

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 процесу суперфінішування кілець підшипників кочення для підвищення надійності вузлів сільськогосподарської техніки»

КРМ.133ГМмд(ОНП)_21.03.000 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
БОДНИК Андрій

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.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

БОДНИК Андрій

1. Тема роботи: «Удосконалення процесу суперфінішування кілець підшипників кочення для підвищення надійності вузлів сільсько-господарської техніки».

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 _____ Андрій БОДНИК
(підпис)

Керівник роботи _____ Володимир ВЕТОХІН
(підпис)

РЕФЕРАТ

Тлумачальна записка: 4 розділи, 19 рисунків, 4 таблиці, 20 використаних джерел, 53 сторінки. **Ілюстраційна частина:** 11 слайдів.

Об'єкт дослідження – процес суперфінішної обробки доріжок кочення кілець підшипників кочення.

Предмет дослідження – закономірності впливу параметрів суперфінішування на показники якості робочих поверхонь підшипникових кілець, можливості технологічного удосконалення процесу для підвищення довговічності підшипників у сільськогосподарській техніці.

Постановка актуальної технічної задачі – підвищення якості деталей сільськогосподарських машин.

Мета кваліфікаційної роботи магістра – підвищення надійності та довговічності підшипникових вузлів сільськогосподарської техніки за рахунок удосконалення процесу суперфінішування кілець підшипників кочення, зокрема встановлення оптимальних параметрів обробки, що забезпечують мінімальні значення шорсткості, хвилястості, відхилення геометричної форми доріжок кочення.

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

У першому розділі проведено аналіз сучасних методів остаточної обробки та оцінка переваг і недоліків різних схем суперфінішування.

Другий розділ містить опис об'єкта, умов, обладнання та методики проведення багатфакторного експерименту.

У третьому розділі подаються результати досліджень впливу параметрів брусків і часу обробки на якість поверхні.

Четвертий розділ присвячений практичному впровадженню результатів досліджень, оцінці економічної ефективності, безпеки та екологічності розробленої технології.

Практичні результати роботи – експериментально встановлено оптимальні режими багатбрускового суперфінішування, що забезпечують зниження шорсткості, хвилястості та геометричних відхилень доріжок кочення підшипників. Розроблені моделі та рекомендації впровадження підтверджують економічну доцільність методу та забезпечують підвищення довговічності підшипникових вузлів.

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 удосконалення суперфінішування кілець підшипників кочення для підвищення надійності вузлів сільськогосподарської техніки. Проаналізовано сучасні методи обробки, визначено їхні переваги й недоліки. Розроблено методику багатофакторного експерименту та проведено оцінку впливу параметрів брусків і часу обробки на якість поверхні. Наведено результати, що підтверджують ефективність удосконаленого багатобрускового суперфінішування, а також розглянуто економічні, безпекові та екологічні аспекти впровадження технології.

СУПЕРФІНІШУВАННЯ, ШОРСТКІСТЬ, ХВИЛЯСТІСТЬ, ПІДШИПНИК, АБРАЗІВНІ БРУСКИ, ОПТИМАЛЬНІ РЕЖИМИ

ANNOTATION

The study investigates the improvement of the superfinishing process for rolling bearing rings to enhance the reliability of agricultural machinery components. Modern finishing methods are analyzed, their advantages and limitations identified. A multifactor experimental methodology was developed to assess the influence of stone parameters and processing time on surface quality. The results confirm the effectiveness of the improved multistone superfinishing process. Economic, safety and environmental aspects of its implementation are also considered.

UPERFINISHING, ROUGHNESS, WAVINESS, BEARING, ABRASIVE STONES, OPTIMAL MODES

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	8
1.1 Особливості остаточної обробки криволінійних поверхонь обертання.....	8
1.2 Методи остаточної обробки криволінійних поверхонь обертання.....	11
1.3 Удосконалення процесу суперфінішування.....	19
1.3.1 Ультразвукове суперфінішування.....	19
1.3.2 Суперфінішування із круговою осциляцією бруска.....	20
1.3.3 Суперфінішування із гвинтовою осциляцією бруска.....	21
1.3.4 Суперфінішування із «розв'язаним центром».....	22
1.3.5 Двохбрускове суперфінішування.....	23
1.3.6 Суперфінішування із додатковим рухом бруска.....	24
1.3.7 Шліфування доведення кругом, що гойдається.....	25
1.3.8 Багатобрускове суперфінішування.....	26
Висновки до розділу 1	28
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ	30
2.1 Об'єкт та умови проведення досліджень.....	30
2.2 Експериментальна установка, вимірювальні прилади, обладнання.....	33
2.3 Методика проведення багатofакторного експерименту.....	36
Висновки до розділу 2	39
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТІВ.....	41
Залежність показників якості поверхні заготовки від інструмента та часу обробки.....	41
Висновки до розділу 3	46
РОЗДІЛ 4. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РОЗРОБОК.....	47
4.1 Безпека ведення операції суперфінішування.....	47
4.2 Розрахунок економічного ефекту.....	49
4.3 Екологічна безпека.....	50
Висновки до розділу 4	52
ВИСНОВКИ.....	53
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	54

ВСТУП

У вузлах сільськогосподарської техніки підшипники кочення працюють за умов підвищених навантажень, вібрацій, абразивного зношування та забрудненості робочого середовища. Такі фактори різко знижують їх ресурс, визначаючи необхідність забезпечення високої якості поверхневого шару контактних доріжок. Саме мікрогеометрія поверхні кілець підшипників суттєво впливає на рівень тертя, тепловідведення, стабільність мастильної плівки та довговічність вузла.

Одним із найефективніших способів отримання високоякісних доріжок кочення є суперфінішування. Воно дозволяє зменшити шорсткість, хвилястість та відхилення профілю, а також сформувати оптимальні параметри поверхневого шару. Однак традиційні технологічні схеми суперфінішування мають низку недоліків: невисоку продуктивність, чутливість до вихідної якості заготовки, складності налагодження, низьку здатність усунути нерівності низької частоти.

У зв'язку із цим актуальною є задача удосконалення процесу суперфінішування кілець підшипників кочення, що дозволить підвищити ресурс роботи підшипникових вузлів сільськогосподарських машин, зменшити витрати на технічне обслуговування та забезпечити більш надійне функціонування агрегатів за складних умов експлуатації.

Метою роботи є підвищення надійності та довговічності підшипникових вузлів сільськогосподарської техніки за рахунок удосконалення процесу суперфінішування кілець підшипників кочення, зокрема встановлення оптимальних параметрів обробки, що забезпечують мінімальні значення шорсткості, хвилястості, відхилення геометричної форми доріжок кочення.

Об'єктом дослідження є процес суперфінішної обробки доріжок кочення кілець підшипників кочення, а **предметом** – закономірності впливу параметрів суперфінішування на показники якості робочих поверхонь підшипникових кілець, можливості технологічного удосконалення процесу для підвищення довговічності підшипників у сільськогосподарській техніці.

Для досягнення поставленої мети передбачено розв'язання таких завдань.

1. Провести аналіз сучасних методів остаточної обробки криволінійних поверхонь обертання та визначити їхні переваги й недоліки у контексті виготовлення підшипникових кілець.

2. Розробити методику проведення багатфакторного експерименту, обґрунтувати вибір факторів, їх рівнів та інтервалів варіювання.

