

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”**

Степанов Михайло Сергійович

УДК 621.923

**НАУКОВІ ОСНОВИ ВИКОРИСТАННЯ ЗМАЩУВАЛЬНО-ОХОЛОДЖУВАЛЬНИХ
РІДИН ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ
ШЛІФУВАННЯ**

Спеціальність: 05.02.08-Технологія машинобудування

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків – 2005

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрах гідропневмоавтоматики і гідропривода та технології машинобудування та металорізальних верстатів Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут” Міністерства освіти і науки України, м. Харків.

Науковий консультант:	- доктор технічних наук, професор Тимофієв Юрій Вікторович, Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, завідувач кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів.
Офіційні опоненти:	- доктор технічних наук, професор Арпентьев Борис Михайлович, Українська інженерно-педагогічна академія (м. Харків), завідувач кафедри технології та управління якістю у машинобудуванні; - доктор технічних наук, професор Кальченко Віталій Іванович, Чернігівський державний технологічний університет, завідувач кафедри металорізальних верстатів та систем; - доктор технічних наук, професор Коробочка Олександр Миколайович, Дніпродзержинський державний технічний університет, завідувач кафедри автомобільного господарства.
Провідна установа:	Національний технічний університет України „Київський політехнічний інститут” Міністерства освіти і науки України.

Захист відбудеться “ 24 ” листопада 2005 р о “ 14 ” годині на засіданні спеціалізованої ради Д 64.050.12 у Національному технічному університеті “Харківський політехнічний інститут” за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе ,21.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”.

Автореферат розісланий 06.10.2005 року

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Пермяков О.А.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Найважливішим завданням, яке стоїть перед машинобудівним комплексом, є підвищення конкурентоспроможності продукції за умови високої продуктивності і низької собівартості її виготовлення із забезпеченням заданих параметрів якості. Виконання завдань, направлених на розвиток ресурсозберігаючих і екологічно чистих технологій, передбачає значне підвищення якості продукції при значній економії ресурсів на її виробництво з поліпшенням екологічних чинників.

Завершальною технологічною операцією, що визначає якість оброблених заготовок, є шліфування. Реальному зростанню його ефективності сприяє раціональне застосування змашувально-охолоджувальних рідин (ЗОР). При шліфуванні з великими швидкостями, глибинами різання і подачами (для збільшення продуктивності) можливе надмірне підвищення температури і, як наслідок, поява термодфектів, мікротріщин, небезпечних розтягуючих напруг в поверхневому шарі. Це зумовлює необхідність розроблення і застосування засобів зниження теплонапруженості процесу, серед яких найбільш істотним і традиційним є використання ЗОР.

Проблема полягає в тому, що на цей час відсутня загальна методологія використання систем застосування ЗОР при шліфуванні, недостатньо розроблені наукові основи створення таких систем, підвищення їх працездатності і енергозбереження. Відомі рішення зі створення систем застосування ЗОР, що працюють у комплексі з шліфувальними верстатами, не завжди враховують конкретні умови їх використання. Актуальність проблеми зумовлена недостатньо високою продуктивністю шліфування, значними витратами на інструмент і ЗОР і, як наслідок, високою собівартістю обробки. З урахуванням різноманітності моделей та типорозмірів шліфувальних верстатів і оброблених на них матеріалів питання розробки систем застосування ЗОР для управління технологічним процесом на базі шліфування постало з великою гостротою. Тому розробка наукових основ забезпечення високого рівня вихідних технологічних параметрів процесу шліфування за рахунок раціонального застосування ЗОР є важливим технологічним завданням і має велике народногосподарське значення.

Зв'язок роботи з науковими планами і програмами. Тема дисертації входить до наукових напрямків кафедр “Гідропневмоавтоматика і гідропривод” та “Технологія машинобудування та металорізальні верстати” НТУ “ХПІ”, пов’язаних з розробкою гідрофіційного технологічного обладнання, а також з підвищенням ефективності виготовлення та експлуатації автоматизованого технологічного устаткування, і відповідає комплексним цільовим науково-технічним програмам України КЦНТП-14 і КЦНТП - 22. В основу дисертаційної роботи покладені дослідження, виконані здобувачем як відповідальним виконавцем НДР з ВАТ “ХАРВерст”, ДКБШВ і ДП ХМЗ “ФЕД” (м.Харків). Дослідження виконувалися в рамках господарських договорів і договорів про творчу співпрацю відповідно до тематичних планів вище названих організацій.

Мета роботи - підвищення ефективності технологічних систем шліфування за рахунок направленої вибіркової активації ефектів дії ЗОР при мінімізації їх витрати і витрат енергії.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні **задачі**:

- провести аналіз стану проблеми функціонування систем обробки шліфуванням із застосуванням ЗОР і технологічного обладнання для їх використання;
- розробити методологію комплексних теоретико-експериментальних досліджень процесу шліфування із застосуванням ЗОР, що дозволяє виявити ефект їх дії і шляхи управління ними;
- розкрити особливості явищ і процесів, що виникають при проходженні ЗОР в контактній зоні, виявити основні закономірності шліфування в присутності ЗОР і визначити диференціюючу роль ефектів їх дії у формуванні точності та якості заготовок, які обробляються;
- розробити фізичні і математичні моделі найважливіших складових дії ЗОР на процес шліфування (проникаюча здатність і охолоджувальна дія ЗОР, нагрів заготовки з урахуванням різної інтенсивності охолодження в зоні контакту і поза нею);
- виявити потенційні можливості раціонального введення ЗОР в зону різання, ефективного використання ЗОР, окреслити перспективні шляхи його вдосконалення і на цій основі запропонувати нові технологічні процеси шліфування заготовок деталей машин;

- розробити принципово нову техніку подачі, очищення ЗОР і гідроочищення шліфувального круга, що забезпечують задану якість шліфованих деталей, і підтвердити практично високу технологічну ефективність цієї створеної техніки;
- розробити науково обґрунтовані норми використання ЗОР і промислові рекомендації, реалізація яких забезпечить істотну мінімізацію їх витрати і енергоємності процесу.

Об'єкт дослідження – технологічна система шліфування із застосуванням ЗОР.

Предмет дослідження – інтенсифікація ефектів дії ЗОР при шліфуванні і їх взаємозв'язок з технологічними та енергетичними параметрами.

Методи дослідження. В основу роботи був покладений єдиний підхід до проведення теоретичних і експериментальних досліджень, який базується на фундаментальних положеннях теорій технології машинобудування, теплофізики, теплообміну, механіки рідини, системного аналізу, механіки контактного руйнування, теорії різання матеріалів, теорії тертя і зносу, а також теорії імовірності і математичної статистики. Експериментальні дослідження проводилися на реальному технологічному устаткуванні в умовах машинобудівного виробництва, а також на спеціально розроблених установках і модернізованих верстатах. Математична обробка результатів досліджень виконувалася з використанням прикладного програмного забезпечення (пакету MathCAD). Достовірність теоретичних положень роботи підтверджується результатами експериментальних досліджень і практикою промислового впровадження.

Наукова новизна отриманих результатів. Створено наукові основи підвищення ефективності систем застосування ЗОР у технологічних процесах обробки шліфуванням шляхом диференційованого керування ступенем реалізації їхньої охолоджувальної, миючої та деформуючої дії, а також мінімізації витрати ЗОР і енергоємності процесу. На базі висунутих наукових положень вперше:

- створено і реалізовано методологію оптимального синтезу й направленої вибору систем застосування ЗОР при шліфуванні, з урахуванням специфічних особливостей обробки в різних умовах, що ґрунтується на комплексному аналізі факторів впливу складових їхньої дії на вихідні технологічні параметри обробки й вирішує проблему керування ними для підвищення ефективності технологічної системи;

- визначено принцип стабілізації теплового режиму шліфування, згідно з яким гідравлічні параметри системи повинні точно відповідати інтенсивності знімання матеріалу, удосконалено математичну модель температурного поля в оброблюваній заготовці, що дозволяє враховувати розходження інтенсивності тепловідведення в зоні контакту й за нею, сформульовано тезу про превалюючий вплив на зниження температури шліфування фізико-хімічної дії ЗОР над її охолоджувальною дією;

- за допомогою оригінальних методів визначення пропускної здатності абразивних кругів, на основі застосування теорії контактних схем і електрогідравлічної аналогії, отримано кількісну оцінку факторів проникнення й поведінки ЗОР у зоні контактної взаємодії круга й заготовки;

- доказано, що параметри подачі ЗОР визначають параметри продуктивності шліфування і якості одержуваної поверхні, розширено класифікацію джерел формування гідродинамічної силової дії ЗОР і оцінено ступень їхнього впливу на процес обробки;

- розроблено принципи спільного використання особливостей елементів конструкцій оброблюваної заготовки й верстата для підвищення проникаючої здатності ЗОР у зоні різання й керування параметрами точності обробки за рахунок деформуючої дії ЗОР на елементи технологічної системи;

- запропоновано нові енергетичні критерії оцінки проникаючої здатності ЗОР на основі зниження енергоємності процесу обробки деталей різних класів шляхом раціональної мінімізації витрати й тиску подачі ЗОР;

- отримано закономірності протікання процесу гідроочищення робочої поверхні шліфувального круга зосередженими струменями високого й надвисокого тисків, які віддзеркалюють зв'язок між гідравлічними параметрами струменю та технологічними параметрами обробки.

Практичне значення отриманих результатів. Розроблено комплекс засобів очищення ЗОР, який дозволяє при економії енергії в 1,2-1,4 рази підвищити ступінь очищення на 10-15% (а.с. 1803194, пат. України №49687).

Запропоновано ряд пристроїв подачі ЗОР при шліфуванні заготовок деталей різних класів, які дозволяють на 11-15% збільшити продуктивність обробки і на 17-21% підвищити точність обробки (пат. України 43691, 46497).

Запропоновано до використання комплекс засобів для гідравлічного очищення шліфувального круга струменем ЗОР високого тиску, який дозволяє більше ніж у два рази збільшити стійкість круга за критерієм шліфувального припикання (Заявка на винахід (корисну модель) 2004032045).

Розроблено технологічні регламенти і норми: - чистоти ЗОР за критеріями якості поверхневого шару шліфованих деталей; - величин витрати і тиску подачі ЗОР при повздовжньому шліфуванні.

Розроблено методики: - визначення розподілу сили різання уздовж зони контакту круга і заготовки при повздовжньому шліфуванні;- управління параметрами очищувача в циклі шліфування (на основі встановленого зв'язку між конструктивними параметрами очищувача ЗОР і режимами обробки шліфуванням);- вибору альтернативних варіантів шліфування із застосуванням ЗОР з урахуванням енергетичних показників обробки.

