

**ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Мельникова Олена Павлівна

**УДК 621.92  
+ 621.434**

**ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ДВИГУНІВ  
ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ ЗА РАХУНОК УДОСКОНАЛЕННЯ ФІНІШНИХ  
АБРАЗИВНИХ СПОСОБІВ ОБРОБКИ**

Спеціальність 05.02.08 – Технологія машинобудування

**АВТОРЕФЕРАТ**

**дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук**

Донецьк – 2006

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на автотранспортному факультеті Автомобільно – дорожнього інституту Донецького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України

**Науковий консультант**

заслужений діяч науки і техніки  
РФ, доктор технічних наук, професор  
**Бабічев Анатолій Прокопович,**  
Донський державний технічний  
університет, кафедра „Технологія  
машинобудування”, м. Ростов–на–Дону, РФ

**Офіційні опоненти:**

доктор технічних наук, професор  
**Грабченко Анатолій Іванович,**  
Національний технічний університет  
„Харківський політехнічний інститут”,  
м. Харків, завідувач кафедри „Інтегровані  
технології у машинобудуванні” ім. М.Ф. Семка;

доктор технічних наук, професор  
**Петраков Юрій Володимирович,**  
Національний технічний університет  
України „КПІ”, м. Київ, завідувач  
кафедри „Технологія машинобудування”;

доктор технічних наук, професор  
**Калафатова Людмила Павлівна,**  
Донецький національний технічний  
університет, кафедра „Металорізальні  
верстати та інструменти”, м. Донецьк.

**Провідна організація:**

Відкрите акціонерне товариство „Мотор Січ” Міністерства  
промислової політики України, м. Запоріжжя.

Захист відбудеться “ 10 ” березня 2006 р. о 14 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д11.052.04 у Донецькому національному технічному університеті (ДонНТУ) за адресою: 83000, м. Донецьк, вул. Артема, 58, VI навч. корпус, ауд. 202.

Із дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Донецького національного технічного університету за адресою: 83000, м. Донецьк, вул. Артема, 58, II навч. корпус.

Автореферат розісланий “ 9 ” лютого 2006 р.

Вчений секретар спеціалізованої  
вченої ради Д 11.052.04  
к.т.н., доцент

Т.Г. Івченко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Автомобілі, що випускаються вітчизняною промисловістю, не завжди мають необхідні експлуатаційні характеристики деталей і цілих вузлів. До таких вузлів, що визначають надійність роботи автомобіля, належать двигуни внутрішнього згоряння (ДВЗ). Тому задача підвищення технічного ресурсу автомобільних двигунів є дуже актуальною з огляду на вимоги підвищення ресурсу автомобілів у загалі. Аналіз свідчить, що кількість деталей, які лімітують термін служби технічних засобів до капітального ремонту (КР), не перевищує декількох десятків найменувань. Задача полягає в тому, щоб підвищити довговічність цих деталей до рівня тих, які мають найвищу працездатність. Цього можна досягти з мінімальними витратами за рахунок удосконалення технології фінішної обробки, що на даному етапі є важливою як **науковою, так і технологічною проблемою.**

Вивчення стану питання і літературних джерел показали, що цю проблему можна вирішувати через удосконалення методів обробки, до яких належать хонінгування, доводка та вібраційна обробка. Реальним резервом підвищення ефективності абразивної обробки є створення та раціональне використання нових абразивних і мастильно-охолоджувальних технологічних середовищ (МОТС) на основі компонентів, які містять кремній.

У зв'язку з цим розвиток теоретичних основ фінішних методів обробки, розкриття закономірностей знімання металу з урахуванням виду і властивостей інструментів і МОТС, утворення системи МПД (“МОТС + продукти диспергування”) і формування поверхневого шару деталей, створення екологічно чистих інструментів, МОТС і паст, а також використання нетрадиційних видів абразивів і сполучних матеріалів є **актуальною комплексною науково-технічною проблемою**, що має важливе народногосподарське значення. Вирішення даної проблеми дозволить підвищити продуктивність фінішних методів обробки, поліпшити умови праці та екологічний стан на промислових підприємствах, знизити собівартість виготовлення абразивного інструменту, МОТС і паст, а також підвищити експлуатаційні властивості деталей ДВЗ.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконана в межах наукової тематики кафедри „Ремонт автомобілів і дорожніх машин” Автомобільно – дорожнього інституту Донецького національного технічного університету і базується на науковій держбюджетній темі: „Теоретичні основи створення мастильних силікатних матеріалів широкого функціонального призначення” (№ ДР 0193U033330), яка відповідає напрямкові „Інші междисциплінарні та міжгалузеві проблеми науково – технічного розвитку”.