3. Побудувати математичні моделі впливу параметрів процесу на результати обробки. Встановити закономірності зміни показників якості поверхні. Визначити оптимальні режими багатобрускового суперфінішування, що забезпечують мінімальні значення шорсткості, хвилястості та геометричних відхилень.

4. Оцінити умови безпечного виконання операції суперфінішування. Розробити заходи з охорони праці та промислової безпеки. Виконати розрахунок економічного ефекту впровадження вдосконаленого суперфінішування у виробничий процес. Проаналізувати екологічні аспекти процесу суперфінішування та запропонувати способи зменшення негативного впливу на довкілля.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Особливості остаточної обробки криволінійних поверхонь обертання

У сучасних машинах, приладах і агрегатах усе більше широке застосування знаходять деталі, контактуючі поверхні яких мають криволінійні поверхні обертання. У цей час важко намітити достатньо струнку систему класифікації цих деталей. Однак вони можуть бути підрозділені наступним чином:

1 За характером спряження:

а) нерухомі, до яких можна зізнести деталі машин, криволінійні поверхні яких контактують із нерухомими деталями, наприклад, з ущільнювальними й контр-кільцями;

б) рухомі, з тертям ковзання, до яких відносяться деталі шарнірних пристроїв, деталі кулачкових і коноїдних механізмів, цапф і трибів точних приладів;

в) рухомі, з тертям кочення й ковзання.

Сюди можна включити деталі гвинтових кулькових передач, широко застосовуваних у верстатах із програмним керуванням, у пристроях механізації крила літака, приладах, а також деталі кулькових і роликів підшипників, які працюють в особливо важких умовах.

2 За формою криволінійної твірної:

а) деталі із криволінійною твірною 2-го порядку (деталі гвинтових пар кочення, кулачки, кільця кулькових підшипників);

б) деталі із криволінійною твірною обертання n -ого порядку (деталі коноїдних механізмів, кільця кулькових підшипників із жолобом "складного профілю", що забезпечує багатоточковий контакт спряжених деталей кочення для підвищення несучого навантаження вузла).

3 За точністю геометричних розмірів:

а) нормальної точності;

б) підвищеної точності;

с) особливо високої точності.

Серед розглянутих вище деталей машин із криволінійною твірною обертання найбільше застосування мають кільця кулькових підшипників. До цих деталей до того ж пред'являються особливі високі вимоги по надійності, довговічності й геометричній точності. Тому ці деталі надалі будемо використовувати як об'єкт дослідження, хоча в принципі результати цих досліджень можна буде розглядати для інших деталей із криволінійною поверхнею обертання.

Експлуатаційні властивості виробів (зносоустійкість, довговічність, надійність і ін.) багато в чому залежать від технологічного процесу, що визначає геометричні й фізико-хімічні параметри поверхневого шару – точність розмірів, форми, шорсткість поверхні, її топографію, твердість [1-3]. При виборі технологічного методу остаточної обробки криволінійних поверхонь обертання відповідальних деталей машин найбільш істотними критеріями є:

1. Здатність забезпечувати спадкування кращих параметрів точності і показників якості поверхні й поверхневого шару попередніх технологічних операцій.

2. Можливість виправляти похибки розмірів, форми, забезпечувати досягнення заданої шорсткості поверхні і якісних показників поверхневого шару деталей.

3. Можливість забезпечення високої культури виробництва й техніки безпеки.

4. Висока продуктивність.

5. Простота здійснення технологічної операції й налагодження технологічного устаткування.

6. Можливість автоматизації процесу.

Відомо [4], що при зменшенні шорсткості з $R_a=0,63$ мкм до $R_a=0,32$ мкм довговічність роботи кулькових підшипників збільшується в 3 рази (таблиця 1.1). При зменшенні шорсткості з $R_a=0,98$ мкм до $R_a=0,04$ мкм різко зростає трудомісткість виготовлення кілець підшипників кочення, а їхня довговічність майже не змінюється.

Однак шорсткість поверхні доріжок кочення підшипників повинна бути оптимальною, тому що при занадто низьких значеннях шорсткості може виникнути явище "схоплювання" контактуючих поверхонь, при якому частки металу відкриваються від поверхонь деталей, прискорюючи їхнє зношування. Оптимальна

початкова шорсткість подібних поверхонь близька до тієї, що формується в процесі припрацьовування. У роботах [5-10] показано, що таке значення шорсткості жолобів кілець кулькопідшипників становить $R_a=0,08...0,05$ мкм, а оптимальне значення шорсткості доріжок кочення кілець роликотпідшипників становить $R_a=0,16-0,32$ мкм.

Таблиця 1.1 – Залежність довговічності підшипників від величини шорсткості жолоба

№ партій підшипників	Величина шорсткості жолобу, R_a , мкм	Середня довговічність у % від розрахункової
1	0,32	589
2	0,16	972
3	0,08	1200
4	0,04	1400

Рівень вібрації є одним з найбільш важливих сумарних показників якості підшипників кочення, що характеризують точність їх виготовлення та експлуатаційні характеристики. Похибки геометричної форми доріжок кочення кілець підшипників впливають на величину вібрацій і рівень шуму. Експерименти показують, що при зменшенні амплітуди хвилястості жолобів внутрішніх кілець підшипника №307 від 2,5 до 0,05 мкм рівень вібрації знижується в середньому на 17 дБ у діапазоні частот 200-4000 Гц. Рівень вібрації підшипників на низьких частотах значною мірою залежить від величини некрутості (овальності, огранювання) жолобів кілець підшипників кочення.

Похибки геометричної форми впливають на несучу здатність підшипників кочення [11-13]. Утворення хвилястості завжди супроводжується нерівномірністю розподілу шорсткості й мікротвердості на вершинах і загинах хвиль. Це додаткове джерело руйнування поверхні, особливо при циклічних навантаженнях.

Щоб одержати високоякісні робочі поверхні кілець кулькопідшипників, необхідно повністю видалити дефектний шар із цієї поверхні й забезпечити високу геометричну точність. Ці вимоги можуть бути виконані, якщо рекомендовані

методи обробки самі не створюють дефектних шарів і не успадковують похибки геометричної форми від попередніх методів обробки.

Важливим фактором підвищення експлуатаційних властивостей підшипників є надання робочим поверхням кілець раціональної геометричної форми [14]. Наприклад, надання робочим поверхням кілець роликотпідшипників опуклості в 3-4 мкм у кілька разів підвищує їхню довговічність. А так як величина цієї опуклості невелика, то досить важливим є створення відповідної технології остаточної обробки деталей.

1.2 Методи остаточної обробки криволінійних поверхонь обертання

На сучасному етапі розвитку машинобудування розроблено багато методів остаточної обробки криволінійних поверхонь обертання деталей машин, які відрізняються схемою обробки, режимами й видами різального інструмента. Для одержання поверхні з низькою шорсткістю, забезпечення високої геометричної точності й зняття дефектного шару особливо ефективні методи обробки абразивним інструментом. При цьому, найбільш широко застосовується шліфування [15]. В певних умовах шліфуванням можна знизити величину шорсткості оброблюваної поверхні до $R_a=0,08$ мкм. Однак високі швидкості нагрівання поверхневих шарів деталі й нерівномірний розподіл температури в процесі шліфування (до 1200°C) утворюють прижоговання, тріщини. Локальне нагрівання поверхневих шарів викликає структурні фазові перетворення в шарах різної глибини. Дефектний шар поверхонь, оброблених шліфуванням, коливається від 30 до 110 мкм. Крім того, шліфовані поверхні мають великий розкид параметра шорсткості й значні відхилення геометричної форми у вигляді некрутості й хвилястості. У процесі шліфування у поверхневому шарі деталей з'являються внутрішні напруження, що істотно знижують працездатність деталей. Таким чином, процес шліфування хоча й необхідний для досягнення заданої точності розміру й геометричної форми деталей, але при виготовленні таких відповідальних поверхонь, як доріжки кочення підшипників, він не може бути рекомендований як остаточний технологічний

процес. Тому після операцій шліфування доріжок кочення кілець підшипників у виробництві звичайно здійснюються доводочні операції.

