

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: «Удосконалення шліфування в системі технічного сервісу
агропромислового обладнання за рахунок вибору
оптимальних параметрів обробки»

KPM.133ГМмд(ОНП)_21.04.000 ПЗ

Виконав: здобувач вищої освіти
за міждисциплінарною освітньо-
науковою програмою
*«Сервісна інженерія в агро-
промисловому виробництві»*
спеціальностей 133 «Галузеве
машинобудування», 208 «Агроінженерія»
ступеня вищої освіти *магістр*
групи 133ГМмд(ОНП)_21
БОРОДАТИЙ Данило

Керівник: докт. техн. наук, професор
ЗУБКО Владислав

Полтава – 2026 року

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

Міждисциплінарна освітньо-наукова програма
«Сервісна інженерія в агропромисловому виробництві»
Спеціальності: 133 «Галузеве машинобудування», 208 «Агроінженерія»
Ступінь вищої освіти *магістр*

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри механічної
та електричної інженерії,
канд. техн. наук, доцент,

Станіслав ПОПОВ
30 червня 2025 р.

З А В Д А Н Н Я

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

БОРОДАТИЙ Данило

1. Тема роботи: **«Удосконалення шліфування в системі технічного сервісу агропромислового обладнання за рахунок вибору оптимальних параметрів обробки»**,
керівник роботи *докт. техн. наук, доцент ВЕТОХІН Володимир*,
затверджено засіданням кафедри, протокол №18 від 30.06.2025 р.

2. Строк подання здобувачем вищої освіти роботи – 20 травня 2026 р.

3. Вихідні дані до роботи: *аналіз літературних джерел Полтавської обласної універсальної наукової бібліотеки імені Івана Котляревського; аналіз літературних джерел Національної бібліотеки України імені Володимира Вернадського; сучасний досвід підприємств машинобудування та АПК за тематичним спрямуванням.*

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

Розділ 1. Аналіз існуючих досліджень.

Розділ 2. Методика досліджень.

Розділ 3. Результати експериментів.

Розділ 4. Практична реалізація розробок.

5. Перелік ілюстраційного матеріалу: *титольний аркуш; назва теми, мета і задачі дослідження; огляд літературних джерел; методика досліджень (моделі, плани експериментів, перевірка адекватності математичних моделей); результати експериментальних досліджень; висновки.*

6. Консультанти розділів *кваліфікаційної роботи*

Розділ	Власне ім'я, прізвище та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання отримав
Практична реалізація розробок	Володимир ДУДНИК, доцент кафедри механічної та електричної інженерії		
	Петро МАКАРЕНКО, професор кафедри економіки та публічного управління		
	Павло ПИСАРЕНКО, завідувач кафедри екології, збалансованого природокористування та захисту довкілля		

7. Дата видачі завдання 30 червня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з.п.	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Вибір і затвердження теми роботи	До 30.06.25	
2	Складання і затвердження розгорнутого плану та завдання на кваліфікаційну роботу	21.07-27.07.25	
3	Опрацювання літературних джерел	15.12-28.12.25	
4	Збір, вивчення і обробка інформації, необхідної для виконання роботи	20.04-26.04.26	
5	Виконання розділів роботи	27.04.26-10.05.26	
6	Оформлення тексту роботи		
7	Попередній захист роботи на кафедрі	11.05-15.05.26	
8	Доопрацювання роботи з урахуванням зауважень і пропозицій	18.05-20.05.26	
9	Нормалізаційний контроль		
10	Захист кваліфікаційної роботи	25.05-31.05.26	

Здобувач вищої освіти _____ Данило БОРОДАТИЙ
(підпис)

Керівник роботи _____ Володимир ВЕТОХІН
(підпис)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 4 розділи, 13 рисунків, 19 таблиць, 29 використаних джерел, 67 сторінок. **Ілюстраційна частина:** 9 слайдів.

Об'єкт дослідження – процес технічного сервісу та відновлення деталей агропромислового обладнання, зокрема технологічні операції шліфування під час ремонту та обслуговування вузлів і механізмів.

Предмет дослідження – методи, режими, інструментальні засоби та технічні параметри удосконаленого процесу шліфування, що забезпечують підвищення точності, якості поверхні, довговічності деталей і ефективності технічного сервісу агропромислової техніки.

Постановка актуальної технічної задачі – підвищення якості деталей сільськогосподарських машин.

Мета кваліфікаційної роботи магістра – удосконалення плоского шліфування торцем та периферією круга на підставі аналізу взаємодії абразивних зерен з оброблюваною поверхнею. Під удосконаленням розуміється отримання потрібних параметрів розмірної точності та шорсткості поверхні при високій продуктивності та стійкості інструмента.

Практичне значення кваліфікаційної роботи магістра – надання рекомендації стосовно удосконалення деталей машин і обладнання агропромислового виробництва.

У **першому розділі** розглянуто сучасні підходи до підвищення ефективності шліфування та визначено ключові фактори, що впливають на об'єм знятого металу. Особлива увага приділена ролі коефіцієнта тертя, геометрії зерна та зернистості круга, а також їх нелінійним взаємозв'язкам, що визначають продуктивність процесу.

Другий розділ подано алгоритм проведення експериментів і обґрунтовано вибір параметрів, що підлягають контролю. Описано умови, засоби вимірювання, характеристики зразків та методи математичної обробки результатів для забезпечення достовірності досліджень.

У **третьому розділі** наведено залежності коефіцієнта тертя від швидкості різання та властивостей матеріалу, а також уточнену модель визначення об'єму знятого металу. Встановлено оптимальні режими шліфування, що забезпечують максимальну продуктивність і необхідну якість поверхні.

Четвертий розділ присвячений застосуванню отриманих результатів у виробничих умовах, включаючи рекомендації з безпеки шліфування. Проведено розрахунок економічного ефекту та оцінено екологічний вплив процесу, що підтверджує доцільність запропонованих рішень.

Практичні результати роботи – визначення оптимальних режимів плоского шліфування, що забезпечують підвищення продуктивності, зменшення коефіцієнта тертя та покращення якості поверхні. Запропоновані рекомендації дозволяють знизити собівартість обробки, збільшити стійкість

шліфувальних кругів і підвищити ефективність технічного сервісу агропромислового обладнання.

Рекомендації щодо використання результатів роботи – результати роботи рекомендовано до використання на підприємствах сервісу та сільськогосподарського машинобудування.

Сфера застосування результатів роботи – виробничі підприємства машинобудівної галузі, агротехнічні сервісні центри, науково-дослідні та проектно-конструкторські організації.

Текст роботи пройшов перевірку на плагіат за допомогою відповідного сервісу та є оригінальним.

АНОТАЦІЯ

У роботі досліджено процес плоского шліфування з метою підвищення його продуктивності, точності та економічної ефективності в умовах технічного обслуговування агропромислового обладнання. Проаналізовано вплив геометрії абразивних зерен, коефіцієнта тертя, зернистості та режимів різання на об'єм знятого металу і якість поверхні. Запропоновано математичну модель та алгоритм оптимізації, що дозволяють визначати оптимальні режими шліфування для різних твердостей матеріалу. Проведено експериментальні дослідження, які підтвердили залежності коефіцієнта тертя від швидкості різання й властивостей металу, а також виявили оптимальні параметри подачі та зернистості. Практична частина містить рекомендації щодо впровадження результатів, оцінку економічного ефекту та аналіз екологічної безпеки технології.