Результати роботи впроваджені в виробництво із загальним економічним ефектом більше 200 тис. гривень. Низку наукових розробок впроваджено в навчальний процес Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”.

Особистий внесок здобувача. Основні результати теоретичних і експериментальних досліджень, які виносяться на захист, одержані здобувачем самостійно. А саме: наукове обґрунтування розробок в області створення систем застосування ЗОР, яке забезпечує вирішення найважливішої прикладної проблеми – підвищення ефективності обробки шліфуванням, постановка завдань і аналіз наукових результатів. Розробка технічної документації, модернізація устаткування і проведення випробувань виконані спільно із співробітниками ВАТ “ХАРВерст”, ДКБШВ і ДП ХМЗ “ФЕД”.

Апробація роботи. Основні положення і результати, що представлені в дисертації, доповідалися на: міжнародних науково-технічних конференціях ”Фізичні і комп'ютерні технології в народному господарстві” (м.Харків,2000 –2004р.); “Гидравлические машины, гидропривод и гидропневмоавтоматика” (г. Москва, МЭИ, 1998 – 2000г.); міжнародній конференції “Високі технології: тенденції розвитку” (м. Алушта, Інтерпартнер 2002р.,2005р.); міжнародних науково-практичних конференціях “Наука і соціальні проблеми суспільства: людина, техніка, технологія, навколишнє середовище” (м.Харків 1997-2005р.р.); міжнародній науково-технічній конференції “Проблеми теорії і практики технології машинобудування, механічної і фізичної обробки (м. Харків, 2000р.); 8-й міжнародній науково-методичній конференції “Сучасні технології, економіка і екологія в промисловості, на транспорті і в сільському господарстві” (м. Алушта, 2001р); засіданні науково-технічного семінару Харківського обласного будинку вчених (м. Харків, 2002р); 10-й міжнародній науково-методичній конференції “Технології XXI століття” (м. Алушта, 2003р); 2-й міжнародній науково-технічній конференції “Research and Education”. (Miskolc, Hungari, 2004); спільних наукових семінарах кафедр “Технологія машинобудування”, “Різання матеріалів і різальні інструменти”, “Гідропневмоавтоматика і гідропривод” НТУ “ХПІ”.

Публікації. Основні положення і результати дисертації опубліковані в 45 роботах, з них 26 у фахових виданнях ВАК України, 12 – матеріали міжнародних конференцій і семінарів, 1 – авторське свідоцтво на винахід, 3 декларативних патенти України.

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається з вступу, 6 розділів, висновків і 3 додатків. Повний обсяг дисертації складає 439 сторінок, з них 46 ілюстрацій по тексту, 102 ілюстрації на 68 сторінках, 16 таблиць на 19 сторінках, 21 таблиця по тексту, 3 додатки на 32 сторінках, список використаних літературних джерел з 250 найменувань на 22 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Вступ. Обґрунтовано актуальність теми, сформульовані мета і задачі досліджень, визначається наукова новизна і практичне значення результатів дослідження. Структурно-логічна схема роботи представлена на рис. 1.

Розділ 1. У розділі проведено аналіз стану питання, встановлена значущість ЗОР і засобів їх застосування в системах шліфування. Виявлені тенденції їх застосування і визначені основні напрями досліджень дії ЗОР. Проведено обґрунтування ефективності різних ЗОР і засобів їх застосування.

Шліфування як один з видів остаточної обробки має в порівнянні з лезовою обробкою специфічні особливості. Фундаментальні дослідження в цій області виконали А.К. Байкалов, М.К. Беззубенко, Ю.М.Внуков, А.І. Грабченко, А.П. Гавріш, Д.Г. Евсеєв, А.В. Корольов, С.М. Корчак, Т.М.Лоладзе, Е.М. Маслов, Ю.К. Новосолов, В.І. Островський, Ю.В.Петраков, С.О. Попов, А.О.Сагарда, А.Н. Сальников, М.Ф. Семко, С.С. Силін, В.А.Сипайлов, С.Г.Редько, А.Н.Резников, Л.М.Філімонов, П.І. Ящеріцин, О.В. Якимов, Ф.Я.Якубов та ін. Кожний з вище названих вчених в тому або іншому ступені розглядав питання впливу ЗОР на процес шліфування. Великий внесок в створення фундаментальних положень науки про дію зовнішніх середовищ при механічній обробці внесли П.О. Ребіндер, Н.І. Богомоллов, М.Б.Гордон, М.І. Клушин, І.В. Крагельській, В.М. Латишев, В.М. Подураєв, С.Г.Энтеліс та ін. Істотні результати в напрямі, пов'язаному з розробкою і дослідженням засобів доставки ЗОР в зону різання і її очищення від домішок, отримані Г. В. Бокучавой, Ю.В. Полянськовим, О.М. Тіхонцовим, А.М. Коробочкою, В.В.Ефімовим, Є.С. Киселевим. Суттєвий внесок у вирішення багатьох проблем, пов'язаних з використанням ЗОР в процесах абразивної обробки, зроблено Л.В. Худобіним. Проведений аналіз стану питання дозволив визначити основні напрями досліджень в області застосування ЗОР.

Рис. 1. Структурно-логічна схема дослідження

Величезний обсяг досліджень присвячено розв'язанню локальних конкретних задач, наприклад, дослідженню впливу складу або забрудненості ЗОР, техніки очищення і подачі ЗОР, активації ЗОР і т.п. на ефективність операцій шліфування. У той же час комплексних досліджень взаємовпливу чинників застосування ЗОР практично не було.

Експертна оцінка теоретико-експериментальних досліджень і досвіду експлуатації шліфувальних верстатів дозволила оцінити вагу чинників дії ЗОР залежно від їх впливу на продуктивність обробки і якість поверхні (рис. 2). В результаті виявлено чинники максимальної дії на параметри шліфування, варіювання якими дає найбільший ефект. Цими чинниками є: подача і очищення ЗОР, гідроочищення шліфувального круга і склад ЗОР. В процесі теоретико-експериментальних досліджень визначальна увага приділена першим трьом чинникам, а останній чинник (склад ЗОР) детально не досліджувався. Проведений аналіз дозволив зумовити напрями наукового пошуку і визначити основні завдання досліджень.

Рис. 2. Ранжирування ЗОР і засобів їх застосування за ступенем впливу на продуктивність і якість поверхні при шліфуванні

Розділ 2. У розділі розглянуто теоретичні передумови інтенсифікації охолоджувальної дії ЗОР при шліфуванні. Для аналізу ефективності охолоджуючої дії ЗОР була розроблена методологія розрахунків, яка враховує проникаючу здатність і рух ЗОР в зоні контакту (або до зони контакту).

Можливі два шляхи проникнення ЗОР в зону контакту. Перший – через канал, утворений в контактні “круг – заготовка”. При цьому з урахуванням топографічної пристосованості, яка характеризується зміною геометричних параметрів топографії робочої поверхні, засалювання і забруднення ЗОР механічними домішками, визначена площа прохідного перетину цього каналу

$$S_4^{кон} = \int_0^{H_k} f(x) - \Delta_3(r) + I(r) + \Phi(r) \bar{dx}, \quad (1)$$

де $\Phi(r)$ – величина, що показує характер зміни закону розподілу рівнів западин шліфованої поверхні при обробці з ЗОР, забрудненої механічними домішками; $I(r)$ – величина зносу круга в часі; $\Delta_3(r)$ – товщина шару засалювання; $f(x)$ – закон розподілу рівня западин на профілі шліфувального круга.

Другий шлях проникнення ЗОР в зону контакту – через пори шліфувального круга. При цьому для визначення витрати рідини скористалися методом електрогідрравлічної аналогії, заснованої

на подібності ламінарного потоку рідини електричному струму. Абразивний круг (рис. 3) представлено в вигляді складного ланцюга постійного струму, що описано рівняннями (2) і (3). На електричній схемі (рис. 4) вузли відповідають порам шліфувального круга, а опори - міжпоровим каналам. Джерела ЕДС в схемі $E_{n,1}, E_{n,2} \dots E_{n,m}$ імітували виникнення тиску ЗОР у тілі шліфувального круга під дією відцентрових сил при його обертанні. Джерела ЕДС $E_{0,0}, E_{1,0} \dots E_{n,0}$, а також $E'_{0,m+1}, E'_{1,m+1} \dots E'_{n,m+1}$ імітували розподіл тиску в потоці ЗОР, яка рухається по торцях круга.

Рис.3. Структура абразивного круга

Рис.4. Електрична схема заміщення шліфувального круга

Для контурів, що описують шар правого торця шліфувального круга можна записати:

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= I_{0,1} \\ I_2 &= I_{0,1} - I_{0,2} \\ I_3 &= I_{0,2} - I_{0,3} \\ &\dots \\ I_n &= I_{0,n-1} - I_{0,n} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Переходячи від електричних параметрів до їх гідравлічних аналогів, вирази (2), (3) відповідно представимо у вигляді:

$$\left. \begin{aligned} -P_{0,m+1} &= Q_{0,m+1} \left[\left(\frac{\Delta p}{Q} \right)_{0,m+1} + \left(\frac{\Delta p}{Q} \right)_{1,m+1} + \left(\frac{\Delta p}{Q} \right)_{m,1} \right] - Q_{1,m+1} \left(\frac{\Delta p}{Q} \right)_{1,m+1} - Q_{0,m} \left(\frac{\Delta p}{Q} \right)_{m,1} \\ -P_{1,m+1} &= Q_{1,m+1} \left[\left(\frac{\Delta p}{Q} \right)_{1,m+1} + \left(\frac{\Delta p}{Q} \right)_{2,m+1} + \left(\frac{\Delta p}{Q} \right)_{m,2} \right] - Q_{2,m+1} \left(\frac{\Delta p}{Q} \right)_{2,m+1} - \\ &\quad - Q_{1,m} \left(\frac{\Delta p}{Q} \right)_{m,2} - Q_{0,m+1} \left(\frac{\Delta p}{Q} \right)_{1,m+1} \\ &\dots \\ -P_{n-1,m+1} &= Q_{n-1,m+1} \left[\left(\frac{\Delta p}{Q} \right)_{n-1,m+1} + \left(\frac{\Delta p}{Q} \right)_{n,m+1} + \left(\frac{\Delta p}{Q} \right)_{m,n} \right] - \\ &\quad - Q_{n,m+1} \left(\frac{\Delta p}{Q} \right)_{n,m+1} - Q_{n-1,m} \left(\frac{\Delta p}{Q} \right)_{m,n} - Q_{n-2,m+1} \left(\frac{\Delta p}{Q} \right)_{1,m+1} \end{aligned} \right\} \quad ; (4)$$

$$\left. \begin{aligned} Q_1 &= Q_{0,1} \\ Q_2 &= Q_{0,1} - Q_{0,2} \\ Q_3 &= Q_{0,2} - Q_{0,3} \\ &\dots \\ Q_n &= Q_{0,n-1} - Q_{0,n} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Використовуючи відомі експериментальні дані щодо структури шліфувальних кругів (наявність пор і каналів між ними, їх розміри), можна теоретично за рівняннями (4), (5) розрахувати витрату ЗОР в зону контакту через круг. Представлений вище опис структури шліфувального круга може бути обмежений, оскільки при остаточних режимах шліфування, які характеризуються відсутністю самозаточування, відбувається засалювання міжзеренного простору, а, отже, і порових каналів, як показано на рис 5. Подібні процеси можна спостерігати, наприклад, при повздовжньому шліфуванні в активній частині профілю круга (біля торців). Тому (як один з варіантів) порові канали і їх закупорку (засалювання) (див. рис. 5) представляли на контактних схемах у вигляді електричного ланцюга, розірваного декількома вимикачами. Кожний з елементів шліфувального круга мав опис на контактній схемі (рис. 6).