**Мета роботи і задачі досліджень.** Метою роботи є поліпшення експлуатаційних характеристик деталей ДВЗ через удосконалення технологічних процесів фінішної абразивної обробки на основі використання раціональних видів абразивних і мастильно-охолоджувальних середовищ, які забезпечують підвищення продуктивності обробки та довговічності деталей.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити такі **задачі**:

1. Провести аналіз стану проблеми і причин передчасного виходу з ладу деяких деталей ДВЗ, визначити шляхи підвищення їх експлуатаційних властивостей з використанням технологічних методів фінішної обробки та обрати найбільш ефективні з них.
2. Провести дослідження для визначення впливу властивостей абразивних і мастильно-охолоджувальних середовищ на продуктивність процесу обробки, шорсткість поверхні та стан матеріалу поверхневого шару і, як наслідок, – на експлуатаційні властивості оброблених деталей.
3. Дослідити з використанням математичного моделювання процес знімання матеріалу деталі при фінішних методах обробки з урахуванням впливу властивостей МОТС.
4. Вивчити властивості та визначити раціональний склад абразивних і мастильно-охолоджувальних середовищ на основі теоретичних досліджень контактної взаємодії пари „інструмент – деталь” із урахуванням руху МОТС між контактними поверхнями.

5. Розробити математичні моделі формування шорсткості поверхні деталей, які враховують вплив складу і властивостей запропонованих МОТС та концентрацію абразиву в інструменті при фінішних методах обробки для прогнозування досягнення потрібного рівня якості обробки.

6. Дати теоретично – експериментальне обґрунтування механізму формування поверхневого шару виробів у процесі фінішної обробки за наявності абразивних і мастильно–охолоджувальних технологічних середовищ, які містять кремній, та оцінити їх вплив на довговічність деталей.

7. Виконати дослідження експлуатаційних властивостей деталей, оброблених з використанням нових складів абразивних і мастильно–охолоджувальних технологічних середовищ, і розробити практичні рекомендації щодо впровадження результатів роботи.

*Об'єкт досліджень* – технологія абразивної фінішної обробки деталей ДВЗ та її вплив на їх експлуатаційні характеристики.

*Предмет досліджень* – функціональні зв'язки між властивостями абразивних і мастильно–охолоджувальних технологічних середовищ та якістю поверхонь, продуктивністю обробки і довговічністю деталей.

*Методи досліджень.* Методологічною основою роботи є загальний системний підхід до вивчення й опису об'єкта і предмета досліджень, процесів, які протікають у зоні контакту інструмента і деталі при фінішній абразивній обробці, закономірностей формування шорсткості оброблюваної поверхні та поверхневого шару з урахуванням впливу вхідних технологічних параметрів.

Теоретичні дослідження базуються на основних законах і положеннях технології машинобудування, механіки твердого тіла, теорії різання та тертя, механіки рідини, фізико-хімічної механіки матеріалів. Основні наукові результати в роботі отримано теоретично і підтверджено експериментально.

Експериментальні дослідження проводилися на спеціально спроектованих лабораторних установках, хонінгувальних, плоскодовідних і вібраційних верстатах із використанням атестованих вимірювальних засобів. Оцінювання характеристик поверхневого шару, отриманого в результаті фінішної обробки, здійснено з допомогою сучасних приладів та устаткування. Математичне оброблювання результатів досліджень виконувалося з використанням прикладного програмного забезпечення (паketу MathCAD). Достовірність отриманих результатів підтверджено аналітичними моделями робочих процесів, експериментальною перевіркою та їх адекватністю, а також результатами виробничих випробувань і впроваджень.

Дослідження виконувалися в лабораторіях кафедри „Ремонт автомобілів і дорожніх машин” Автомобільно-дорожнього інституту Донецького національного технічного університету, у лабораторії „Вібротехнологія” кафедри „Технологія машинобудування” Донського державного технічного університету, у лабораторії „Електронна мікроскопія” Інституту механіки металополімерних систем Білорусії, у лабораторії „Загальна теорія тертя” Інституту машинознавства Академії наук РФ (м. Москва), на ЗАТ „Сантарм”, ВАТ „1-й Донецький АРЗ”, АТЗТ „Горлівський АРЗ”, ВАТ „Концерн Стирол” (м. Горлівка).