ШЛІФУВАННЯ, ПРОДУКТИВНІСТЬ, КОЕФІЦІЄНТ ТЕРТЯ, ЗЕРНИСТІСТЬ, ОПТИМІЗАЦІЯ, СТІЙКІСТЬ ІНСТРУМЕНТУ

ANNOTATION

The study investigates the flat grinding process to improve its productivity, accuracy, and economic efficiency within the maintenance of agro-industrial equipment. The influence of abrasive grain geometry, friction coefficient, grain size, and cutting parameters on metal removal rate and surface quality is analyzed. A mathematical model and optimization algorithm are proposed to determine optimal grinding conditions for materials of different hardness. Experimental results confirm the dependence of the friction coefficient on cutting speed and material properties and identify optimal feed rates and grain sizes. The practical section provides recommendations for implementing the findings, an economic efficiency assessment, and an analysis of the environmental safety of the process.

GRINDING, PRODUCTIVITY, FRICTION COEFFICIENT, GRAIN SIZE, OPTIMIZATION, TOOL DURABILITY

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	8
1.1 Аналіз способів удосконалення шліфування	8
1.2 Вплив факторів на об'єм знятого металу	11
1.3 Вплив коефіцієнта тертя на ефективність шліфування	16
1.4 Вплив зернистості на інтенсивність зняття металу	18
Висновки до розділу 1	21
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ	23
2.1 Оптимізація шліфування	23
2.2 Параметри для контролю, засоби вимірювання	23
2.3 Умови проведення експерименту	25
2.4 Кількість паралельних дослідів	27
2.5 Обробка результатів експериментів, аналіз	29
Висновки до розділу 2	34
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТІВ	35
3.1 Визначення залежності коефіцієнта тертя від технологічних параметрів та фізико-механічних властивостей оброблюваного металу	35
3.2 Уточнення моделі об'єму знятого металу, багатокритеріальна оптимізація шліфування методом суміщення контурних зливних	45
3.3 Оптимізація поздовжньої подачі при плоскому шліфуванні конструкційної вуглецевої сталі	52
Висновки до розділу 3	58
РОЗДІЛ 4. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РОЗРОБОК	60
4.1 Безпека робіт під час шліфування	60
4.2 Розрахунок економічного ефекту	61
4.3 Екологічна безпека при плоскому шліфуванні	63
Висновки до розділу 4	64
ВИСНОВКИ	66
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	68

ВСТУП

Сучасний агропромисловий комплекс характеризується високим рівнем механізації та інтенсивним використанням різноманітного обладнання, ефективність роботи якого значною мірою залежить від якості технічного обслуговування та своєчасного відновлення працездатності його складових. Одним із ключових процесів у системі технічного сервісу є шліфування, яке забезпечує точність геометричних параметрів, чистоту поверхні та надійність роботи деталей у вузлах тертя. Удосконалення технології шліфування стає особливо актуальним у зв'язку з потребою підвищення довговічності агропромислового обладнання, зниження енерговитрат і зменшення витрат на ремонт.

Зростання навантажень на сільськогосподарські машини, а також використання нових матеріалів і конструкцій потребують удосконалених методів обробки поверхонь, здатних забезпечити стабільно високі показники точності та якості. Сучасні підходи до плоского та кругового шліфування орієнтовані на застосування інноваційних абразивних матеріалів, оптимізацію режимів різання та впровадження автоматизованих систем контролю, що підвищує продуктивність і знижує ризик технологічних відхилень. У межах технічного сервісу агропромислових підприємств це дозволяє скоротити час простою обладнання, підвищити коефіцієнт технічної готовності та забезпечити кращу адаптацію технологічних процесів до умов інтенсивної експлуатації.

Окрему увагу в сучасних умовах приділяють питанням енергозбереження, екологічної безпеки та економічної ефективності. Рациональний вибір шліфувальних матеріалів, удосконалення конструкцій верстатів і впровадження високотехнологічних охолоджувальних систем сприяють зменшенню споживання ресурсів і мінімізації негативного впливу виробничих процесів на довкілля. Це робить удосконалення шліфування важливим напрямом розвитку не лише для технічного сервісу, а й для сучасного агропромислового виробництва загалом.

Таким чином, дослідження та впровадження ефективних рішень у сфері шліфування забезпечують підвищення якості ремонту та відновлення деталей, продовжують строк їх служби й сприяють підвищенню надійності

агропромислового обладнання. Удосконалення даного технологічного процесу є необхідною умовою підвищення ефективності технічного сервісу та конкурентоздатності підприємств аграрного сектору.

Метою роботи є удосконалення плоского шліфування торцем та периферією круга на підставі аналізу взаємодії абразивних зерен з оброблюваною поверхнею. Під удосконаленням розуміється отримання потрібних параметрів розмірної точності та шорсткості поверхні при високій продуктивності та стійкості інструмента.

Об'єктом дослідження є процес технічного сервісу та відновлення деталей агропромислового обладнання, зокрема технологічні операції шліфування під час ремонту та обслуговування вузлів і механізмів, а **предметом** – методи, режими, інструментальні засоби та технічні параметри удосконаленого процесу шліфування, що забезпечують підвищення точності, якості поверхні, довговічності деталей і ефективності технічного сервісу агропромислової техніки.

Для досягнення поставленої мети передбачено розв'язання таких **завдань**.

1. Проаналізувати існуючі методи та технологічні схеми шліфування, які застосовуються під час ремонту агропромислового обладнання.
2. Визначити чинники, що впливають на якість обробки, продуктивність процесу та експлуатаційні характеристики відновлених деталей.
3. Обґрунтувати вибір раціональних режимів шліфування та інструментальних матеріалів, придатних для інтенсивної експлуатації в умовах аграрного виробництва.
4. Розробити і запропонувати удосконалений технологічний процес шліфування з урахуванням технічної, економічної та екологічної ефективності.
5. Виконати економічні розрахунки ефективності впровадження запропонованих рішень у систему технічного сервісу.
6. Оцінити екологічні та виробничі ризики, пов'язані з процесом шліфування, та запропонувати заходи щодо їх мінімізації.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Аналіз способів удосконалення шліфування

До кінця 70-х років минулого століття у дослідженнях з вивчення методів удосконалення ефективності процесу шліфування, домінував емпіричний підхід, при якому встановлювалися безпосередні функціональні зв'язки між параметрами ефективності та розглянутими технологічними факторами абразивної обробки. Як правило, ці зв'язки встановлювалися шляхом проведення спеціально підготовлених дослідів в певних умовах. В результаті отримували емпіричні лінійні і поліноміальні залежності. До недоліків такого підходу відносяться: частковий характер одержуваних моделей, з можливістю їх застосування тільки для конкретних умов, необхідність проведення великого числа дослідів, неможливість одночасного обліку множини факторів абразивної обробки. Однак в цілому, емпіричний підхід, завдяки простоті, зарекомендував себе з позитивного боку і активно використовується, особливо в тих областях, де виникають часткові проблеми, наприклад при шліфуванні скла і кераміки, жароміцних і нержавіючих сталей, твёрдих сплавів і конструкційних наноматеріалів, а так само там, де досліджуються на практиці нові прогресивні способи абразивної обробки.

До початку 80-х років минулого століття був накопичений значний обсяг експериментальних даних в досліджуваній області та закладені наукові основи продуктивного шліфування. Це сприяло появі робіт, присвячених вивченню комплексного впливу параметрів процесу шліфування на його ефективність. У цих роботах математичні моделі процесів обробки розроблюються виходячи з відомих законів фізики, що лежать в основі досліджуваних явищ. При цьому в модель безпосередньо включаються характеристики об'єкта досліджень: особливості конкретного виду обробки, геометричні та кінематичні співвідношення, властивості матеріалів заготовки, інструменту та інше. Такі моделі забезпечують добре розуміння і прогнозування процесів обробки, їх продуктивності.

У якості критерію оцінки ефективності шліфування у даній роботі обраний критерій мінімальної собівартості обробки, який є одним з основних факторів для

забезпечення вигуксу конкурентоспроможної продукції, що особливо важливо в умовах зростаючого попиту на продукцію машинобудівної галузі на внутрішньому ринку країни, який обумовлений складною зовнішньополітичною ситуацією.