Рис. 5. Модель фрагменту шліфувального круга

$$Ц = А \cdot [Б \cdot (\cdot Д + \bar{E}) + В \cdot Ж \cdot З + Г \cdot И \cdot \bar{K}] \cdot Л$$

Рис. 6. Контактна схема моделі фрагменту шліфувального круга і її алгебраїчний запис

Охолоджувальна дія ЗОР визначається коефіцієнтом тепловіддачі α , який залежить від безлічі чинників та приймає різні значення як в зоні контакту, так і поза нею. Крім того, поза зоною контакту α не постійний, а є функцією кутової координати на поверхні заготовки. Проте, відомі рішення для опису температурного поля в заготовці під час шліфування з охолодженням цей факт не враховують. Не враховуються також обмеженість джерела по ширині, поперечний рух для плоского і вісьовий для круглого шліфування.

Аналіз процесу шліфування дозволив зробити висновок, що джерело тепла при шліфуванні може вважатися швидкорухомим згідно критерію Пекле, який для типових режимів шліфування знаходиться в межах 20 – 4000. Таким чином, прийнявши джерело тепла швидкорухомим, тобто таким, що безперервно діє в перебігу часу τ , опис температурного поля можна представити рішенням рівняння теплопровідності

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (6)$$

за наступних граничних умов:

$$\begin{aligned} -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} + \alpha T \Big|_{x=0} &= 0, \\ -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{-h < y < h} &= q = const, T \Big|_{t=0} = 0, \end{aligned} \quad (7)$$

де T – температура, $^{\circ}\text{C}$; a – коефіцієнт теплопровідності, $\text{мм}^2/\text{с}$; λ – коефіцієнт теплопровідності, $\text{Дж}/\text{мм}\cdot\text{с}\cdot^{\circ}\text{C}$; q – щільність теплового потоку, $\text{Дж}/\text{мм}^2\cdot\text{с}$; α – коефіцієнт тепловіддачі, $\text{Дж}/\text{мм}^2\cdot\text{с}\cdot^{\circ}\text{C}$.

Використовуючи фундаментальне рішення для точкового джерела на поверхні заготовки, що задовольняє умові теплообміну третього роду на межі, і переходячи до елементарного плоского джерела тепла, зробивши деякі перетворення, отримали вираз температурного поля при швидкорухомому джерелі тепла:

$$\begin{aligned} T(x, y) &= \frac{q\sqrt{a}}{2\lambda\sqrt{\pi}} \int_0^{\tau} \frac{dt}{\sqrt{\tau-t}} \exp\left[-\frac{x^2}{4a(\tau-t)}\right] \times \left[1 - \frac{\alpha}{\lambda} \sqrt{\pi a(\tau-t)} \cdot \text{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{a(\tau-t)}}\right) \cdot \exp u^2\right] \times \\ &\times \left[\text{erf}\left(\frac{y+h}{2\sqrt{a(\tau-t)}}\right) - \text{erf}\left(\frac{y-h}{2\sqrt{a(\tau-t)}}\right) \right], \end{aligned} \quad (8)$$

де $u = \frac{x}{\sqrt{4a(\tau-t)}} + \frac{\alpha}{\lambda} \sqrt{a(\tau-t)}$; τ – час спостереження за температурним полем; h – половина ширини джерела тепла.

Одержане рішення (8) дозволяє врахувати раніше наведені обмеження, властиві відомим рішенням. Достовірність отриманого рішення підтверджена порівнянням його з рішенням при рухомому джерелі тепла, одержаному для мінімального значення критерію Пекле – $N_{pe} = 20,8$. Результати порівняння приведені на рис. 7. Температурні поля, що розраховані за формулами для рухомого і швидкорухомого джерел тепла, ідентичні, відмінність максимальної температури нагріву при $x=0,00005\text{мм}$, (тобто практично рівному нулю) складає $394,3660\text{C} - 388,647^{\circ}\text{C} = 5,719^{\circ}\text{C}$, або 1,5%.

Модель температурного поля в заготовці при швидкорухомому джерелі (8) дозволяє оцінити нагрів поверхні заготовки у середині і по краях джерела, а також змодельовати його переміщення вздовж вісі заготовки і з'ясувати вплив зсуву джерела тепла на нагрів поверхні заготовки після проходження над нею джерела тепла.

Рис. 7. Результати порівняльного розрахунку температурних полів і температури поверхні заготовки: а – швидкорухоме джерело тепла ($N_{pe} = 20,8$), б – рухоме.

Одержаний вираз можна використовувати для обчислення температури в точці поверхні заготовки після m її обертів. Для цього необхідно підсумовувати $TK(x, y, \tau)$ від $k=1$ до $k=m$:

$$T(x, y, t) = \sum_{k=1}^m TK(x, y, t) \quad (9)$$

Результати розрахунку нагріву-охолодження точки поверхні заготовки показують, що тепло від дії джерела на другому оберті нагріває точку всього на долі градуса (рис. 8), а на третьому - додатковий нагрів складає $1 \cdot 10^{-80} \text{C}$. Тому сумарна теплова дія на досліджувану точку поверхні заготовки практично не відрізняється від дії збоку джерела тепла на першому оберті. Рис.8. Нагрів-охолодження точки поверхні заготовки при шліфуванні з повздовжньою подачею після 1-го,2-го і 3- го обертів заготовки, відповідно, і сумарний нагрів після трьох обертів.

Таким чином, вплив повздовжньої подачі на термічний цикл поверхні шліфованої заготовки надто малий, і при дослідженні якості поверхні вплив чинника повздовжньої подачі (на даних режимах) можна не враховувати.

Теоретично вирішене завдання визначення відношення C кількості тепла, що перейшло в стружку Q_{cmp} , до кількості тепла, що перейшло в заготовку і стружку $Q_{з.с.}$ при плоскому шліфуванні

$$C = \frac{s}{4h\sqrt{a\pi}} \times \int_{-h}^h \int_0^k \int_0^s \frac{L - R \sin(\arccos \frac{R-X}{R})}{\sqrt{M_0}} \operatorname{erf}\left(\frac{y+h}{2\sqrt{aM_0}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{y-h}{2\sqrt{aM_0}}\right) \times dx dy dt, \quad (10)$$

$$\text{де } M_0 = \left(\frac{L - R \sin(\arccos \frac{R-X}{R})}{s} - t \right); r, R - \text{радіуси заготовки і круга}; S - \text{подача}; k - \text{глибина}$$

шліфування.

Аналогічна залежність отримана і для круглого зовнішнього шліфування. Визначаючи C без урахування тепла, що переходить в круг, можна вирішити завдання теплового балансу, що дозволяє обчислити щільність теплового потоку в заготовку і розрахувати температурні поля в заготовці.

Розроблені математичні моделі дали можливість визначити вплив гідравлічних параметрів подачі ЗОР (тиску подачі ЗОР) на контактну температуру (рис. 9).

Рис. 9. Вплив тиску подачі ЗОР на контактну температуру : а – $p_{зор} = 0,2 \cdot 10^5 \text{ Па}$; б – $p_{зор} = 10 \cdot 10^5 \text{ Па}$

Розділ 3. У розділі визначена роль деформуючої дії ЗОР у формуванні параметрів точності шліфованих поверхонь. Наведені результати досліджень з розвитку наукових основ подачі ЗОР в зону різання, розглянуті питання методології створення і пошуку засобів управління процесом подачі з метою економії енергії.

Параметри подачі ЗОР (витрата, тиск) та спосіб подачі значно впливають на технологічні і енергетичні показники процесу за рахунок охолоджуючої і силової дії. Силова дія ЗОР проявляється в контактній “круг-заготовка”, в клиновому зазорі між заготовкою і кругом поза зоною контакту і через дію струменя ЗОР на поверхню заготовки і круга. Розширення класифікації, джерел формування гідродинамічної силової дії ЗОР припускає виникання нового джерела її впливу, який проявляється під час направленої радіальної, тангенціальної або вісьової подачі струменю на поверхню круга чи заготовки.

При звичайному способі підведення ЗОР у зону контакту в результаті гідродинамічної дії ЗОР виникає сила

$$P_{e_r} = P_y^{г.к} + P_y^{г.з} + P_y^{зоп}, \quad (11)$$

де $P_y^{г.к}$ - гідродинамічна сила, що діє внаслідок виникнення гідродинамічного клину; $P_y^{г.з}$ - гідродинамічна сила, що діє безпосередньо в межах дуги контакту і є сумою двох складових: гідродинамічної сили в контактній поверхні круга (зв'язки) з поверхнею заготовки $-P_{з.с.}$ і гідродинамічної сили в контактній зерно - матеріал заготовки $-P_{з.з.м}$; $P_y^{зоп}$ - сила гідродинамічної дії струменю на поверхню заготовки (круга).

Для визначення сили $P_y^{зоп}$ з урахуванням зносу круга отримали значення складових гідродинамічної сили:

$$P_{y.z.c.}^{zop} = 2 \cdot \mu \cdot \varphi \cdot a_c \cdot b_c \cdot p_{zop} \frac{r_3 - \Delta_i}{r_3^4} \sqrt{\Delta_i \cdot r_3 - \Delta_i^2};$$

$$P_{z.r.c.}^{zop} = 2 \cdot \mu \cdot \varphi \cdot a_c \cdot b_c \cdot p_{zop} \frac{r_3 - \Delta_i}{r_3},$$

де p – тиск подачі ЗОР; r_3 – радіус заготовки; Δ_i – величина зменшення радіуса шліфувального круга внаслідок зносу і правки; μ – коефіцієнт витрати, $\mu = 0,62$; φ – коефіцієнт, залежний від числа Рейнольдса, при $Re > 10000$, $\varphi = 0,97$; a_c і b_c – товщина і ширина струменя рідини.

