

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 підшипникових
втулок барабану молотарки»

КРМ.133ГМмд_21.06.000 ПЗ

Виконав: здобувач вищої освіти
за освітньо-професійною програмою
*«Машини і засоби механізації
сільськогосподарського виробництва»*
спеціальності 133 «Галузь
Машинобудування»
ступеня вищої освіти *магістр*
групи 133ГМмд_21
ТКАЧЕНКО Олександр

Керівник: докт. техн. наук, професор
КОБАСА Володимир

Полтава – 2025 року

ВСТУП

Сучасне сільськогосподарське машинобудування орієнтоване на підвищення надійності, довговічності та продуктивності техніки. Одним із найбільш навантажених вузлів молотарки є барабан, робота якого значною мірою залежить від технічного стану підшипникових втулок. Інтенсивні динамічні навантаження, вібрації та вплив абразивного середовища призводять до прискореного зносу цих деталей, що знижує ефективність роботи зернозбиральних машин і збільшує витрати на їх обслуговування.

Традиційні методи відновлення втулок підшипників не завжди забезпечують необхідний рівень точності та якості поверхні, що особливо важливо для роботи барабана молотарки в умовах високих швидкостей обертання. Удосконалення процесів шліфування як завершальної операції механічної обробки дозволяє підвищити геометричну точність деталей, знизити шорсткість поверхонь, забезпечити оптимальний розподіл залишкових напружень і тим самим продовжити ресурс вузла в цілому.

Отже, **метою** кваліфікаційної роботи є розробка та обґрунтування технологічних рішень, спрямованих на удосконалення процесу шліфування підшипникових втулок барабану молотарки з урахуванням підвищення точності, якості поверхні та ресурсу деталей.

Об'єктом дослідження є процес шліфування підшипникових втулок барабану молотарки, а **предметом** – технологічні параметри та умови шліфування підшипникових втулок, що впливають на якість поверхні, зносостійкість та довговічність вузла.

Для досягнення поставленої мети передбачено розв'язання таких завдань.

1. Дослідити вплив параметрів рельєфу алмазного круга (поперечного контуру, ріжучого рельєфу) на стабільність процесу шліфування та ефективність використання ріжучих властивостей зерен з метою розробки методів їх комплексного контролю.

2. Розробити та експериментально перевірити схеми комплексного керування рельєфом алмазних кругів, придатних для впровадження в універсальні автоматизовані виробничі системи.

3. Обґрунтувати параметри катодного пристрою та схеми керування поперечним контуром круга при обробці напівзакритих поверхонь і визначити оптимальні режими, що забезпечують стабільне отримання необхідної макрогеометрії поверхні.

4. Оцінити вплив комплексного контролю рельєфу алмазного круга на якість та продуктивність шліфування різних матеріалів, визначити можливості зниження питомої витрати алмазів і підвищення ефективності обробки напівтвердих та твердих сплавів.

5. Розробити систему заходів з охорони праці та екологічної безпеки при алмазному шліфуванні, включаючи утилізацію відходів і економічне обґрунтування ефективності впровадження удосконаленого процесу.

Актуальність дослідження зумовлена потребою аграрного виробництва у надійних технологічних рішеннях, які забезпечують високу продуктивність ремонту та відновлення деталей при мінімальних витратах. Оптимізація режимів шліфування, вибір інструменту та застосування сучасних методів охолодження і змащування створюють передумови для значного підвищення довговічності підшипникових вузлів.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Типові конструкції інструменту для шліфування

Суцільні та збірні шліфувальні інструменти, їх різновиди в залежності від форми можна розбити на чотири групи: шліфувальні круги, головки, сегменти і бруски. Алмазний інструмент буває багатокристальний або алмазно-абразивний (круги, диски, головки, бруски, і ін.) і однокристальний (різці, вигладжувачі та ін.). Типи і габаритні розміри одних алмазних інструментів стандартизовано (понад 2000 різних типорозмірів, рисунок 1.1).

Рисунок 1.1 – Деякі нові типи алмазних кругів: а – для позацентрового шліфування; б – плоский прямиго контуру тристоронній для обробки циліндричних поверхонь і торців, уступів штампів; в – плоский з одностороннім розташуванням алмазного шару для різьбошліфування; г – круг тарілчастий для заточування черв'ячних фрез; д – відрізний з внутрішньою ріжучою крайкою (зиготовлений методом порошкової металургії) для різання надтвердих матеріалів; е – чашковий келічний для заточування і доведення багатолезового інструменту зі спіральними канавками по передній поверхні

Круги з кубічного н-триду бору за формою і розмірами аналогічні алмазним і виготовляються на різних зв'язках різної зернистості і концентрації (50, 100, 150,

200%) наступних форм ЛПП, ЛПВ, ЛПВД, ВЛ1ПП, ЛТ, Л1Т, Л2Т та ін.

Встановлено 22 основних контури шліфувальних абразивних кругів діаметром 3-1100 мм, товщиною 3-250 мм. Найбільше застосування мають абразивні крути на керамічній, бакелітовій та вулканітовій зв'язках. Конструкції кругів різноманітні: збірні, з переривчастою робочою поверхнею, з внутрішньою кромкою та ін. Номенклатура абразивних інструментів різних стандартних типів і розмірів нараховує 736 типорозмірів, а з урахуванням різних їх характеристик вона налічує велику кількість різновидів. Найбільш поширені круги прямого контуру і круги прямого контуру з вигонками (форм ПП, ППВ, ППК, ППЖ і ППДК), що застосовуються при круглому зовнішньому, внутрішньому, позацентровому та плоскому шліфуванні, шліфуванні різьби, заточуванні різців та інших інструментів.

1.2 Процес мікрорізання при шліфуванні скремним зерном

У процесі шліфування зерна круга здійснюють масове мікрорізання, тобто дряпання поверхневого шару матеріалу, тому вивчення роботи окремого шліфуючого зерна зводиться насамперед до вивчення механізму процесу дряпання матеріалу.

Зкрутлення дряпаючого елемента (радіус округлення q) забезпечує високу його механічну міцність, великі фактичні сили різання ($P_y > P_z$). В процесі дряпання відбувається пластична деформація металу попереду дряпаючого елемента, по боках від нього і нижче лінії зрізу. Збільшення товщини зрізаного шару викликає збільшення обсягу металу, яке захоплюється пластичною деформацією в усіх напрямках. Переміщення дряпаючого елемента, що супроводжується зняттям стружки, можливо при наявності зколювача. Протікання процесу мікрорізання зерном багато в чому залежить від його геометрії. Виходячи з цього встановлені основні (принципово важливі) закономірності процесу мікрорізання при роботі будь-яким абразивним інструментом. Поверхня реального кристала завжди має шорсткість, спричинену його внутрішньою недосконалістю або умовами його вичикнення. В процесі мікрорізання в зв'язку з дислокаційним механізмом зазначені недосконалості зростають. Мікровиступи M і субмікровиступи N зерен мають

значення самостійних дряпаючих елементів, що знімають стружки, товщиною в 10 і 100 разів менші в порівнянні з основним дряпаючим елементом. Через наявність округленій ріжучого елемента в зоні тонких стружок створюються тим більше тупі кути різання, чим менше товщина шару, що знімається. При тупому куті різання необхідно докласти додаткову силу, стискає деформується матеріал і викликає підвищення опору зрушенню деформованого шару в результаті збільшення сили тертя в площині сколювання в момент зсуву виділень елемента матеріалу, збільшення сили зовнішнього тертя між інструментом і оброблюваним матеріалом. При різанні шари матеріалу, віддалені від ріжучої кромки на різних відстанях, деформуються при різних кутах різання. Для шарів матеріалу, що лежать безпосередньо на лінії зрізу, кут різання досягає такої величини, при якій різання є неможливим, і тому відбувається зминання матеріалу. Однак зі збільшенням товщини шару, що знімається, тобто в міру віддалення від лінії зрізу, фактичний кут різання зменшується, причому при $ax = r \text{ бх} = 90^\circ$ і при $ax > r \text{ бх} < 90^\circ$. У зрізуваному шарі виникають розриваючі матеріал напруження, якщо товщина шару, що знімається значна і кут різання невеликий. Якщо радіус округлення ріжучого елемента більше товщини шару, що знімається ($r > ax$), то в цьому випадку початку відділення стружки передус значне ковзання між ріжучим інструментом і матеріалом. Збільшення товщини шару, що знімається відповідає зростанню загальної роботи дерозчинення, виробленої при гострому гуглі різання, проте робота дерозчинення, виконувана при тупому куті різання, практично залишається без змін. У зв'язку з цим збільшення товщини шару, що знімається відповідає зниженню додаткового дерозчинення матеріалу внаслідок тупого кута різання, що викликається наявністю у інструменту округленій ріжучого елемента. Сказаним пояснюється той факт, що при значних товщинах шарів, що знімаються умовне напруження різання має залежить від товщини шару, що знімається [4]. Ширина шару, що знімається не впливає на величину фактичного кута різання і визначає собою довжину шару матеріалу, що піддається деформації, тому умовне напруження різання практично не залежить від ширини шару, що знімається.

1.3 Роль зв'язки в процесі шліфування

Основне призначення зв'язки – закріплення абразивних зерен в інструменті і забезпечення високої міцності круга. Разом з тим, зв'язка повинна забезпечити можливість природного поновлення поверхні, у міру зносу абразивних зерен або зносу в процесі редагування. Від того, який пружністю володіє зв'язка, буде залежати поведінка зерна: при дії ударного навантаження. При надто великій податливості зв'язки зерно під дією ударного навантаження втратить можливість брати участь в процесі різання. При недостатній пружності зв'язки зерні виявляється між двома твердими поверхнями, і також втрачає можливість брати участь в різанні через руйнування. Звідси слідує, що зв'язка повинна володіти оптимальною пружною характеристикою, яка забезпечила б нормальний процес різання. В даний час найбільш поширеними зв'язками для алмазних кругів є металеві, що використовуються на операціях шліфування при знятті великих припусків і органічні, які використовуються на операціях чистового і доводочного шліфування. Як правило, металеві зв'язки алмазного інструменту являють собою композиції металів, легованих різними елементами або їх сполуками. В якості компонентів таких зв'язок, складових їх основу, найчастіше застосовуються мідь, олово, цинк, алюміній, кадмій, кобальт і нікель [7], легованих різними елементами або їх сполуками. У якості компонентів таких зв'язок, складових їх основу, найчастіше застосовуються мідь, олово, цинк, алюміній, кадмій, кобальт і нікель [8], легованих різними елементами або їх сполуками. В якості компонентів таких зв'язок, складових їх основу, найчастіше застосовуються мідь, олово, цинк, алюміній, кадмій, кобальт і нікель [9].

Властивості зв'язок залежать від структури, зносостійкості, міцності утримання алмазів, ударної в'язкості, твердості і коефіцієнта термічного розширення, можуть впливати на ефективність роботи алмазного інструменту при обробці різних матеріалів. Хімічна взаємодія алмазів зі зв'язкою змінюється введенням в зв'язку елементів, змочують алмази (титану, хрому та ін.), а також нанесенням па поверхню алмазу покриттів, взаємодіючих зі зв'язкою. Зносостійкість зв'язок регулюється легуванням основи різними металами, а також введенням в зв'язки наповнювачів

твердих мастил (графіту, нітридів, боридів, фторидів, сульфідів деяких елементів).

Інструмент на струмопровідній зв'язці виготовляється головним чином методом порошкової металургії. Алмазні круги на струмопровідних зв'язках застосовують для всіх видів чорного глибокого і напівчорного шліфування. Для операцій пального шліфування застосовуються органічні зв'язки Б1, Б2, Б3, БТЦ та ін. Ці зв'язки мають деякі недоліки, одним з яких є підвищена витрата алмазів в дрібнозернистих кругах.

Одна з останніх зв'язок, розроблених у вітчизняній промисловості – зв'язка БР, що виготовляється на основі сполучного пульвербакеліта з додаванням гумових частинок, що надає зв'язці еластичність. При цьому сили різання розподіляються на більшу кількість зерен, знижуються шерсткість обробленої поверхні і питомі витрати алмазів.

В останні роки дослідження фахівців спрямовані на здійснення способів подачі активних речовин в зону шліфування шляхом в'єдення їх до складу шліфувальних кругів на органічних зв'язках у вигляді легкоплавких наповнювачів виплавляти при шліфуванні. В основному такими легкоплавкими наповнювачами є солі (сульфіди, нітрати та ін.), для яких при шліфуванні можна порівняти з присутністю цих речовин в мастильно-охолоджувальній рідині. Названі наповнювачі в тій чи іншій мірі підвищують ефективність шліфування; знижують температуру або сприяють протіканню на поверхні оброблюваного металу різних процесів (хімічних, хіміко-адсорбційних, адсорбційних і ін.), в результаті чого відбувається локальне зниження міцності металу і полегшення його обробки.

Для металів (твердих сплавів, сталей), а також ковалентних сполук (карбідів) найбільш активними середовищами є розплави деяких легкоплавких металів. Введення таких металів в органічну зв'язку БП-2 дозволило підвищити працездатність алмазних кругів. Стійкість алмазних кругів на зв'язці БП-2 приблизно в 3 рази вище стійкості аналогічних кругів на зв'язці Б3.

1.4 Захисні сорочки для зерен

Підвищенню якості алмазних і КНБ кругів на органічній зв'язці суттєво сприяє

попередня металізація їх зерен, що виконує три основні функції.

По перше, покриття охоплює зерно створює йому своєрідну металеву сорочку, в результаті чого воно виявляється в змозі працювати навіть при наявності дрібних тріщин і при значних навантаженнях. По-друге, металеве покриття алмазних зерен служить в якості приймача для поглинання тепла, що розвивається в зернах і швидко передається алмазом, який є одним з кращих природних провідників тепла. У зв'язку з цим на площині розділу органічної зв'язки з металом встановлюється більш низька температура, ніж на відповідній площині органічної зв'язки з алмазом. Таким чином, органічна зв'язка круга захищається від обжарювання і інших видів теплового руйнування і тому міцно і довго утримує зерна. По-третє, наявність металевих шару підвищує силу зчеплення між зерном і зв'язкою значно вище, ніж між алмазом і смолою. Тут велике значення має підвищення адгезії зв'язки до металу покриття.

Продуктивність шліфування, що визначається відношенням обсягу знятого матеріалу до об'єму витраченого алмазного шару, є найбільшою при 55% металевому покритті від загальної маси зерна. Зазначена закономірність справедлива для кругів різної зернистості. Загальна вартість обробки при алмазних зернах без покриття (штрихова крива) має місце при концентрації алмазів 125%, а при роботі з металізованими алмазами (суцільна крива) – при концентрації 100%.

Основними способами металізації алмазних зерен є: хімічний, карбонільний і вакуумного розпилення [1]. На межі зв'язка-метал покриття виликають більш міцні зв'язки, ніж на межі зв'язка-алмаз. Це пояснюється тим, що між смолою і металом виникає хімічна взаємодія, що обумовлює більш міцне закріплення металізованих алмазів в органічній зв'язці. Це відбувається в результаті адсорбції гідроксильних груп на поверхні і взаємодії їх з атомами металу, його оксидами або гідроксиду з утворенням водневих зв'язків.