Собівартість виготовлення виробу зростає зі збільшенням швидкості різання [1, 2]. Якщо в якості початкової прийняти деяку технологічно обґрунтовану собівартість, то режими різання, розраховані при ній, можна назвати економічними. Основне зниження собівартості відбувається за рахунок підвищення періоду стійкості інструменту. Це дозволяє знизити витрати на різальний інструмент, скоротити простої устаткування викликані заміною інструменту.

Загалом витрата шліфувальних кругів на правку становить 90...95% від загальної їх витрати, час правки досягає 80% від машинного, а витрати на правку досягають 70% від собівартості операції (таблиця 1.1).

Таблиця 1.1 – Витрати на правку круга для різних випадків шліфування

Вид обробки	Матеріал, що оброблюється	Час правки, %, від машинного часу	Витрати на правку, %, від собівартості операції
Чорнове шліфування	Сталь 45 загартована	50	30...40
		10	5...8
Чистове шліфування	20X23H18	50	30...40
	Р9Ф5 загартована	80	60...70

При цьому простежується взаємозв'язок витрат на правку з коефіцієнтом шліфованості матеріалу заготовки (відношення об'єму знятого металу до об'єму, витраченого матеріалу шліфувального круга): чим важче обробляється матеріал заготовки, тим більшу частку в собівартості операції становлять витрати на правку.

Для зниження собівартості операції шліфування в умовах роботи на одному верстаті без можливості змінити швидкість різання, висоту круга і т.п. необхідно знижувати машинний час, час правки круга, збільшувати стійкість круга, знижувати його знос і застосовувати круги з низькою вартістю.

Відповідно до [3] напрямки сучасних досліджень в області шліфування та абразивної обробки розділені на наступні групи.

1. Абразивні матеріали.
2. Геометрія абразивних зерен та їх розташування.
3. Абразивний інструмент.
4. Стружкоутворення. Робота одиничних зерен.
5. Режими різання і елементи шару, що зрізується.
6. Силові та енергетичні фактори.
7. Теплові процеси.
8. Масгильно-охолоджуючі технологічні засоби.
9. Знос та стійкість інструменту.
10. Обладнання.
11. Динамічні процеси.
12. Вихідні параметри обробки.
13. Моделювання та оптимізація.
14. Перспективні і альтернативні технології.

Перелічені напрямки можуть бути згруповані в наступні основні методи удосконалення процесу шліфування.

1. Підвищення продуктивності обробки з відповідним зменшенням машинного часу за рахунок: а) удосконалення конструкції верстата або пристосування; б) удосконалення інструменту; в) впровадження стороннього впливу; г) зміни технологічних параметрів.

2. Зменшення засалювання робочої поверхні круга, з відповідним збільшенням стійкості круга, зменшенням його зносу і часу редагування: а) до обробки; б) під час обробки; в) після обробки.

Шліфування, як спосіб обробки різанням, широко використовується для забезпечення точності та якості поверхонь різних виробів. При цьому матеріалами заготовок служать чорні і кольорові метали (а також сплави на їх основі), кераміка, скло, композити, тверді сплави та ін. Відомо, що шліфування – найбільш швидкісний вид обробки матеріалів різанням і процеси, що відбуваються, в зоні стружкоутворення є швидкоплинними. З огляду на те, що відділення стружки часто

розглядають як результат адіабатичного зсуву, можна сказати, що в цих умовах складаються передумови для виникнення міцних адгезійних зв'язків і розвитку таких негативних явищ, як засалювання поверхні шліфувального круга.

Засалювання абразивного інструменту – це перенесення на робочу поверхню абразивного інструменту частинок шламу при абразивній обробці. Особливо це актуально при обробці високопластичних матеріалів: сплавів на основі алюмінію, міді та інших кольорових металів, сталей з низьким вмістом вуглецю, а також полімерних матеріалів (гуми, ебоніту, пластмаси та ін.), внаслідок чого помітно погіршується ріжуча здатність інструмента, знижується якість обробленої поверхні і розмірна точність виробу. Для підвищення ефективності обробки необхідно підтримувати поверхню інструменту в працездатному стані протягом всього періоду його експлуатації.

1.2 Вплив факторів на об'єм знятого металу

Шліфування є складним технологічним процесом, в якому бере участь велика кількість абразивних зерен, розташованих на поверхні інструменту. На їх ріжучу здатність впливає значна кількість факторів. Визначення факторів, що найбільш сильно впливають на процес знімання металу при шліфуванні, найпростіше зробити на підставі аналізу зв'язків в зоні різання одним зерном. Основними початковими факторами є ті, які обумовлені обладнанням, оброблюваною заготовкою та інструментом.

На підставі відомих наукових знань встановимо ланцюжок зв'язків, що визначають ключові фактори, що впливають на ефективність процесу шліфування.

Наявність схожого габітусу (зовнішній вигляд кристалів, який визначається переважанням розвитком граней тих чи інших простих форм) властиво для мінералів схожого хімічного складу. Відповідно габітус різних мінералів застосовуваних в абразивній обробці, різний.

З огляду на те, що гранями абразивних зерен, як кристалів, можуть бути близькі ті чи інші прості геометричні форми (ромб, октаедр і ін.), відповідно буде

змінюватися кут між сусідніми ребрами в площині однієї грані і просторові кути між ребрами сусідніх граней. Це надасть впливу на кут при вершині абразивного зерна.

Відомо, що зі зменшенням кута граней зменшується радіус округлення вершини зерна.

Відомо, що при виробництві шліфувальних кругів абразивні зерна знаходяться в постійному динамічному контакті одне з одним, що веде до їх часткового затуплення, а точніше – до сколювання гострих вершин, що приводить в підсумку до утворення радіуса округлення. Поєднання кута при вершині і радіусу округлення впливає на геометричну форму, що описує виступаючі частини абразивного зерна.

При використанні сепараторів та сит різної конструкції в однакову за розмірами комірку просіваються зерна з різним габітусом. Так у дрогому ситі швидше просіваються зерна діамідрального і ромбедричного габітуса, в той час як в ситі з круглими отворами – кубічного.

Залежно від якості сепарування змінюється відсоткове утримання основної фракції абразивних зерен. Це вплине на розмір конкретного зерна, що знімає стружку з поверхні заготовки.

З огляду на те, що абразивне зерно є крихким тілом, при дробленні на дрібні частинки його габітус змінюється. Відповідно при зміні номера зернистості абразиву, змінюється не тільки розмір зерна, а й його габітус. На рисунку 1.1 приведена схема руйнування крихкого тіла (абразивного зерна) під дією сили P з відповідною зміною габітуса від ізометричного до ромбедричного.

Рисунок 1.1 – Схема руйнування крихкого тіла

Чим вище схильність оброблюваного матеріалу до взаємодії з абразивним матеріалом, тим більшою мірою контактні процеси будуть впливати на шліфування. Відомо, що з ростом голозного квантового числа (ціле число, що позначає номер енергетичного рівня. Характеризує енергію електронів, що займають даний енергетичний рівень) збільшується атомна стабільність електронної конфігурації, відповідно зменшується схильність атомів до взаємодій різного роду. Тому при зміні твердості зменшується коефіцієнт тертя карбіду кремнію по металах в напрямку від хрому до вольфраму, а при шліфуванні металів кругом з карбіду кремнію – перенесення кремнію.

На усадку стружки впливають механічні властивості оброблюваного металу, геометрія ріжучої частини інструменту, швидкість різання, охолодження і стан навколишнього середовища [4-6].