Отримано залежності $P_{y.z.c.}^{zop}$ від тривалості шліфування (рис.10).

Рис.10. Вплив тривалості шліфування $t_{ш}$ на величину $P_{y.z.c.}^{zop}$ при $a_c = 5 \text{ мм}$;

$$p_{zop} = 1 \text{ МПа}; 1 - V_k = 70 \text{ м/с}; 2 - V_k = 100 \text{ м/с}.$$

Одним із методів підвищення ефективності обробки є метод вібраційного шліфування, що передбачає задавання низькочастотних і високочастотних коливань заготовці або кругу. Встановлено, що ефекту вібраційного шліфування можна добитися також шляхом імпульсної силової дії струменя ЗОР на поверхню заготовки. Встановлено, що в результаті однієї імпульсної дії ЗОР відбувається зміна дуги контакту від l_{\min}^{TM} до l_{\max}^{TM} . В результаті теоретичних досліджень отримані значення тиску подачі ЗОР, необхідного для створення вібрації заготовки з амплітудою A залежно від жорсткості технологічної системи і режимних параметрів.

Силова дія струменю ЗОР на круг і заготовку дає можливість зменшувати деформацію елементів технологічної системи. Подаючи ЗОР у вузький торцевий зазор між кругом і стінками кожуха, можна за рахунок вісьової гідродинамічної сили деформувати шпindel, усуваючи корсетність або бочкоподібність нежорстких заготовок. Деформація валу шпинделя при збереженні необхідної працездатності не повинна перевищувати 2-3 мкм. Зменшення похибки форми валів в повздовжньому перетині шляхом управління деформаціями шліфувального шпинделя доцільно при обробці валів, що мають жорсткість $\gamma_3 \geq 350 \text{ Н/мм}$. Як показує аналіз, значного ефекту в зменшенні погіршеності форми можна добитися шляхом застосування ЗОР з вищими значеннями динамічної в'язкості. Досліджений спосіб круглого зовнішнього повздовжнього шліфування з подачею ЗОР в торцевий зазор із змінною величиною витрати Q_{zop} залежно від величини переміщення заготовки.

Теоретичні дослідження дозволили отримати значення тиску подачі ЗОР при орієнтації її струменю на заготовку в напрямі, протилежному дії сили P_y .

Як раніше було показано, охолоджувальна дія ЗОР визначається коефіцієнтом тепловіддачі α . Оскільки на параметр α при шліфуванні вплив робить характер руху рідини, досліджували параметри ЗОР в контактній зоні. При цьому оцінювали вплив орієнтації сопла подачі ЗОР і режимів шліфування на її корисну витрату (через зону контакту). Встановлено, що при прямому розташуванні сопла корисна витрата ЗОР (через контакт) складає 14,2 % величини витрати, що подається в зону різання. Зсув вісі сопла щодо лінії контакту на $11,2^\circ$ знижує величину корисної витрати ЗОР майже в 2 рази. Кутове розташування сопла подачі ЗОР сприяє де - якому поліпшенню її проникаючої здатності в зону контакту (в порівнянні з прямим розташуванням). Величина корисної витрати при цьому складає 15,8% від витрати, що подається в зону різання. Встановлено, що корисна витрата ЗОР при врізній подачі $V_{ep} = 0,1 \text{ мм/хв}$ в 3-4 рази менше, ніж при $V_{ep} = 0,05 \text{ мм/хв}$ навіть при підвищенні тиску подачі ЗОР з 0,09 до 0,6 МПа.

Оцінка режиму плинності ЗОР у зоні контакту при вище названих значеннях врізних подач і тиску ЗОР, що подається, показала, що при тонкому шліфуванні число Рейнольдса знаходиться в межах $Re < 100$, а це відповідає ламінарному режиму течії, причому число Re сильно залежить від режиму шліфування і параметрів ЗОР, яка подається.

Математичною основою для проектування енергозберігаючої техніки подачі ЗОР в зону різання є отримані залежності, що апроксимують мінімальні значення тиску p_{zop} (кгс/см^2) і витрати при подачі ЗОР Q_{zop} ($\text{дм}^3/\text{хв}$) в залежності від інтенсивності знімання матеріалу на різних етапах циклу шліфування.

Отримані залежності витрати ЗОР при суміщеному шліфуванні колінчастих валів, які враховують геометричні параметри валу, час шліфування, тощо.

Для оцінки проникаючої здатності ЗОР і кількісного порівняння способів подачі ЗОР при шліфуванні за енергетичними витратами введені нові безрозмірні показники: коефіцієнт проникаючої здатності ЗОР і коефіцієнт корисної дії способу подачі ЗОР у зону шліфування.

Сформульовані умови, які забезпечують мінімум енерговитрат, пов'язаних з подачею ЗОР, коли вимоги шліфування, що висуваються процесом до охолоджувальної дії, невисокі (остаточне шліфування і виходжування). Втрати потужності, пов'язані з розпилюванням ЗОР при круглому зовнішньому шліфуванні (особливо, тонкому), при подачі рідини на торці і периферію круга можуть бути сумірними з потужністю різання. Причому потужність розпилювання значно перевищує потужність, що витрачається на подолання тертя між кругом та повітрям, рідиною та шліфувальним кругом.

Для підвищення технологічних можливостей ЗОР запропоновані нові принципи конструювання техніки подачі ЗОР, реалізовані в пристроях, які захищені патентами. До них можна віднести пристрої подачі ЗОР: при шліфуванні довгомірних заготовок із зовнішньою гвинтовою поверхнею; при комбінованій фінішній обробці робочої поверхні гільз гідроциліндрів та інші. З урахуванням знайдених локальних значень сил і температур розроблені норми тиску та витрати подачі ЗОР у зону різання при обробці сталей чотирьох груп оброблюваності на операціях звичайного і швидкісного повздовжнього шліфування. Досліджена технологічна ефективність різних схем подачі ЗОР.

Розділ 4. Розділ присвячений теоретичним і експериментальним дослідженням процесів, пов'язаних з дією ЗОР на поверхню шліфувального круга з метою інтенсифікації її миючої дії; дається оцінка технологічної ефективності гідроочищення його робочої поверхні струменем ЗОР високого тиску.

Запропонована концепція, яка полягає в тому, що збереження ріжучої здатності круга можна забезпечити двома способами:

1. Шляхом постійного оновлення профілю за рахунок руйнуючої дії струменю ЗОР на зв'язку круга, внаслідок чого запресована стружка відокремлюється разом із зв'язкою (гідралічна правка);

2. Шляхом подолання адгезійної взаємодії і тертя між запресованою в вільному просторі профілю круга стружкою, з одного боку, і зв'язкою й зернами круга, з іншого, що забезпечується силовою дією струменю ЗОР (гідралічне очищення).

Для того, щоб струмінь руйнував матеріал зв'язки, необхідно виконати умову $P_{стр} > P_{зр}$, де $P_{стр}$ - сила дії струменя ЗОР на зв'язку; $P_{зр}$ - сила зруйнування. Математична обробка результатів експерименту показала, що найбільший вплив на процес руйнування зв'язки (в порівнянні з межами міцності на стиснення і згинання, ударною в'язкістю, модулем пружності і твердістю) справляє межа міцності при розтягуванні, яка забезпечує найбільшу надійність кореляційної залежності з найменшою середньоквадратичною помилкою відхилень. Тому межа міцності при розтягуванні σ_p може бути рекомендована як критерій оновлення робочої поверхні круга внаслідок руйнування тонкими струменями ЗОР високого тиску з метою правки круга. Одержаний кореляційний взаємозв'язок сили $P_{зр}$ з величиною σ_p має важливе значення для визначення тиску струменю ЗОР, що впливає на робочу поверхню круга. Теоретичні дослідження дали можливість отримати розрахункові формули параметрів процесу гідралічної правки і його тривалості для нерухомого і рухомого кругів.

Необхідне значення швидкості струменю при гідралічній правці з урахуванням обертання шліфувального круга і напрямку дії ЗОР описується нерівністю

$$V_{стр} > -\frac{1}{2 \mu - \alpha_x} \left(V_k \cos \alpha - \sqrt{V_k^2 \cos^2 \alpha + \frac{4P_{зр}}{\rho_{зор} f_c}} \right), \quad (13)$$

де $\alpha_x = \frac{u_c}{v_{стр}}$ ($0 \leq \alpha_x \leq 1$); u_c – швидкість переміщення поверхні круга в результаті дії струменю; α –

кут між напрямом дії струменю ЗОР і дотичної в точці контакту; μ - коефіцієнт витрати; f_c – площа поперечного перетину сопла.

Для шліфувального круга, що обертається, потужність, яка витрачається на руйнування зв'язки, можна визначити по залежності:

$$N_p = \rho_{\text{зоп}} \mu f_c V_{\text{сгп}}^2 (1 - \alpha_x)^2 \left[\frac{V_k}{V_{\text{сгп}} (1 - \alpha_x)} + \frac{1}{\cos \alpha} \right] \times \left[-\frac{1}{2(1 - \alpha_x)} \left(V_k \cos \alpha - \sqrt{V_k^2 \cos^2 \alpha + \frac{4P_{\text{зр}}}{\rho_{\text{зоп}} \mu f_c}} \right) \right], \quad (14)$$

тривалість гідралічної правки

$$\tau_{\text{усвгп}} = \frac{\delta_c}{V_k \cos \alpha + V_{\text{сгп}} \frac{P_{\text{зр}}}{\rho_{\text{зоп}} Q_{\text{зоп}} \sin \alpha}}, \quad (15)$$

де δ_3 – середньоімовірнісна критична глибина закладення зерна в зв'язці.

Одержані залежності враховують середньоімовірнісну критичну глибину закладення зерна в зв'язці, щільність, витрату і інші параметри ЗОР, що подається, конструктивні параметри сопла для її подачі.

Головним недоліком використання гідралічної правки є неможливість забезпечення постійності параметрів точності в поперечному перетині. Тому область її застосування може обмежуватися тільки режимами попереднього шліфування, де вимоги до вищезазначених параметрів невисокі. Усунути цей недолік можна шляхом використання гідралічного очищення. В цьому випадку для збереження ріжучої здатності абразивного круга слід забезпечити створення умов для розміщення стружки в вільному просторі профілю круга, що багато в чому визначає продуктивність шліфування. Безперешкодне розміщення стружки в вільному просторі профілю можливе при постійному вилученні запресованої стружки з нього, зокрема за допомогою гідроочищення круга. Для того, щоб струмінь ЗОР “вимивав” запресовану стружку з міжзеренного простору, необхідно виконати умову $P_{\text{смп}} > P_{\Sigma}$, де $P_{\Sigma} = P_{\text{адг}} + P_{\text{тр}}$, $P_{\text{адг}}$, $P_{\text{тр}}$ – сили адгезії і тертя між зерном (зв'язкою) і стружкою.