До числа основних доводочних операцій у машинобудуванні відносять: притирання, полірування, мікрошліфування, мікрохонінгування й суперфінішування.

Притирання звичайно використовується у верстатобудуванні в умовах єдиничного й дрібносерійного виробництва при виготовленні високоточних деталей, що сполучаються, наприклад, плунжерних пар. У підшипниковому виробництві притирання використовується рідко, тому що цей технологічний процес відрізняється низькою продуктивністю, вимагає висококваліфікованої ручної праці, спряжені поверхні повинні працювати в режимі тертя-ковзання.

Полірування в підшипниковому виробництві здійснюється дрібнозернистим гнучким шліфувальним полотном з нанесеним на його поверхню полірувальної пасти. Полотно притискається до оброблюваної поверхні протягом деякого часу, достатнього для створення на цій поверхні полірувального блиску [16]. Однак видимий блиск поверхні не є свідченням її високої якості, тому що під блискучою поверхнею залишаються сліди попередньої шліфувальної обробки. Знімання металу при поліруванні настільки мале, що з поверхні не видаляється дефектний шар, навіть якщо він перебуває у дуже тонкому поверхневому шарі. Слабо виправляється хвилястість. Практично не виправляється ребристість і некруглість, звичайно спотворюється форма профілю деталі. Операція полірування здійснюється вручну й використовується тільки в умовах дрібносерійного виробництва деталей підшипників низької точності.

Більш досконалим процесом обробки є мікрохонінгування, схема якого стосовно обробки жолобів кілець кулькових підшипників наведена на рисунку 1.1 [17].

Як і при поліруванні, мікрохонінгування здійснюється дрібнозернистим шліфувальним полотном 2, але притискання полотна до оброблюваної поверхні здійснюється абразивним бруском 3, попередньо припрацьованим до неї й здійснюючим осцилюючий рух навколо осі жолоба кільця 1. Звичайно процес мікрохонінгування механізований, і тому свіжі ділянки шліфполотна підводяться до

оброблюваної поверхні шляхом його перемотування з бобіни 4 на іншу бобіну в проміжку між обробкою двох послідовних кілець.

Рисунок 1.1 – Схема мікрохонінгування деталей підшипників

За рахунок осциляції абразивного бруска процес зняття припуску йде більш інтенсивно, чим при поліруванні. Знімання металу зростає зі збільшенням частоти обертання заготовки, сили притискання шліфполотна до поверхні доріжки кочення й зернистості. Однак зі зростанням значень всіх цих перерахованих факторів збільшується шорсткість обробленої поверхні. Тому для досягнення низьких значень шорсткості поверхні необхідно занижувати режим обробки. Крім того в процесі мікрохонінгування шліфполотно швидко забивається стружкою й шламом (засалюється), а процес різання швидко припиняється. Внаслідок цього мікрохонінгування не може видалити шорсткий поверхневий шар після шліфувальної обробки. Тому перед мікрохонінгуванням високоякісних поверхонь деталей звичайно здійснюється суперфінішування.

Суперфінішування в підшипниковому виробництві є основним технологічним процесом остаточної обробки доріжок кочення кілець високоточних підшипників [18]. Традиційне суперфінішування (рисунок 1.2) здійснюється дрібнозернистими абразивним брусками, що підтискаються до оброблюваної поверхні або пружно із постійною силою, наприклад, за рахунок використання пружини, пневмо- або гідроциліндра, або жорстко за допомогою механічного пристрою, що здійснює високочастотні коливальні рухи вздовж оброблюваної поверхні. За цією схемою

дотепер працює більшість вітчизняних моделей суперфінішних автоматів (ЛЗ-11, ЛЗ-112, ЛЗ-113 і ін.) і автоматів провідних закордонних фірм (Ернст Теленхауз, Супфіча (Німеччина).

Абразивний брусок при суперфінішуванні притискається до оброблюваної поверхні всією своєю робочою поверхнею. Тому, як і при мікрохонінгуванні, робоча поверхня бруска після деякого часу роботи забивається стружкою й шламом і перестає знімати припуск. Таким чином, суперфінішування, як і мікрохонінгування, є самозатухаючим процесом.

Але на відміну від мікрохонінгування суперфінішування характеризується можливістю самозаточування інструмента в процесі обробки, і тому об'єм припуску, що знімається, при суперфінішуванні вище, ніж при мікрохонінгуванні. Ця обставина є надзвичайно важливою тому що дозволяє видаляти з поверхні заготовки дефектні шари металу і більш інтенсивно виправляти такі похибки геометричної форми заготовки, як хвилястість і шерсткість.

а) б)

Рисунок 1.2 – Схема суперфінішування кілець підшипників: а – із пружним; б – жорстким підтисканням бруска до заготовки: 1 – брусок, 2 – держатка, 3 – заготовка, 4 – механізм притискання

З метою підвищення знімання металу операція суперфінішування звичайно здійснюється у два технологічних переходи – спочатку грубозернистим, а потім дрібозернистим брусками. З огляду на, що на другому технологічному переході

вимоги до знімання металу знижуються, а вимоги до шорсткості обробленої поверхні підвищуються, часто суперфінішування на цьому переході замінюється мікрохонінгуванням.

Значний вплив на знімання металу й кінцеві показники якості обробленої поверхні при суперфінішуванні спричиняють умови обробки. Наприклад, зі збільшенням частоти осциляції бруска знімання металу збільшується, а шорсткість обробленої поверхні зменшується. Це пояснюється тим, що при малій частоті осциляції бруска абразивні зерна залишають на поверхні заготовки кільцеві риси й при кожному її оберті попадають у ті самі канавки. Опорна поверхня бруска збільшується, зменшується тиск бруска на оброблювану поверхню, знімання металу знижується. Зі збільшенням частоти осциляції бруска подряпини від абразивних зерен починають перетинатися, стружки відрізаються більше короткі, брусок легше від них звільняється в процесі самозаточування, величина опорної поверхні знижується, тиск на поверхню збільшується, знімання металу зростає. У наслідок перетинання рисок зменшується ймовірність співпадіння траєкторії переміщення абразивних зерен на оброблюваній поверхні збільшується число рисок, що призводить до зниження її шорсткості.

Найбільш сприятливе значення кута перетину рисок на оброблюваній поверхні з точки зору забезпечення гнучкої здатності інструмента й досягнення мінімальної шорсткості поверхні становить 45° . Однак у реальних умовах це не досягається. На жаль, частота осциляції бруска при суперфінішуванні обмежується припустимими динамічними навантаженнями й звичайно становить 400...800 подвійних коливань за хвилину.