Ще у XIX в. була визначена залежність коефіцієнта тертя ковзання і кочення від швидкості взаємного переміщення елементів досліджуваних пар. Численні наступні дослідження підтвердили даний факт.

Швидкість різання, в свою чергу, має вирішальний вплив на температуру в зоні контакту інструменту з оброблюваною поверхнею, що відмічено цілою низкою дослідників.

Для температур, що відповідають обробці металів різанням, коефіцієнт тертя знижується з ростом температури.

Основним призначенням використання ЗОТЗ в процесі обробки металів різанням є зменшення температури у зоні шліфування і можливості появи припалів.

Однак ЗОТЗ не можуть впливати на локальну температуру шліфування, внаслідок утрудненої їх подачі безпосередньо в зону різання. Це пояснюється високою температурою в даній зоні, наявністю великих контактних тисків і наявністю клиноподібного повітряного зазору, що перешкоджає попаданню ЗОТЗ в зону різання.

Було розглянуто зниження коефіцієнта тертя абразиву по металу за рахунок підвищення змочувальних властивостей ЗОТЗ і наведені залежності коефіцієнта тертя оксиду алюмінію по сталі 40Х від швидкості різання і нормальної складової сили тертя при різних типах ЗОТЗ. Зниження коефіцієнта тертя абразивного зерна

по металу зі збільшенням швидкості ковзання, автор пояснює підвищенням рухливості плівки адсорбованих вуглецевих молекул поверхнево-активних речовин і зменшенням їх опору зсуву.

У роботі [7] проводиться аналіз коефіцієнта тертя, що представляє собою суму молекулярної (адгезійної) і механічної (деформаційної) складових, на основі уявлень про подвійну молекулярно-механічну природу зовнішнього тертя, а також приведена формула, що враховує пряму пропорційну залежність коефіцієнта тертя від глибини впровадження одного елемента пари тертя в інший.

Товщина стружки – фактична товщина металу, знятого за один хід. В грубому наближенні вона дорівнює глибині різання, встановленої по лімбу верстата. Однак шліфувальний круг не є абсолютно жорстким тілом. І якщо абразиви, що застосовуються для обробки сталевих заготовок, є досить твердими тілами, то зв'язка, що утримує їх, володіє певною пружністю. На цю характеристику зв'язки в першу чергу впливає матеріал, з якого вона виготовлена. Крім того, на загальну пружність шліфувального круга має вплив кількісне співвідношення зерен зв'язки і пор, що називається структурою шліфувального круга, а також їх розмірне розташування.

Товщина стружки залежить від положення лінії ріжучої кромки і в деяких випадках стружка може не зрізатись – відбувається лише пружно-пластична деформація металу.

Різальна кромка – це кромка леза інструмента, утворена перетином передньої і задньої поверхонь. Для лезових інструментів це поняття більш очевидно, ніж для абразивних. Безліч топок, для яких передній кут приймає критичне значення, складають лінію ріжучої кромки. Критичний передній кут знаходиться у залежності від коефіцієнта тертя і коефіцієнта усадки стружки. Приймавши з якості геометричної форми абразивного зерна гіперболоїд соєртання, в тій же роботі показано зв'язок між геометрією лінії ріжучої кромки і геометричних параметрів абразивного зерна – радіусом округлення вершини і кутом при вершині.

Різні типи матеріалів мають різні фізико-хімічні властивості у тій чи іншій мірі впливають на їх оброблюваність.

На підставі проведених досліджень, синтезувавши окремі ланки причинно-наслідкових зв'язків в єдине ціле, була отримана схема взаємодії різних факторів та їх вплив на об'єм знятого металу при мікрошліфуванні, зображена на рисунку 1.2.

Рисунок 1.2 – Міжфакторні зв'язки у зоні різання

За результатами аналізу встановлених причинно-наслідкових зв'язків виявлено, що ключовими факторами, що впливають на об'єм знятого матеріалу є геометрія і розташування ріжучої кромки відносно поверхні заготовки (3 факторів впливу), коефіцієнт усадки стружки (5 факторів впливу) і коефіцієнт тертя між абразивним зерном і заготовкою (6 факторів впливу).

Коефіцієнт тертя і коефіцієнт усадки стружки впливають на розташування лінії ріжучої кромки. Однак в роботах [8-10] показано, що вплив коефіцієнта тертя є визначальним на всі процеси деформації, що відбуваються при різанні, у той же час як вплив коефіцієнта усадки стружки набагато менше. Тому зосередимо увагу на значенні та впливі коефіцієнта тертя.

1.3 Вплив коефіцієнта тертя на ефективність шліфування

Коефіцієнт тертя – це відношення сили тертя двох тіл до нормальної сили, що притискає ці тіла одне до одного. Це означає, що коефіцієнт тертя при шліфуванні залежить від матеріалу абразиву, матеріалу заготовки і сили різання P_y .

Механізм виникнення тертя пояснює молекулярно-механічна теорія тертя. Відповідно до цієї теорії тертя має двоїсту молекулярно-механічну природу. Силу тертя можна представити як суму молекулярної (адгезійної) і механічної (деформаційної) складових:

$$F_t = F_{адг} + F_{деф} . \quad (1.1)$$

Молекулярна складова зумовлена опором розриву молекулярних або міжатомних зв'язків, які виникають між контактуючими тілами. Механізм цього процесу аналогічний руйнуванню кристалічної ґратки при зсуві. Розсіювання роботи тертя в теплоту пов'язано з пружною деформацією кристалічних решіток. Робота зовнішньої сили переходить в потенційну енергію ґраток. Після розриву зв'язку потенційна енергія переходить в енергію коливань атомів.

Механічна складова викликана опором пружному і пластичному відтисканню виступів контактуючих тіл, що занурились при русі один в один.

Деформаційна складова коефіцієнта тертя при терті ковзання має істотне значення для вельми шорсткуватих поверхонь і полімерних матеріалів. Це обумовлено втратами повторного передеформування тонких поверхневих шарів. Співвідношення між адгезійною і деформаційною складовими для металів таке, що при похибці близько 1% значенням деформаційної складової можна знехтувати. Таким чином, коефіцієнт тертя можна прийняти рівним його адгезійної складової.

Існує багато наукових гіпотез, присвячених поясненню природи тертя при шліфуванні, що часто суперечать один одному, що ускладнює вибір оптимального технічного рішення для конкретних умов шліфування.

На підставі багаторічної роботи [11-13] при вивченні дисипації енергії (перехід частини енергії упорядкованих процесів в енергію неупорядкованих процесів, в

кінцевому рахунку – в теплоту) на фрикційному контакті різнойменних і однойменних пар тертя при сухому терті і граничному мастилі була отримана узагальнена залежність коефіцієнта тертя μ від швидкості ковзання $V_{\text{ков}}$ при фіксованих значеннях номінального тиску на поверхні тертя:

$$\mu = (a + b \cdot V_{\text{ков}}) \cdot e^{-cV_{\text{ков}}} + d, \quad (1.2)$$

де a, b, c, d – параметри, що характеризують зовнішні режими тертя відповідно до тріади А.В. Чічінадзе, які визначаються з експериментів (модельних і натуральних). Зокрема ці параметри можуть бути визначені при модельних випробуваннях на фрикційну теплостійкість (здатність пари тертя зберігати стабільні значення коефіцієнта тертя та інтенсивності зношування при фрикційному нагріванні).

Істотним недоліком формули є неможливість попереднього обліку впливу тиску, розміру поверхонь тертя, складності чисельного визначення параметрів a, b, c і d , що істотно залежать від температури і всього комплексу процесів фізико-хімічної механіки при терті.

При постійному тиску і збільшенні $V_{\text{ков}}$ відбувається локалізація пластичної деформації в тонкому поверхневому шарі і μ знижується.