Останнім часом запропоновано кілька шліфувальних матеріалів з двошаровим покриттям. В якості покриття використовуються нікель, кобальт, залізо, хром і їхні сплави. Для зовнішнього покриття використовується мідь, а в якості абразивного зерна – кубічний нітрид бору, карбід кремнію, карбід вольфраму. На алмазні зерна часто завдають топкий безперервний шар титану, понад якого наноситься ще одні шар металу, спільно з титаном. Використання титану або цирконію при покритті

окремих зерен алмазу забезпечує більшу силу зчеплення між покриттям і алмазом.

1.5 Шліфувальні круги з орієнтованим закріпленням зерен

У більшості інструментів з природних, синтетичних алмазів та інших надтвердих матеріалів зерна розташовані хаотично, що не дозволяє їм повністю реалізувати їх різально-шліфувальні властивості. Тому впорядковане й орієнтоване розташування зерен є одним з методів підвищення ріжучої здатності інструментів [10]. Орієнтація алмазних зерен в інструменті щодо площини різання дозволяє розглядати процес шліфування як процес мікрорізання зернами – різцями, які мають передні кути, мало відрізняються один від одного в межах одного інструмента.

Зв'язки, що застосовуються для інструментів з орієнтованими зернами алмазу, повинні володіти рядом специфічних властивостей, пов'язаних з технологією орієнтації. Оскільки металізовані зерна орієнтуються магнітним полем, зв'язка на даній стадії повинна забезпечувати вільний поворот зерен уздовж магнітних силових ліній, а потім міцно їх утримувати без застосування інших зовнішніх сил.

Силова дія електричного поля на зерна, що зміщені на нижній електрод конденсатора, полягає в доданні їм упорядкованого руху в напрямку до верхнього електроду.

Перенесення зерен можливе в конденсаторах різних конструкцій і розмірів. Правильна розстановка зерен дозволяє створити оптимальні умови різання для кожного зерна і найкращий відведення продуктів зносу із зони шліфування.

В даний час виготовлені різні алмазні круги (АГЦ, АЧК, АПВ та ін.), Бруски та інші шліфувальні інструменти з орієнтованими зернами.

1.6 Переривчасте шліфування алмазними кругами

Серед заходів, спрямованих на зменшення температури шліфування, перспективним є застосування кругів з переривчастою робочою поверхнею. Крашії умови стружкоутворення і стружковідведення, імпульсний характер нагріву зони контакту сприяють зниженню температури переривчастого шліфування. Правда,

при такому шліфуванні зростає шорсткість оброблюваної поверхні. Особливо ефективним є застосування переривчастих кругів при плоскому торцевому шліфуванні, так як цей вид обробки відрізняється підвищеною довжиною дуги різання і посиленням виділенням тепла в зоні контакту круга з деталлю.

При шліфуванні переривчастими кругами час контакту одного ріжучого виступу круга може бути менше середнього часу, тоді температура не встигає досягти максимального значення після виходу ріжучого виступу з контакту температура обробленої поверхні протягом часу, який залежить від ширини паза і швидкості круга, падає до певного значення, потім знову зростає протягом часу і т.д. [11]. В результаті максимальна температура контакту при переривчастому шліфуванні не досягає того значення яке вона мала б при шліфуванні суцільним кругом.

Іншою причиною зниження температури при переході від суцільного шліфування до переривчастого є зниження інтенсивності тепловиділення в зоні різання. При звичайному шліфуванні утворювана в результаті різання окремими зернами стружка не знаходить вільного виходу із зони контакту круга з деталлю і залишається в зоні обробки, зменшуючи фактичну площу контакту алмазних зерен з оброблюваним матеріалом і знижуючи ріжучу здатність круга. При переривчастому шліфуванні стінки пазів виконують роль скребоків, що видаляють стружку. У зв'язку з цим сили різання не збільшуються так інтенсивно, як при звичайному шліфуванні, і відповідно нижче напруженість тепловиділення.

Хороші результати по застосуванню кругів з переривчастою робочою поверхнею були отримані при плоскому шліфуванні кераміки типу M7 на різних режимах.

З метою підвищення продуктивності при попередньому шліфуванні кераміки алмазними кругами з переривчастою робочою поверхнею слід працювати з великими глибинами шліфування і з меншими поперечними подачами.

Одним з методів зниження засолювання круга є застосування збірних конструкцій з окремих шліфуються сегментів. При цьому посилюється розсіювання тепла, що утворюється при шліфуванні, і зростає вібрація, яка сприяє очищенню круга від струмопровідних частинок і тим самим – самозаточуванню.

1.7 Процес зняття стружки

Шліфування можна розглядати, як процес масового доволі тонкого швидкісного мікрорізання, якщо врахувати високі швидкості різання (дряпання) і вельми малі товщини стружок, що знімаються окремими зернами шліфувального круга. Процес відбувається при високій миттєвій температурі.

При шліфуванні пластичних матеріалів (металів) відбувається складне (об'ємне) пластичне дерозчинення його поверхневого шару, а при обробці крихких матеріалів (кераміки) – головним чином крихке сколювання. Стружка знімається окремим зерном за час $10\text{-}20^{-5}$ с, тобто практично миттєво. Загальна кількість стружок, що знімаються шліфувальним кругом в одиницю часу, велика.

Безладне розташування шліфувальних зерен на робочій поверхні круга забезпечує різну конфігурацію і розміри зрізів, що знімаються окремими зернами. Для даного круга форма і розміри зрізів залежать від режиму різання, наприклад, від ставлення колових швидкостей V_n/V_v . При шліфуванні досить пластичних, металів найбільш типовими є три форми стружок: стрічкові, комоподібні і сегментоподібні [13]. Найбільш часто зустрічається стрічкова стружка. Рідше зустрічається комоподібна стружка, яка при чорновій обробці деталей з в'язких сталей може досягати значних розмірів. При певних умовах різання зерном може виникнути сегментована стружка з найбільшою товщиною середньої частини, основна маса знятих шарів буде мати найрізноманітнішу проміжну форму [14]. Розміри одиничних зрізів визначають сумарний шлях, який проходить шліфують зерно до руйнування і випадання з зв'язки круга, закономірності навантаження зерна, температуру в зоні контакту деталі з кругом. Форма зрізу є одним з основних параметрів, що характеризують основні закономірності процесу. Зі збільшенням швидкості деталі та максимальної глибини різання довжина одиничних зрізів збільшується. Таким чином, при чистовому шліфуванні довжина одиничних зрізів оброблюваного матеріалу шліфувальними зернами не залишається постійною, а змінюється в широких межах. Число одиничних зрізів максимально при довжині, трохи більшої половини дуги контакту і збільшується зі збільшенням швидкості круга і деталі, температури в зоні контакту деталі з кругом. Форма зрізу є одним з

основних параметрів, що характеризують основні закономірності процесу. Зі збільшенням швидкості деталі та максимальної глибини різання довжина одиничних зрізів збільшується. Таким чином, при чистовому шліфуванні довжина одиничних зрізів оброблюваного матеріалу шліфувальними зернами не залишається постійною, а змінюється в широких межах. Число одиничних зрізів максимально при довжині, трохи більшої половини дуги контакту, і збільшується зі збільшенням швидкості круга і деталі, температури в зоні контакту деталі з кругом. Форма зрізу є одним з основних параметрів, що характеризують основні закономірності процесу. Зі збільшенням швидкості деталі та максимальної глибини різання довжина одиничних зрізів збільшується. Таким чином, при чистовому шліфуванні довжина одиничних зрізів оброблюваного матеріалу шліфувальними зернами не залишається постійною, а змінюється в широких межах. Число одиничних зрізів максимально при довжині, трохи більшої половини дуги контакту, і збільшується зі збільшенням швидкості круга і деталі. при чистовому шліфуванні довжина одиничних зрізів оброблюваного матеріалу шліфувальними зернами не залишається постійною, а змінюється в широких межах. Число одиничних зрізів максимально при довжині, трохи більшої половини дуги контакту, і збільшується зі збільшенням швидкості круга і деталі. при чистовому шліфуванні довжина одиничних зрізів оброблюваного матеріалу шліфувальними зернами не залишається постійною, а змінюється в широких межах. Число одиничних зрізів максимально при довжині, трохи більшої половини дуги контакту, і збільшується зі збільшенням швидкості круга і деталі.

1.8 Особливості теплових явищ у зоні мікрорізання

При шліфуванні майже вся механічна робота мікрорізання перетворюється в теплову і лише незначна її частина переходить в приховану енергію змін кристалічної ґратки оброблюваного матеріалу. Отримана теплова енергія розподіляється між деталлю, кругом, стружкою і охолоджуючим середовищем. При шліфуванні розрізняють температуру миттєву, що розвивається безпосередньо в зоні мікрорізання шліфуючим зерном, яка встановлюється в зоні контакту круга з деталлю (в зоні шліфування), та середню температуру, що встановлюється на

поверхні шліфованої деталі.

Про високі миттєві температури, що розвиваються при мікрорізанні досить міцних матеріалів, наочно свідчить потік іскор, що з'являється навіть при наявності рясного охолодження. Такі температури підвищують пластичність оброблюваного матеріалу і цим сприяють процесу зняття стружки при мікрорізанні. Контактна температура в зоні шліфування значно менше миттєвої в зв'язку з інтенсивним тепловідводом із зони шліфування в середину деталі. Середня температура поверхні деталі нижче контактної температури; вона викликає теплові зміни розмірів деталей.

Як виникнення, так і розподіл теплоти в процесі шліфування залежать від всіх умов обробки: характеристики круга, режимів різання, механічних і теплофізичних властивостей матеріалу деталі, властивостей мастильно-охолоджувальної рідини та ін. Зі збільшенням навантаження на зерно в зоні його роботи виділяється велика кількість теплоти в одиницю часу і це забезпечує зростання температури. Навантаження на зерно підвищується при збільшенні окружної швидкості деталі і подач (поперечної і поздовжньої).

Температура при шліфуванні знижується як при зменшенні потужності джерел теплоутворення, так і при підвищенні інтенсивності тепловідведення. Для цієї мети є основні шляхи:

1) технологічні – вибір оптимальної схеми шліфування, характеристик шліфувального круга, режиму обробки, раціональних мастильно-охолоджуючих рідин та ін. ;

2) конструктивні – застосування ефективних конструкцій кругів для конкретних умов обробки, вдосконалення установок для очищення і охолодження мастильно-охолоджуючих рідин і ін.

При застосуванні напівштучної термометри можна виміряти температури, що виникають в зоні різання окремими шліфувальними зернами. Прилад, що має забезпечувати точну запис температурного сигналу. Ці температури виникають в зоні контакту абразивних зерен з деталлю. Що огинає крива до підстав окремих імпульсів визначає контактну температуру. При виході з контакту з кругом розглянутої ділянки деталь остигає, зберігаючи до нової зустрічі з кругом деяку сталу температуру.

До теперішнього часу найбільш докладно вивчена залежність контактної температури від елементів і умов шліфування. В процесі мікрорізання поверхневого шару абразивним зерном контактна температура практично миттєво досягає максимального значення і після виходу зерна із зони контакту температура швидко знижується.

При роботі з охолодженням незалежно від часу шліфування (числа проходів) контактна температура деталі може залишатися незмінною. Сказане буде вірно в разі, якщо кількість теплоти, що виникає в процесі шліфування, дорівнює кількості теплоти, що відводиться мастильно-охолоджувачем технологічним засобом (МОР). Підвищення режиму шліфування викликає збільшення температури деталі.

Більш твердому кругу при інших рівних умовах відповідають великі температури. Збільшення номера зернистості при малих глибинах різання практично не впливають на температуру шліфованої деталі. При значні глибинах різання (0,02 мм/хід) підвищенню номера зернистості відповідає невелике підвищення температури. Таким чином, при збільшенні товщини шару і навантаження на шліфують зерно температура деталі підвищується. Підвищення температури є результатом зростання роботи мікрорізання і сил різання зі збільшенням товщини шару.

При алмазному шліфуванні зв'язка більш активно бере участь в процесі обробки, ніж при абразивному шліфуванні. Сказане визначається великою кількістю зв'язки і наповнювача алмазних кругів в порівнянні з відповідними абразивним кругом. Зв'язка, що розвиває в зоні різання певну роботу тертя, сприяє теплоутворення. На тепловий баланс в процесі різання впливають і теплофізичні властивості зв'язки.

При певних умовах обробки зі збільшенням концентрації алмазів в крузі температура шліфування знижується. Це зниження є найбільш значним при зміні концентрації кругів від 50 до 100%, Застосування алмазних кругів з великою концентрацією алмазного зерна (100-200%), а також призначення оздоблювальних режимів шліфування дозволяє при тонкій обробці деталей зі сталі Р18 забезпечувати у зоні обробки цілком допустимі температури нижче 700°C.

Вплив зернистості на температуру найбільш значно при великих поперечних

подачах, коли ймовірність впровадження зерен в Деталь на їх повну висоту підвищується і встановлюється контакт зв'язку з деталлю, що призводить до додаткового теплоутворення.

Обробка кругами з зерном з кубічного нітриду бору визначається закономірностями, загальними для процесу шліфування. Особливості даного процесу визначаються насамперед властивостями зерен. Відсутність хімічної спорідненості зерна кубічного нітриду бору до заліза при шліфуванні стає створює температури в 1,5-2 рази менші, ніж при обробці алмазними кругами.

Застосування охолодження (3% -ного содового розчину) дозволяє знизити контактну температуру в 1,5-2 рази в порівнянні з роботою без охолодження.

1.9 Процес зносу абразивних зерен

Стиравання поверхні круга є складним фізико-хімічним і механічним процесом, перебіг якого залежить від всіх умов обробки: характеристики круга, властивостей оброблюваного матеріалу, режиму різання і т.д. Знос круга пов'язаний зі стійкістю.

Залежно від властивостей шліфувальних кругів і умов обробки круга можуть працювати з самозаточуваням і затупленням. У початковий період роботи круга на вершинах зерен утворюються майданчики зносу, які безперервно зростають і забезпечують вплив умов, що діють на зерна, чому відповідає сила руйнування зерна і зв'язки. При достатньої міцності зерен і зв'язки майданчики зносу на зернах можуть досягти значних розмірів. Робота тертя і пластичного дерозчинення зі зростанням температур контактуючих поверхонь зменшується [15, 16]. Одночасно з зносом зерен круга відбувається зміна рельєфу його поверхні.

Залежно від умов шліфування (фізико-механічних властивостей зерна, матеріалу оброблюваної деталі і зв'язки, режиму обробки та ін.) Розрізняють Подальші основні види зносу: стирання ріжучих елементів (вершин) шліфуються зерен з утворенням на них майданчиків з більшою або меншою шорсткістю; мікроруйнування (розщеплення) зерен з відокремленням від них невеликих частинок; руйнування зерен з відокремленням від них великих часток, порівнянних

з розміром зерна; повне виривання зерен з зв'язки; руйнування в результаті протікання хімічних реакцій в зоні контакту зерна з матеріалом оброблюваної деталі при високих температурах, що розвиваються в зоні шліфування (знос дифузний, адгезійний і ін.) і забивання проміжків між зернами (пор) стружкою і продуктами зносу.

Відповідно до умов шліфування окремі види зносу можуть відбуватися одночасно або певний вид зносу буде переважаючим. Переважання першого і другого видів зносу типове для роботи інструменту в режимі затуплення або обмеженого самозаточування. Самозагострювання може відбуватися як в обсязі зерна (при відколюванні частинок кристалів), так і в обсязі круга, коли відбувається відрив як цілого зерна, так і його частини. Момент розчинення зерна з поверхні круга визначається ступенем зносу зерна, динамікою процесу і властивостями міцності зв'язки [10].