Частота осциляції бруска в – єдиний фактор, зі зростанням значення якого всі показники процесу суперфінішування поліпшуються. Всі інші фактори чинять на результати обробки суперечливий вплив. Так, зі зростанням сили притискання бруска до оброблюваної поверхні знімання металу зростає, але це приводить до підвищення шорсткості поверхні. Звичайно на першому переході тиск бруска на оброблювану поверхню становить 0,6..0,7 МПа, а на чистовому переході – 0,4...0,5 МПа.

Подібний вплив на результати обробки має зернистість інструмента. Попереднє суперфінішування звичайно здійснюється бруском зернистістю M14, а остаточне – бруском зернистістю M7...M10. Зі зростанням частоти обертання заготовки знімання металу й шорсткість обробленої поверхні зменшуються, тому що при цьому зменшується кут перетину рисок від зерен. Тому іноді процес суперфінішування здійснюють у два етапи – спочатку при помірній частоті обертання заготовки, а потім частоту обертання підвищують.

Звичайне суперфінішування здійснюється при невисокій швидкості обертання заготовки (300-500 м/хв). Тому небезпеки виникнення дефектів поверхневого шару, викликаних температурними факторами, не виникає.

Суперфінішування, як і будь-який інший процес абразивної обробки, відрізняється здатністю до саморегулювання. Дійсно, у процесі обробки брусок не тільки знімає припуск з оброблюваної поверхні, але сам зношується – самозаточується. Самозаточування бруска забезпечує його припрацьовування до оброблюваної поверхні. Це дуже важливо, тому що знімання металу при суперфінішуванні дає звичайно менше геометричних похибок заготовки. Наприклад, знімання металу при суперфінішуванні звичайно перебуває в межах 7-9 мкм на діаметр, а допуск на радіус жолоба становить 0,08 мкм. Навіть заготовки однієї партії мають різні радіуси профілю, різне зміщення площини симетрії жолоба відносно базового торця, різні відхилення від круглості. У цих умовах, наприклад, при мікрохонігуванні частина поверхні заготовки може виявитися не обробленою, а похибка профілю поверхні заготовки може зрости. Але властивість бруска самозаточуватись, припрацьовуватись до оброблюваної поверхні знижує можливість появи подібних дефектів, що й забезпечує процесу суперфінішування широке застосування в промисловості.

Звичайно при обробці коротких поверхонь типу дорічок кочення підшипників висота брусків вибирається рівній ширині оброблюваної поверхні. Однак довжину робочої частини брусків звичайно намагаються використовувати по можливості більше. Зі зростанням довжини робочої частини інструмента збільшується число гармонік, що становлять хвилястість обробленої поверхні, які одночасно попадають під інструмент. На найбільш виступаючі нерівності, що становлять

профіль поздовжнього (уздовж доріжки кочення) перетину заготовки, робоча частина бруска чинить більший тиск і вони активно зменшуються. Внаслідок цього зі зростанням довжини робочої поверхні бруска хвилястість оброблюваної поверхні знижується. Це наочно представлено в таблиці 1.2.

Але загато велика довжина робочої частини брусків викликає спотворення профілю заготовки, особливо таких, як жолоби кілець кулькопідшипників. Це наочно видно з рисунка 1.3. За рахунок кривизни робочої поверхні бруска 2 радіус його осциляції r_b навколо осі О-О збільшується по краях і має найменше значення в центрі. Внаслідок цього кожен переріз бруска формує свій профіль заготовки. При надмірній довжині робочої частини бруска профіль заготовки може істотно спотворюватися. Тому довжина робочої частини брусків повинна бути оптимальною.

Таблиця 1.2 – Вплив довжини робочої частини бруска на геометричну точність обробленої поверхні

Довжина робочої частини бруска, мкм	Відношення довжини робочої частини бруска до довжини кола заготовки	Хвилястість обробленої поверхні, мкм	Ребристість обробленої поверхні, мкм
6	0,04	0,20	1,80
12	0,08	0,07	0,65
20	0,135	0,07	0,40

Розглянуті особливості процесу суперфінішування дозволяють чіткіше представити його переваги й недоліки. До переваг процесу суперфінішування можна віднести наступні:

- припрацьовуваність бруска до оброблюваної поверхні, що дозволяє вести обробку заготовок із геометричними похибками, що перевищують знімання металу;
- самоочищення бруска від стружки й шламу, що підвищує знімання металу й збільшує продуктивність обробки;

- здатність значно знижувати хвилястість і шорсткість поверхні заготовок;
- низька температура в зоні контакту, відсутність небезпеки виникнення дефектів поверхневого шару деталей.

Рисунок 1.3 – Схема формування профілю кільця¹ при суперфінішуванні

Основні недоліки процесу суперфінішування полягають у наступному:

- відносно низька продуктивність (120-200 заготовок за годину), особливо при підвищеній шорсткості поверхні заготовок;
- висока чутливість до якості початкової поверхні заготовок;
- невисокий ступінь видалення нерівностей низької частоти (обальності, ребристості);
- необхідність здійснення процесу обробки в декілька технологічних переходів, що істотно ускладнює конструкцію устаткування й підвищує його собівартість;
- низька універсальність технологічного устаткування, так як для обробки зовнішніх, внутрішніх кілець, кілець різних типорозмірів підшипників потрібне використання спеціального обладнання, що також підвищує його вартість;
- складність налагодження устаткування, необхідність залучення до роботи висококваліфікованих наладчиків, необхідність частого відналагодження устаткування через підвищене зношування бруска.

1.3 Удосконалення процесу суперфінішування

Відзначені недоліки процесу суперфінішування викликають необхідність його удосконалення. Зазначена проблема настільки серйозна, що її вирішенню присвячене величезне число робіт. Самим радикальним напрямком розв'язку цієї проблеми є удосконалювання способів здійснення процесу суперфінішування й створення на цій основі нового технологічного устаткування.

1.3.1 Ультразвукове суперфінішування

У роботах [19, 20] повідомляється про створення шліфувального устаткування, саме гаму суперфінішних автоматів з накладенням на абразивний брусок ультразвукових коливань (рисунок 1.4).

Рисунок 1.4 – Схема ультразвукового суперфінішування

Ультразвуковий пристрій, що складається з ультразвукового генератора 1, обмотки 2, осердя 3 і хвилеводу-концентратора 5, кріпиться на звичайній суперфінішній головці (не показано) за допомогою кронштейна 4. На хвилеводі 5 за допомогою болта 8 закріплюється брусок 7, що через звичайний пристрій підведення-відведення притискається до оброблюваної поверхні заготовки 9, установлені на шпинделі верстата 10 у пристосуванні 6. У процесі

суперфінішування бруска 7, як звичайно, осцилює навколо осі жолоба із частотою 5...15 Гц, але одержує додаткові ультразвукові коливання уздовж осі заготовки 9 із частотою 18...30 кГц і амплітудою 1...4 мкм. Ультразвукові коливання накладають на брусок тільки на першому технологічному переході, що сприяє підвищенню знімання металу в 9-10 разів. На другому переході здійснюється звичайне суперфінішування.

До переваг цього способу відносяться продуктивність зняття припуску, висока самозаточуваність інструмента, що дозволяє використовувати бруски малої зернистості й досягати на другому етапі обробки малих значень шорсткості. До недоліків цього способу відносяться підвищене зношування брусків, що зростає у 5...6 разів у порівнянні із традиційним суперфінішуванням, необхідність їх ретельного приклеювання до державки, нестабільність процесу, що вимагає частого підлагодження технологічного устаткування. Використання цього процесу вимагає високої культури виробництва, і виявилось несприятливим для підшипникових підприємств-виробників.