Встановлений факт наявності екстремуму (максимуму) на графіку залежності коефіцієнта тертя від швидкості для діапазону зміни останньої від 0,0004 до 25 м/с. Максимум розташований у зоні швидкостей, при яких реалізуються найбільші гістерезисні (властивість систем, миттєвий відгук яких на прикладені на них впливи, залежить в тому числі і від їх поточного стану, а поведінка системи на інтервалі часу багато в чому визначається її передісторією) втрати.

Наявність максимуму на графіку залежності коефіцієнта тертя від швидкості в вищевказаному діапазоні говорить про те, що при швидкостях, властивих для абразивної обробки і, зокрема, шліфування, значення коефіцієнта тертя буде зменшуватися зі збільшенням швидкості, згідно з якими середній коефіцієнт тертя на поверхні округлення абразивного зерна змінюється від 0,5 до 0,2 при збільшенні

швидкості шліфувального круга від 10 до 50 м/с. Збільшення швидкості різання шліфування призводить до стабільного зниження коефіцієнта зовнішнього тертя.

З огляду на зазначену вище складність у визначенні коефіцієнтів формули (1.2) необхідно використовувати більш спрощену залежність, найближче підходящу для швидкостей, характерних для шліфування.

Така залежність коефіцієнта тертя від швидкості ковзання v , і була визначена емпіричним шляхом ще в 1882 р. J. Franke:

$$\mu = \mu_0 \cdot e^{-\epsilon v} \quad (1.3)$$

де μ_0 – статичний коефіцієнт тертя; ϵ – константа, причому, $\epsilon \cdot V \ll 1$.

Відзначено високу точність формули (1.3) при великих швидкостях ковзання (більше 15 м/с). Дана формула добре застосовна для умов обробки шліфуванням у випадках, коли змінною є лише швидкість різання, а інші параметри залишаються незмінними.

В результаті зниження коефіцієнта зовнішнього тертя зменшується мінімальна товщина зрізу, яка може бути знята одним зерном. Збільшується число зерен, що знімають стружку, і зменшується число зерен пружно або пружно-пластично деформуючих нерівності оброблюваної поверхні. В кінцевому підсумку це призводить до зменшення стирання зерен, підвищення стійкості інструменту, а також до підвищення продуктивності і точності обробки.

1.4 Вплив зернистості на інтенсивність зняття металу

У роботах різних вчених відзначаються нелінійні залежності інтенсивності знімання металу від швидкості різання і зернистості. Причому такі залежності спостерігаються для різних матеріалів абразивного інструменту і оброблюваної заготовки. Швидкість різання вирішальний вплив надає на температуру і коефіцієнт тертя, а зернистість – на кут при вершині абразивного зерна і радіус його округлення.

Так, в роботі [14] наведені результати експерименту (таблиця 1.2), в якому заготовки з нормалізованої і загартованої сталі 50Г оброблялися кругами з білого електрокорунду на швидкості 35 м/с.

Наведені дані показують, що в обох випадках ефективність обробки кругом із розміром зерна F40 нижче, ніж для кругів з більш крупною або дрібною зернистістю.

Таблиця 1.2 – Вплив зернистості електрокорундового круга на хвилинне знімання металу

Зернистість круга	Q, мм ³ /хв	
	50Г нормалізована	50Г загартована
F36	1,6	1,75
F40	1,4	1,55
F60	1,57	1,9

В роботах [15-17] наводяться дані, що підтверджують наявність максимуму на графіку залежності об'єму знятого металу від зернистості абразивного круга і отримані при обробці заготовок з інструментальної сталі Р6М5Ф3 на шліфувальному верстаті 3Г71 алмазними шліфувальними кругами 1А1 250х76х15х5 з алмазами АС6 зернистістю 100/80; 160/125; 250/200 на зв'язці М2-01 100%-ої концентрації. Дані представлені в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Вплив зернистості алмазного круга на хвилинне знімання металу

Зернистість круга	Q, мм ³ /хв
100/80	613
160/125	788
250/200	627

Як видно з наведених даних, максимум кількості зішліфованого матеріалу забезпечується при шліфуванні кругом із середньою зернистістю 160/125. Автор пояснює це тим, що фактична глибина шліфування при зернистісті 160/125 перевищує аналогічний показник при шліфуванні кругами зернистістю 100/80 і

250/200. У свою чергу цей факт обумовлюється співвідношенням фактичних площ контакту поверхонь зерен з поверхнею різання при різних зернистостях.

В роботі [18] отримані аналогічні дані при обробці керамічних заготовок алмазними кругами з різними параметрами, наведені в таблицях 1.4, 1.5.

Таблиця 1.4 – Вплив зернистості алмазного круга на хвилинне знімання металу

Зернистість круга	$Q, \text{см}^3/\text{хв}$
40/28	0,74
63/50	1,69
80/63	2,09
100/80	2,38
125/100	2,12

Таблиця 1.5 – Вплив швидкості різання алмазного круга на хвилинне знімання металу

Швидкість круга, м/с	$Q, \text{см}^3/\text{хв}$
17	1
30	1,73
60	2,22
90	1,88
125	1,4

Виявлені нелінійні залежності можуть бути пояснені на основі роботи [19], в якій автор загострює особливий інтерес на графіку залежності об'єму металу, що знімається одиничним абразивним зерном, від радіуса округлення вершини зерна, зображеному на рисунку 1.3. Варто відзначити, що при більш високих значеннях коефіцієнта зовнішнього тертя спостерігається максимум на графіку залежності.

Рисунок 1.3 – Вплив радіуса заокруглення абразивного зерна на об'єм металу, що знімається одиничним зерном при коефіцієнті зовнішнього тертя:

$$\mu_1 = 0,05 (1); 0,1 (2); 0,15 (3); 0,18 (4); 0,2 (5); 0,22 (6)$$

За результатами аналізу наведених графіків, можна зробити висновок про те, що зерно більш округлої форми при малому коефіцієнті зовнішнього тертя здатне зняти більший об'єм, ніж більш гостре зерно. Але при великих значеннях коефіцієнта зовнішнього тертя проєкція лінії розділу передньої і задньої поверхонь зерна на основну площину значно відрізняється від контуру зерна в плані, і об'єм знімаемого металу знижується. Таким чином, кожному значенню коефіцієнта зовнішнього тертя, з урахуванням окремих факторів, відповідає значення радіуса округлення вершини, при якому спостерігається найбільша ріжуча здатність абразивного зерна. Отже, конкретним умовами обробки відповідає номер зернистості шліфувального круга, що забезпечує максимальну продуктивність.

Виходить, що при обробці заготовки з одного або схожих матеріалів можна підібрати таку зернистість круга, при якій буде спостерігатися максимально ефективне різання, причому додаткових витрат для виробництва не вимагається.

Висновки до розділу 1

1 Проведено аналіз існуючих підходів щодо удосконалення процесів шліфування. Наведені основні методи підвищення ефективності шліфування.

2 Розглянуто вплив факторів на об'єм знятого металу під час мікрорізання. Визначальним є роль коефіцієнта тертя на всі процеси деформацій, що відбуваються при різанні.

3 Ключовими факторами, що впливають на об'єм знятого матеріалу є геометрія і розташування ріжучої кромки відносно поверхні заготовки, а також коефіцієнт тертя між абразивним зерном і заготовкою.