У разі гідралічного очищення круга формули, що описують цей процес, аналогічні (13) – (15). Відмінність полягає в тому, що замість сили руйнування в них присутня сума сил $P_{\Sigma} = P_{\text{адг}} + P_{\text{тр}}$.

Аналіз результатів досліджень показує, що при збільшенні швидкості круга V_k з 12 до 150 м/с значення швидкості струменю ЗОР може бути понижено на 25% при гідралічній правці і в 2,8 рази при гідралічному очищенні. Проте при цьому зростає потужність приводу шліфувальної бабки.

Встановлено, що тиск подачі ЗОР, мінімально необхідний для гідроочищення круга, залежить від режимів шліфування. Це пояснюється тим, що збільшення контактної температури з 500°C до 700°C призводить до значного зростання сили адгезійної взаємодії оброблюваного матеріалу і зерна, подолання якої вимагає створення значного тиску. Таким чином, гідроочищення круга при шліфуванні на чорнових режимах вимагає створення значно вищого тиску, ніж при шліфуванні на чистових режимах. Тривалість гідралічного очищення знаходиться аналогічно тривалості гідралічної правки, тільки в отриманих формулах замість глибини закладення зерна в зв'язці підставляється значення еквівалентної висоти вільної поверхні ріжучого профілю h_e , а замість сили руйнування зв'язки $P_{\text{зр}}$ – сума $P_{\Sigma} = P_{\text{адг}} + P_{\text{тр}}$.

Завдання створення гідросистем високого тиску на базі звичайних схем гідроприводу практично можливе, але вимагає спеціального підходу, оскільки отримання тиску 10-1000 МПа за допомогою серійних насосів утруднене. Для отримання струменів ЗОР високого тиску доцільно застосовувати гідромультіплікатори із стандартними насосом і апаратурою, що управляє.

Дослідження технологічної ефективності гідралічного очищення показали, що шорсткість шліфованої поверхні Ra зменшилася при повздовжньому і врізному шліфуванні відповідно на 20-27% і 12-18% (при використанні струменя високого тиску 40 МПа). Експерименти показали, що ефективна потужність шліфування $N_{\text{еф}}$ при використанні гідроочищення високого тиску в значній мірі залежить від швидкості переміщення сопла. До того найбільший ефект був отриманий при швидкості сопла 450 мм/хв. Збільшення швидкості сопла до 650 мм/хв не привело до зниження ефективної потужності шліфування (рис.11). Стійкість абразивного круга

і відповідно об'єм металу, знятий за період стійкості, в залежності від режимів шліфування матеріалу, який обробляється, і пристрою, що застосовується для гідроочищення, збільшується на 12,5- 37,3% (рис. 12). Найбільший ефект від застосування гідроочищення полягає в підвищенні стійкості круга (якщо за критерій стійкості прийнято момент появи термодефектів на оброблюваній поверхні). При цьому стійкість може бути підвищена в 2 і більше разів (особливо при шліфуванні торцем круга з плечевою подачею), що видно з табл.

Рис. 11. Вплив швидкості руху сопла на параметр N_{ef} під час шліфування ст. 45 HRC 28-30:1- без гідроочищення; 2, 3, 4 – з гідроочищенням, швидкість сопла 300, 450, 650 мм/хв відповідно.

Рис. 12. Вплив гідроочищення шліфувального круга на його стійкість: ■ - без гідроочищення; о - з гідроочищенням

При шліфуванні без застосування гідроочищення на торцях третьої (іноді четвертої) заготовки після шліфування з'являлися термодефекти в вигляді темно-бурих плям, що покривали майже всю поверхню торця (рис. 13а).

При мікроскопічному аналізі структури круга встановлено, що при використанні для гідроочищення струменю високого тиску 40МПа він не тільки інтенсифікує миючий ефект зерен і зв'язки, але й часто призводить до закупорки пор. При очищенні торця круга після шліфування і правки периферії круга на ній можна помітити чорну смужку, при розгляді якої видно, що в порах є частинки шлама (рис.14).

Таблиця

Результати застосування гідроочищення круга при торцевому шліфуванні з плечевою подачею

Пристрій гідро-очищення	Подача, мм/хв	Кількість прошліфованих заготовок		Кількість подвійних ходів сопла
		без гідроочищення	з гідроочищенням	
1	25	3	20-22	1
			60-62	3,5,7
			14-15	при постійному гідроочищенні
2	12	2-3	9	3
	20		8	
	30		7	
3	10	3-4	12	При нерухомому щілинному соплі
	20		11	
	30		10	

Проте вказане явище не знижує стійкості круга. При шліфуванні із застосуванням нерухомого щілинного сопла (тиск подачі ЗОР 2,5МПа) шлам не забивається глибше в пори, а вилучається з поверхні круга струменем ЗОР.

Рис.13. Термодефекти при шліфуванні торцевих поверхонь: а - без гідроочищення, б- з гідроочищенням круга

Рис.14. Межі розміщення шліфувального шлама в тілі круга після гідроочищення при торцевому шліфуванні

Результати досліджень гідравлічного очищення (правки) абразивних кругів високонапірним струменем ЗОР дозволили визначити не тільки істотні переваги, але і недоліки названого методу.

Розділ 5. Розділ присвячений теоретичним і експериментальним дослідженням процесів, пов'язаних з підвищенням ефективності шліфування за рахунок очищення ЗОР.

Кожному режиму шліфування відповідають розміри стружки і режими роботи очищувача, забезпечивши які можна добитися максимальної ефективності очищення. Зміна режимів шліфування в циклі призводить до зміни параметрів зрізу l_c і a_{zcp} , а також концентрацій механічних домішок в ЗОР. Це в значній мірі впливає на ефективність роботи очищувача. Прирівнявши величину мінімального розміру відокремлюваної в очищувачі частинки середньої довжині зрізу, що приходить на кожну ріжучу кромку абразивного зерна, отримали формули, що відображають взаємозв'язок параметрів шліфування і параметрів очищення ЗОР в очищувачі.

В даний час не виявлено впливу забруднення ЗОР на параметри шорсткості шліфованої поверхні при повздовжньому шліфуванні. Тим часом, у зв'язку з високими вимогами до якості поверхні таких деталей, як наприклад, штоки гідроциліндрів, це завдання стало вельми актуальним. Встановлено, що наявність в ЗОР механічних забруднень розміром 10мкм дозволяє отримати шорсткість поверхні не нижче за $Ra=0.13\text{мкм}$. Тому для стабільного отримання меншої шорсткості слід видаляти з ЗОР частинки з розмірами 10мкм, як мінімум, а по можливості, і дрібніші частинки. В ході досліджень встановлено, що на шорсткість поверхні великий вплив справляє не тільки концентрація механічних домішок у ЗОР, але і характер розподілу частинок за розмірами. Механічні домішки розміром 2мкм при використанні кругів зернистості 25 і 40 істотно не впливають на шорсткість поверхні.

Відомі способи очищення ЗОР при шліфуванні заготовок з алюмінієвих сплавів недостатньо ефективні. Так, внаслідок того, що частинки алюмінію мають сильно розвинену поверхню, седиментація їх відбувається дуже поволі. Очищення фільтруванням у даному випадку не можливе, оскільки домішки, коагулюючи між собою, миттєво засмічують пори фільтроелементів, перешкоджаючи проходженню ЗОР. Для очищення ЗОР від алюмінієвого шліфувального шламу розроблена техніка, що дозволяє забезпечити ступінь очищення 70-75%, а в комплексі з відстійником і гідроциклоном ефективність виведення шламу з системи очищення - близько 80%.

Відомі норми чистоти ЗОР забезпечують отримання тільки геометричних характеристик шліфованих поверхонь деталей і абсолютно не пов'язані з параметрами якості поверхневого шару. В результаті теоретико-експериментальних досліджень визначено характер зміни стану поверхневого шару залежно від концентрації і розміру механічних домішок в ЗОР. Це дало можливість підготувати базу нормування чистоти ЗОР не тільки за критеріями шорсткості і точності, але і за параметрами глибини структурно-зміненого шару матеріалів різних груп оброблюваності. З урахуванням отриманих даних підбирається відповідна техніка очищення ЗОР.

Розділ 6. Вибираючи ту чи іншу систему застосування ЗОР, важливо оцінити її надійність і економічну ефективність. У розділі проведена оцінка надійності систем застосування ЗОР за критерієм імовірності безвідмовної роботи. Наведено економічне обґрунтування вибору системи застосування ЗОР, а також результати дослідження екологічної обстановки на операціях шліфування при забезпеченні заданих продуктивності процесу і якості обробки. У розділі також запропоновано методикку оптимізації режимів шліфування із застосуванням ЗОР, за якою оптимальні режими шліфування абразивним кругом вибирають з урахуванням мінімальної собівартості обробки з виконанням всіх технічних вимог.

При розв'язанні задачі оптимізації необхідно враховувати обмеження параметрів процесу шліфування із застосуванням ЗОР, які можна поділити на дві групи: обмеження, пов'язані з технологічними можливостями устаткування для застосування ЗОР, та обмеження, пов'язані з технічними вимогами до точності обробки і до якості шліфованої поверхні і шліфувального інструменту.

До першої групи відносяться обмеження вигляду:

$$\left. \begin{array}{l} Q_{\text{зор min}} \leq Q_{\text{зор}} \leq Q_{\text{зор max}}; \quad P_{\text{зор min}} \leq P_{\text{зор}} \leq P_{\text{зор max}}; \\ Q_{\text{зор min}}^{\text{np}} \leq Q_{\text{зор}}^{\text{np}} \leq Q_{\text{зор max}}^{\text{np}}; \quad P_{\text{зор min}}^{\text{np}} \leq P_{\text{зор}}^{\text{np}} \leq P_{\text{зор max}}^{\text{np}}; \\ P_{\text{зор min}}^{\text{зок}} \leq P_{\text{зор}}^{\text{зок}} \leq P_{\text{зор max}}^{\text{зок}}; \quad E_{\text{зор min}} \leq E_{\text{зор}} \leq E_{\text{зор max}}; \\ V_{\text{зор min}}^{\text{o}} \leq V_{\text{зор}}^{\text{o}} \leq V_{\text{зор max}}^{\text{o}} \end{array} \right\} \quad (16)$$

де $Q_{\text{зор}}$, $Q_{\text{прзор}}$ – відповідно витрати подачі ЗОР в зону шліфування і в зону правки; $P_{\text{зор}}$, $P_{\text{прзор}}$, $P_{\text{зокзор}}$ – відповідно тиски подачі ЗОР в зону шліфування, в зону правки, струменя, що використовується для гідроочищення круга; $E_{\text{зор}}$ – енергія активації ЗОР; $V_{\text{зор}}$ – швидкість проходження ЗОР в очищувачі.