1.3.2 Суперфінішування із круговою осциляцією бруска

З метою підвищення ріжучої здатності бруска в роботі [6] розглядається процес суперфінішування, здійснюваний способом кругової осциляції інструмента (рисунк 1.5). Замість осциляції абразивному бруску 5 від спеціального механізму повідомляють круговий поступальний рух з радіусом:

$$r_1 = R - r, \quad (1.1)$$

де R – радіус жолоба;

r – радіус робочої поверхні бруска.

Завдяки тому, що радіус бруска виходить менше радіуса жолоба досягається відразу два ефекти:

- брусок контактує з оброблюваною поверхнею обмеженою площею, а отже, зростає тиск бруска на поверхню;

- кожна мікроділянка робочої поверхні бруска періодично контактує з оброблюваною поверхнею, що підвищує ступінь самозаточування інструмента, і його різальних властивостей.

Рисунок 1.5 – Схема процесу суперфінішування із круговою осциляцією бруска:

1 – кривошип, 2 – куліса, 3 – важіль, 4 – державка, 5 – брусок, 6 – шпindelь, 7 – заготовка, 8 – пружина, 9 – шатун

Обидва фактори сприяють підвищенню знімання металу й продуктивності обробки. Одночасно досягається низька хвилястість і некруглість обробленої поверхні. Однак даний спосіб не знайшов застосування в промисловості, через складність досягнення низьких значень шорсткості поверхні й складності здійснення, особливо через складність налагодження операції й необхідності частого переналагодження внаслідок підвищеної інтенсивності зношування інструмента.

1.3.3 Суперфінішування із гвинтовою осциляцією бруска

Приблизно до того ж ефекту й з тим же результатом приведе використання способу гвинтової осциляції [8] (рисунок 1.6).

Рисунок 1.6 – Спосіб суперфінішування із гвинтовою осциляцією бруска: 1 – брусок; 2 – заготовка

Брусок при цьому способі переміщується зворотно-поступально по гвинтовій поверхні, ціль якої розташована під кутом 30-40 градусів до осі жолоба. Амплітуда осциляції бруска становила 1...2 мм, частота осциляції – 500...30000 подвійних ходів за хвилину. Даний спосіб є одним з різновидів способу суперфінішування з додатковим рухом бруска.

1.3.4 Суперфінішування із «розв'язаним центром»

Розроблено й практично реалізовано спосіб суперфінішування із «розв'язаним центром» (рисунок 1.7). Сутність якого полягає в тому, що в багатомісному пристосуванні одночасно здійснюється обробка відразу декількох деталей 1 брусками 2, яким повідомляється осцилюючий рух уздовж осі заготовок. Бруски 2 зібрані в один блок 3, закріпленій на пружних пластинах 4, і підтискаються до заготовок від механізму притискання 5. Однак застосування цього способу через підвищену коливну масу обмежується тільки мілкими, приладовими підшипниками. До того ж, по краях доріжки кочення виникає підвищений тиск, що призводить до спотворення профілю поверхні.

Рисунок 1.7 – Схема суперфінішування із «розв'язаним центром»

1.3.5 Двохбрускове суперфінішування

Більш досконалою схемою у порівнянні з раніше розглянутими є схема двухбрускового суперфінішування з обертовою суперфінішною головкою [12], наведена на рисунку 1.8. Бруски 2 і 3 закріплені на протилежних кінцях головки 4 на відповідних осях з можливістю повороту навколо них при обертанні головки із частотою V_1 . Вісь головки нахилена до осі заготовки 1 під кутом α і перетинається з нею в центрі симетрії оброблюваної поверхні. В результаті обертання головки 4 бруски 2 і 3 осцилюють навколо своїх осей, які не лишаються на місці, а переміщуються зворотно-поступально вздовж осі заготовки 1. Таким чином, відстань між віссю гойдання брусків 2 і 3 та віссю жолоба постійно змінюється в межах від $L \cdot \sin \alpha$ до L . Отже, бруски в процесі обробки періодично контактують з оброблюваною поверхнею в момент, коли вони знаходяться на мінімальній відстані від неї, і відриваються від поверхні при видаленні – вісі гойдання брусків від осі жолоба.

Рисунок 1.8 – Схема дообрускового суперфінішування

Вони ніби підстрибують над поверхнею, очищаючись від стружки й шламу, що повинне сприяти підвищенню продуктивності і якості обробки. Однак ця прекрасна ідея так і залишилася на папері, тому що для забезпечення можливості її практичної реалізації вона вимагала серйозного удосконалення.

1.3.6 Суперфінішування із додатковим рухом бруска

У роботі [13] запропоновано спосіб суперфінішування із додатковим рухом бруска (рисунок 1.9). Як і при звичайному суперфінішуванні, брусок 2 притискається силою F до заготовки 1, що обертається зі швидкістю V_d , і здійснює осцилюючий рух навколо осі жолоба із частотою $n_{осц}$. Але крім цього брусок повідомляють додатковий рух зі швидкістю $V_{дп}$ вздовж осі жолоба або під гострим кутом α до осі жолоба (не показано). Таким чином, на відміну від розглянутих вище способів брусок контактує з оброблюваною поверхнею постійно, забезпечуючи тим високі динамічні властивості верстата, але кожна ділянка робочої поверхні бруска контактує із заготовкою періодично, безупинно очищаючись від стружки й шламу. На заключному етапі брусок зупиняють наприкінці ходу й здійснюють звичайне суперфінішування.

Рисунок 1.9 – Схема способу суперфінішування з додатковим рухом бруска

В 1970-1980 рр. була створена ціла гама суперфінішних автоматів типу ШВН, СПА та ін., що працюють по запропонованому принципу. Автомати вийшли прості, дешеві, тому що вони мали всього одну робочу позицію.

1.3.7 Шліфування-доведення кругом, що гойдається

Подальшим удосконаленням обробки став спосіб обробки шліфуванням-доведенням кругом, що гойдається. Спосіб і пристрій для його здійснення запатентовані в США, Франції, Італії. Особливістю способу є те, що він сполучає шліфування й суперфінішування в одній операції на одній позиції (рисунок 1.10).

Рисунок 1.10 – Схема способу шліфування доведення кругом, що гойдається

Спочатку заготовка 1 піддається звичайному шліфуванню кругом 2, а на етапі виходжування круг 2 загальмовується і йому повідомляється рух гойдання зі швидкістю V_T на кут 2α від механізму 3. Запропонований спосіб забезпечує високу продуктивність і високу геометричну точність деталей, тому що шліфування й доведення здійснюються при одному встановленні виробу й на одній позиції. Впровадження цього способу дозволило скоротити операції доведення, промивання й протирання виробів.

1.3.8 Багатобрускове суперфінішування

Удосконаленню способів багатобрускового суперфінішування присвячені роботи [16-20]. Одним з них є спосіб, реалізований у пристрої для суперфінішування поверхонь обертання із криволінійною тврістю. Абразивні бруски рівномірно по колу розташовані у суперфінішній голівці з можливістю гойдання на своїй осі. У вихідному положенні вони втримуються пружинами. Радіальна подача брусків здійснюється механізмом подачі деталей.

У процесі суперфінішування головка робить осцилюючий рух уздовж осі заготовки. Вісь гойдання брусків у процесі осциляції головки змінює відстань від оброблюваної поверхні заготовки. Бруски періодично відриваються від поверхні, очищаючись від стружки й шламу і забезпечуючи високу продуктивність обробки.