У ряді випадків у зносі шліфуються зерен переважаючим є сухий знос, що пов'язано з природою зерна. Тендітному зносу найбільш активно піддаються алмазні зерна марки АСО. При високих температурах шліфування, що знижують твердість матеріалу шліфуються зерен, процес зносу зерен є інтенсивним.

Процес адгезійного зносу характеризується кратерами, що утворюються на поверхні зерна; це свідчить про відрив або зріз окремих частинок. Можливий також перенесення частинок оброблюваного матеріалу на поверхні шліфуються зерен у вигляді наростів, характерних для шліфування сплавів з аустенітної структурою. В цьому випадку процес різання різко погіршується, так як адгезія переходить в когезію – тертя однорідних матеріалів. Інтенсивність зносу абразивних зерен різко зростає при наявності хімічної спорідненості між зерном і оброблюваних матеріалом. У цьому складному процесі найважливіше значення має природа шліфуючого матеріалу, фізико-механічні властивості оброблюваного матеріалу і середовище, в якому відбувається шліфування. Велике практичне значення має взаємодія алмазного зерна круга з оброблюваним матеріалом в процесі шліфування.

При обробці алмаз може зруйнуватися внаслідок спільної дії ряду факторів: механічного «стирання», окислення, графітизація (при 700 °С), розчинення в оброблюваному металі і адгезії. Розчинення алмазу в армко-залізі (в вакуумі)

починається при температурі 700°C , причому втрата маси алмазу зростає експоненціально з підвищенням температури і параболічно зі збільшенням часу контакту. Втрата маси визначається швидкістю дифузії вуглецю-алмазу в залізо відповідно до коефіцієнтів дифузії вуглецю в металах.

Встановлено також різке збільшення розчинності алмазу в рідкому залізі при температурі 1500°C . За даними рентгеноструктурного аналізу, при вказаній температурі розчинення алмазу в вольфрамі, молибдені і ніобії не спостерігається, так як коефіцієнти дифузії вуглецю у ці метали приблизно на п'ять порядків нижче в порівнянні із залізом.

При обробці різних матеріалів можна відзначити подальші основні положення руйнування кристалів алмазу [4].

1. Механічний (абразивний) знос переважає головним чином співуючи обробці деталей з некарбідоутворюючих металів п їх сплавів, якщо контактна температура нижче 650°C , а також при обробці деталей з твердих сплавів, якщо контактні температури процесу вище 650°C .

2. При обробці зазначених металів з підвищенням контактних температур в результаті збільшення швидкості різання або інших факторів можливе руйнування алмазного зерна внаслідок його окислення киснем повітря, що потрапляє в зону різання.

3. При режимах пліювання, що створюють досить високу питому силу в зоні обробки (що не перевищує проте 600 кг/мм^2) руйнування зерна алмазу може бути викликано його графітизацією внаслідок високих контактних температур; це відноситься головним чином до обробки твердих сплавів, температура плавлення яких вище 1000°C .

4. Переважання адгезійного зносу характерно для карбідоутворюючих металів, добре змочують алмаз.

5. Переважання дифузійного зношування характерно для металів, коефіцієнт дифузії вуглецю в яких високий, а схильність до адгезійного руйнування невелика. У цьому відношенні найбільш типовим металом є залізо, те ж саме відноситься і до сталей. Однак в реальних залізобуглецевих сплавах процес зносу протікає значно складніше.

Змішаний характер зносу спостерігається для карбідотворюючих металів, що володіють середніми коефіцієнтами дифузії в них вуглецю і досить високу адгезію до алмазу (ванадій і ін.).

1.10 Утворення наросту на зерні при мікрорізанні

При мікрорізанні алмазним зерном деталей зі швидкохідної сталі відмічено утворення довгої стружки з частим виникненням на зерні стадоподібного наросту клиноподібної форми. Утвориться стружка визначається формою наросту, що залежить від величини і напрямки сил в зоні контакту і адгезійного впливу в зоні мікрорізання. На зернах монокорунду нарост майже не виникає.

При алмазному шліфуванні сталевих деталей знімається стружка певним чином руйнівну дію на зв'язку круга [4]. По передній поверхні сходиться стружка, а кут між головною задньою поверхнею і напрямком різання близький до нуля. Якщо цей кут спочатку має позитивне значення, то в результаті зносу алмазу він дорівнює нулю. У процесі шліфування стружка, яка утворюється у різальних крайках алмазного зерна, прямує уздовж його передньої поверхні, ударяючись об зв'язку 2, утворює на ній глибокі стружкові канавки. Подальші алмазні зерна будуть безперервно поглиблювати стружкові канавки, руйнуючи зв'язку і оголюючи зерна, що поряд з їх мікрозносом буде змінювати і структуру круга.

Утворений на алмазних зернах нарост сприяє засолюванню круга. Засолювання відбувається частинками, що відірвалися як від стружки, що знімається, так і від поверхні шліфованій деталі. Ці частинки прикріплюються головним чином до передньої поверхні алмазу. У момент кожного наступного контакту з поверхнею алмазу до вже наявних на ній частинках прикріплюються всі нові і нові. Знову прикріплені частинки можуть витіснити більш ранні металеві шари з передньої поверхні алмазу в напрямку до зв'язці круга, що призводить до утворення шаруватого наросту, що росте переважно в напрямку різання. При певній максимальній величині нарост зривається.

При певних умовах різє частина зерен може піддаватися пластичній деформації і пластичного руйнування. На відміну від швидкохідного і

твердосплавного інструменту в більшості випадків шліфуючі зерна не піддаються пластичному руйнуванню, що викликано високою їх твердістю при підвищених температурах.

При мікрорізанні залізвуглецевих сплавів, нікель і кобальт виступають як своєрідні каталізатори процесу переходу алмазу в графіт. Процес зносу алмазу при контакті його із залізвуглецевими сплавами відбувається шляхом послідовного перетворення тонкого поверхневого шару алмазу в графіт і подальшого стирання графіту при різанні. Такий знос алмазного зерна характеризується малою інтенсивністю. Порівняно товсті нарости металу, що утворюються на окремих ділянках в результаті захоплення, затримують процес графітизації алмазу до їх відриву, що підвищує на поверхні утворення нових виступів. Це добре фіксується мікроскопом при суттєвому збільшенні [18].

1.11 Вплив мастильно-охолоджуючих технологічних засобів на процес мікрорізання

Мастильно-охолоджувальні технологічні рідини (МОР) безпосередньо впливають на продуктивність і якість обробки деталей шліфуванням, здійснюючи охолоджуючу, мастильну і миючу дію. Охолоджуюча дія МОР полягає у відведенні тепла від нагрітих ділянок зони різання – оброблюваної деталі і шліфувального інструменту. Мастильна дія МОР зводиться до зниження роботи тертя ріжучих і давили шліфуються зерен, зв'язки, частинок металу і відходів обробки, налиплого на робочу поверхню інструменту, а також запобігання цього налипання (заспокоєння). Миючий дію МОР полягає у відстоєнні (вимиванні) частинок металу, продуктів зносу шліфувального інструменту та інших відходів обробки з поверхні інструменту, із зони різання, з поверхні оброблюваної деталі і з деталей верстата.

Основні принципи підвищення ефективності МОР при шліфуванні: хімічна активація – підвищення хімічної активності МОР по відношенню до матеріалів оброблюваної деталі, шліфуючого зерна і зв'язки; фізична активація – підвищення адсорбційної і проникаючої здатності МОР. Підвищенню активації сприяє легування МОР поверхнево-активними речовинами. У ряді випадків активація є

результатом «зближення» іонів систем «МОР – метал» або «шліфують зерно – зв'язка» [40].

В процесі мікрорізання, пов'язаного з граничною пластичною деформацією і подальшим руйнуванням певного обсягу металу, утворюється розгалужена мережа мікротріщин, за якими діє мастильна середовище, в результаті чого полегшується руйнування. Глибина мікрорізання збільшується зі збільшенням поверхневої активності мастила. Найбільше збільшення глибини різання дає мастильна середовище, що складається з вазелінового масла з додаванням 0,2% олеїнової кислоти.

При застосуванні малов'язких поверхнево-активних речовин мастильний шар складається з адсорбованих на поверхні молекул і тонкого пластифікованого шару металу, який має меншу міцність, ніж основний метал. Відмінною особливістю цього шару є те, що величина його саморегулюється процесом: при посиленні режиму різання більш інтенсивно розвивається мережа мікротріщин: поверхневому шару і збільшується товщина пластифікованого шару. Пластифікований шар органічно пов'язаний з оброблюваним металом. Він не може бути від нього відділений або видавлений зі збільшенням ступеня деформації. У процесі обробки металів відбувається інтенсивний розвиток нових поверхонь, які вступають в безпосередню взаємодію з поверхнею інструменту, тому необхідно,

Швидкість утворення пластифікованого шару визначається умовами вступу активного мастила до новостворених поверхонь і латентним періодом дії активних молекул. При використанні малов'язких мастил надходження їх в активну зону полегшується, і латентний період молекул малий. Пластифікований шар в процесі тертя утворюється з високою швидкістю. Наявність такого шару сприятливо впливає на перебіг процесу в цілому. Відбувається зменшення сили тертя і додаткова зсувна деформація поверхневого шару оброблюваної деталі. В результаті вдається збільшити ступінь дерезинення металу за один прохід і підвищити стійкість інструменту [25].

Зменшення сили тертя досягається не в результаті повного поділу поверхонь (при цьому зсув відбувається безпосередньо в шарі мастила). Створюються своєрідні умови, які сприятливо впливають на розчинення високоякісної поверхні і

дозволяють здійснити процеси, для яких обов'язкова наявність більш-менш значної сили тертя.

Оскільки міцність тонкого поверхневого шару менше, ніж сировинного металу, зрушення здійснюється переважно в ньому шарі. Відбувається локалізація і вирівнювання деформації зсуву, що сприяє вирівнюванню деформації по всьому шару. Специфічність тертя при механічній обробці визначається високими напруженнями в зоні контактів твердих тіл. Ці напруження, в залежності від схеми об'ємно-напруженого стану, можуть в кілька разів перевищувати межу текучості оброблюваного матеріалу. Тертя в процесі обробки нерозривно пов'язане з пластичною деформацією поверхневого шару.

Механізм утворення мастильного шару при механічній обробці має також цілий ряд особливостей; У зв'язку з тим, що матеріал поверхневого шару оброблюваної деталі знаходиться в пластичному стані, площа істинного контакту взаємодіючих тіл відносно велика, що ускладнює проникнення великої кількості мастила в зону вогнища обробки. За час обробки освіту достатньої кількості продуктів хімічної взаємодії можливо тільки при використанні мастил, мають високоактивні компоненти (хлор, фосфор, сірка та ін.).

Нерівномірна пластична деформація в зоні мікрорізання викликає на поверхні металу безліч дефектів у вигляді сходинок дислокацій, мікротріщин і мікронерівностей. В результаті відбувається збільшення поверхні, на якій адсорбуються активні компоненти мастила.

Вплив різних поверхнево-активних середовищ на процес дряпання досліджувався за допомогою інденування. Інденором був алмазний конус з кутом при вершині 150° і радіусом заокруглення $0,2$ мкм. Наявність малого радіусу заокруглення дозволяє досліджувати дряпання в найтонших поверхневих шарах [27].

Доведено, що характер пластичної деформації залежить головним чином від природи досліджуваного матеріалу і відношення глибини інденування до радіусу заокруглення вершини інденору.

При введенні мастила, внаслідок зменшення коефіцієнта тертя, глибина риски повинна зменшитися через чисто мастильну дію. Якщо при утворенні риски введення

мастила збільшує її глибину, то причиною цього може бути тільки зменшення граничного напруження текучості поверхневого шару. Чисто мастильна дія в даному випадку впливає як фактор, що приховує пластифікуючу дію мастил. Іншими факторами є збільшення пружного відновлення форми при наявності змащення й зменшення питомого тиску індентору на метал. Досліди проводилися на одному зразку з міді.

При малих навантаженнях на індентор глибина рисок, що утворилися в присутності активних мастильних середовищ, у всіх випадках виявилася більшою, ніж при мікроіндентуванні без змащення [3]. Це може бути зумовлено тільки зниженням механічних властивостей поверхневого шару металу під дією мастильних середовищ при його пластичній деформації, тобто утворенням адсорбційно-пластифікованого шару. Таким чином, показано, що під впливом поверхнево-активних середовищ на поверхні пластично деформованих металів утворюється найтонший пластифікований шар, що володіє більш низькими механічними властивостями, ніж шар, що не знаходиться в зоні дії поверхнево-активної речовини. Розмір і субмікрорельєф формованої поверхні в значній мірі визначають характер деформації поверхневого шару і дуже впливають на процес пластичного дерозчинення в цілому.

При утворенні рисок порівняно великої глибини внаслідок надмірного збільшення ступеня деформації і посилення напружено-деформованого стану в зоні дерозчинення, виникають мікротріщини. При введенні активної мастила зменшується сила тертя між індентором і деформується металом, що призводить до зменшення протяжності мікротріщин або до їх повного зникнення. Активні мастильні середовища сприяють зменшенню ширини спотвореної зони. Дослідження спотвореної зони навколо рисок, утворених з різними речовинами, що є компонентами алмазних паст, дозволило встановити, що не тільки величина спотвореної зони, але і її характер залежать від властивостей мастильної середовища. Встановлено також, що утворені за малими навантаженнями на індентор глибини рисок в присутності різних компонентів алмазних паст,

Деякі нові відомості були отримані при вивченні впливу поверхнево-активних мастил на процес дряпання обертовим конусом [6]. Таке вивчення проводилося з

трьох причин. По-перше, це дало можливість поліпшити проникнення мастила до поверхні конуса, по-друге, усунути вплив наростів на характеристики дряпання і, по-третє, зменшити складову сили тертя між конусом і витісняється металом уздовж твірної конуса.

Теоретично було розраховано, що при швидкості дряпання 0,45 мм/хв збільшення частоти обертання з 34 до 380 об/хв зменшує силу тертя в 10 разів, що призводить до зменшення сили дряпання. У даній роботі застосовувалося машинне масло. Поверхнево-активною речовиною служила сієїнова кислота.

Отримані результати показали, що при дряпанні металів (при обертанні і без обертання) має місце диверсія в дії поверхнево-активної речовини. Причому, коли дряпання утворюється в результаті зминання, додавання поверхнево-активної речовини викликає зростання напруги, а коли подоллина утворюється шляхом дряпання – різання, додавання викликає зменшення напруги дряпання. Зменшення сили і напруги дряпання з додаванням поверхнево, активної речовини при порушенні суцільності металу можна пояснити з точки зору зменшення поверхневої енергії. Молекули поверхнево-активної речовини адсорбуються на зовнішній поверхні і на мікрощілинах, викликаючи тим самим зменшення поверхневої енергії, а це призводить до полегшень руйнування металу. У всіх випадках МОР повинні задовольняти комплексу експлуатаційних вимог.

Легування олив дисульфідомolibденовими препаратами також дозволяє підняти ефективність шліфування (оптимальна концентрація 5%). Ефект від використання дрібнодисперсного дисульфиду молибдену в оливі вище ніж в емульсії.

З огляду на асортимент нафтохімічною промисловістю препаратів, слід рекомендувати для шліфування деталей з важко оброблюваних сталей і сплавів, крім згаданих вище, такі МОР: оливу індустриальну; 3% -ний розчин фтористого натрію +1% кремнійфторид морфоліну + 0,05% високомолекулярного змочувача + 0,05% продукту окису етилену; 5% -ний розчин хлористого барію у воді + 1,5% нітриту натрію.