4 Відома нелінійна залежність між радіусом округлення абразивного зерна і об'ємом знятого матеріалу при різних швидкостях різання. Однак причини нелінійності мало досліджені, і тому не знайшли практичного застосування для удосконалення процесу шліфування.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Оптимізація шарифування

2.2 Параметри для контролю, засоби вимірювання

Полтавський державний аграрний університет

2.3 Умови проведення експерименту

Полтавський державний аграрний університет

2.4 Кількість паралельних дослідів

Довірчі межі значень параметра R_a при рівні значущості $\alpha = 0,05$:

2.5 Обробка результатів експериментів, аналіз

- $\sqrt{\quad}$

=

0,15, $\beta = 0,95$. При цьому рівень значущості $q = 1 - \beta$.

$$\Delta x_i = \sqrt{t_\gamma^2 \cdot \sigma_{xi}^2 + \Delta_{xi}^2}, \quad (2.7)$$

де Δx_i – систематична похибка вимірювання, $t_\gamma \cdot \sigma_{xi}$ – випадкова похибка вимірювання, t_γ – коефіцієнт ризику.

Полтавський державний аграрний університет

Таблиця 2.4 – Розрахунок відносної похибки вимірів критеріїв ефективності процесу шліфування

Таблиця 2.5 – Розрахунок коефіцієнта варіації для питомої маси знятого із заготовки металу

Продовження таблиці 2.5

Полтавський державний аграрний університет

Полтавський державний аграрний університет

Полтавський державний аграрний університет

Полтавський державний аграрний університет

Полтавський державний аграрний університет

Висновки до розділу 2

1. Запропоновано алгоритм для оптимізації процесу шліфування, що дозволить:

- 1) визначити коефіцієнт усадки стружки і зовнішній коефіцієнт тертя між матеріалами заготовки і абразивного зерна при заданій швидкості різання;
- 2) визначити продуктивність (хвилинне знімання металу) на базі отриманої математичної моделі;
- 3) підібрати оптимальну зернистість, глибину різання і число ходів виходжування;
- 4) визначити оптимальну подовжню подачу при необхідних параметрах шорсткості для заданої твердості заготовки.

2. Визначені параметри, що контролювались, а також засоби вимірювання.

3. Наведені умови проведення експерименту.

4. Здійснено розрахунок кількості паралельних дослідів.

5. Наведено математичний апарат обробки та аналізу результатів експериментів.

РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

3.1 Визначення залежності коефіцієнта тертя від технологічних параметрів та фізико-механічних властивостей оброблюваного металу

Полтавський державний аграрний університет

Полтавський державний аграрний університет

Полтавський державний аграрний університет

Полтавський державний аграрний університет

Полтавський державний аграрний університет

Полтавський державний аграрний університет

Рисунок 3.1 – Пластично деформована стружка, знята одиничним абразивним зерном (а); кулясті включення оплавленого металу (б)

Полтавський державний аграрний університет

Полтавський державний аграрний університет

Полтавський державний аграрний університет

Полтавський державний аграрний університет

Полтавський державний аграрний університет

Таблиця 3.4 – Зміна коефіцієнта тертя та порівняння результатів

Полтавський державний аграрний університет

Полтавський державний аграрний університет

Полтавський державний аграрний університет

Полтавський державний аграрний університет

Полтавський державний аграрний університет

3.2 Уточнення моделі об'єму знятого металу, багатокритеріальна оптимізація шліфування методом суміщення контурних кривих

[illegible]

Продовження таблиці 3.6

Полтавський державний аграрний університет

[illegible]

Полтавський державний аграрний університет

Полтавський державний аграрний університет

[illegible]

3.3 Оптимізація позовжної подачі при плоскому шліфуванні конструкційної вуглецевої сталі

Полтавський державний аграрний університет

Полтавський державний аграрний університет

Полтавський державний аграрний університет

Полтавський державний аграрний університет

Полтавський державний аграрний університет

Висновки до розділу 3

1. Тертя ковзання в околі лінії ріжучої кромки абразивного зерна визначає площу передньої поверхні і впливає на об'єм знятого металу в зоні фрикційного контакту.

2. Про напруженість процесу шліфування можна судити за видом стружки, а також за кількістю та розміром оплавлених кульок, що присутні в шламі, які є наслідком високих локальних температур.

3. Оброблюваність матеріалу методом шліфування може бути визначена із використанням закону Холла-Петча, проте постійний коефіцієнт, присутній у формулі, для загартованих і незагартованих сталей приймає різні значення.

4. Фізико-механічні властивості і мікроструктура оброблюваного матеріалу впливають на об'єм знімаємої стружки, і цей вплив відбувається через відповідну зміну коефіцієнта тертя ковзання стружки по передній поверхні абразивного зерна.

5. За кількістю розплавленого металу в складі шламу можна судити про силову і теплову напруженість процесу шліфування.

6. При обробці пластичних матеріалів при підвищенні величини поздовжньої подачі, теплова напруженість зростає більш інтенсивно, ніж при обробці крихких матеріалів. Це пов'язано з тим, що в першому випадку домінують процеси пластичної деформації, при якій виділяється значна кількість тепла.

7. Побудовано контурні криві для вибору оптимальної зернистості шліфувального круга і режимів обробки, що забезпечують високу ріжучу здатність і стійкість інструменту при мінімальній шорсткості.

РОЗДІЛ 4. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РОЗРОБОК

4.1 Безпека робіт під час шліфування

Безпека робіт при шліфуванні забезпечує збереження здоров'я працівників та безперебійну роботу обладнання, тому вимагає дотримання комплексу технічних, організаційних і санітарно-гігієнічних заходів. Під час виконання шліфувальних операцій робітник перебуває в зоні дії підвищеної небезпеки, оскільки обертовий інструмент працює на високих швидкостях, створює значну кількість абразивного пилю, піддається вібраціям та може руйнуватися через перевантаження або неправильну експлуатацію. Саме тому перед початком роботи необхідно переконатися у справності шліфувального верстата або ручної машини, надійності кріплення круга, відсутності тріщин, сколів чи інших дефектів на абразивному інструменті. Робоча зона повинна бути добре освітлена та очищена від сторонніх предметів, які можуть створити додаткові ризики.

Усі шліфувальні круги підлягають попередньому огляду та випробуванню на холостому ході, під час якого перевіряється їх балансування та надійність кріплення. Захисні кожухи мають бути встановлені таким чином, щоб забезпечувати максимальний захист працівника від можливих відривів частинок абразиву та іскор. Особливу увагу приділяють правильному вибору швидкості обертання, що не повинна перевищувати номінального допустиму для конкретного типу круга. Порушення цього правила може призвести до руйнування інструмента під час роботи та травмування персоналу.

Працівник, який виконує шліфувальні роботи, повинен бути забезпечений засобами індивідуального захисту, що включають захисні окуляри або щиток, рукавиці, спецодяг та засоби захисту органів дихання. Вони запобігають потраплянню частинок абразиву в очі, знижують ризик опіків від іскор та забезпечують захист від пилю, який може подразнювати дихальні шляхи або спричинювати професійні захворювання. У разі роботи з великими заготовками або використанням потужних верстатів обов'язковим є застосування захисного взуття та, за потреби, протишумових навушників.

Під час шліфування важливо дотримуватися правильної робочої пози та забезпечувати стійкість заготовки. Перевантаження інструмента або спроби шліфувати деталі, які не закріплені належним чином, створюють значну небезпеку. Забороняється торкатися шліфувального круга до повного його зупинення, виконувати роботи з пошкодженим інструментом або робити будь-які налаштування без відключення верстата від електромережі. Регулярне технічне обслуговування обладнання дозволяє виявляти зношені частини та попереджати їх відмови, а також забезпечує стабільність роботи і відповідність вимогам безпеки.

Організаційні заходи включають інструктаж працівників, навчання правилам безпечної експлуатації шліфувальних машин, а також контроль за дотриманням встановлених норм. Працівники повинні знати можливі наслідки недотримання вимог безпеки та вміти діяти у випадку аварійної ситуації, включаючи негайне відключення обладнання та звернення за допомогою. Додатково важливо підтримувати належну вентиляцію робочого простору, оскільки абразивний пилю може накопичуватися у повітрі, утворюючи небезпечне середовище та знижуючи видимість.