На основі цього способу був сконструйований і виготовлений суперфінішний автомат МФ-1 для обробки зовнішніх кілець підшипників. Виробничі випробування автомата показали, що забезпечує задану якість поверхні й поверхневого шару деталей. Але внаслідок значної маси суперфінішної головки довелося обмежити частоту осциляції.

Частково виниклі технічні труднощі усувалися в способі суперфінішування брусками, що перекочуються по оброблюваній поверхні. Абразивні бруски рівномірно розташовані навколо заготовки й підтискаються до неї із силою. Абразивні бруски закріплені в голівці на осях так, що при осцилюючому русі головки уздовж осі заготовки бруски перекочуються по оброблюваній поверхні, безупинно контактуючи з нею різними своїми ділянками. Це, як і в попередніх

способах, забезпечило можливість підвищення ріжучої здатності інструмента, можливість використання брусків малої зернистості, а отже, в один технологічний перехід забезпечувати й задане знімання металу й низькі значення шорсткості поверхні заготовки. Але крім цього спосіб мав нову якість – забезпечував можливість зняття з різних ділянок оброблюваної поверхні різних по величині припусків і тим самим можливістю прецизійного формування профілю заготовки, виправлення її похибок. Це досягалось тим, що при осцилюючому русі головки її швидкість уздовж поверхні можна регулювати за будь-яким законом, а отже можна формувати різні профілі оброблюваної поверхні. Але авторів цей спосіб не задовольняв тим, що суперфінішна головка робила осцилюючий рух, що погіршувало динаміку верстата, а також тим, що бруски в головці закріплювались шарнірно, що знижувало жорсткість технологічної системи.

Найбільш перспективним способом суперфінішування, на наш погляд, є спосіб багатобрускового суперфінішування з обертотою суперфінішною голівкою, при якому абразивні бруски жорстко закріплені в суперфінішній головці з можливістю подачі в радіальному напрямку від жорсткого, (наприклад, клинового) механізму подачі. Голівка обертається навколо своєї осі, розташованої під кутом α до осі заготовки.

Спосіб усуває недоліки попередніх способів. А саме, бруски контактують із оброблюваною поверхнею безупинно, відсутня осциляція головки. Тим самим забезпечуються сприятливі динамічні властивості технологічної системи. Розворот головки відносно осі заготовки забезпечує сприятливі умови для самоочищення й самозаточування інструмента, а отже, можливість використання дрібнозернистого інструмента й тим самим досягнення низької шорсткості оброблюваної поверхні й можливість здійснення процесу в один технологічний перехід. Жорстке силове замикання абразивних брусків у суперфінішній головці і з поверхнею заготовки забезпечує можливість виправлення не тільки хвилястості, але й ребристості овальності. Нарешті, за рахунок розвороту головки по краях доріжки кочення виникає більше високий тиск, чим у центрі. Це забезпечує можливість виправляти похибку форми профілю поверхні заготовки, наприклад усувати сідлоподібність, що

часто виникає при шліфуванні, формувати поверхню опуклої форми, що, як відомо, істотно підвищує довговічність підшипників.

Однак досить давно технологічні можливості багатобрускового суперфінішування можна розкрити тільки в процесі досліджень, що і є нашим завданням.

Висновки до розділу 1

1. На даний час у машинобудуванні є велика кількість різноманітних деталей, до яких пред'являються високі вимоги по точності виготовлення і якості поверхні й поверхневого шару. Типовим і найбільш масовим представником цих деталей є кільця підшипників качення.

2. Серед різноманітних методів остаточної обробки таких деталей найбільш ефективним є суперфінішування, що на відміну від інших методів має здатність до самозаточування інструмента до самоочищення здатністю інструмента припрацьовуватись до оброблюваної поверхні. Це забезпечує можливість знімати найтонший припуск із оброблюваної поверхні навіть при значних геометричних похибках заготовки, істотно зменшувати її хвилястість і шорсткість.

3. Традиційному процесу суперфінішування властиві суттєві недоліки, основними з яких є: відносно низька продуктивність, висока чутливість до якості початкової поверхні заготовок, невисокий ступінь видалення нерівностей низької частоти (овальності, ребристості), необхідність здійснення процесу обробки в кілька технологічних переходів, низька універсальність, складність налагодження обладнання, необхідність залучення до роботи висококваліфікованих налагоджувальників. Необхідність частого підналагодження обладнання через підвищене зношування бруска.

4. З метою вирішення проблеми підвищення ефективності процесу суперфінішування й усунення відзначених недоліків мають місце безліч спроб його вдосконалення. Однак кожний із пропозованих способів суперфінішування, усуваючи деякі з його недоліків, зберігає інші й навіть призводить до появи нових.

5. Серед найбільш відомих ефективних розробок останніх років є створення технології формотворного багатобрускового суперфінішування із твердим кріпленням абразивного інструмента. Однак для широкого практичного використання цих розробок необхідні більше глибокі дослідження їх технологічних можливостей.

2.2 Експериментальна установка, вимірювальні прилади, обладнання

2.3 Методика проведення багатofакторного експерименту

Полтавський державний аграрний університет

Висновки до розділу 2

РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

Залежність показників якості поверхні заготовки від інструмента та часу обробки

Висновки до розділу 3

РОЗДІЛ 4. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РОЗРОБОК

4.1 Безпека ведення операції суперфінішування

Суперфінішування належить до операцій чистової абразивної обробки, що супроводжується високою частотою коливань інструмента, наявністю абразивного пилю, а також використанням мастильних-охолоджувальних рідин (МОР). Під час операції працівник повинен: пройти інструктаж з охорони праці та мати відповідну кваліфікацію; працювати у спецодязі, спецвзутті та захисних окулярах; знати будову, можливості небезпеки та порядок зупинки обладнання. До роботи не допускаються особи у стані втоми, алкогольного чи наркотичного сп'яніння.

При суперфінішуванні на робітників можуть впливати: механічні фактори (можливість травмування рухомими частинами верстату, відлітання абразивних частинок або уламків бруска); пил та аерозолі МОР (потрапляння шкідливих частинок у дихальні шляхи, подразнення шкіри); підвищена шумова та вібраційна дія (робочі частоти інструмента формують локальну вібрацію); електрична небезпека (можливість ураження електричним струмом при пошкодженні ізоляції або порушенні заземлення); пожежонебезпечність (мастильно-охолоджувальні рідини можуть займатися при контакті з гарячими поверхнями).

До обладнання та робочого місця висуваються наступні вимоги: верстат повинен мати справні захисні кожухи та блокування; освітлення не менше 300 лк, без прямих відблисків; робоча зона повинна обладнуватися витяжною вентиляцією для відведення аерозолів МОР та пилю; подача МОР повинна відбуватися безперервно, щоб уникнути перегріву заготовки та інструмента; усе електрообладнання має бути заземлене та перевірене на відповідність встановленим вимогам експлуатації.

Розглянемо основні безпечні методи роботи. На початку необхідно: перевірити закріплення заготовки та інструменту; переконатися у справності подачі МОР; встановити огороження. Під час роботи: не торкатися рухомих вузлів; не регулювати інструмент під час роботи верстата; контролювати рівень МОР; використовувати індивідуальні засоби захисту (окуляри, рукавиці, протишумові

навушники). Після закінчення роботи: вимкнути обладнання; витерти пролиту МОР; очистити робочу зону від відходів.