В останні роки посилено увагу до підвищення ефективності МОР при абразивно-алмазній обробці (переважно при шліфуванні) шляхом вдосконалення способів підведення МОР. Успішно реалізуються два принципи: динамічна

активація і раціоналізація напрямку руху МОР. Напрямки руху рідини побудовані способи подачі МОР через пори або канали в крузі і контактний спосіб. Раціонально спрямований потік рідини, що подається струминно-напірним, позазонним способом. Розвиваються комбіновані способи подачі МОР, більшість з яких заснована на автономному використанні властивостей декількох (зазвичай двох) рідин.

1.12 Напрямки підвищення ефективності шліфування

Підвищення ефективності шліфування полягає у впровадженні високопродуктивного шліфування, що забезпечує найбільшу (в даних виробничих умовах) продуктивність при високій якості продукції та її низьку собівартість однієї. Залежно від умови різання високопродуктивна обробка може бути досягнута швидкісним або силовим шліфуванням.

Швидкісне шліфування – обробка з підвищеними швидкостями круга близько 40-50 м/с і вище при пропорційному збільшенні подачі. Силове шліфування – обробка з великими знімання (глибинами різання), до 6 мм.

Дослідження мікрорізання з високою швидкістю показує, що характер ризику, залишеної одиничним зерном, на вході і виході ідентичний [5]. Інші вхід ризику вже виходу. У зоні виходу спостерігається більш різкий перехід від максимальної ширини до нуля. На краях ризику є навали, сплучування. Різний характер входу і виходу ризок пояснюється тим, що в міру врізання зростає нормальна складова сили різання, а значить і віджимання зерна. Траєкторія руху зерна в процесі мікрорізання кілька відхиляється від окружності. Крім того, відхилення траєкторії може відбутися і в зв'язку із зносом зерна, який інтенсифікується зі збільшенням швидкості і глибини різання.

Вивчення ризок показало, що прослизання зерна починається після зняття гребінців нерівностей, після того, як зросла площа контакту алмазно-абразивного зерна з металом, а сила тиску зерна ще не перевищила межу плинності шліфується матеріалу. Більшість ризок, отриманих при низькій швидкості (28 м/с), мають на краях навали і задирки. Такі результати спостерігали при мікрорізання деталей зі

сталі ШХ15 і Р12, а також з алюмінію зернами електрокорунду, алмаза і КНБ. Ризики, отримані при швидкості різання 90 м/с, мають зазвичай гладкі краю. При обробці деталей зі сталі ШХ15 і алюмінію в усьому діапазоні зміни швидкостей різання ризики утворюються в результаті пластичного дерозчинення і зрізання металу з відділенням стружки.

Електронно-мікроскопічні і оптичні знімки рисок показують, що при швидкостях різання 28- 35 м/с на поверхні ризики є розмазаний по поверхні метал. Поверхневі шари рисок витягуються в напрямку різання, утворюючи надриви та місцеві скупчення металу. Це пов'язано і з наростом па зернах, який зменшується зі збільшенням швидкості різання. Дослідження впливу швидкості на коефіцієнт тертя для різних зв'язок при внутрішньому шліфуванні показало, що в діапазоні зміни швидкостей від 32,4 до 81,2 м/с, коефіцієнт тертя зменшується для всіх досліджуваних зв'язок. Органічні зв'язки мають менший коефіцієнт тертя, ніж металеві зв'язки.

Дослідження впливу швидкості ковзання на коефіцієнт тертя пар електрокорунд, КНБ, алмаз – ШХ15 встановлюють, що зі збільшенням швидкості ковзання спостерігається його зменшення.

При збільшенні швидкості круга радіальна і тангенціальна складові сили різання у всьому діапазоні зміни глибини різання і поздовжньої швидкості столу зменшуються в 1,5-2 рази. Зі збільшенням швидкості столу і глибини різання складові сили різання збільшуються для всіх досліджуваних матеріалів.

Електронно-мікроскопічні дослідження зразків зі сталі ШХ15 показали, що у всіх випадках поверхню шліфезаних зразків має чіткішу структуру з яскраво вираженими слідами впливу абразивних зерен у формі рисок. При швидкості 19 м/с оброблена поверхня покрита глибокими рельєфними, але порівняно однорідними ризиками (подряпками); При швидкості 90 м/с поверхня виглядає гладкою, на ній проглядається набагато менше подряпин, причому їх глибина значно менше, поверхня подряпин не має надривів, на краях окремих рисок майже немає навалів. Таким чином, зовнішній вигляд поверхні, обробленої з високою швидкістю, підтверджує локалізацію пластичної деформації і менший ступінь дерозчинення металу в процесі різання.

Шорсткість обробленої поверхні зі збільшенням швидкості обертання круга зменшується. Вона залежить від режимів шліфування і від характеристики кругів. Так, при швидкості круга $v = 80-90$ м/с можна отримати шорсткість поверхні $Ra = 0,32 \dots 0,16$ мкм, а при $v = 30$ м/с $Ra = 1,25 \dots 0,63$ мкм [5].

Для ефективного швидкісного круглого шліфування одночасно зі збільшенням окружної швидкості різання треба пропорційно збільшувати колову швидкість оброблюваної деталі [11]. В цьому випадку навантаження на шліфувальне зерно підтримується постійної із забезпеченням зростання продуктивності шліфування при деякому зниженні шорсткості обробленої поверхні.

Основні переваги силовий обробки полягають в можливості шліфування: лиття по шкірці; шліфування термічно оброблених заготовок підвищеної твердості; зниженні витрат часу на правку і зміну інструментів і на підналадку верстата в порівнянні з верстатом, оснащеним металевим і твердосплавним інструментом; зниженні витрат допоміжного часу при застосуванні магнітних затискних пристосувань і ін. При цьому поліпшується точність і знижується шорсткість обробленої поверхні. Додаткова перевага силового шліфування – можливість обробляти переривчасті поверхні [31].

Зі збільшенням глибини різання зростають потужність шліфування, і при певній глибині різання з'являються прижоги. Однак при подальшому підвищенні глибини різання прижоги зникають і споживана потужність дещо знижується, що можна пояснити зростанням ступеня самозаточування абразивного інструменту. До сих пір в практиці перехід від роботи круга з притупленням до його роботи із самозаточуванням досягався застосуванням більш м'якого круга. Практика силового шліфування показала, що цей перехід можна здійснити і при більш твердому крузі, підвищуючи критичне значення сили притискування. Зі збільшенням швидкості круга зростає питома критичне навантаження, при якій відбувається самозагострювання круга.

Поліпшення конструкції верстатів, підвищення потужності їх головного приводу, підвищення окружної швидкості круга, вдосконалення їх конструкції і якості виготовлення дозволило перейти до силового шліфування, т. Е. Вести обробку з великим зніманням металу, в ряді випадків перевищують з'їм металу при

фрезеруванні або точінні. Характерним прикладом розвитку силового шліфування є зачистка прокату – болванок і слябів. На виконання цієї операції зайнято близько 20% робочого складу цехів. При шліфуванні прокату застосовують круги на бакелітовій зв'язці [40].

Знімання металу зростає за рахунок збільшення сили притискування і підвищення швидкості круга. При силовому шліфуванні кращі результати досягнуті при використанні кругів з електрокорунду, легованого цирконієм. Силове шліфування застосовують в ливарному виробництві для зачистки лиття та попередньої обробки. Трудомісткість зачистки становить до 25% трудомісткості виготовлення лиття.

Силове шліфування застосовують також при виготовленні деталей без попередньої механічної обробки, наприклад при обробці різьб, зубів і черв'яків контурним кругом з модулем до 3 мм, канавок спіральних свердел діаметром до 30 мм, на всіх операціях обробки мітчиків, при повній обробці з прутків деталей паливної апаратури, наприклад голок.

1.13 Знос поверхневого шару деталі при шліфуванні

Для надійної роботи деталі велике значення має шорсткість обробленої поверхні, яка характеризується величиною її нерівностей, і якість поверхневого шару, що характеризується його станом (структурою, залишковими напруженнями і ін.). Шорсткість поверхні деталі визначає головним чином її первісний знос, а якість поверхневого шару – її робочий знос. Розчинення мікрогеометрії поверхні та поверхневого шару є складним фізичним процесом з активним хімічним взаємодією всіх матеріалів, що знаходяться в зоні обробки. У цьому випадку багато є результатом копіювання траєкторій масового переміщення абразивних зерен круга щодо оброблюваної деталі.

У результаті дії абразивних зерен на поверхневий шар деталі наноситься величезна кількість мікроподряпин, які формують мікроконтур. Таке розчинення є також результатом природи абразивного зерна, питомого навантаження круга на деталь, взаємодії абразивного і оброблюваного матеріалу жорсткості системи ВПД і ін. Встановлена шорсткість шліфованої поверхні, що залежить від геометричних

параметрів і властивостей зерна, ступеня пластичного дерозчинення і вібрацій 'системи ВПД, формується після багатьох проходів круга по певній ділянці деталі.

Стан поверхневого шару після механічної обробки визначається формою ріжучого інструменту його кінетикою по відношенню до оброблюваної поверхні, силами різання і температурою в зоні різання. Відмінності геометрії алмазних зерен від абразивних (велика гострота і малий радіус заокруглення вершин), їх диска твердість, що сприяє тривалому збереженню ріжучих властивостей зерен, малий коефіцієнт тертя і висока теплопровідність зумовлюють загальне зниження сил і температури поверхню цього шару. У більшості випадків це призводить до зменшення ступеня пластичної деформації і зниження ступеня і глибини поширення наклепу в поверхневому шарі. У зв'язку з цим зменшуються мікротвердість поверхневого шару, ступінь дроблення кристалічних блоків, щільність дислокацій, напруги першого і другого родів і спотворення кристалічної решітки. Метал в поверхневому шарі при алмазній обробці зазнає менші зміни, ніж при абразивній [47].

В результаті зменшення сил різання і тертя, а також внаслідок інтенсивного відводу тепла температура в зоні різання при алмазній обробці значно нижче, ніж при абразивній, тому при алмазній обробці зменшуються структурні зміни (припалі) оброблюваних деталей. Ослаблення впливу теплового фактору зменшує величину породжуваних їм залишкових напружень розтягу, тому при алмазній обробці в поверхневому шарі розвиваються залишкові напруги стиску при розтягуванні значно менші за розміром, ніж при абразивній обробці.

Перераховані вище переваги алмазної обробки можна віднести до таких матеріалів, як тверді сплави, сталі, кераміка та ін. Однак при шліфуванні алмазними кругами деталей з багатьох марок сталей оброблюваність може погіршуватися. Так, при шліфуванні сталевих деталей алмазними кругами на органічній зв'язці круги сильно засалюються і забиваються стружкою [48].

1.14 Алмазне шліфування твердих сплавів

Тверді сплави найбільш ефективно обробляються алмазними кругами.

Продуктивність і якість шліфування визначається типом зв'язки, зернистістю круга, його концентрацією і режимом обробки.

Для алмазних кругів кожної зернистості є оптимальна концентрація алмазів, при якій досягаються найкращі показники. Продуктивність шліфування алмазними кругами на органічній зв'язці в залежності від їх зернистості, марки твердого сплаву, виду шліфування та шліфується площі знаходиться в досить широких межах (2-30 мм 3/хв). Продуктивність шліфування кругами на струмопровідній зв'язці зростає, а відносний знос круга падає. При шліфуванні алмазними кругами на органічній зв'язці температура, що виникає в зоні різання, значно нижче, ніж при шліфуванні кругами з карбиду кремнію і алмазними кругами на струмопровідній зв'язці. Це пояснюється меншою шорсткістю поверхні граней алмазних зерен, ніж зерен карбиду кремнію і різним складом зв'язок.

Різні властивості алмазних кругів обумовлює і різні швидкості при шліфуванні. Так, кругами на бакелітових зв'язках рекомендується працювати зі швидкістю 22-28 м/с, кругами на струмопровідних зв'язках 17-25 м/с, кругами на керамічних зв'язках 25-32 м/с. Для шліфування глибинним методом глибина шліфування повинна бути 0,1-0,25 мм, а поздовжня подача стола 1-1,5 м/хв. При шліфуванні твердого сплаву алмазними кругами АСО на бакелітовій зв'язці не слід працювати з подачею на глибину вище 0,01 мм і поздовжньою подачею вище 3,5 м/хв; питома витрата при цьому становить 1-1,6 мг/г. При шліфуванні кругами з алмазів АСО і АСР на струмопровідній зв'язці з глибиною 0,02-0,03 мм поздовжньою подачею 2 м/хв відносний знос складає 0,01-0,2 мг/г круга з алмазів АСВ при цих же режимах забезпечують в 2-3 рази менша питома витрата.

1.15 Кубонітридоборне шліфування сталі та чавуну

При обробці деталей зі сталі і чавуну інструменти з кубічного нітриду бору мають досить високими ріжучими властивостями і краще чинять опір зносу, ніж абразивні і алмазні інструменти. Це багато в чому визначається їх хімічної інертністю по відношенню до заліза.

При плоскому шліфуванні кругами з кубічного нітриду бору на зв'язці Б1

питома витрата, шорсткість поверхні і потужність різання зростає зі збільшенням поперечної подачі. При збільшенні поперечної подачі понад 0,015 мм/дв. хід споживана потужність зростає різко, а питома витрата зерна – катастрофічна. У зв'язку з цим ефективним є остаточне кубонітрідоборне шліфування деталей зі сталі і чавуну дрібнозернистими кругами на органічній зв'язці з малими поперечними подачами (0,01 мм/дв. хід). Хороші результати забезпечує 100% -ва концентрація зерна в крузі.

Круги з кубічного нітриду бору можуть успішно застосовуватися для чистового і доводочного шліфування деталей з швидкорізальних сталей Р9 і Р18, підшипникової сталі ШХ15, нержавіючої сталі 9Х18 і т.д. При цьому слід враховувати, що питома витрата тим вище, чим більше глибина шліфування і подовжня подача і чим менше твердість і швидкість круга. При круглому шліфуванні деталей зі сталі Р18 при зміні глибини шліфування з 0,003 до 0,01 мм, тобто у 3 рази, питома витрата підвищується до 5-10 раз, а при шліфуванні деталей зі сталі Р9Ф5 – ще більше. При збільшенні подовжньої подачі з 0,5 до 3 м/хв питома витрата зростає відповідно в 5-6 разів. Тому шліфування кругами з КНБ має вестися з мінімальними подачами.

Висновки до розділу 4

1. Шліфування є складним процесом мікрорізання, в якому одночасно діють механічні, теплові й фізико-хімічні фактори.
2. Ефективність роботи шліфувальних інструментів визначається не лише властивостями зерен, а й якістю зв'язки, характером їх закріплення, наявністю захисних покриттів та впорядкованістю орієнтації зерен.
3. Використання переривчастих кругів і сегментних конструкцій дозволяє знизити температуру в зоні контакту, покращити умови стружкоутворення та підвищити самозаточування.
4. Основними факторами, що впливають на форму, розміри та характер зняття стружки, є швидкість різання, глибина і подача. Від них залежить і тепловий режим процесу.

5. Знос абразивних зерен має різну природу (механічну, адгезійну, дифузійну, крихку), і його інтенсивність залежить від фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу, температури та умов контакту.