До другої групи відносяться обмеження

$$T, P, R_A \leq \begin{pmatrix} S, V_s, V_k, \\ Q_{зор}, P_{зор}, \\ Q_{зор}^{np}, P_{зор}^{np}, \\ E_{зор}, P_{зор}^{зок}, V_{зор}^o \end{pmatrix} \leq T_K, P_K, R_{A_{max}}, \quad (17)$$

де T – температура шліфування (перевищення її критичного значення T_K призводить до появи дефектів на шліфованій поверхні); P – сила шліфування (перевищення її критичного значення P_K обумовлює неприпустимі пружні деформації в технологічній системі і, отже, відхилення від необхідних розмірів і форми); $R_{A_{max}}$ – максимальне значення шорсткості R_A , що допускається технічними вимогами до шліфованої поверхні.

При виборі математичної моделі слід враховувати, що залежно від виду шліфування, характеру операції шліфування (попередня або остаточна), характеру роботи круга (з самозаточуванням або затупленням) превалюють ті чи інші обмеження. При попередньому шліфуванні, коли круг працює з самозаточуванням, відокремлюється основна частина припуску з максимально допустимою продуктивністю.

За умови виконання співвідношень $T_p > t_{max}$; $S > S_{max}$; $V > V_{max}$, де T_p , S і V – глибина, подача і швидкість різання, може виникнути критична температура T_k , перевищення якої призводить до появи дефектів на шліфованій поверхні. При цьому найважливіше значення має охолоджувальна дія ЗОР, і умова забезпечення мінімальної температури шліфування при t_{max} , S_{max} , і V_{max} може бути виконана при забезпеченні необхідної витрати і тиску подачі ЗОР, використання необхідних способів подачі ЗОР, гідроочищення круга. У той же час вимоги до очищення ЗОР на етапі попереднього шліфування можуть бути невисокими. При остаточному шліфуванні, коли необхідно забезпечити виконання технічних вимог до точності і шорсткості шліфованих поверхонь, належить забезпечити поєднання мінімально необхідної витрати і тиску подачі ЗОР в зону різання з підвищеними вимогами до якості очищення ЗОР. Розглянуто питання методології вибору альтернативних варіантів шліфування із застосуванням ЗОР (рис.15).

Науково обґрунтоване застосування ЗОР максимально виявляється в комплексному використанні ефектів її дії на технологічні і енергетичні параметри процесу шліфування з урахуванням конкретної оброблюваної заготовки.

Рис.15. Узагальнена структурна схема забезпечення технологічних параметрів шліфування.

Гідроочистку шліфувального круга, яка стимулює миючу дію струменем високого тиску, належить застосовувати при обробці заготовок з матеріалів:

- III, IV, V груп оброблюваності, алюмінієвих і титанових сплавів незалежно від схеми і режимів шліфування;

- I і II групи оброблюваності при торцевому шліфуванні (з великою площею контакту).

При торцевому шліфуванні заготовок збільшення тиску і витрати ЗОР не має сенсу і призводить до значних непотрібних витрат енергії, оскільки в цьому випадку доступ рідини в зону контакту (внаслідок значної її площі) практично неможливий або сильно утруднений. Як виняток, ефекту можна добитися саме за рахунок збільшення тиску подачі ЗОР на торець круга при незначній (2 – 3 мм) ширині сегменту поверхні контакту. При забезпеченні мінімальних значень температурних деформацій найважливіше значення має витрата подачі ЗОР. Збільшення тиску подачі ЗОР також не доцільно, оскільки і це призводить до значних зайвих витрат енергії. При швидкісному (силовому) круглому зовнішньому шліфуванні матеріалів I і II групи оброблюваності при подачі ЗОР слід збільшувати тиск при одночасному зниженні витрати ЗОР. Гідроочищення струменем невисокого тиску слід застосовувати при обробці заготовок з матеріалів I і II груп оброблюваності при торцевому шліфуванні з дуже незначною площею зони контакту. При шліфуванні алюмінієвих сплавів треба проводити не тільки гідроочищення, але і очищення ЗОР для зменшення засалювання круга. Очищення ЗОР з метою забезпечення технологічних параметрів слід проводити при обробці заготовок з різних матеріалів для отримання шорсткості поверхні $R_a = 0,63 \mu\text{мкм}$ і менш. Особливо очищення ЗОР від механічних домішок важливе при повздовжньому шліфуванні кругами високої твердості. Слід також враховувати, який з чинників є домінуючим – продуктивність обробки або енергетичні витрати. За наслідками досліджень може бути сформований банк даних для

забезпечення технологічних параметрів при обробці деталей різних класів, таких як шток та гільза гідроциліндра, колінчастий вал, ходовий гвинт, муфта перемикачів, золотник та корпус гідророзподільника, кільце підшипника, пластина пластинчастого насоса та інше.

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота присвячена рішенням науково – практичної задачі розробки наукових основ створення і використання систем застосування ЗОР при шліфуванні, на підставі яких реалізована можливість підвищення продуктивності обробки в 1,2 - 3 рази при забезпеченні якості обробленої поверхні і раціональному енергозберігаючому застосуванню ЗОР.

1. Запропоновані методи опису структури абразивних кругів при взаємодії їх з ЗОР. Встановлено, що для оцінки витрати ЗОР, що потрапляє в зону контакту через пори, для опису шліфувальних кругів на керамічних зв'язках можна використовувати електрогідрравлічну аналогію, а в умовах засалювання - методи контактних схем. На режимах остаточного шліфування витрата через пори круга і корисна витрата сумірні між собою.

2. Розроблена математична модель сили різання при повздовжньому шліфуванні з урахуванням геометричних параметрів зерна, характеристики круга і його зносу, фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу. Оригінальна методика визначення характеру розподілу сили різання дозволила встановити, що при повздовжньому шліфуванні із застосуванням ЗОР закон її зміни вздовж зони контакту - гіперболічний. Це дало можливість визначити необхідний розподіл ЗОР в залежності від теплового та силового навантаження зерен круга.

3. Розроблені більш обґрунтовані теплофізичні моделі, які в порівнянні з відомими раніше рішеннями, враховують обмеженість джерела тепла по ширині, повздовжнє переміщення джерела і його вплив на нагрів заготовки, нерівномірний розподіл тепловіддачі по поверхні заготовки поза джерелом тепла, відмінність інтенсивності тепловіддачі в джерелі і поза ним. Сформульовано наукове положення про превалюючий вплив фізико-хімічної дії ЗОР над її охолоджувальною дією на поверхню круга і заготовки в зоні контакту на зниження температури шліфування.

4. Визначено основний принцип стабілізації теплового режиму шліфування, згідно з яким гідрравлічні параметри повинні точно відповідати інтенсивності знімання матеріалу. Режим теплообміну, який встановлюється при шліфуванні, окрім відомих параметрів (режим обробки, фізико-хімічні властивості ЗОР і умови її подачі, схема шліфування, габарити заготовки) визначається координатою точки, в якій здійснюється теплообмін. Встановлено, що в умовах швидкісного шліфування при одних і тих же витратах потужності варіювання тиском з метою збільшення коефіцієнту тепловіддачі є ефективнішим, ніж варіювання витратою ЗОР. Запропоновані залежності для розрахунку локальних значень коефіцієнту тепловіддачі.

5. Знайшла подальший розвиток класифікація і проведений аналіз сил, що виникають у наслідок дії ЗОР, встановлені кількісні співвідношення між ними. Гідродинамічна сила, що виникає в межах дуги контакту, в 10 і більше разів перевищує гідродинамічну силу, що діє унаслідок виникнення гідродинамічного клину. Одержана розрахункова формула для визначення складових сили гідродинамічної дії струменю ЗОР на поверхню заготовки з урахуванням зносу шліфувального круга.

6. Теоретично обґрунтована й підтверджена модельними і експериментальними дослідженнями визначальна роль гідрравлічних параметрів ЗОР в ефективності шліфування. Доказано, що гідрравлічні параметри подачі ЗОР визначають параметри продуктивності шліфування (особливо швидкісного) і якості одержуваної поверхні. Для поліпшення умов формування макропрофілю в поздовжньому перетині запропоновано використовувати енергію подачі ЗОР. При цьому похибка форми профілю в поздовжньому перетині може бути знижена в 1,3 і більше разів.

7. Запропонована, обґрунтована і застосована методика дослідження поведінки ЗОР в зоні контакту. Встановлено, що величина питомої корисної витрати подачі ЗОР значною мірою залежить від параметрів струменя, режиму обробки і орієнтації сопла подачі ЗОР. На режимах остаточного шліфування величина питомої корисної витрати складає 16% від величини

питомої витрати ЗОР (при кутовому розташуванні сопла). Зміна орієнтації сопла може зменшити питому корисну витрату від 10 (при прямому розташуванні сопла) до 40% (при кутовому розташуванні сопла). Збільшення врізної подачі з 0,05 до 0,1 мм/хв зменшує питому корисну витрату в 3-4 рази, не дивлячись на збільшення тиску подачі ЗОР в 6-7 разів.

8. Для оцінки технологічної ефективності ЗОР введені нові енергетичні критерії: коефіцієнт проникаючої здатності і ККД способу подачі ЗОР. Запропоновані методи зниження енергоємності шляхом максимального зменшення витрати подачі ЗОР при шліфуванні. Проведена оцінка втрат потужності, пов'язаних з обертанням шліфувального круга і розпилюванням ЗОР, і намічені шляхи зниження енергоємності подачі ЗОР. Встановлено, що в умовах остаточного шліфування втрати потужності на розпилювання сумірні з ефективною потужністю шліфування і потужністю, витраченою на тертя в підшипниках шпинделя шліфувального круга. Створена математична модель процесу подачі ЗОР при плоскому остаточному шліфуванні, що дозволяє підбором геометричних параметрів техніки подачі ЗОР мінімізувати енерговитрати.

9. Сформульовано нові принципи конструювання техніки подачі ЗОР в зону контакту, які враховують більшість специфічних особливостей, що виникають при шліфуванні конкретної заготовки, забезпечують сприятливі умови попадання рідини в зону контакту і тим самим гарантують її активну участь в процесі різання. На основі цих принципів розроблено комплекс способів та засобів подачі ЗОР й технологічні регламенти величин витрати і тиску подачі ЗОР при повздовжньому шліфуванні.