Окрім того, на ділянці суперфінішування слід забезпечити: місцеве відсмоктування у зоні різання; підтримка температури у межах 18...20°C та відносної вологості 40...60%; швидкість руху повітря 0,1...0,3 м/с.

Стосовно електричної безпеки, то клас захисту верстатів повинен становити І з обов'язковим заземленням. Роботи повинні відбуватися відповідно до Правил безпечної експлуатації електроустановок споживачів. Забороняється працювати з обладнанням у разі пошкодження кабелів, вилок, кнопок керування. Щитки автоматики повинні бути закриті та доступні лише електротехнічному персоналу.

Щодо пожежної безпеки, то в зоні верстату повинні бути: вогнегасник ВВК-2 або ВВК-5 (вуглекислотний); ящик з піском; ковдра протипожежна. Забороняється: палити біля верстату; використовувати відкритий вогонь; зберігати промаслені ганчірки МОР повинні зберігати у металевих, герметично закритих ємностях.

Робітник повинен використовувати: захисні окуляри або щиток, спеціальної щільної бавовняної тканини; гумові рукавиці стійкі до МОР; протипіщні навушники; під час роботи з пилом – респіратор як мінімум.

Організаційні заходи наступні: регулярний інструктаж (первинний, повторний, позаплановий); проведення медичних оглядів, особливо для працівників, що зазнають вібраційного впливу; навчання користуванню засобів індивідуального захисту; призначення відповідальної особи за охорону праці на ділянці.

Під час суперфінішування найбільші ризики пов'язані з: механічними травмами; дією пилу та аерозолів; електричною небезпекою; опіками від нагрітих деталей. Необхідно передбачити наступні заходи мінімізації: огороження небезпечних зон; автоматизація подачі МОР; застосування герметичних кожухів; встановлення віброізоляції; постійний контроль технічного стану верстату.

Особливості надання першої медичної допомоги. При порізах чи саднах – промити рану, накласти стерильну пов'язку. Під час опіків МОР – охолодити уражену ділянку водою, накласти пов'язку. При потраплянні частинок в очі – промити проточною водою, звернутися до медпункту. У разі ураження електричним струмом – негайно знеструмити обладнання та викликати швидку.

Отже, під час суперфінішування необхідно забезпечити безпечні умови праці за рахунок застосування захисних огорожень, засобів індивідуального захисту, справної вентиляції та надійного електрозахисту. Дотримання встановлених вимог, правильна організація робочого місця та контроль робочого стану обладнання мінімізують ризики травмування й шкідливих впливів на працівника. Це гарантує стабільність технологічного процесу та підвищує його безпечність.

4.2 Розрахунок економічного ефекту

Економічний ефект від впровадження суперфінішування 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, $A_2 = 10$ т;

0,15 – нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень;

K – капітальні вкладення на впровадження заходів, грн., $K = 250000$ грн.

Економія від зниження собівартості уворюється за рахунок зниженням трудомісткості:

$$\Delta C = 0,1 \cdot 100000 = 10000 \text{ грн. / т,}$$

де 100000 – середня вартість 1 тони продукції, грн.

Ціна продукції збільшиться за рахунок доплат від час обробки:

$$\Delta Ц = \Delta Ц', \quad (4.2)$$

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

$$\Delta Ц' = 3000 \text{ грн. / т};$$

$$\Delta Ц = 3000 \text{ (грн./т)}.$$

Відповідно до формули (4.1) маємо наступне:

$$E = (10000 + 3000) \cdot 0,0 - (0,15 + 0,1) \cdot 250000 = 77500 \text{ (грн.)}.$$

Отже, економічний ефект від впровадження суперфінішування склав 77500 грн. на рік.

4.3 Екологічна безпека

Суперфінішування є чистовою обробкою, що забезпечує отримання високої точності та низької шорсткості поверхні. Процес передбачає використання абразивних брусків із подачею мастильно-охолоджувальної рідини (МОР). Вона забезпечує відведення тепла, зняття тертя, покращення якості поверхні. Разом із високою ефективністю суперфінішування супроводжується низкою експліцитних ризиків, пов'язаних із використанням абразивів, МОР та утворенням шліфувального пилу та аерозолів.

МОР містять нафтові компоненти, присадки та поверхнево-активні речовини. Вони під час неправильної експлуатації або утилізації можуть потрапляти до ґрунту, ґрунтових вод. Забруднення проявляється в наступному: хімічній нестабільності відпрацьованої МОР; бактеріальному розкладанні й утворенні токсичних побічних продуктів; утворенні аерозолів у робочій зоні, що шкідливі для оператора.

При зношуванні абразивних брусків та обробці металевої поверхні утворюється дрібнодисперсний пил. Він може містити: частинки абразиву; металеві частинки із поверхні деталі; продукти взаємодії матеріалу з МОР.

Дрібнодисперсний пи́л є небезпечним під час вдихання, сприяє забрудненню повітря у виробничих приміщеннях.

Процес суперфінішування супроводжується локальним нагріванням. Воно впливає не лише на якість поверхні, а й на інтенсивність випаровування МОР, збільшуючи концентрацію аерозолів у повітрі. Завищений тепловий режим також підсилює швидкість зношування та появлення абразиву, що збільшує кількість твердих відходів.

Для підвищення екологічної безпеки рекомендується застосовувати: синтетичні та напівсинтетичні МОР із низьким рівнем токсичності; біорозкладні емульсії; МОР із зниженим вмістом мінерального мастила.

Такі рідини утворюють менше відходів і є менш шкідливими при контакті із навколишнім середовищем.

Системи очищення включають: фільтрацію механічних домішок; сепарацію масла; бактеріальну стабілізацію; багаторазову рециркуляцію рідини. Це дозволяє зменшити обсяг відпрацьованої МОР та знизити витрати на утилізацію.

Для зменшення запиленості та концентрації аерозолів необхідно: встановити витяжні кожухи над робочою зоною; застосовувати локальні аспіраційні системи; забезпечити ефективну вентиляцію з багатетапною фільтрацією.

Саме такі засоби знижують рівень шкідливих викидів у робочу зону на 40...70%.

Перспективним напрямком є застосування маловідходних технологій, а саме: використання абразивів підвищеної стійкості (керамічні, алмазні); оптимізація режимів обробки для зменшення зношування інструменту; застосування мінімальної кількості МОР (технології MOL – мінімально достатнього змащення).

Такі методи зменшують кількість шліфованого пи́лу, відходів абразиву, а також обсяг використаної МОР.

Також необхідно створити систему утилізації відходів, яка передбачає: збір та зневоднення відпрацьованих МОР перед передачею на переробку; окреме збирання та утилізація абразивних відходів; недопущення потрапляння рідких відходів до каналізації або ґрунту; утилізація металевої стружки та шламу як вторинної сировини.

Підприємство повинно вести облік утворених відходів та забезпечувати передачу їх ліцензованим організаціям.

Задля безпеки персоналу передбачено наступні заходи: індивідуальні засоби захисту (респіратори, окуляри, рукавички); навчання оператора правильній роботі із МОР; контроль концентрації аерозолів у повітрі; регулярне технічне обслуговування обладнання та вентиляції. Дотримання цих вимог зменшує ризики професійних захворювань і підвищує безпеку роботи.