### **Наукова новизна отриманих результатів:**

Розроблено наукові основи підвищення якості та експлуатаційних властивостей деталей ДВЗ внаслідок удосконалення способів фінішної абразивної обробки з використанням властивостей нових абразивних та мастильно–охолоджувальних технологічних середовищ. На базі висунутих наукових положень:

1. Створено і розроблено методологію оцінки контактної взаємодії пари “інструмент – деталь”, яка вперше враховує особливості різних способів фінішної абразивної обробки і дозволяє аналітично визначити вплив складу і властивостей абразивних і мастильно–охолоджувальних середовищ на продуктивність технологічної системи.
2. Запропоновано спосіб абразивної обробки із застосуванням абразивних та мастильно–охолоджувальних технологічних середовищ із кремнієм, які забезпечують утворення

поверхневих плівок з модулем зсуву вищим за модуль зсуву оброблюваного матеріалу. Це приводить до формування дислокаційних структур наклепаного і зміцненого металу та підвищує експлуатаційні властивості деталей.

3. Отримано аналітичне розв'язання контактної задачі взаємодії двох поверхонь, розділених шаром "МОТС + продукти диспергування" (МПД), де вперше враховується вплив теплових ефектів одночасно на швидкість руху робочого середовища, а також на тиск і силу тертя в зоні пластичної деформації. Установлено, що із збільшенням тиску робочого середовища зростає шорсткість оброблюваної поверхні.

4. Розроблено нові принципи прогнозування і створено комплекс моделей, які дозволяють на стадії виготовлення обирати раціональний склад і технологію виготовлення абразивного інструменту, паст і МОТС, прогнозувати параметри формування шорсткості поверхні, зняття металу і термін оброблення для досягнення потрібної шорсткості в процесі фінішних методів обробки.

5. Теоретично обґрунтовано і експериментально підтверджено доцільність підвищення експлуатаційних властивостей поверхневого шару деталей ДВЗ в результаті фінішної обробки, яка базується на застосуванні абразивних і мастильно-охолоджувальних середовищ із кремнієм.

**Практичне значення отриманих результатів:** Запропоновано математичну модель, яка в умовах виробництва дозволяє за заданими параметрами шорсткості визначити кількісні значення компонентів абразивних та мастильно-охолоджувальних середовищ для низки методів обробки (хонінгування, доводки і віброобробки).

Запропоновано нові склади абразивного інструменту, паст і МОТС із поліпшеними екологічними характеристиками, надано практичні рекомендації щодо їх використання в промисловості, що забезпечує:

- підвищення продуктивності фінішних операцій обробки деталей ДВЗ на 10 – 15 %;
- поліпшення умов праці та екологічної ситуації під час абразивної обробки та виготовлення абразивного інструменту;
- унеможливлення виникнення небезпечних ситуацій внаслідок заміни пожежо- і вибухонебезпечних вуглеводневих сумішей на МОТС із водною основою;
- зниження собівартості виготовлення абразивних інструментів, паст і МОТС в тричі;
- підвищення довговічності деталей ДВЗ на 15 – 20 %.

**Особистий внесок автора в одержання наукових результатів.** Усі наукові результати отримані автором самостійно. Автор виконав наукові розробки в галузі технології машинобудування, пов'язані з вирішенням важливої науково-прикладної проблеми, а саме: підвищення експлуатаційних властивостей деталей ДВЗ за рахунок ефективності абразивної фінішної обробки, а також поліпшення умов праці та екологічної ситуації на промислових підприємствах. Постановку задач і обговорення наукових результатів виконано разом із науковим консультантом і частково із співавторами публікацій. Достовірність наукових результатів підтверджено великим обсягом експериментальних досліджень, виконаних із використанням сучасних методик, устаткування та апаратури.