10. Запропоновано, обґрунтовано і застосовано методологію підтримки ріжучої здатності шліфувального круга шляхом його гідроочищення струменями високого тиску. Визначені області раціонального застосування гідроочищення. Найбільший ефект від її використання полягає в підвищенні стійкості круга за критерієм появи термодфектів на обробленій поверхні. При цьому стійкість може бути підвищена в 2 і більше разів (особливо при шліфуванні торцем круга з плечевою подачею). Розроблена нова техніка гідроочищення шліфувального круга і проведений вибір її раціональних параметрів.

11. Підготовлена база нормування чистоти ЗОР за параметром глибини структурно-зміненого шару матеріалів різних груп оброблюваності. З урахуванням отриманих даних проводиться підбір і розробка нової техніки очищення ЗОР.

12. Запропоновано методологію створення і використання систем застосування ЗОР, а також вибору альтернативних варіантів технологічних процесів шліфування із застосуванням ЗОР. На базі проведених досліджень розроблені практичні рекомендації, які дозволяють переважаючими засобами застосування ЗОР, розв'язувати комплексну задачу забезпечення технологічних параметрів шліфування матеріалів різної оброблюваності. Впровадження результатів роботи у виробництві дозволило одержати річний економічний ефект 209,6 тис.грн.

Список опублікованих праць за темою дисертації

1. Степанов М.С., Гришин А.М., Яковлева Л.К. Оценка потерь мощности при подаче СОЖ в зону шлифования // Резание и инструмент в технологических системах. - Харьков: ХГПУ, 1997. - Вып. 51. - С. 214 - 219. Здобувачем одержані залежності для визначення втрат потужності, які пов'язані з розпилюванням СОЖ і тертям об шліфувальний круг при її пліні.

2. Степанов М.С. Нормирование чистоты СОЖ по критериям качества поверхностного слоя шлифованных деталей. // Резание и инструмент в технологических системах. - Харьков: ХГПУ, 1998. - Вып.52. - С.195-199.

3. Степанов М.С. Обобщенная оценка эффективности действия СОЖ при шлифовании. // Резание и инструмент в технологических системах. - Харьков: ХГПУ, 2000. - Вып. 56. - С. 145 - 149.

4. Степанов М.С., Ходаков Л.В. Очистка СОЖ при шлифовании алюминиевых сплавов. // Труды Одесск. политех. ин-та. - Одесса, 2001. - Вып. 5 - С.47 - 50. Здобувачем запропонована методика оцінки якості очищення СОЖ.

5. Степанов М.С. Определение эффективности способа подачи СОЖ в зону шлифования по энергетическим критериям. // Интегровані технології та енергозбереження. - Харків: НТУ "ХПІ", 2001. - № 3. - С. 98 –101.
6. Степанов М.С. Управление параметрами подачи СОЖ в цикле врезного шлифования. // Резание и инструмент в технологических системах. - Харьков: ХГПУ, 2001. - Вып. 59. - С. 179 - 183.
7. Степанов М.С. Математическое описание площади канала, образующегося при контакте шлифовального круга и заготовки. // Вісник інженерної академії України. - Київ, 2001, - Вип.3. - С. 199 - 203.
8. Степанов М.С. Определение влияния гидравлических параметров подачи СОЖ на коэффициент теплоотдачи в зоне резания при шлифовании. // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". - Харків: НТУ "ХПІ", 2001. - Вип. 10. - С. 168 - 172.
9. Степанов М.С. Нормативные значения давления и расхода подачи СОЖ на операциях продольного абразивного шлифования. // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". - Харків: НТУ "ХПІ", 2001. - Вип. 11. - С. 136 - 139.
10. Степанов М.С., Калиба Е.Г. Технологическая эффективность гидроочистки круга при шлифовании. // Резание и инструмент в технологических системах. - Харьков: НТУ "ХПИ", 2002. - Вып.63. - С. 150 - 156. Здобувачем запропонована методика визначення технологічної ефективності гідроочищення круга.
11. Степанов М.С. Закономерности изменения кинематических параметров шлифования и давления подачи СОЖ при импульсном воздействии струи на поверхность заготовки. // Резание и инструмент в технологических системах. - Харьков: НТУ "ХПИ", 2002. - Вып. 62. - С. 114 - 118.
12. Степанов М.С. Калиба Е.Г, Повышение эффективности шлифования коленчатых валов путем рационального использования смазочно-охлаждающих технологических средств. // Високі технології в машинобудуванні. - Харків: НТУ "ХПІ", 2002, - Вип. 1. - С. 364 - 369. Здобувачем отримана залежність для управління витратою ЗОР.
13. Степанов М.С., Ковязин В.И. Исследование влияния загрязненности СОЖ на шероховатость поверхности при шлифовании штоков гидравлических цилиндров. // Вісник ХДТУСГ. „Підвищення надійності відновлюємих деталей машин”. - Харків: ХДТУСГ, 2002. - Вип. 10. - С. 215 - 218. Здобувачем запропоновано методику експериментальних досліджень.
14. Степанов М.С., Коваленко О.Л. Рациональный выбор припуска при шлифовании с применением СОЖ. // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". - Харків: НТУ "ХПІ", 2002. - Вип. 9, т. 11. - С. 79 - 82. Здобувачем запропоновано управління енергоємністю шліфування шляхом максимального зменшення подачі ЗОР на різних етапах циклу обробки.
15. Степанов М.С. Теплообмін при шліфуванні з застосуванням ЗОР // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". - Харків: НТУ "ХПІ", 2002. - Вип. 19. - С. 62 - 67 .
16. Степанов М.С., Борзиловский А.В. Определение силы резания и закономерностей распределения СОЖ в зоне контакта при круглом шлифовании с продольной подачей. // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". - Харків: НТУ "ХПІ", 2002. - Вип. 7, т. 2. - С. 59 - 63. Здобувачем запропоновано методику експериментального визначення сили різання.
17. Степанов М.С., Удовиков А.Н. Энергетический анализ действия струи СОЖ на поверхность шлифовального круга. // Интегровані технології та енергозбереження. - Харків: НТУ "ХПІ", 2002. - №1. - С. 106 – 109. Здобувачем виконано чисельне визначення енергетичних показників струменю ЗОР.
18. Степанов М.С. Подача СОЖ при скоростном прерывистом шлифовании. // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". - Харків: НТУ "ХПІ", 2002. - Вип. 6. - С. 241 - 244.

19. Степанов М.С. Экономическое обоснование выбора системы применения СОЖ при шлифовании. // Вісник ХДТУСГ. "Підвищення надійності відновлюємих деталей машин". - Харків: ХДТУСГ, 2003. - Вип.18. - С. 39 - 43.
20. Степанов М.С. Анализ действия сил при шлифовании с применением СОЖ. // Резание и инструмент в технологических системах. - Харьков: НТУ "ХПИ", 2003. - Вып. 65. - С. 157 - 165.
21. Степанов М.С. Влияние режимов шлифования на удельный полезный расход СОЖ через зону контакта. // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". - Харків: НТУ "ХПИ", 2003. - Вип. 9, т. 1. - С. 71 -76.
22. Степанов М.С., Пермяков А.А. Влияние ориентации сопла подачи СОЖ на её полезный расход через зону контакта. // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. - Донецк, 2004. - Вып. 27. - С. 233 - 238. Здобувачем виконано розрахунок корисної витрати ЗОР для різних умов її подачі.
23. Сизый Ю.А., Степанов М.С. Математическое моделирование температурного поля в шлифуемой заготовке периферией круга. // Восточно-европейский журнал передовых технологий. - Харьков, 2004. - №2. - С. 52-63. Здобувачем визначені значення кінематичних параметрів, критерію Пеклі і коефіцієнту тепловіддачі для типових режимів шліфування.
24. Степанов М.С. Управление параметрами точности продольного шлифования воздействием СОЖ на шлифовальный круг. // Вісник ХДТУСГ. "Технічний сервіс АПК, техніка та технології у сільськогосподарському машинобудуванні". - Харків: ХДТУСГ, 2004. - Вип. 26. - С. 143 - 149.
25. Сизый Ю.А., Степанов М.С. Тепловой баланс процесса шлифования. // Резание и инструмент в технологических системах. - Харьков: НТУ "ХПИ", 2004. - Вып. 66. - С. 177 - 190. Здобувач виконав аналіз розподілу теплового потоку в зоні шліфування для різних умов шліфування.
26. Тимофеев Ю.В., Сизый Ю.А., Степанов М.С. Обеспечение технологических параметров шлифования рациональным выбором средства применения СОЖ. // Восточно-европейский журнал передовых технологий. - Харьков, 2005. - №1. - С. 48 - 51. Здобувач запропонував інформацію для банку даних по забезпеченню технологічних параметрів при обробці деталей різних класів.
27. А.С.№1803194 СССР МКИ³ В04С 3/00. Устройство для подачи и очистки жидкостей / М.С.Степанов, А.В. Чекмасов, А.А. Юдин, В.Н. Филиппов. (СССР)-4813418/26. Заявлено 13.04.90. опубл. 23.03.93. Бюл. №11. - 4с. Здобувач запропонував тарілчасті перфоровані перегородки.
28. Деклараційний патент України на винахід №43691 В24В МКл⁷ 55/02 "Пристрій для кінцевої, з використанням змащувально-охолоджувальної рідини, обробки внутрішніх циліндричних поверхонь" / М.С. Степанов, О.Л. Коваленко, Д.В. Борисов, Д.Б. Мішустін, Р.В. Морозов, - 2001053216. Опубл. 17.12.2001. Бюл. №11. Здобувач запропонував збірний шліфувальний круг, в пазах якого, встановлені пластини.
29. Деклараційний патент України на винахід №46497 В24В МКл⁷ 55/02 "Пристрій для подачі змащувально-охолоджувальної рідини під час шліфування довгомірних заготовок" / М.С. Степанов, А.М. Онищенко, Є.О. Шевченко, - 2001075362. Опубл. 15.05.2002. Бюл. №5. Здобувач запропонував підтримуючий елемент у вигляді втулки, на внутрішній поверхні якої виконані гвинтові канавки.
30. Деклараційний патент України на винахід № 49687 В01Д МКл⁷ 25/38 "Пристрій для зливу рідини із станини шліфувального верстата" / М.С. Степанов, О.Л. Коваленко, Л.В. Ходаков, А.Н.Удовиков, Т.О. Іщенко - Опубл. 16.09.2002. Бюл. №9. Здобувач запропонував виконати вертикальні перегородки і розмістити їх на різній висоті.
31. Степанов М.С., Ходаков Л.В. Оценка газосодержания СОЖ при шлифовании. // Смазочно-охлаждающие жидкости в процессах абразивной обработки. - Ульяновск. 1992. С. 16-22. Здобувачем запропонована методика експериментального визначення газозмісту.
32. Степанов М.С. СОЖ для шлифования. // Мир техники и технологий. - Харьков, 2003. - №2 - С. 14 - 16.
33. Степанов М.С. Техника очистки СОЖ при шлифовании. // Мир техники и технологий. - Харьков, 2003. - № 6.- С. 30 - 31.