Отже, процес суперфінішування, попри свою технологічну ефективність, супроводжується утворенням токсичних відходів, пилу та аерозолів. Вони можуть негативно впливати на довкілля та здоров'я персоналу. Застосування екологічно безпечних МСГ, ефективних систем очищення та вентиляції, оптимізація режимів обробки та належна утилізація відходів дозволяють суттєво знизити екологічний вплив процесу. Впровадження таких заходів є необхідною складовою забезпечення сталого та безпечного виробництва.

Висновки до розділу 4

У розділі розглянуто комплекс питань, пов'язаних із впровадженням операції суперфінішування на виробництві. Встановлено, що забезпечення безпечних умов праці потребує використання таких засобів: огорожень, вентиляційних систем, засобів індивідуального захисту та дотримання вимог електро-, пожежної безпеки. Це мінімізує ризики травмування персоналу. Проведений розрахунок економічного ефекту показав, що впровадження суперфінішування дає річну економію 77500 грн за рахунок зниження трудомісткості, підвищення вартості продукції. Аналіз екологічних аспектів підтвердив, що процес супроводжується утворенням пилу, відпрацьованих МОР, абразивних відходів. Застосування фільтраційних систем, екологічно безпечних МОР та раціональної утилізації дозволяє суттєво зменшити негативний вплив на довкілля. У сукупності ці заходи забезпечують безпечне, економічно доцільне та екологічно стале впровадження суперфінішування у виробництво.

ВИСНОВКИ

1. Проведений аналіз існуючих методів остаточної обробки засвідчив, що традиційні схеми суперфінішування мають низку суттєвих недоліків, а саме низьку продуктивність, високу чутливість до початкової якості поверхні, недостатня здатність усувати нерівності низької частоти. Вдосконалення процесу є актуальною науково-технічною задачею. Найбільш перспективним напрямом підвищення якості робочих поверхонь є багатобрускове формотворне суперфінішування. Воно здатне істотно зменшити хвилястість, неруцлість, гранність, забезпечити формування раціональної опуклості доріжки кочення.

2. За результатами багатфакторного експерименту побудовано математичні моделі, що описують вплив часу обробки, твердості, зернистості брусків на шорсткість, хвилястість, опуклість та знімання металу. Ці моделі дозволили встановити закономірності процесу та визначили фактори із найбільшим впливом.

3. На основі отриманих залежностей визначено раціональні режими суперфінішування, що забезпечують мінімальні значення шорсткості, хвилястості та відхилень геометричної форми поверхні (час обробки $T = 8$ с; частота обертання виробу $n_1 = 1500$ об/хв., частота обертання інструментальної головки $n_2 = 500$ об/хв.; сила притискання бруска до оброблюваної поверхні $P_6 = 80$ Н; кут перетину осей виробу та інструментальної головки $\alpha = 3^\circ$; зернистість брусків M14, твердість CM2). Використання оптимальних параметрів підвищує точність та довговічність підшипникових вузлів. Впровадження багатобрускового суперфінішування забезпечує істотне підвищення ресурсу підшипників сільськогосподарської техніки, що працюють у важких умовах навантаження та забрудненості.

4. Досліджено питання економії праці та екологічної безпеки. Застосування захисних огорожень, ефективних систем вентиляції, екологічно безпечних МОР, правильна утилізація відходів гарантують безпечне та екологічно стале виконання процесу. Розрахунок економічної ефективності показав річну економію підприємства на рівні 77500 грн. Це підтверджує доцільність впровадження вдосконаленого процесу у виробництво.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Роїк Т. А., Гавриш О. А., Майстренко Ю. Ю., Ямрозь К., Курзава А. Вплив алмазного суперфінішування на шорсткість поверхні антифрикційних композитних деталей з відходів силумінів для пост-друкарського устаткування. *Технологія і техніка друкарства*. 2024. 2(84). С. 74-85.
2. Гавриш А. П., Роїк Т. А., Мельник О. О., Віцюк Ю. Ю. Вплив алмазного суперфінішування на якість поверхонь деталей зі зносостійких композитів на основі алюмінію. *Наукові Вісті «НТУ КПП»*. 2015. № 1. С. 58-65.
3. Фесенко А. В., Авсюкєва Т. М., Сліщенко С. А., Линник І. І. Підвищення ефективності фінішної механічної обробки. *Вісник НТУ «КПП»*. 2022. № 1(5). С. 33-43.
4. Клименко С. А. Науково-технічні проблеми механічної обробки інструментами з надтвердих матеріалів: стан і перспективи. *Вісник НАН України*. 2018. № 9. С. 45-52.
5. Мазур М. П. Основи теорії різання матеріалів: монографія. Львів: Новий Світ, 2000, 2020. 471 с.
6. Кузьменко А. Г., Диха І. В. Дослідження зносоконтактної взаємодії змащених поверхонь тертя : монографія. Хмельницький: ХНУ, 2005. 183 с.
7. Громовий О. А. Шляхи удосконалення процесу обробки плоских поверхонь деталей фрезеруванням. *Технічна інженерія*. 2020. С. 48-53.
8. Кудратов М. М., Віштак І. В. Аналіз сучасних методів шліфування для підвищення точності та якості поверхонь газових підшипників. *НаукПраці ВНТУ*. 2024. № 4. С. 1-8.
9. Ковальчук В. М. Основні методи шліфування газових підшипників. *Вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут"*. 2021. №12(2). С. 45–52.
10. Петренко І. С. Дослідження методів шліфування газових підшипників. *Науковий журнал "Технічна механіка"*. 2022. №8(1). С. 28-34.
11. 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.

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

13. Стрельчук Р. М. Аналіз якості обробки в умовах електроерозійного шліфування зі змінною полярністю електродів. *Машинобудування*. 2022. No 29, С. 5-14.

14. Klimenko S. Mechanical properties of surface layer of cutting elements from polycrystalline superhard composites based on cubic boron nitride. *Mechanics and Advanced Technologies*. 2017. No 79(1). pp. 108-114. URL: <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2017.79.99428>.

15. Hui Deng, Zhou Xu. Dressing methods of superabrasive grinding wheels: A review. *Journal of Manufacturing Processes*. September 2019. Volume 45. pp. 46-69. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.06.020>.

16. Fukuo Hashimoto, Hitomi Yamaguchi, Peter Krajnik, Konrad Wegener, Rahul Chaudhari, Hans Werner Hoffmeister, Friedrich Kuster. Abrasive fine-finishing technology. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 2016. Vol. 65, Issue 2. pp. 591-620. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.06.003>.

17. Brinksmeier Å., Y. Mutlugünes, F. Klocke J. C. Aurich, D. Shore, Í. Ohmori. Ultra-precision grinding. *CIRP Annals*. 2010. Volume 59, Issue 2. pp. 652–671. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2010.05.001>.

18. Nengru T., Chen Genyu, Liu Zhuoming, Luo Fengrong, Wei Yi, Zhou Wei. Laser dressing of fine-grained metal-bonded diamond grinding wheels with concave surface. *Optics & Laser Technology*. 2024. Volume 175. pp. 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2024.110812>.

19. Brinksmeier E., C. Heinzl, N. Bleil. Superfinishing and grind-strengthening with elastic bonding system. *Journal of Materials Processing Technology*. 2009. Vol. 209. Issue 20. pp. 6117–6123. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.08.027>.

20. Tribology. Handbook, Second Edition / Editor M. J. Neale. 1996. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-1198-5.X5000.0>