**Апробація результатів дисертації.** Основні наукові результати дисертаційної роботи були повідомлені й обговорювалися на таких конференціях і семінарах: II міжнародній науково-технічній конференції „Застосування коливальних у технологіях. Розрахунок і проектування машин для реалізації технологій” (Вінниця, 5 – 7 вересня 1994); науково-технічній конференції „Ресурсозберігальні та енергозберігальні технології у машинобудуванні” (Одеса, 1994р.); VII Всеукраїнській науковій конференції „ОНС і раціональне використання природних ресурсів” (Донецьк, 15 – 17 травня 1997); III міжнародній науково-технічній конференції „Вібрації у техніці і технології” (Вінниця, Євпаторія, Полтава, 1998, 2004, 2005); Міжнародній науково-технічній конференції „Процеси абразивної обробки, абразивні інструменти і матеріали” Шліфабразив (Волзький, 1998, 2001); Міжнародній науково-технічній конференції „Машинобудування і техносфера на межі XXI століття” (Севастополь, ДонДТУ, 1998); Міжнародній науково-технічній конференції “Екологія промислових регіонів” (Горлівка – Донецьк, 30 – 31 березня 1999); Міжнародному науково-технічному семінарі „Високі технології у машинобудуванні” (Харків, 1999, 2004); Міжнародній науково-технічній конференції

„Питання вібраційної технології” (Ростов-н/Д, ДДТУ, 2000, 2001, 2002, 2003, 2004); Міжнародній науково-технічній конференції „Інженерія поверхні і реновація виробів” (Феодосія – Ялта – Київ, 2001, 2002); XXII міжнародній науково-практичній конференції „Композиційні матеріали в промисловості” (Ялта, 2002); Міжнародній науково-технічній конференції „Вібрація машин: вимір, зниження, захист” (Донецьк, ДонНТУ, 13 – 15 травня 2003); Міжнародній науково-технічній конференції „Теорія, технологія та устаткування для виробництва абразивного інструменту” (Челябінськ, ПУрДУ, 2003); III міжнародній науково-технічній конференції „Нові технології, методи обробки і зміцнення деталей енергетичних установок” (Запоріжжя – Алушта, 20 – 26 вересня 2004).

Дисертація доповідалася й одержала позитивну оцінку на розширених засіданнях міжкафедральних науково-технічних семінарів Донського державного технічного університету, м. Ростов – на –Дону, 2003р.; на кафедрі „Технологія машинобудування” і „Металорізальні верстати та інструменти” Донецького національного технічного університету (ДонНТУ), 2004р. та кафедрі „Технологія машинобудування” ДонНТУ, 2005р.; на науково-технічній раді управління головного технолога ВАТ „Мотор Січ” Міністерства промислової політики України, м. Запоріжжя, 2005р.; на кафедрі „Інтегровані технології у машинобудуванні” ім. М.Ф. Семка Національного технічного університету „Харківський політехнічний інститут”, м. Харків, 2005р.

**Публікації.** Основні положення дисертації та одержані автором результати досить повно відображені в 33 основних роботах, з яких у фахових виданнях 25, 4 патенти на винаходи, 3 тези доповідей на наукових конференціях та семінарах, одноосібні публікації – 22.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, 6 розділів, висновків і рекомендацій, 2 додатків. Повний обсяг роботи становить 419 сторінок, у тому числі 114 ілюстрацій до тексту, 5 ілюстрацій на 4 стор., 43 таблиці до тексту, 5 таблиць на 7 стор., 2 додатки на 39 стор., 316 використаних літературних джерел на 25 стор.

Автор висловлює глибоку подяку д.т.н., професору К.С. Ахвердієву за допомогу, надану при розробленні теоретичних питань. Автор також вдячний усім співробітникам кафедр „Металорізальні верстати та інструменти”, „Технологія машинобудування” (ДонНТУ), „Технологія машинобудування” Донського державного технічного університету (РФ), за значну науково – методичну допомогу при підготовці роботи.

## **ЗМІСТ РОБОТИ**

**У вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, викладено положення винесені здобувачем на захист, показано теоретичну і практичну цінність отриманих результатів досліджень, рівень реалізації і впровадження наукових розробок.

**У першому розділі – „Аналіз особливостей і технологічні можливості фінішних методів обробки”** – проведено аналіз досліджень ресурсу основних деталей автомобільних двигунів. Установлено, що різна довговічність (нерівномірність) деталей ДВЗ знижує його надійність, спричиняє необхідність частого ремонтування, підвищує вартість експлуатації і є складною проблемою, вирішування якої повинно ґрунтуватися на врахуванні великої кількості факторів.

Оптимальним варіантом є одночасне досягнення граничного зношування всіма деталями двигуна на необхідному рівні його довговічності. Так, у більшості випадків за нормальної експлуатації саме зношування деталей гільзопоршневої групи визначає постановку автомобільних двигунів на КР.