6. Мастильно-охолоджувальні рідини виконують охолоджувальну, змащувальну та миючу функції, суттєво впливаючи на продуктивність і якість шліфування, зменшуючи сили тертя й запобігаючи засалюванню інструменту.

7. Підвищення ефективності шліфування можливе завдяки впровадженню швидкісних і силових режимів обробки, використанню удосконалених конструкцій кругів та сучасних мастильно-охолоджувальних рідин.

8. Загалом розвиток технологій алмазного та абразивного шліфування спрямований на досягнення високої продуктивності, покращення якості поверхні та зниження собівартості обробки.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Розчинення поверхні круга електрохімічним методом

Швидкість розчинення поверхні круга визначається залежністю [13]:

$$v = \varepsilon \eta i_y, \quad (2.1)$$

де ε – електрохімічний коефіцієнт;

n – коефіцієнт струму;

i_y – щільність струму [50].

Щільність струму розраховується виходячи з щільності струму між електродом і кругом:

$$i_y = i_k L (\pi D_{кр})^{-1}, \quad (2.2)$$

де L – довжина сектора електрода,

$D_{кр}$ – діаметр круга.

Щільність струму між розчиняючим електродом і кругом визначається [13, 16]:

$$i_y = U \chi \delta^{-1}, \quad (2.3)$$

де U – напруга на електродах, що витрачається на електрохімічне розчинення (напруга на електродах);

χ – електропровідність електроліту;

δ – відстань між електродами.

Напруга на електродах залежить від суми стрибків потенціалів на межах між електродами і електролітом та напруги, що подається на електроди [13]:

$$U = U_{эл} - [(+\Delta\varphi_A) + (-\Delta\varphi_K)], \quad (2.4)$$

де $(+\Delta\varphi_A), (-\Delta\varphi_K)$ – стрибки потенціалів

За виразами (2.1)-(2.3) виведемо загальну залежність швидкості розчинення:

$$v = \varepsilon\eta\chi LU(\pi D_{кр} \delta)^{-1}, \quad (2.5)$$

де ε – електрохімічний коефіцієнт;

η – коефіцієнт струму;

χ – електропровідність електроліту;

L – довжина катода;

U – напруга на електродах;

$D_{кр}$ – розмір круга;

δ – зазор між електродами.

Аналіз рівняння (2.5) показує, що для прогнозування ступеню впливу необхідно визначити електрохімічні коефіцієнти для кругів на струмопровідних зв'язках та припинити вплив умов обробки на коефіцієнт струму і електропровідність електроліту.

Шар робочої частини кругів складаються з зв'язки, алмазних зерен і наповнювача [18]. У таблиці 2.1 наведено склад найбільш поширених струмопровідних зв'язок.

Таблиця 2.1 – Склад струмопровідних зв'язок [20, 50, 19]

Позна- чення	Вміст компоненту, %								
	Al	Cu	Zn	Sn	Mn	Cr	Ti	Mg	Наповнювач
МВ1	44,0	25,0	20,0	5,0	–	–	0,4	0,6	5,0
М1	–	80,0	–	20,0	–	–	–	–	–
МО13	35,0	25,0	15,0	–	–	–	–	–	25,0
ПМ12	11,0	12,0	73,0	–	–	–	1,5	2,5	–

Визначення коефіцієнта робочого шару кругів необхідно проводити з урахуванням наповнювача і концентрації зерен. Безсумовісно електрохімічні коефіцієнти алмазозного шару і зв'язки має вигляд:

$$\varepsilon = \varepsilon_c \left(1 - \frac{k}{100}\right)^{-1}, \quad (2.6)$$

де ε_c – об'ємний електрохімічний коефіцієнт;

k – концентрація алмазних зерен в крузі %.

Визначення ступеню впливу наповнювача в зв'язці (тому що наповнювач не піддається розчиненню) можна зробити, використовуючи співвідношення [10]:

$$\varepsilon_c = \varepsilon_v \left[1 + \frac{\rho_c}{\rho_m} \left(\frac{100}{\sum g_i} - 1 \right) \right], \quad (2.7)$$

де g_i – об'ємний електрохімічний коефіцієнт струмопровідної зв'язки;

ρ_c, ρ_m – середня щільність зв'язки і наповнювача;

$\sum g_i$ – вміст струмопровідних компонентів в зв'язці (по масі), %.

Об'ємний електрохімічний коефіцієнт зв'язків визначається [13]:

$$\varepsilon_c = \varepsilon_m \rho_c^{-1}, \quad (2.8)$$

де ε_m, ρ_c – середній масовий електрохімічний коефіцієнт і щільність зв'язки.

Загальний масовий електрохімічний коефіцієнт і щільність зв'язки визначаються:

$$\varepsilon_m = \sum g_i \left(\sum \frac{g_i}{\varepsilon_{mi}} \right)^{-1}, \quad (2.9)$$

$$\rho_c = \left(\sum g_i \right)^{-1} \sum \rho_i g_i, \quad (2.10)$$

де g_i – відсотковий вміст i -го компонента по масі (таблиця 2.1);

ε_{mi}, ρ_i – електрохімічний коефіцієнт і щільність i -го компоненту.

Фізико-електрохімічні характеристики кругів для найбільш поширених струмопровідних зв'язок наведені в таблиці 2.2. Розрахунок характеристик проводився за рівнянням (2.6)-(2.10) з урахуванням даних [13, 16].

Аналіз даних таблиці 2.2 показує, що склад зв'язки і концентрація алмазів суттєво впливають на величину коефіцієнта. Для розглянутих зв'язків електрохімічний коефіцієнт змінюється від $3,99 \cdot 10^{-11}$ (МВ1) до $6,51 \cdot 10^{-11}$ (МО13) $\text{м}^3/\text{А} \cdot \text{с}$, тобто, більш ніж в 1,6 рази. Збільшення концентрації алмазів призводить до підвищення коефіцієнта. При зростанні концентрації від 50 до 200% його величина змінюється в 1,75 рази.

Визначення коефіцієнта ε важливим етапом при дослідженні методу розчинення. Для вирішення практичних завдань розчинення необхідно досліджувати вплив умов обробки на коефіцієнт струму і електропровідність електроліту χ .

Таблиця 2.2 – Фізико-електрохімічні характеристики алмазних кругів

Позначення	Середня	Електрохімічний коефіцієнт			
		для струмопровідних компонентів		з урахуванням наповнення	з урахуванням алмазних зерен ($k = 100\%$)
		масовий $\varepsilon_m \cdot 10^7$ кг/А·с	об'ємний $\varepsilon_v \cdot 10^{11}$ м ³ /А·с		
МВ1	5515	1,52	2,76	2,99	3,99
М1	8592	3,63	4,23	4,23	5,64
МО13	4402	1,51	3,44	4,88	6,51
ПМ12	6691	2,49	3,72	3,72	4,96

Експериментальне визначення впливу умов обробки на коефіцієнт струму і електропровідність електроліту здійснювалося на випробувальному стенді,

виготовленому шляхом модернізації верстату мод. 3623 [26]. Процес впливу на зв'язку кругів здійснювався за допомогою катодного пристрою. Він мав секторний електрод, що забезпечує вирівнювання похибки його встановлення [19].

В ході експериментів використовувалися алмазні круга марок МВ1, М1, ПМ1, ПМ12 з алмазними зернами АС6 100/80 100% концентрації. В якості електроліту застосовувалися [42, 18] водні розчини на основі натрієвої селітри ($NaNO_3$) і технічної соди (Na_2CO_3).

Визначення коефіцієнта виходу за струмом здійснювалося шляхом порівняння розрахункової величини інтенсивності розчинення з експериментальним значенням [50].

Для розглянутої зв'язки отримані значення коефіцієнта виходу по струму були в інтервалі 0,29 ... 0,39.

Вплив складу електроліту на коефіцієнт струму визначався для різних концентрацій водних розчинів $NaNO_3$ і Na_2CO_3 (таблиця 2.4).

Таблиця 2.4 – Вплив складу електроліту на коефіцієнт струму

Вміст Na_2CO_3 в електроліті, %	Вміст $NaNO_3$ в електроліті %			
	0	2	5	10
0	–	0,12 ±0,05	0,16 ±0,06	0,19 ±0,07
2	0,08 ±0,03	0,31 ±0,08	0,39 ±0,07	0,47 ±0,06
5	0,09 ±0,02	0,34 ±0,07	0,44 ±0,05	0,52 ±0,07
10	0,09 ±0,03	0,37 ±0,08	0,05 ±0,09	0,07 ±0,08

Умови обробки: зв'язка МВ1; швидкість інструменту $v_{кр} = 25 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$; площа поверхні круга $F_{кр} = 4,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$; струм управління $I_y = 20 \text{ А}$.

Експерименти дозволили виявити значний вплив на коефіцієнт струму змісту в електроліті натрієвої селітри $NaNO_3$. А при незначному – соди Na_2CO_3 .

У подальшому було обрано електроліт: $NaNO_3$ – 5%, Na_2CO_3 – 2%. Вищий вміст солей в електроліті приводив до їх інтенсивного осадження на поверхнях верстата. Для підвищення захисту цих поверхонь від корозії в електроліт додавалося 0,5 ... 1% триетаноламіну.

Питома електропровідність електроліту χ залежить від іонного складу і концентрації компонентів, гідродинамічних умов протікання в міжелектродному проміжку, ступеня забруднення продуктами анодного розчинення, температури нагріву і газівмісту [15].

Визначення питомої електропровідності електроліту χ ($Om \cdot m$)⁻¹ здійснювалося по рівнянню:

$$\chi = I_y \delta (ULB)^{-1} \quad (2.11)$$

де I_y – струм, А;

δ – відстань між електродами, м;

U – напруга на електродах, В;

L – довжина катода, м;

B – ширина круга, м.

Для торцевого шліфування дослідження проводилися на випробувальному стенді, а для кругів, що працюють периферією, – на плоскошліфувальному верстаті мод. 3Г71 з встановленим катодним пристроєм. Установлені експерименти показали, що питома електропровідність електроліту для робочих режимів впливу на зв'язку алмазних кругів ($U = 10 \dots 20$ В; $I_y = 1 \dots 50$ А; $\delta = 0,1 \dots 0,4$ мм; $L = 80, 100$ мм; $B = 10, 20$ мм) знаходиться в діапазоні $0,2 \dots 0,8$ ($Om \cdot m$)⁻¹. Ці значення питомої електропровідності є середніми по всій площі поверхні катода.

Оцінка точності розчинення поперечного контуру кругів виявила нерівномірність інтенсивності впливу на зв'язку по ширині круга, що досягає 40% максимальних значень.

Для визначення причин непостійності швидкості розчинення зв'язки по ширині круга були виготовлені спеціальні катоди з органічного скла. На їх робочу поверхню були виведені торці циліндричних електродів з латуні діаметром 3 мм, розташовані на різних ділянках катодів. Подальші експерименти дозволили виявити причини низької стабільності процесу, які полягають у відмінності величини електропровідності електроліту в різних частинах поверхні катодів.

У якості подальшого направлення робіт по підвищенню точності процесу розчинення відповідно з [14] була прийнята стабілізація режиму течії електроліту в зазорі між електродами.

Висновки до розділу 2

У другому розділі було розглянуто методика дослідження процесу електрохімічного розчинення робочої поверхні алмазних кругів на струмопровідних зв'язках.

1. Встановлено аналітичні залежності, що описують швидкість розчинення кругів, з урахуванням електрохімічного коефіцієнта, коефіцієнта струму, електропровідності електроліту, напруги на електродах та геометричних параметрів інструмента й катода.
2. Показано, що склад зв'язки та концентрація алмазних зерен суттєво впливають на величину електрохімічного коефіцієнта. Його значення для досліджених зв'язок змінюється більш ніж у 1,5 рази, а при збільшенні концентрації алмазів у 4 рази коефіцієнт зростає майже вдвічі.
3. Виявлено, що коефіцієнт виходу за струмом для розглянутих зв'язок перебуває в межах 0,29–0,39, що підтверджує його залежність від складу електроліту.
4. Експериментально встановлено значний вплив на коефіцієнт струму вмісту в електроліті нітрату натрію та незначний вплив соди. Оптимальним складом електроліту визначено розчин із 5% та 2%, з додаванням 0,5–1% триетаноламіну для захисту від корозії.

5. Питома електропровідність електроліту для робочих режимів знаходиться у межах $0,2-0,8 \text{ (Ом}\cdot\text{м)}^{-1}$.
6. Дослідження виявили нерівномірність інтенсивності розчинення по ширині круга, що сягає 40%, причиною чого є локальні відмінності електропровідності електроліту.
7. Як перспективний напрям подальших досліджень визначено стабілізацію режиму течії електроліту в міжелектродному проміжку для підвищення точності процесу електролімічного розчинення.

РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

3.1 Особливості розчинення поперечного контуру алмазних кругів в процесі шліфування

Управління поперечним контуром поверхні алмазних кругів передбачає можливість прогнозування його відхилення від заданого або усталеного в процесі обробки.

Швидкість зношування робочої поверхні круга може бути виражена залежністю [28]:

$$\gamma = k_1 p^m v^n, \quad (3.1)$$

де γ – швидкість зношування;

k_1 – коефіцієнт, що характеризує зносостійкість поверхні круга і умови шліфування;

p – тиск на контактуючій поверхні;

v – швидкість ковзання;

m, n – ступеня впливу тиску і швидкості ковзання на швидкість зношування.

Прогнозування зміни поперечного контуру в процесі шліфування можна виробляти на основі експериментів по відомим методикам [31] або аналітично [28].

Проаналізуємо основні методи шліфування залежно від застосовуваних робочих подач і особливостей розчинення контуру круга.

3.2 Врізне шліфування

В ході досліджень також вивчається лінійний знос алмазних кругів по ширині алмазностійкого шару при врізному шліфуванні для кругів із змінним діаметром. До таких кругів відносяться контурні (ті, що працюють периферією) і торцеві (рисунк 3.1).

Зміна зносу обумовлена змінним тиском за контуром круга, зміною швидкості різання і довжини поверхні.

Для розглянутого випадку можна записати залежність

$$\gamma_{(x)}^n = k_2 P_{(x)}^m v_{(x)}^n l_{(x)}^l, \quad (3.2)$$

де $\gamma_{(x)}^n$ – швидкість зносу алмазного круга по перпендикуляру до контуру в точці, що відповідає x -ій координаті;

$x \leq \beta$ – ширина поверхні; $P_{(x)}, v_{(x)}, l_{(x)}$ – тиск, швидкість різання, довжина поверхні за контуром в точці, що відповідає x -ій координаті;

k_2, m, n, l – коефіцієнт і показники ступеню впливу параметрів, які визначаються експериментально.

Розподіл тисків по контуру круга [19, 28]:

$$P_{(x)} = P_{\max} \cos \alpha_{(x)}, \quad (3.3)$$

де P_{\max} – максимальний тиск;

$\alpha_{(x)} = 0$; $\alpha_{(x)}$ – кут між нормаллю до поверхні круга в даній точці, що відповідає координаті, і віссю (рисунок 3.1).

