость – на 15-30%;
- при работе с режимами резания для повышения производительности обработки – производительность повысилась в 1,5-2 раза, силы резания уменьшились на 15-30%.

Проведенные производственные испытания при отрезке металлических заготовок дисковыми отрезными фрезами с разнонаправленными зубьями показали повышение производительности обработки на 20-25% и качества поверхностей на 35-40%, по сравнению с фрезами стандартной конструкции.

Ключевые слова: дисковые отрезные фрезы, разнонаправленные зубья, геометрические параметры, срезаемый слой, 3D моделирование, математическое моделирование, режимы резания, силы резания, шероховатость поверхности.

Abstract

Maidaniuk S.V. Design of saw blade with multidirectional teeth – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the candidate of technical sciences on a specialty 05.03.01 – «Machining processes, machine tools and tools» – Zhytomyr Polytechnic State University, Ministry of Education and Science of Ukraine. Zhytomyr, 2021.

The dissertation is devoted to the issues of increasing the productivity and quality of processing during the cutting of metal blanks per set of the development of the design of saw blade with multi-directional teeth and the definition of rational processing modes.

Based on the general positions of the cutting theory and the design of cutting tools, the design of the tool was developed and the geometric parameters of the cutting part were investigated during its operation. Based on the theory of surface shaping, methods have been developed for determining the parameters of the cut layer based on 3D modeling using solid geometric modeling and analytical modeling systems. Parameters of cut layer are investigated, on the basis of which theoretical geometric parameters of tool and modes of its operation are determined.

The conducted laboratory tests, aimed at verifying the theoretical research, made it possible to obtain analytical dependences of the characteristics of the processing process and the quality of the obtained parts. Optimization of the obtained dependences allowed to obtain the recommended geometrical parameters and machining modes, on the basis of which the geometrical parameters of the tool were determined and the parameters of the chip groove and the number of teeth were specified. Industrial verification of research results confirmed the results of theoretical research.

Key words: saw blade, multidirectional teeth, geometric parameters, cut layer, 3D modeling, mathematical modeling, cutting modes, cutting forces, surface roughness.

Підписано до друку 10.08.2021р. Формат 60x90¹/16
Ум. друк. арк. 0,9. Обл-вид. арк 0,9
Наклад 100 прим. Замовлення № 662
Віддруковано на різнографі в видавничому центрі ФО-П Січкач Ю. В.
Свідоцтво ДК №7390 від 05.07.2021р.
04053, м. Київ, вул. Січових Стрільців, 26А
Тел./факс: 486-50-88, 277-40-16, (050)712-40-80, (097)182-07-07
<http://www.printc.com.ua>. E-mail printcentr@ukr.net