34. Степанов М.С., Головащенко Г.В., Дубровский С.Б. Оптимизация условий подачи СОЖ при шлифовании. // Сборник научных трудов ХГПУ “Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье”. - Харьков: ХГПУ, 1997. - Вып. 6. - С. 377-379. Здобувачем запропоновано модель розрахунку діаметру сопла подачі ЗОР.

35. Мусиенко М.С., Степанов М.С. Обеспечение эффективности подачи СОЖ при шлифовании заготовок деталей гидроприводов. // Тез. докл. международн. научн.-техн. конференции “Гидравлические машины, гидропривод и гидропневмоавтоматика”. – Москва: МЭИ, 1998. – С. 25. Здобувач запропонував оцінювати техніку подачі ЗОР з урахуванням енерговитрат.

36. Степанов М.С., Сиренко Н.Н. Описание абразивного инструмента методами электрогидравлической аналогии. // Сборник научных трудов ХГПУ. “Информационные технологии: наука, техника, технология, образование”. - Харьков: ХГПУ, 1998. - Вып. 6.- С. 212 - 214. Здобувач запропонував для опису структури шліфувального круга і його пропускної спроможності використовувати метод електрогидравлічної аналогії.

37. Зорькин М.Е., Гавриков Д.В., Степанов М.С. Повышение эффективности гидроочистки шлифовального круга путем применения гидропривода. // Тез. докл. международн. научн.-техн. конференции “Гидравлические машины, гидропривод и гидропневмоавтоматика”. – Москва: МЭИ, 2000. – С. 18. Здобувач запропонував використовувати мультиплікатор тиску, що працює від гідроприводу верстата.

38. Степанов М.С. Подача СОЖ при шлифовании длинномерных заготовок с наружной винтовой поверхностью. // Тез. докл. 4-й международн. научн.-техн. конференции “Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве”. - Харьков. -2001. – С. 165 - 168.

39. Степанов М.С. Принципы конструирования техники подачи СОЖ при шлифовании. // Тез. докл. 6-й международн. научн.-техн. конференции “Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве”. - Харьков. - 2002. – С. 34 - 36.

40. Степанов М.С., Пермяков А.А., Ходаков Л.Л. Исследование загрязнения воздуха аэрозолем и летучими продуктами деструкции СОЖ при шлифовании. // Сборник статей по материалам 10-й международной научно-методической конференции “Технологии XXI века”. - Сумы, 2003. - С. 143 - 149. Здобувачем запропоновано методіку експериментальних досліджень.

41. Степанов М.С., Черныш В.Н., Дунаевский В.А. Описание шлифовальных кругов с помощью алгебры Буля. // Доклады международной научно-практической конференции. Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье. - Харьков: НТУ “ХПИ”, 2003. - С. 181. Здобувач запропонував для опису пропускної спроможності шліфувального круга використовувати елементи алгебри Буля.

42. Stepanov M.S. Parameters control of an exactitude of longitudinal grinding by influence grinding fluid on perform. // 2nd International Conference “Research and Education”. Results of the SCIENTIFIC COOPERATION between the National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute” and University of Miskolc. – Miskolc. 2004. p145-151.

43. Степанов М.С., Скворчевский А.Е. Определение силы действия струи СОЖ высокого давления при гидроочистке шлифовального круга. // Доклады международной научно-практической конференции “Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье”. - Харьков: НТУ “ХПИ”, 2004. - С. 152. Здобувачем запропоновано модель розрахунку сили дії струменю ЗОР на поверхню шліфувального круга.

44. Сизый Ю.А., Степанов М.С. Определение полезного расхода СОЖ при финишной обработке рабочей поверхности гильз гидроцилиндров. // Сборник статей международной научно-технической конференции “Актуальные вопросы промышленности и прикладных наук”. – Ульяновск: УлГТУ, - 2004. - С. 211 – 214. Здобувачем запропоновано модель розрахунку корисної витрати ЗОР.

45. Сизый Ю.А., Степанов М.С. Влияние давления подачи СОЖ на нагрев заготовки при врезном шлифовании. // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції “Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я”. - Харків: НТУ “ХПИ”, 2005. - С. 210-214. Здобувачем запропоновано модель розрахунку сили різання.

Анотації

Степанов М.С. Наукові основи використання змащувально-охолоджувальних рідин для підвищення ефективності технологічних систем шліфування. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за фахом 05.02.08 - технологія машинобудування. - Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, 2005.

У дисертації вирішена важлива наукова проблема забезпечення вихідних параметрів шліфування шляхом раціонального енергозберігаючого застосування ЗОР, що дозволило вирішити завдання підвищення продуктивності при збереженні якості обробленої поверхні. Запропоновано методологію створення і використання систем застосування ЗОР при шліфуванні, яка базується на комплексному аналізі чинників впливу ЗОР на вихідні технологічні параметри обробки. Встановлено, що для оцінки витрати ЗОР, що потрапляє в зону контакту через пори, для опису шліфувальних кругів на керамічних зв'язках можна використовувати електрогідрравлічну аналогію, а в умовах засалювання - методи контактних схем.

Розроблені нові теплофізичні моделі, які вперше враховують відмінність інтенсивності тепловіддачі в джерелі і поза ним та інші фактори. Запропоновано принцип стабілізації теплового режиму шліфування, згідно з яким гідрравлічні параметри подачі ЗОР повинні відповідати інтенсивності знімання матеріалу. Вперше введені нові енергетичні критерії: коефіцієнт проникаючої здатності і ККД способу подачі ЗОР. Запропоновано методи зниження енергоємності шляхом максимального зменшення витрати подачі ЗОР. Обґрунтована методологія підтримки ріжучої здатності шліфувального круга шляхом його гідроочищення струменями високого тиску. Розроблені практичні рекомендації, які дозволяють вирішувати комплексну задачу забезпечення технологічних параметрів шліфування матеріалів різної оброблюваності переважними засобами застосування ЗОР.

Ключові слова: змащувально-охолоджувальна рідина (ЗОР), шліфування, шліфувальний круг, заготовка, витрата, тиск, подача ЗОР, гідроочищення, зона контакту.

Степанов М.С. Научные основы использования смазочно-охлаждающих жидкостей для повышения эффективности технологических систем шлифования. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.02.08 – технология машиностроения. – Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", Харьков, 2005.

В диссертации решена важная научная проблема обеспечения выходных параметров шлифования путем рационального энергосберегающего применения СОЖ, что позволило решить задачу повышения производительности при сохранении качества обработанной поверхности.

Предложена методология создания и использования систем применения СОЖ при шлифовании, которая базируется на комплексном анализе факторов влияния СОЖ на выходные технологические параметры обработки и решающая проблему управления ими за счет интенсификации действия СОЖ.

Впервые предложены методы описания структуры абразивных кругов при взаимодействии их с СОЖ. Установлено, что для оценки расхода СОЖ, попадающей в зону контакта через поры, для описания шлифовальных кругов на керамических связках можно использовать электрогидравлическую аналогию, а в условиях засаливания - методы контактных схем.

Разработаны новые теплофизические модели, которые впервые (по сравнению с известными ранее решениями) учитывают ограниченность источника по ширине, продольное перемещение источника и его влияние на нагрев заготовки, неравномерное распределение теплоотдачи по поверхности заготовки вне источника тепла, различие интенсивности теплоотдачи в источнике и вне него.

Предложена и обоснована методика исследования поведения СОЖ в зоне контакта. Установлено, что величина полезного расхода подачи СОЖ в значительной мере зависит от параметров струи, режима обработки и ориентации сопла подачи СОЖ.

Предложен основной принцип стабилизации теплового режима шлифования, согласно которому гидравлические параметры подачи СОЖ должны точно соответствовать интенсивности съема. Предложены новые принципы конструирования техники подачи СОЖ в зону контакта при шлифовании.

Впервые введены новые энергетические критерии: коэффициент проникающей способности и КПД способа подачи СОЖ.

Предложены методы снижения энергоемкости путем максимального уменьшения расхода подачи СОЖ при шлифовании. Проведена оценка потерь мощности, связанных с вращением шлифовального круга и распылением СОЖ, и намечены пути снижения энергоемкости подачи СОЖ. Установлено, что в условиях окончательного шлифования потери мощности на распыление соизмеримы с эффективной мощностью шлифования и мощностью, затраченной на трение в подшипниках шпинделя шлифовального круга.

Обоснована методология поддержания режущей способности шлифовального круга путем его гидроочистки струями высоких давлений. Установлены области рационального применения гидроочистки. Наибольший эффект от ее использования состоит в повышении стойкости круга по критерию появления термодефектов на обработанной поверхности. При этом стойкость может быть повышена в 2 и более раз (особенно при шлифовании торцом круга с плечевой подачей).

Подготовлена база нормирования чистоты СОЖ по параметру глубины структурно-измененного слоя материалов различных групп обрабатываемости. На базе комплексного теоретико-экспериментального исследования разработана методология выбора альтернативных вариантов шлифования с применением СОЖ. Разработаны практические рекомендации, которые позволяют на их основе решать комплексную задачу обеспечения технологических параметров шлифования материалов различной обрабатываемости предпочтительными средствами применения СОЖ.

Ключевые слова: смазочно-охлаждающая жидкость (СОЖ), шлифование, шлифовальный круг, заготовка, расход, давление, подача СОЖ, гидроочистка, зона контакта.

M.S. Stepanov. Scientific basics of the use of cutting fluids for the enhancement of efficiency of the technological grinding systems. -Manuscript.

The thesis of the competitor for the scientific degree of the doctor of technical sciences in specialty of 05.02.08. - Technology of mechanical engineering. National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkov. 2005.

This dissertation resolves the most important scientific problem related to ensuring the output grinding parameters through the rational energy-saving use of cutting fluids that allowed for the increase of productivity with maintaining the quality of the ground surface.

The methods of description of a structure of abrasive disks during their interaction with cutting fluid have been offered for the first time. The new thermophysical models that take into consideration the source width restriction, the source coplanar motion and its effect on the billet, as well as nonuniform distribution of heat emission on the billet surface outside the heat source and different heat emission intensity inside and outside the source have been developed for the first time.

The basic principle of stabilization of the thermal grinding conditions according to which the hydraulic cutting fluid supply parameters should precisely comply with the intensity of machining has been offered. The methodology of investigation of the opportunity of maintaining the cutting power of an abrasive disc through its hydrofming by the high pressure jets has been substantiated.

Key words: cutting fluid, grinding, abrasive disc, flow rate, pressure, cutting fluid supply, hydrofming, contact zone.