На основі узагальнення попередніх досліджень, виробничого досвіду підприємств була розглянута група деталей двигуна автомобіля ЗІЛ–130 з метою забезпечення їхньої однакової довговічності. Аналіз основних тенденцій розвитку сучасного двигунобудування показує, що вони тісно пов'язані з розвитком технологічних задач виготовлення їх складових і особливо деталей, ресурс яких не є кратним термінові служби базової деталі, наприклад, блоку циліндрів двигуна. Довговічність ДВЗ багато в чому залежить від якості виготовлення, стану і фізико-механічних властивостей тонких поверхневих шарів деталей пар тертя. Технологічні методи обробки деталей ДВЗ є найбільш ефективними у вирішенні проблеми забезпечення необхідної якості та експлуатаційних властивостей виробів. Вони дозволяють підвищити точність виготовлення деталей і складання вузлів машин, а також забезпечити оптимальний (для певних умов експлуатації) стан поверхневого шару.

Після аналізу і вибору деталей ДВЗ встановлено найбільш доцільні методи їх обробки, які відповідають вимогам до якості поверхневого шару. Для обробки циліндричних поверхонь, характерних для таких деталей, як гільзи циліндрів і нижні голівки шатуна, найбільш прийнятним методом є хонінгування, що забезпечує відповідні властивості й якість поверхневого шару. При обробці деталей типу „клапан”, „сідло клапана” єдиним способом, що забезпечує необхідну якість сполучуваних поверхонь, є доводка. Для зняття задирок і затуплення гострих кромки після складного лиття доцільно використовувати методи обробки вільним абразивом.

Здійснено аналіз робіт із хонінгування, доводки і віброобробки з використанням різних видів абразивних і мастильно–охолоджувальних технологічних середовищ, що дозволило визначити шляхи їх удосконалення. Внаслідок цього встановлено, що показники фінішних операцій: продуктивність, стійкість абразивного інструменту і шорсткість обробленої поверхні значною мірою залежать від ефективності застосованих середовищ.

Проте до сьогодні у технічній літературі відсутня узагальнена щодо фінішної обробки модель взаємодії абразивного інструменту та деталі, яка б враховувала вплив складу і властивостей абразивних і мастильно–охолоджувальних технологічних середовищ на продуктивність технологічної системи та якість поверхонь деталей.

Сучасні уявлення про вплив абразивних і мастильно–охолоджувальних середовищ на процеси обробки базуються на працях А.П. Бабічева, А.П. Гавриша, А.І. Грабченка, Л.П. Калафатової, А.О. Маталіна, П.Г. Матюхи, П.Н. Орлова, Ю.В. Петракова, О.Є. Проволоцького, Л.В. Худобіна, І.Х. Чеповецького, Є.І. Фрагіна, П.І. Ящерицина та інших учених. Проте аналіз праць дозволяє зробити висновок про ще недостатнє опрацювання в них теоретичних основ і механізмів контактної взаємодії абразивних інструментів з оброблюваною поверхнею за наявності МОТС і паст. Вирішення проблеми можливо у разі використанні системного підходу, який врахує механізми зняття і диспергування оброблюваного матеріалу інструментом, взаємозв'язок і взаємовплив механічних, фізико–хімічних та інших процесів, що протікають за наявності абразивних і мастильно–охолоджувальних середовищ у зоні оброблення.

**У другому розділі – „Методологія роботи та методи досліджень”** – викладено загальну методологію роботи, подано структурну схему досліджень (рис.1).

Відповідно до сформульованих наукових задач запропоновано методики теоретичних та експериментальних досліджень. Наведено технічні характеристики і кінематичні схеми розробленої лабораторної установки, що реалізує процес плоского хонінгування, пристрою для притирання клапанів, установки для визначення реологічних характеристик систем МПД в умовах плоского зсуву, а також стандартних машин тертя і промислового устаткування, використовуюваного для проведення експериментів, подано опис зразків, виготовлених із матеріалів, які використовуються для деталей ДВС; абразивного інструменту, характерного для кожного способу обробки (хонінгувальні бруски, гранули для ВіО, доводильні паст); МОТС, с добавками кремнієвих сполук та без них.