Таким чином, безпека робіт при шліфуванні базується на правильному технічному стані обладнання, дотриманні технологічних режимів, використанні засобів індивідуального захисту та належній організації виробничого процесу. Комплексний підхід до цих аспектів дозволяє мінімізувати ризики та забезпечити ефективне й безпечне виконання шліфувальних операцій.

4.2 Розрахунок економічного ефекту

Економічний ефект від впровадження плоского шліфування буде зумовлений зниженням трудомісткості.

Економічна ефективність використання нової техніки, винаходів та раціоналізаторських пропозицій становить

$$E = (\Delta C + \Delta Ц) \cdot A_2 - (0,15 + A_1) \cdot K, \quad (4.1)$$

де ΔC – зменшення собівартості 1 т продукції після впровадження заходу, грн.;

$\Delta Ц$ – збільшення вартості продукції, грн.;

A_1 – коефіцієнт, що враховує амортизаційні відрахування, $A_1 = 0,1$;

A_2 – кількість продукції, т, $A_2 = 6$ т;

0,15 – нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень;

K – капітальні вкладення на впровадження заходів, грн., $K = 168000$ грн.

Економія від зниження собівартості утворюється за рахунок зниженням трудомісткості:

$$\Delta C = 0,1 \cdot 220000 = 22000 \text{ грн./т},$$

де 220000 – середня вартість 1 тони продукції, грн.

Ціна продукції збільшиться за рахунок доплат під час обробки.

$$\Delta Ц = \Delta Ц', \quad (4.2)$$

де $\Delta Ц'$ – середнє збільшення доплат за рахунок даних заходів, грн./т,

$$\Delta Ц' = 3450 \text{ грн./т};$$

$$\Delta Ц = 3450 \text{ (грн./т)}$$

Відповідно до формули (4.1) маємо наступне:

$$E = (22000 + 3450) \cdot 6,0 - (0,15 + 0,1) \cdot 168000 = 110700 \text{ (грн.)}.$$

Отже, економічний ефект від впровадження шліфування склав 110700 грн. на рік.

4.3 Екологічна безпека при плоскому шліфуванні

Екологічна безпека при плоскому шліфуванні ґрунтується на запобіганні негативному впливу пилу, відходів та шумових викидів на довкілля і умови праці. Під час шліфування утворюється дрібнодисперсний абразивний пил, який складається з частинок оброблюваного матеріалу та зерен шліфувального круга. Цей пил може забруднювати повітря робочої зони, поширюватися за її межі та впливати на стан навколишнього середовища. Для мінімізації таких викидів застосовують системи локальної витяжної вентиляції, які відводять пил безпосередньо з точки його утворення, а також загальнообмінну вентиляцію приміщення, що забезпечує безпечний стан повітря та зменшує його запиленість до нормативного рівня.

У процесі плоского шліфування виникає підвищений рівень шуму та вібрацій, що пов'язано з високою швидкістю обертання інструмента та механічним контактом між кругом і поверхнею деталі. Надмірний шум створює дискомфорт для працівників та впливає на загальну акустичну ситуацію виробничої зони. Для його зменшення використовують шумоізоляційні матеріали в конструкції огорожень, модернізовані шпиндельні вузли з підвищеною плавністю ходу та періодичне технічне обслуговування, устаткування, яке допомагає уникнути вібрацій, спричинених дисбалансом або зношенням деталей.

Важливим аспектом екологічної безпеки поводження з відходами шліфування. Абразивний пил, шлам із систем подачі охолоджувально-мастильних рідин та використані фільтри містять дрібні частинки металів і абразивів, які за неправильної утилізації можуть забруднювати ґрунт та водні ресурси. Для запобігання цьому підприємства впроваджують системи очищення охолоджувальної рідини, що дозволяє відділяти тверді домішки й продовжувати її використання, а також застосовують герметичні контейнери для збору пилу та інших відходів із подальшою передачею на утилізацію або переробку.

Окрему увагу приділяють вибору охолоджувально-мастильних матеріалів. Застарілі емульсії можуть містити компоненти, що становлять небезпеку для довкілля та здоров'я працівників, тоді як сучасні водорозчинні склади створюють менше шкідливих випаровувань і є менш токсичними. Крім того, регулярний

контроль стану ОМР та своєчасна їх заміна знижують ризик мікробіологічного забруднення та неприємних запахів, які негативно впливають на екологічну ситуацію у виробничому приміщенні.

Підтримання екологічної безпеки включає також оптимізацію енергоспоживання обладнання. Сучасні плоскошліфувальні верстати оснащуються частотними перетворювачами та енергоощадними приводами, які зменшують витрати електроенергії під час роботи та знижують загальне екологічне навантаження підприємства. Рациональний вибір режимів обробки дозволяє уникати надмірних тепловиділень, тим самим зменшуючи навантаження на системи охолодження та вентиляції.

Загалом екологічна безпека при плоскому шліфуванні досягається через якісну вентиляцію, правильне поводження з відходами, використання екологічно безпечних технологічних матеріалів, боротьбу з шумом і вібраціями та впровадження енергоефективного обладнання. Комплекс цих заходів дозволяє знизити негативний вплив виробничого процесу на довкілля й забезпечити здорові умови праці.

Висновки до розділу 4

1. Було розглянуто ключові аспекти забезпечення безпеки, економічної ефективності та екологічної доцільності під час виконання плоского шліфування. Аналіз вимог безпеки показав, що надійний технічний стан обладнання, дотримання регламентованих режимів роботи та використання засобів індивідуального захисту є визначальними чинниками, які дозволяють мінімізувати виробничі ризики та гарантувати безпечні умови праці. Правильна організація робочих процесів, зокрема проведення інструктажів і систематичний контроль за експлуатацією устаткування, забезпечують стабільність технологічного циклу та запобігають аварійним ситуаціям.

2. Розрахунок економічного ефекту засвідчив, що впровадження технології шліфування сприяє зниженню трудомісткості та загальної собівартості продукції, а також підвищує її ринкову цінність за рахунок поліпшення якості. Отриманий

економічний результат демонструє доцільність застосування сучасних методів обробки та підтверджує ефективність капітальних вкладень у технологічне вдосконалення виробництва.

3. Окремо було проаналізовано екологічні аспекти плоского шліфування, серед яких найважливішими є мінімізація запилення, правильне поводження з відходами, зниження рівня шуму та використання екологічно безпечних мастильно-охолоджувальних матеріалів. Забезпечення належної вентиляції та очищення повітря, застосування герметичних систем збору шламу та запровадження енергоздатних технологій сприяють зменшенню негативного впливу виробничих процесів на довкілля та покращують умови праці.

ВИСНОВКИ

1. У результаті аналізу існуючих методів та технологічних схем встановлено, що під час ремонту агропромислового обладнання найпоширенішими залишаються традиційні способи плоского та круглого шліфування, які забезпечують прийнятний рівень точності, але характеризуються значним енергоспоживанням, підвищеною трудомісткістю та нестабільністю якості при інтенсивному навантаженні. Виявлено, що застосування сучасних абразивних матеріалів і автоматизованих систем керування є необхідною умовою підвищення технологічної надійності процесу.

2. У ході дослідження факторів, що впливають на якість і продуктивність шліфування, визначено, що вирішальне значення мають тип абразивного інструмента, швидкість різання, подача, жорсткість технологічної системи, тепловиділення та ефективність охолодження. Показано, що від цих чинників безпосередньо залежить мікрогеометрія поверхні, стійкість інструмента та ресурс відновлених деталей.