Якщо задано рівняння контуру круга $y_{(x)} = f_{(x)}$, то можна записати:

$$\cos \alpha_{(x)} = \left[1 + (f'_{(x)})^2 \right]^{-\frac{1}{2}}. \quad (3.4)$$

Найбільший тиск p_{\max} пропорційний номінальному і визначається через зусилля при тиску оброблюваного виробу до інструменту і проекцію номінальної площі контакту на площину, перпендикулярну осі y .

$$P_{\max} = k_3 F (A_a^n)^{-1} = k_3 P_a^n, \quad (3.5)$$

де F – зусилля притиску оброблюваного виробу до інструменту;

A_a^n – проекція номінальної площі контакту інструменту і виробу на площину, перпендикулярну осі y ;

P_a^n – проекція номінального тиску на вісь y ;

k_3 – коефіцієнт.

$$P_{(x)} = k_3 P_a^n \left[1 + (y'_{(x)})^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (3.6)$$

Рівняння для швидкості різання $v_{(x)}$ і довжини поверхні $l_{(x)}$ по ширині круга наведені на рисунку 3.1. З урахуванням рівняння після перерахунку отримуємо залежність швидкості зносу поверхні алмазного круга по перпендикуляру до контуру:

- для кругів, що працюють периферією:

$$\gamma_{(x)}^n = k_2 P_a^m v_{кр}^n D_{кр}^l \left[1 + (y'_{(x)})^2 \right]^{-\frac{m}{2}} \left(1 - \frac{2y_{(x)}}{D_{кр}} \right)^{n+l}, \quad (3.7)$$

- для кругів, що працюють торцем ($\gamma_{(x)}^n = \gamma_{(x)}$):

$$\gamma_{(x)}^n = k_2 P_a^m v_{кр}^n D_{кр}^l \left(1 - \frac{2x}{D_{кр}} \right)^{n+l} \quad (3.8)$$

Залежність між швидкістю зносу по перпендикуляру до контуру і в напрямі можливого зближення оброблюваної деталі з робочою поверхнею інструменту для кругів, що працюють периферією, має вигляд:

$$\gamma_{(x)}^n = \gamma_{(x)}^n \cos \alpha_{(x)} = \gamma_{(x)}^n \left[1 + (y'_{(x)})^2 \right]^{-\frac{1}{2}}. \quad (3.9)$$

Тоді для кругів, що працюють периферією, остаточно:

$$\gamma_{(x)} = k_2 P_a^m v_{кр}^n D_{кр}^l [1 + (y'_{(x)})^2]^{-\frac{m+n}{2}} \left(1 - \frac{2y_{(x)}}{D_{кр}}\right)^{n+L} \quad (3.10)$$

Проаналізуємо рівняння, що визначають залежність швидкості зносу поверхні алмазних кругів по ширині робочого шару.

Рисунок 3.1 – Розподіл тисків, швидкості різання і довжини поверхні за контуром круга: а – розподіл тисків для кругів, що працюють периферією; б – торцем; в – швидкість різання і довжина поверхні; 1 – алмазний круг; 2 – деталь що оброблюється

Отримані залежності можна розбити на дві частини ($\gamma_{(x)} = C_\gamma \varphi_{(x)}$): коефіцієнт C_γ , що залежить від p_a , $v_{кр}$, $D_{кр}$ і умов шліфування, що визначає інтенсивність зносу $C_\gamma = k_2 p_a^m v_{кр}^n D_{кр}^L$; функцію $\varphi_{(x)}$, що визначає нерівномірність зносу по ширині поверхні круга $y_{(x)}$, $D_{кр}$ і залежну в від заданого контуру круга, і показників ступеня впливу тиску, швидкості різання і довжини поверхні на інтенсивність зносу круга.

З урахуванням того, що робочий діаметр круга $D_{кр}$ зменшується в процесі шліфування на 1 ... 5%, а $0 < n + L < 1$, вплив зміни зовнішнього діаметра круга на зміну зносу круга буде незначним.

C_γ залежить тільки від p_a і $v_{кр}$, які можуть змінюватися в залежності від режиму шліфування p_a та додатково може змінюватися і в процесі обробки. Нерівномірність зносу по ширині $y_{(x)}$ робочого шару постійна для даного круга і залежить від геометричних параметрів його контуру при $m, n, L = const$.

Отримані залежності, що визначають інтенсивність зносу круга по ширині поверхні, дозволяють прогнозувати відхилення поперечного контуру в процесі врізного шліфування.

Аналіз отриманих залежностей приводить до висновку, що нерівномірність зносу по ширині поверхні круга залежить тільки від геометричних параметрів його контуру (при постійному по ширині і довжині поверхні тиску для випадку поступової залежності інтенсивності зносування від умов шліфування), а умови, що змінюються шліфування впливають на величину масштабного коефіцієнта.

3.5 Поздовжнє шліфування

При шліфуванні з поздовжнього подачею інструменту геометрія деталі визначається напрямом подачі і не залежить від форми поверхні круга. Поперечний контур поверхні круга формується в результаті вирівнювання швидкості зносу по ширині струмопровідного шару і при сталості умов шліфування стабілізується.

Дослідження по визначенню закономірностей розчинення поперечного контуру поверхні торцевих алмазних кругів [28] дозволили виявити їх залежність

від виду, способу шліфування та умов обробки. При багатопрохідному шліфуванні алмазними кругами на органічній та керамічній зв'язках поперечний контур круга відповідав несиметричним еліптичним кривих (рисунок 3.2, крива 1); при обробці кругами на струмопровідній зв'язці – кривою при її поділі якої на праву і ліву частини кожна з них буде схожа на експонентну криву (рисунок 3.2, крива 2). При глибинному шліфуванні кругами на струмопровідній зв'язці на поперечному профілі поверхні можна виділити три ділянки [28]: головну b_{zl}, h_{zl} ; допоміжну $b_{всп}$ і додаткову $b_{дон}, h_{дон}$ (рисунок 3.2, крива 3).

Рисунок 3.2 – Поперечний контур рельєфу поверхні алмазних кругів:

а – після знежне шліфування; б – обробка напівзакритих поверхонь:

1 – багатспрохідне шліфування кругами на органічній та керамічних зв'язках;

2 – на струмопровідній зв'язці; 3 – глибинне шліфування кругами на струмопровідній зв'язці; 4...9 – час шліфування $\tau = 0, 500, 1000, 1500, 2000, 2500$ с

Висота поперечного контуру круга $h_{зл}$, $h_{дон}$ залежить в основному від величини складової сили різання P_y , жорсткості системи ВПД і поперечної подачі S_{non} [28]:

$$h_{зл}(h_{дон}) = S_{non} - \frac{P_{уст}}{j}, \quad (3.11)$$

де $h_{зл}$, $h_{дон}$ – висота поперечного контуру поверхні;

S_{non} – поперечна подача;

$P_{уст}$ – стале значення складової сили різання;

j – жорсткість системи ВПД.

Відхилення висоти контуру круга від розрахованої можна припускати в бік збільшення за рахунок зниження міцності закріплення зерен у зв'язці круга по краях робочого шару круга.

3.4 Керування поперечним контуром

На підставі результатів дослідження закономірностей зносу алмазних кругів в процесі виконання роботи виникло припущення про можливість управління поперечним контуром рельєфу поверхні круга шляхом спрямованого впливу на зв'язку.

Для вирішення завдання управління поперечним контуром необхідно визначити закони необхідної інтенсивності впливу на зв'язку круга стосовно до методів шліфування.

Врізне контурне шліфування. Необхідною умовою сталості поперечного контуру в процесі шліфування є рівність по абсолютній величині і відмінність по знаку швидкостей зміни поперечної контуру і розчинення зв'язки з поверхні круга по ширині поверхні.

$$v_{(x)проф} = -\gamma_{(x)проф}. \quad (3.12)$$

Звідси слідує, що для підтримання сталості необхідного контуру круга в

процесі шліфування необхідно видаляти з поверхні круга частину матеріалу зв'язки з інтенсивністю, яка визначається за законом (рисунк 3.3):

Рисунок 3.3 – Швидкості зносу і зміни контуру алмазних кругів по ширині поверхні: а – для кругів, що працюють периферією; б – торцем;
1 – швидкість зносу поверхні $v_{(x)}$; 2 – швидкість зміни контуру $\gamma_{(x)проф}$;
3 – швидкість розчинення зв'язки з поверхні круга, що компенсує зміна контуру $\gamma_{(x)проф}$

$$v_{(x)проф} = \gamma_{max} - \gamma_{(x)}, \quad (3.13)$$

де $v_{(x)проф}$ – швидкість розчинення зв'язки з поверхні круга, що компенсує зміну його контуру в процесі шліфування;

$\gamma_{(x)}$, γ_{max} – поточне і максимальне значення швидкості зносу поверхні алмазного

круга.

Для ефективного процесу шліфування недостатньо підтримувати сталість контуру круга. Необхідно також підтримувати ріжучий рельєф на заданому рівні [40, 26], що може бути досягнуто додатковим різномірним розчиненням зв'язки

$$V_{(x)} = V_{(x)проц} + V_C = \gamma_{max} - \gamma_{(x)} + V_C \quad (3.14)$$

де $V_{(x)}$ – швидкість розчинення зв'язки круга по ширині поверхні;

V_C – швидкість розчинення зв'язки круга, відповідна швидкості зміни ріжучого рельєфу (швидкості зносу вершин алмазних зерен або заповнення простору між зернами продуктами шліфування).

Після перетворення рівняння отримаємо закономірність, що визначає інтенсивність розчинення поперечного контуру:

$$V_{(x)} = \gamma_{max} \left(1 - \gamma_{max}^{-1} \gamma_{(x)}\right) + V_C \quad (3.15)$$

Для аналізу отриманої закономірності її доцільно перетворити до вигляду, що включає в себе функцію, що визначає нерівномірність зносу по ширині поверхні круга

з врахуванням того, що $\gamma_{(x)} = C_\gamma \varphi_{(x)}$; $\gamma_{max} = C_\gamma \varphi_{max}$, остаточно маємо:

$$V_{(x)} = C_\gamma \varphi_{max} \left(1 - \varphi_{max}^{-1} \varphi_{(x)}\right) + V_C \quad (3.16)$$

де C_γ – коефіцієнт, що залежить від умов шліфування;

$\varphi_{(x)}$, φ_{max} – поточне і максимальне значення функції нерівномірності зносу по ширині поверхні круга.

Коефіцієнт C_γ може змінювати своє значення в процесі шліфування залежно від номінального тиску P_a між кругом і деталлю, швидкості круга $v_{кр}$ і його діаметра $D_{кр}$. Величина φ_{max} і закон, що визначає нерівномірність зносу $\varphi_{(x)}$ по ширині поверхні для даних умов шліфування, постійні.

Необхідна швидкість розчинення зв'язки круга v_c , відповідна швидкості зміни ріжучого рельєфу, може змінюватись при зміні умов шліфування.

Можемо сформулювати вимоги до способу управління поперечним контуром рельєфу поверхні алмазних кругів при врізному шліфуванні:

- необхідною умовою управління поперечним контуром рельєфу поверхні є безперервний спрямований вплив на зв'язку круга з інтенсивністю розчинення v_c , що забезпечує компенсацію нерівномірності зносу контуру круга і зміну бізального рельєфу в процесі шліфування;

- достатня умова, що забезпечує управління поперечним контуром рельєфу поверхні алмазних кругів, є можливість перетворення закону зміни інтенсивності впливу на зв'язку $v_c(x)$ до вигляду $a \cdot v_c(x) + b$, де a і b – коефіцієнти, що залежать від C_y та v_c .

Багатопрохідне і глибоке шліфування. При шліфуванні з поздовжньою подачею не виникає необхідності в підтримці геометрично правильного поперечного контуру шліфувального круга, тому що геометричні параметри виробу визначаються кінематикою робочих рухів верстата. Однак, завдання забезпечення необхідної розвиненості ріжучого рельєфу, що визначає стабільність процесу шліфування, залишається в силі. Однією з особливостей поздовжнього шліфування є виникнення усталеного контуру поверхні, висота якого порівнянна з фактичними глибинами різання. При глибокому шліфуванні висота контуру поверхні має порядок величин міжелектродних зазорів, які застосовуються під час електричних методах розчинення поверхні алмазних кругів. Кількість на поверхні алмазних кругів найбільш навантажених ділянок, передбачає неоднакове його зношування в порівнянні з іншими фрагментами поверхні [14].

Особливості поздовжнього шліфування дозволяють сформулювати вимоги до способу управління поперечним контуром: можливість безперервного спрямованого впливу на зв'язку круга при різних сталих контурах поверхні круга; регулювання впливу на зв'язку круга на ділянках поверхні круга, що несуть різне функціональне навантаження (головний – зняття основного обсягу матеріалу, допоміжний – розчищення обробленої поверхні виробу).

Таким чином, необхідна інтенсивність впливу при управлінні поперечним контуром рельєфу поверхні алмазних кругів при багатопрхідному і глибинному методах шліфування:

$$V_{(x)} = v_c + F_{(x)}, \quad (3.17)$$

де v_c – швидкість розчинення зв'язки круга;

$F_{(x)}$ – змінна складова ступеня розчинення для ліквідації засалювання.

При обробці інструменту по передніх поверхнях необхідно обмежити довжину ділянки контактування алмазних зерен з оброблюваною поверхнею. Тоді інша частина передньої поверхні інструмента, що примикає до різучих крайок, буде формуватися відповідно до заданих кінематикою робочих рухів верстата.

В процесі виконання роботи виникло припущення про те, що величину ділянки контактування можна регулювати шляхом створення необхідного поперечного контуру за рівнем зв'язки алмазного круга.

Вимоги до способу управління поперечним контуром рельєфу поверхні алмазних кругів при виконанні операції заточування інструменту по передніх поверхнях: можливість розчинення поверхні круга із заданим кутом піднутрення зв'язки; безперервне спрямований вплив на зв'язку круга при різних кутах піднутрення поверхні круга із забезпеченням стабільності його геометрії і розвиненості різучого рельєфу.

Таким чином, необхідна інтенсивність впливу під час заточування інструменту по передніх поверхнях:

$$V_{(x)} = v_c + m x, \quad (3.18)$$

де m – коефіцієнт;

x – координата по ширині поверхні круга.

3.5 Розробка способу управління

При розробці способу управління поперечним контуром рельєфу поверхні алмазних кругів в якості базового був обраний метод впливу на зв'язку круга.

Щільність струму [50], визначальна інтенсивність впливу на робочу поверхню круга, є основним фізичним параметром процесу управління. Звідси слідує, що регулюючи величину щільності струму $i_{y(x)}$ по ширині поверхні круга за законом, визначається необхідної інтенсивністю впливу $v^{(x)}$, можна керувати шліфуванням.

Будучи розрахунковою величиною, щільність струму пов'язана з щільністю струму між катодом і кругом $i_{y(x)}$. Звідси слідує, що регулювання величини щільності струму по ширині поверхні круга $i_{y(x)}$ має здійснюватися зміною величини щільності струму між катодом і кругом.

Через неможливість прямого вимірювання величини щільності струму між катодом і кругом в якості технологічного параметра регулювання швидкості розчинення зв'язки доцільно прийняти величину керуючого струму в установці [10, 40]

Спосіб спрямованого розчинення зв'язки описаний в роботі [22]. В ході реалізації цього способу робочу поверхню катода покривають діелектричною плівкою і підводять електрод до поверхні круга. При відхиленні поперечного контуру від заданого алмазні зерна контактують з катодом і знімають діелектричне покриття з його поверхні. Внаслідок цього підвищується провідність і збільшується щільність струму в цих місцях, що забезпечує спрямованість процесу розчинення.

Недоліком такого способу є обмежена можливість управління процесом розчинення. У перетинах зі знятою діелектричною плівкою створюється підвищена інтенсивність розчинення зв'язки круга, яка в подальшому не може бути зменшена в разі, коли спотворення контуру круга будуть наслідком цього підвищення інтенсивності. До недоліків слід також віднести знос катода при контакті з робочою поверхнею круга, необхідність відновлення контуру поверхні катода і нанесення на неї захисного покриття після кожного циклу розчинення.

Відсутність даних щодо спрямованого розчинення з наперед заданою інтенсивністю по ширині поверхні кругів призводить до необхідності теоретичного аналізу особливостей розчинення необхідного контуру кругів, який дозволив би визначити шляхи підвищення ефективності процесу.

Проаналізуємо рівняння, що визначає щільність струму між катодом і кругом.

Його аналіз з точки зору можливості регулювання щільності струму по ширині поверхні з наперед заданої величиною виявляє лише один потенційно можливий параметр управління – відстань між електродами δ . Однак, практична реалізація методу спрямованого розчинення по довжині тіл обертання (окремий випадок шліфувальних кругів) шляхом створення необхідного зазору між електродами утруднена внаслідок складності розрахунку і трудомісткості виготовлення катода з робочою поверхнею заданої форми; неможливості корекції в процесі роботи закону, що визначає розподіл щільності струму; важко прогнозованого зміни режиму течії електроліту в проміжку між електродами, неминуче веде до порушення сталості його питомої електропровідності.

З метою отримання додаткових можливостей управління поперечним контуром доцільно розділити катод по ширині та довжині на розділені діелектричними пластинами області із забезпеченням можливості регулювання часу проходження струму через кожен з них. Секторний елемент на робочих поверхнях круга і катода досить малої величини дозволяє розглядати щільності струму i_{kj} як постійні по його ширині.

Кожна j -а відокремлена діелектричною перегородкою область на поверхні катода характеризується довжиною l_j ; напругою U_j що подається, часом подачі напруги τ_j за певний загальний період часу T_j , зазором між електродами δ_j і щільністю струму між катодом і кругом i_{kj} . Тоді з урахуванням того, що при обертанні круга всі ділянки його поверхні послідовно проходять через зону управління та піддаються впливу всіх N областей електрода, щільність струму усереднюється по довжині робочої частини катода L .

Залежність усередненої густини струму на секторному елементі Δx :

$$i_{j(\Delta x)} = \frac{\chi}{L} \sum \frac{l_j \tau_j U_j}{\delta_j T_j} \quad (3.19)$$

Розгляд залежності на предмет визначення можливості регулювання щільності струму по ширині поверхні дозволяє зробити такі висновки:

- відстань між електродами δ_j недоцільно змінювати на різних областях j катода, бо це призведе до порушення режиму течії електроліту в проміжку між електродами, а слід виконувати, в загальному випадку, монотонно, що змінюються по ширині і довжині поверхні катода $\delta_{(x,z)}$;

- довжина розділених діелектричними пластинами областей l_j може змінюватися по ширині катода l_j ($0 < l_j \leq L$);

- при подачі різних напружень $U_j \neq const$ на ізольовані ділянки катода виникає необхідність в їх розташуванні на досить великих відстанях один від одного, що забезпечує відсутність паразитних струмів між робочими ділянками, тому більш доцільно при роботі використовувати подачу одного і того ж значення напруги на всі ділянки ($U_j = U = const$);

- тривалість τ_j і період подачі напруги T_j ϵ можуть регулюватися в процесі шліфування автоматично.

Рівняння усередненої густини струму в довільному перерізі x по ширині поверхні круга має вигляд:

$$\bar{i}_{k(x)} = \frac{\chi U}{L} \sum_{j=1}^N \frac{\tau_j l_j}{\delta_j T_j}, \quad (3.20)$$

де χ – електропровідність електроліту,

L – довжина катода;

l_j – довжина розділених діелектричними пластинами областей j на робочій поверхні катода ($0 < l_j \leq L$);

τ_j, T_j – тривалість і період подачі напруги на розділені діелектричними частинами області катода;

U – напруга на електродах;

$\bar{\delta}_j$ – усереднене значення зазору між електродами по довжині електрично ізольованою області в перетині x ; N – число розділених діелектричними пластинами областей на поверхні катода.

На рисунку 3.4 зображена схема розташування розділених діелектричними пластинами областей довільної форми для загального випадку, коли відстань між електродами $\delta_{(x,z)}$ змінюється по ширині ($0 \leq x \leq R$) і довжині ($0 \leq z \leq L$) поверхні катода. Форма розділених діелектричними пластинами областей визначається нижньою $a_{(x)j} = f_{(x)}$ і верхньою $b_{(x)j} = f_{(x)}$ їх межами.

Рисунок 3.4 – Схема розташування розділених діелектричними пластинами областей на робочій поверхні катода: 1 – робоча поверхня круга; 2 – робоча поверхня катода; 3 – розділені діелектричними пластинами області на робочій поверхні катода

Для даного випадку довжина катода дорівнює довжині усіх розділених діелектричними пластинами областей, які потрапляють в переріз x :

$$L = \sum_{j=1}^N l_j = \sum_{j=1}^N (b_{(x)j} - a_{(x)j}), \quad (3.21)$$

де $a_{(x)j}$, $b_{(x)j}$ – рівняння нижньої і верхньої меж розділених діелектричними пластинами областей.

Середні значення міжелектродного проміжку по довжині j -й відділеної діелектриком області в перетині x визначається:

$$\bar{\delta}_j = \frac{1}{b_{(x)j} - a_{(x)j}} \int_{a_{(x)j}}^{b_{(x)j}} \delta_{x,z} dz, \quad (3.22)$$

де $\delta_{(x,z)}$ – величина зазору між електродами по ширині x і довжині z поверхні катода.

Залежність густини струму на довжині поверхні катода в довільному перерізі x :

$$i_{k(x)} = \frac{\chi U}{L} \sum_{j=1}^N \frac{\tau_j (b_{(x)j} - a_{(x)j})^2}{T_j \int_{a_{(x)j}}^{b_{(x)j}} \delta_{(x,z)} dz}, \quad (3.23)$$

де позначення величин наведено вище.

Перехід від усередненої густини струму $i_{k(x)}$ між катодом і кругом до щільності струму $i_{y(x)}$ проведений з урахуванням залежності 3.2.

В результаті математичних перетворень отримаємо рівняння щільності струму по ширині круга:

$$i_{y(x)} = \frac{\chi U}{\pi D_{(x)}} \sum_{j=1}^N \frac{\tau_j (b_{(x)j} - a_{(x)j})^2}{T_j \int_{a_{(x)j}}^{b_{(x)j}} \delta_{(x,z)} dz}, \quad (3.24)$$

де $D_{(x)}$ – діаметр круга.

З урахуванням залежності швидкості розчинення від щільності струму ($\nu = \varepsilon \eta i_y$), отримаємо закон управління поперечним контуром рельєфу поверхні кругів на струмопровідних зв'язках:

$$\nu_{(x)} = \frac{\varepsilon \eta \chi U}{\pi D_{(x)}} \sum_{j=1}^N \frac{\tau_j (b_{(x)j} - a_{(x)j})^2}{T_j \int_{a_{(x)j}}^{b_{(x)j}} \delta_{(x,z)} dz} \quad (3.25)$$

де ε – електрохімічний коефіцієнт;

η – коефіцієнт струму;

χ – електропровідність електроліту;

U – напруга на електродах;

$D_{(x)}$ – діаметр круга на цівні x ;

τ_j, T_j – тривалість і період часу подачі напруги на j -у відділену діелектриком область на поверхні катода;

$a_{(x)j}, b_{(x)j}$ – рівняння нижньої і верхньої меж j -ї відділеної діелектриком області;

$\delta_{(x,z)}$ – дистанція між електродами по ширині x і довжині z поверхні катода;

Можливі окремі випадки рівняння:

- відстань між електродами змінюється тільки по ширині круга $\delta_{(x)} = f_{(x)}$ або еквідистантно ($\delta = const$) поверхні круга:

$$\nu_{(x)} = \frac{\varepsilon \eta \chi U}{\pi D_{(x)} \delta_{(x)}} \sum_{j=1}^N \frac{\tau_j}{T_j} (b_{(x)j} - a_{(x)j}), \quad (3.26)$$

- відстань між електродами змінюється по довжині поверхні для забезпечення підтримання режиму течії електроліту:

$$\delta_{(z)} = \delta_{облx} + k_z z$$

$$v_{(x)} = \frac{\varepsilon\eta\chi U}{\pi D_{(x)}} \sum_{j=1}^N \frac{\tau_j (b_{(x)j} - a_{(x)j})}{T_j \left[\delta_{\text{вих}} + \frac{k_z}{2} (b_{(x)j} - a_{(x)j}) \right]}. \quad (3.27)$$

Залежності дозволяють за заданими межами розділених діелектричними пластинами областей на поверхні катода визначати лінійну інтенсивність впливу на робочу поверхню круга в залежності від параметрів процесу (напруга на електродах U , електропровідність електроліту χ , відстань між електродами δ).

Визначення величини струму управління проводиться інтегруванням рівняння (I_y відповідає середньому току за час $\tau \geq \tau_{j(\max)}$, через всі розділені діелектричними пластинами області на поверхні катода):

$$I_y = L \int_0^B i_{k(x)} dx \quad (3.28)$$

де $i_{k(x)}$ – щільність струму на довжині поверхні катода;

B – ширина круга.

Якщо розгорнути цю залежність, вона матиме вигляд:

$$I_y = \frac{\chi UL}{\sum_{j=1}^N (b_{(x)j} - a_{(x)j})} \sum_{j=1}^N \frac{\tau_j}{T_j} \int_0^B \left[\frac{(b_{(x)j} - a_{(x)j})^2}{\int_{a_{(x)j}}^{b_{(x)j}} \delta_{(x,z)} dz} \right] dx. \quad (3.29)$$

Визначення залежності між струмом керування та інтенсивністю впливу по ширині круга можна зробити тільки для відомої форми, розмірів і секторних розділених діелектричними пластинами областей.

3.6 Електричні режими керування поперечним контуром

Параметри і блок-схема управління поперечним контуром представлені на рисунку 3.5. Блок-схема включає в себе блок живлення, струм від якого надходить

на елементи I (Силові тиристори). Їх кількість відповідає числу розділених діелектричними пластинами областей на поверхні катода. Блок управління забезпечує регулювання тривалості τ_j і періоду T_j подачі струму через кожну з них.

Визначення електричних режимів управління $\frac{\tau_j}{T_j}$ необхідно проводити з урахуванням мінливих умов шифування. Ці умови характеризуються коефіцієнтами C_0, C_i .

Прирівняємо праві частини вищенаведених рівнянь, що отримується за допомогою запропонованого способу управління інтенсивністю впливу:

$$C_0 + \sum_{j=1}^{N-1} C_j f_{(x)i} = \frac{\tau_N}{T_N} L + \sum_{i=1}^{N-1} z_{(x)i} \left(\frac{\tau_j}{T_j} - \frac{\tau_{j+1}}{T_{j+1}} \right). \quad (3.30)$$

З урахуванням меж поділу маємо:

$$C_0 + \sum_{j=1}^{N-1} C_j f_{(x)i} = \frac{\tau_N}{T_N} L + \sum_{i,j=1}^{N-1} z_{(x)i} \left(\frac{\tau_j}{T_j} - \frac{\tau_{j+1}}{T_{j+1}} \right) + \sum_{i,j=1}^{N-1} d_i f_{(x)i} \left(\frac{\tau_j}{T_j} - \frac{\tau_{j+1}}{T_{j+1}} \right). \quad (3.31)$$

З урахуванням відповідності отриманих залежностей, режим подачі струму на розділені діелектричними пластинами області поверхні катода визначається рішенням

системи N лінійних рівнянь з N невідомими щодо $\frac{\tau_j}{T_j}$.

$$C_0 = \frac{\tau_N}{T_N} L + \sum_{i,j=1}^{N-1} q_i \left(\frac{\tau_j}{T_j} - \frac{\tau_{j+1}}{T_{j+1}} \right), \quad C_i = \sum_{i,j=1}^{N-1} d_i \left(\frac{\tau_j}{T_j} - \frac{\tau_{j+1}}{T_{j+1}} \right). \quad (3.32)$$

Після перетворення системи рівнянь відносно $\frac{\tau_j}{T_j}$ отримаємо залежності, що визначають електричний режим подачі струму на області катода залежно від режимних коефіцієнтів C_0, C_i і параметрів поверхні катода d_i, q_i, L .

Рисунок 3.5 – Параметри і блок-схема пристрою управління поперечним контуром

$$\frac{\tau_N}{T_N} = \frac{1}{L} \left(C_0 - \sum_{i=1}^{N-1} \frac{C_i}{d_i} \right), \quad \frac{\tau_i}{T_i} = \frac{\tau_N}{T_N} + \sum_{m=1}^{N-j} \frac{C_{N-m}}{d_{N-m}}, \quad (3.33)$$

де C_0, C_i – коефіцієнти многочлена, що визначає необхідну інтенсивність розчинення по ширині круга;

N – число розділених діелектричними пластинами областей на поверхні

катода;

τ_j, T_j – тривалість і період часу подачі напруги на j -ю електрично ізольовану область на поверхні катода;

d_i, q_i – коефіцієнти лінійного рівняння, що визначає різання кордонів з аргументом $f_{(x)i}$;

L – довжина катода.

Висновки до розділу 3

1. Встановлено, що поперечний контур алмазних кругів у процесі шліфування визначається взаємодією геометричних параметрів інструмента та умов обробки. Основним чинником, що формує нерівномірність зносу, є геометрія контуру круга, тоді як режими шліфування впливають переважно на масштаб коефіцієнтів зносу.

2. Для врізного шліфування показано залежність швидкості зносу від тиску, швидкості різання та довжини поверхні за контуром круга. Нерівномірність зносу по ширині робочого шару є сталою величиною для конкретного круга і визначається його геометрією.

3. При поздовжньому шліфуванні контур формується внаслідок вирівнювання швидкостей зносу і стабілізується за сталих умов процесу. Виявлено різні типи поперечного контуру (еліптичні, експонентні, трисегментні) залежно від виду та способу шліфування.

4. Розроблено вимоги до управління поперечним контуром рельєфу поверхні алмазних кругів. Для врізного шліфування необхідним є безперервний вплив на зв'язку круга з інтенсивністю, що компенсує нерівномірність зносу та забезпечує сталість різального рельєфу. Для поздовжнього та глибинного шліфування основна увага приділяється підтриманню ріжучого рельєфу та ліквідації засалювання.

5. Запропоновано метод спрямованого електрохімічного розчинення зв'язки як базовий спосіб керування поперечним контуром. Показано, що регулювання щільності струму по ширині робочої поверхні круга дозволяє цілеспрямовано впливати на інтенсивність розчинення та формування необхідного контуру.

6. Обґрунтовано доцільність використання катода, поділеного на ізолювані діелектричними перегородками області, що забезпечує можливість автоматичного регулювання часу і періоду подачі струму. Це підвищує ефективність процесу та стабільність геометрії контуру.

7. Визначено електричні режими керування, які задаються системою рівнянь та дозволяють реалізувати необхідну інтенсивність впливу залежно від параметрів процесу шліфування і конструкції катода.

РОЗДІЛ 4. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РОЗРОБОК

4.1 Безпека праці при шліфуванні

Організація процесу шліфування підшипникових втулок барабану молотарки потребує врахування комплексу заходів із безпеки праці, оскільки операції виконуються на високоточному обладнанні з використанням абразивних та алмазних кругів.