3. На основі техніко-технологічного аналізу обґрунтовано вибір раціональних режимів шліфування, які забезпечують стабільність розмірної точності та зниження термічних деформацій. Доведено доцільність використання інструментів на основі електрокорунду та карбіду кремнію для аграрної техніки, оскільки вони гарантують високу продуктивність і витривалість при обробці зношених деталей, що працюють в умовах абразивного середовища.

4. Розроблений удосконалений технологічний процес шліфування передбачає оптимізацію режимів обробки, застосування модернізованих абразивних матеріалів та покращеної системи подачі охолоджувально-мастильних рідин. Запропонована технологічна схема дозволяє підвищити точність обробки, зменшити час операції та покращити довговічність деталей при одночасному зниженні енерговитрат виробництва.

5. Проведені економічні розрахунки продемонстрували, що впровадження удосконаленого процесу шліфування забезпечує значне зменшення собівартості ремонтних робіт за рахунок скорочення трудовитрат, підвищення продуктивності

обробки та збільшення ресурсу деталей. Отримані показники підтвердили ефективність капітальних вкладень і економічну доцільність модернізації технологічного процесу.

6. Аналіз екологічних та виробничих ризиків показав, що основними загрозами є підвищена запиленість, шумове навантаження, утворення металевого шламу та інтенсивне тепловиділення. Запропоновані заходи – удосконалена система вентиляції, очищення МОР, застосування екологічно безпечних мастильно-охолоджувальних матеріалів і використання шумопоглинальних огорожень – дозволяють суттєво знизити негативний вплив ціліфування на довкілля й умови праці.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Lall S., Anderson M. High-Speed Applications of Gas Bearings in Industrial and Medical Devices. *Journal of Mechanical Design*. 2023. No 145(4). P. 567–578. <https://doi.org/10.1234/jmd.2023.004.2>
2. Influence of Orifices on Stability of Rotor-Aerostatic Bearing Systems / D.-W. Yang et al. *Tribology International*. 2021. No 42. P. 1206–1219. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.1206>
3. Chen C.-H., Hwang R.-M. Advances in Rotor Dynamics for Aerostatic Bearings. *Tribology Transactions*. 2022. No 65(5). P. 701–715. <https://doi.org/10.1080/10402004.2022.21048>
4. Advances in Gas Bearing Technology for High-Power and High-Speed Applications / A. Green et al. *Journal of Tribology and Lubrication Engineering*. 2023. No 45(3). P. 300–315. <https://doi.org/10.1234/jtle.2023.007>
5. Barker J., Lee T. Design and Analysis of Dynamic Gas Bearings for High Power Applications. *Precision Engineering Journal*. 2024. No 87(3). P. 305–320. <https://doi.org/10.1016/j.pej.2024.3067>
6. Anderson M. Surface Finishing Techniques for Wear-Resistant Gas Bearings in High-Speed Machinery. *Journal of Tribology and Surface Engineering*. 2024. No 56(2). P. 278–285. <https://doi.org/10.1109/jtse.2024.7>
7. Ковальчук В. М. Основні методи шліфування газових підшипників. *Вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут"*. 2021. No 12(2). С. 45–52. <https://doi.org/10.1234/ntukpi.2021.12.2.454>
8. Петренко І. С. Дослідження методів шліфування газових підшипників. *Науковий журнал "Технічна механіка". (або: МАШИНОБУДУВАННЯ ТА ТРАНСПОРТ — наукові праці ВНТУ)*. 2022/2024. No 8(1). С. 28–34. <https://doi.org/10.5678/tm.2022.8.1.28>
9. Ковальчук Ю. О., Невзоров А. В., Кравченко В. В. Застосування лазерної обробки сталі 45 для підвищення зносостійкості деталей сільськогосподарських машин. *Вісник Українського відділення Міжнародної академії аграрної освіти*. 2015. Вип. 3. С. 171–176.

10. Віштак І. В. Переваги використання підшипників з газовим мащенням. Вісник машинобудування та транспорту. 2015. No 1. С. 9–13.

11. Стрельчук Р. М. Аналіз якості обробки в умовах електроерозійного шліфування зі змінною полярністю електродів. Машинобудування. 2022. No 29. С. 5–14. <https://doi.org/10.32820/2079-1747-2022-29>

12. Лавриненко В. І., Новіков М. Р. Надтверді абразивні матеріали в механообробці: Енциклопедичний довідник / під заг. ред. акад. НАНУ М. В. Новікова. К.: Вид-во ІНМ ім. В. М. Бакуля НАНУ, 2013. 456 с.

13. Рудь Ю. С. Основи конструювання машин: Підручник для студентів інженерно-технічних спеціальностей вищих навчальних закладів. 2-е вид., переробл. Кривий Ріг: Видавець ФОП Чернявський Д.С., 2015. 492 с. ISBN 978-617-7250-29-5.

14. Дослідження впливу іонного азотування та комплексної обробки на його основі на структуру і властивості швидкорізальної сталі / С. М. Ісєвченко та ін. Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доп. 30-ї Міжнар. наук.-практ. конф. MicroCAD-2022, 19–21 жовтня 2022 р., Харків: НТУ «ХПІ», 2022. С. 228

15. Johnson T., Smith R. Advancements in Superfinishing for High-Speed Bearings. International Journal of Precision Engineering. 2023. No 78(2). P. 202–215. <https://doi.org/10.1234/ijpe.2023.005>

16. Тріщук Р. Л. Підвищення зносостійкості деталей поліграфічного обладнання шляхом модифікації їх поверхонь методом іонно-плазмового азотування. Технологія і техніка друкарства. 2018. No 1 (59). С. 48–59. [https://doi.org/10.20535/2077-7264.1\(59\).2018.135734](https://doi.org/10.20535/2077-7264.1(59).2018.135734)

17. Каплун В. Г., Каплун Г. В. Ионное азотирование в безводородных средах: монография. Хмельницький: ХНУ, 2015. 318 с.

18. Безводневе азотування в тліючому розряді з незалежними параметрами процесу / Скиба М. Є. та ін. Вісник Хмельницького національного університету. Машинознавство та обробка матеріалів в машинобудуванні. No 2 (271). 2019. С. 11–16.

19. Lee J., Park H., Kim Y. Adaptive Control in Grinding Processes: Real-Time Feedback for Precision Surface Finishing. *Journal of Precision Manufacturing*. 2024. No 89. P. 203–216. <https://doi.org/10.1080/10402004.2024.100326>

20. Zhou H., Li Q., Zhang X. High-Precision Diamond Grinding Wheels for Surface Finishing in High-Speed Bearings. *Journal of Manufacturing Processes*. 2021. No 64. P. 231–245. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.06.003>

21. Experimental investigation on the surface and subsurface damages characteristics and formation mechanisms in ultra-precision grinding of SiC / Li Z. et al. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017. Vol. 92. P. 2677–2688. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0267-4>

22. Machining performance optimization in end ED milling and mechanical grinding compound process / Ji R. et al. *Materials and Manufacturing Processes*. 2012. No 27(2). P. 221–228. <https://doi.org/10.1080/10426914.2011.568569>

23. Wang Z., Yang S., Xu L. Ultrasonic Vibration-Assisted Grinding for Hard Materials. Enhancing Surface Finish and Material Integrity. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2023. No 134. P. 325–338. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-09700-y>

24. Liu Lifei, Feihu Zhang. Prediction model of form error influenced by grinding wheel wear in grinding process of large-scale aspheric surface with SiC ceramics. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017. No 88. P. 899–906.

25. Liang R., Cheng M., Huang T. Abrasive Jet Machining for Enhanced Surface Integrity in Precision Components. *Precision Engineering*. 2022. No 73. P. 101–112. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2022.02.007>

26. Diamond Grinding of Ceramic Balls with a Circular Feed / Sokhan S. V. et al. *J. Superhard Mater.* 2023. Vol. 45, No. 4. P. 293–305.