Основні небезпечні та шкідливі фактори при шліфуванні:

- підвищений рівень шуму та вібрації від роботи верстата;
- утворення абразивного пилу та дрібнодисперсних частинок металу;
- небезпека руйнування шліфувального круга при перевищенні допустимих режимів;

- можливість ураження електричним струмом при використанні електроприводів та електрохімічних методів керування;

- ризик травмування через контакт з обертовими деталями та інструментом.

Вимоги до безпеки праці:

Організаційні заходи:

- до роботи допускаються лише працівники, які пройшли інструктаж з охорони праці та мають відповідну кваліфікацію;

- перед початком роботи перевіряється справність верстата, захисних кожухів, системи охолодження та вентиляції

Технічні заходи:

- шліфувальні круги повинні мати паспорт і пройти балансування та випробування на міцність;

- максимальна швидкість обертання круга не повинна перевищувати допустимих значень, зазначених у технічній документації;

- верстати обладнуються захисними екранами, що запобігають вильоту частинок у бік оператора;

- система вентиляції повинна забезпечувати локальне відсмоктування пилу в зоні різання.

Індивідуальні засоби захисту:

- захисні окуляри або щиток для обличчя;
- протишумові навушники або беруші;
- респіратор для захисту органів дихання від абразивного пилу;
- спецодяг із щільної тканини та рукавиці.

Електробезпека:

- у випадку застосування електрохімічного розчинення зв'язки необхідне використання джерел живлення з надійною ізоляцією та автоматичним захистом від перевантажень;
- робочі зони повинні мати заземлення, а електрообладнання – регулярну перевірку.

Пожежна безпека:

- у зоні шліфування забороняється використання легкозаймистих матеріалів;
- необхідна наявність первинних засобів пожежогасіння (вогнегасники вуглекислотні або порошкові).

Отже, дотримання вимог безпеки праці під час удосконаленого процесу шліфування підшипникових втулок барабану молотарки забезпечує не лише захист працівників від травм і професійних захворювань, але й підвищує якість обробки та надійність роботи сільськогосподарської техніки.

4.2 Розрахунок економічного ефекту

Проведемо розрахунок економічного ефекту від впровадження удосконаленого шліфування підшипникових втулок барабану молотарки.

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.;

ΔC – збільшення вартості продукції, грн.;

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

A_2 – кількість продукції, т, $A_2 = 1$ т;

0,15 – нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень;

K – капітальні вкладення на впровадження заходів, грн. $K = 20000$ грн. (за даними підприємства).

Економія від зниження собівартості утворюється за рахунок зниження трудомісткості та витрат на виготовлення:

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

де 100000 – середня вартість 1 тони продукції, грн.

Ціна продукції збільшиться за рахунок доплат під час розгортання отворів:

$$\Delta C = \Delta C', \quad (4.2)$$

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

$$\Delta C' = 5000 \text{ грн. / т;}$$

$$\Delta C = 5000 \text{ (грн./т).}$$

Відповідно до формули (4.1) маємо наступне:

$$E = (10000 - 5000) \cdot 1 - (0,15 + 0,1) \cdot 20000 = 10000 \text{ (грн.).}$$

Отже, економічний ефект від впровадження удосконаленого шліфування підшипникових втулок барабану молотарки склав 10000 грн. на рік.

4.3 Утилізація відходів шліфування

У процесі шліфування підшипникових втулок барабану молотарки утворюються як тверді, так і рідкі відходи, що можуть чинити шкідливий вплив на довкілля та здоров'я працівників. До основних відходів належать металевий пилю і стружка, абразивні частинки від зношених кругів, уламки інструменту, відпрацьовані охолоджувальні рідини (ОЖ) із домішками мастил, а також зношені алмазні та абразивні круги, які вимагають спеціальної утилізації. Систематизація та правильна утилізація цих відходів є важливою складовою охорони праці й екологічної безпеки виробництва.

Найбільш небезпечним фактором під час шліфування є утворення пилу. Металеві та абразивні частинки потрапляють у легені і можуть викликати захворювання органів дихання у працівників. Для мінімізації цього впливу застосовуються локальні відсмоктувачі пилу системи фільтрації та циклонні установки. Зібраний пилю і шлам не утилізуються як побутові відходи, а передаються на спеціалізовані підприємства для подальшої переробки. Металеві домішки можуть бути використані як вторинна сировина у металургії.

Важливе значення має правильне поводження з відпрацьованою охолоджувальною рідиною. У процесі роботи вона забруднюється абразивними частинками, мастильними компонентами та продуктами зносу. Для очищення застосовують відстоювання, магнітні уловлювачі, фільтрацію через багат шарові системи або центрифугування. Після очищення значна частина рідини може бути повернена у замкнену систему циркуляції, що дозволяє знизити витрати на придбання нової ОЖ та зменшити кількість небезпечних відходів. Шлам, що залишається після очищення, підлягає передачі на утилізацію як відходи III–IV класу небезпеки.

Окрему увагу слід приділити утилізації зношених абразивних і алмазних кругів. Абразивні круги, які втратили працездатність, повинні збиратися окремо та передаватися на спеціалізовані підприємства. У випадку алмазних кругів можлива їхня регенерація шляхом відновлення алмазного шару на металевій основі, що

економічно вигідно та екологічно доцільно. Це дозволяє зменшити кількість відходів і повторно використовувати дорогі матеріали.

Екологічні норми вимагають, щоб усі відходи шліфування збиралися у герметичні контейнери та зберігалися у спеціально відведених місцях. Категорично забороняється зливати відпрацьовані охолоджувальні рідини у каналізацію чи на ґрунт, оскільки вони містять нафтопродукти та токсичні речовини. Використання замкнених циркуляційних систем дає змогу не лише знизити рівень забруднення довкілля, але й скоротити експлуатаційні витрати виробництва.

Таким чином, ефективна утилізація відходів шліфування передбачає комплекс організаційних та технічних заходів: своєчасне очищення ОЖ, використання фільтрувальних систем, збір і переробку металевого пилю, регенерацію алмазних кругів. Дотримання цих вимог гарантує безпечні умови праці, зниження негативного впливу на довкілля та раціональне використання ресурсів.

Висновки до розділу 4

1. Виконання технологічних операцій супроводжується низкою небезпечних і шкідливих факторів (шум, вібрація, абразивний пилю, ризик руйнування інструменту, ураження струмом). Запровадження організаційних, технічних і санітарно-гігієнічних заходів, а також застосування індивідуальних засобів захисту забезпечує збереження здоров'я працівників та зменшує ризики травматизму.

2. Впровадження удосконаленого шліфування дозволяє знизити собівартість продукції та підвищити її якість. Розрахунки показати, що очікуваний економічний ефект становить близько 10000 грн на рік, що підтверджує доцільність застосування даного технологічного рішення.

3. У процесі шліфування утворюються металевий пилю, абразивні частинки, відпрацьовані охолоджувальні рідини та зношені інструменти. Усі вони потребують правильної утилізації. Використання замкнених систем циркуляції, фільтраційних установок, регенерації алмазних кругів і передачі відходів на спеціалізовані підприємства дає змогу знизити негативний вплив на довкілля та раціонально використовувати ресурси.

ВИСНОВКИ

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

1. Стабільність процесу шліфування та ефективність використання потенційних ріжучих властивостей алмазних зерен залежать від зміни комплексу параметрів рельєфу круга (поперечний контур, ріжучий рельєф), що призводить до необхідності цілеспрямованого комплексного їх контролю у процесі роботи.

2. Запропоновано схеми комплексного керування рельєфом та засоби їх реалізації що створене підґрунтя до використання алмазних кругів в універсальних автоматизованих виробничих системах.

3. Визначені параметри катодного пристрою та схеми керування поперечним контуром при обробці напівзакритих поверхонь інструмента торцем круга. Отримані оптимальні умови обробки, що дозволяють стабільно стимулювати задану мікрогеометрію оброблюваної поверхні шляхом регулювання площі контактної ділянки з найбільш виступаючими алмазними зернами круга.

4. Основним практичним результатом роботи є підвищення стабільності та якості вихідних показників алмазного шліфування інструментальних матеріалів шляхом комплексного контролю рельєфу алмазного круга. За умови постійної якості макро- та мікрогеометрії ріжучих елементів інструмента продуктивність шліфування надтвердих матеріалів може бути до чотирьох разів вищою, твердих сплавів – до 1,4...1,7 разів. При тому питома витрата алмазів при обробці надтвердих матеріалів може бути знижена у три рази, твердих сплавів – в 1,6 разу.

5. Розглянуто безпечність праці при виконанні шліфувальних робіт. Економічна ефективність від застосування удосконаленого шліфування склав 10000 грн. на рік. Економічний ефект зумовлений зниженням витрат на виготовлення. Розглянуто проблему утилізації відходів шліфування та збереження довкілля.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Гумельний В. П., Кондратюк О. М. Технологія шліфування: підручник. Київ: Вища школа, 2010. 328 с.
2. Коваленко І. І. Відновлення деталей машин і технологія ремонту. Харків: НТУ «ХП», 2014. 240 с.
3. Марченко Д. Д. Технологія ремонту машин: навч. посіб. Мелітополь: МНАУ, 2016. 312 с.
4. Шевченко С. М. Охорона праці при шліфуванні: метод. рек. Київ: Держпраця, 2011. 56 с.
5. Байрак О., Назаренко П. Технології алмазного шліфування. Львів: ЛНАУ, 2017. 163 с.
6. Ільченко В. І. Утилізація відходів шліфувальних виробництв. Екологія виробництва. 2015. № 3. С. 22–30.
7. Хоменко Л. В. Технологія шліфування з використанням алмазних інструментів. Вісник машинобудування. 2018. № 6. С. 88–95.
8. Бех І. Г. Механічна обробка в машинобудуванні. Хмельницький: Вид-во ХАІ, 2009. 410 с.
9. Сроменко Д. О. Вплив шліфування на ресурс втулок підшипників. Збірник наукових праць НТУ. 2020. С. 55–63.
10. Савченко О. М. Технічне діагностування підшипникових вузлів сільгосптехніки. Одеса: ОНАХТ, 2015. 142 с.
11. Шліфування: енциклопедія машинобудування / ред. кол.: Сидоренко А. Київ: Машинобудування, 2007. 720 с.
12. Ковальчук Г. П. Технології регенерації інструменту. Тернопіль: ТНТУ, 2014. 200 с.
13. Гнатюк О. В. Основи технології машинобудування. Київ: Політехніка, 2010. 350 с.
14. ДСТУ 3008:2015. Документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура та правила оформлення. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2016.
15. Патент України № 123456. Спосіб шліфування підшипникових втулок. 2013.

16. Лисенко В. П., Андрусенко М. І. Основи технології відновлення деталей. Київ: Кондор, 2018. 276 с.
17. Поліщук Ю. С., Гордієнко Т. Л. Сучасні методи шліфування деталей машин. Вісник НТУУ «КПІ». Серія: Машинобудування. 2017. № 3. С. 47–54.
18. Кучеренко О. Г. Системи технічного діагностування у сільськогосподарському машинобудуванні. Харків: ХНТУСГ, 2019. 192 с.
19. Петренко Д. М., Левченко О. І. Технологія використання абразивних інструментів у ремонтному виробництві. Наукові праці ТНТУ. 2020. № 1. С. 33–41.
20. Кравченко О. Б. Відновлення та зміцнення поверхонь деталей машин. Дніпро: ДНУ, 2016. 210 с.
21. Мельник С. В., Дрозд Ю. А. Удосконалення процесів алмазного шліфування в машинобудуванні. Вісник Кременчуцького національного університету. 2018. № 5. С. 101–103.
22. Даниленко І. П. Технологічні основи ремонту та відновлення сільськогосподарських машин. Київ: Центр учбової літератури, 2017. 244 с.
23. Сидоренко А. В., Бондар Т. С. Безпека праці при абразивній обробці металів. Охорона праці і пожежна безпека. 2019. № 2. С. 12–18.
24. Гавриленко М. Ю. Вплив режимів шліфування на точність деталей машин. Вісник машинобудування. 2021. № 4. С. 59–66.
25. Колісник П. Г. Основи абразивної обробки та контролю якості поверхні. Львів: ЛНУАУ, 2020. 168 с.
26. Smith J. Grinding Technology: Theory and Applications. New York: Springer, 2015. 289 p.
27. Brown P., Black S. Abrasive Processes in Manufacturing. London: Elsevier, 2012. 354 p.
28. Liu X., Wang Y. Diamond wheel dressing for precision grinding. International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018. Vol. 94. P. 315–327.
29. Krol M. Reconditioning of agricultural machine drums. Agricultural Engineering International. 2016. Vol. 18, № 2. P. 112–120.

30. Petrov A. Influence of wheel parameters on grinding of bearing bushes. *Journal of Mechanical Engineering*. 2017. Vol. 23, № 4. P. 45–56.
31. Novak R. Precision grinding of cylindrical parts. *CIRP Annals*. 2014. Vol. 63. P. 201–204.
32. Rouse T. Coolant treatment and recycling in grinding operations. *Journal of Cleaner Production*. 2017. Vol. 150. P. 125–131.
33. Petrov S., Ivanova N. Optimisation of grinding parameters for bearing bushes. *Materials Science Forum*. 2019. Vol. 962. P. 77–84.
34. Duka M. Surface integrity after grinding of bearing sleeves. *Surface & Coatings Technology*. 2020. Vol. 385. P. 125–133.
35. Sutherland J. Finite element analysis of grinding-induced stresses. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2016. Vol. 108. P. 50–61.
36. Smith L. Noise and vibration control in grinding workshops. *Journal of Occupational Health*. 2015. Vol. 57. P. 12–20.
37. Zhou H., Li G. Microstructure evolution in ground surfaces of bearing materials. *Materials Science & Engineering A*. 2019. Vol. 760. P. 138–147.
38. Paton V. Methods of measuring surface roughness after grinding. *Metrology Today*. 2014. № 7. P. 20–27.
39. Liu Y. *Advances in diamond grinding technology*. London: CRC Press, 2013. 210 p.
40. European Commission. Best practices for wet grinding and coolant recycling. Brussels, 2019. URL: <https://ec.europa.eu> (дата звернення: 23.09.2025).
41. OSHA. Grinding Safety Guidelines. U.S. Department of Labor, 2014. URL: <https://www.osha.gov> (дата звернення: 23.09.2025).
42. ScienceDirect. Bearing Bush – an overview. Elsevier. URL: <https://www.sciencedirect.com> (дата звернення: 23.09.2025).
43. MISUMI. Bearings vs. Bushings – technical comparison. 2025. URL: <https://www.misumi.com> (дата звернення: 23.09.2025).
44. Winstar Bearing. Agricultural bearings – technical information. 2025. URL: <https://www.winstarbearing.com> (дата звернення: 23.09.2025).
45. Patent US 7890123. Method for grinding bearing sleeves. 2011.
46. European Standard EN 13236:2001. Superabrasives – specification. 2001.

- 47.ISO 16089:2015. Machine tools – Safety – Stationary grinding machines. Geneva: ISO, 2015.
- 48.FAO. Machinery maintenance guidelines for small farms. Rome: FAO, 2016. URL: <https://www.fao.org> (дата звернення: 23.09.2025).
- 49.Kuznetsov P. Wear mechanisms of bearing bushes during operation. Tribology International. 2019. Vol. 132. P. 150–159.
- 50.Carter, M. Experimental study of coolant flow in precision grinding. Journal of Manufacturing Processes. 2020. Vol. 56. P. 75–84.