Рис. 1 Структурна схема досліджень

Стабілізувальна здатність присадок, уведених до МОТС, оцінювалася за методом об'єму седиментаційних осадів дисперсної фази у досліджуваному середовищі. Вплив концентрації і складу поверхневоактивних речовин (ПАР) в МОТС на в'язкість системи МПД оцінювалася на основі віскозиметричних досліджень, виконаних на ротаційному віскозиметрі „Реотест–2” і спеціально розробленій експериментальній установці.

При розробленні методики підбору раціональних концентрацій компонентів у складі абразивного інструменту, паст і МОТС був застосований метод повнофакторного експерименту для одержання інтерполяційної формули, яка описує залежність цільової функції (шорсткість поверхні) од факторів (концентрації компонентів у складі). Для МОТС створено методику визначення корозійної агресивності рідини. За інтегральний показник корозії брали ступінь ураження поверхні відповідно до ДСТУ 9.905–82.

Зняття металу визначалося на аналітичних демпферних вагах моделі ВЛА–100 і ВЛА – 200 з точністю виміру до 0,2 мг.

Працездатність поверхонь зразків, оброблених із застосуванням створених видів абразивних і мастильно–охолоджувальних технологічних середовищ, оцінювалася на стаціонарних машинах тертя при проведенні триботехнічних випробувань. Дослідження закономірностей процесів тертя і зношування проводилися за методом мікроструктурного аналізу поверхневих шарів металу з допомогою оптичного мікроскопа МИМ–8, металографічного мікроскопа „Неофот–21”, електронної мікроскопії (мікроскоп ISM–50A), рентгенівського мікроаналізатора MAP–1 і “Сameбах mero”. Змінення шорсткості поверхонь здійснювалося з допомогою подвійного мікроскопа МИС–11, аналіз змінень шорсткості поверхні проводився з допомогою апаратного комплексу JSM – EOM.

Для оцінювання характеристик субзеренної дислокаційної структури оброблюваного матеріалу застосовувався метод зворотного рентгенівського мікропучка. Використовувалася установка АРС–4 з мікрофокусною трубкою БСМ–1, величина фокуса якої становила 50 мкм. Зйомка проводилася в нефільтрованому Fe–випромінюванні. Проаналізовано дифракційну лінію (220)  $K\alpha$ . У роботі подано розроблену методику визначення експлуатаційних показників абразивних інструментів та показників довговічності деталей. Працездатність поверхонь після оброблення на різних видах абразивних та мастильно–охолоджувальних технологічних середовищах оцінювалася за триботехнічними характеристиками пари тертя при роботі в середовищі мастил на торцевій машині тертя (ДСТ 9490–75). Оброблення експериментальних даних і обчислення параметрів обробки виконувалися на EOM.

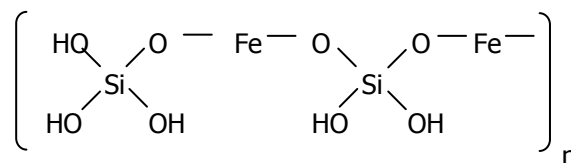
**Третій розділ – „Моделювання впливу робочого середовища на утворення поверхневого шару деталі”** – присвячено дослідженню механіко–хімічних процесів, які протікають у зоні контакту “інструмент – деталь” із урахуванням впливу властивостей МОТС і паст у разі фінішних методів обробки.

Проведені теоретичні дослідження дозволили описати процес взаємодії інструмента з оброблюваною деталлю за наявності абразивних і мастильно–охолоджувальних технологічних середовищ, які містять кремній. Установлено, що ефективність обробки зумовлена наявністю в складі середовищ гелеподібної структури на основі рідкого скла (РС), обробленого активувальним агентом. Оксид кремнію, який утвориться під час такої обробки, і карбонат кальцію “вбудовуються” у проміжки пор силікатних структур, діючи як полірувальні агенти. Експериментальними дослідженнями структурування МОТС встановлено, що змінення в'язкості відбувається за законом

$$\frac{\mu}{\mu_0} = 3,4 \cdot \tau^{1,52}, \quad (1)$$

де  $\mu_0, \mu$  – динамічна в'язкість рідкого скла до і після введення активатора;  $\tau$  – час після введення активатора, хв.

Таким чином, механізм мастильної дії абразивних і мастильно–охолоджувальних середовищ на основі полімерних кремнієвих структур може бути пов'язаний із хімічною взаємодією кремнієвої кислоти з металом оброблюваної поверхні, що спричиняє зв'язування катіонів заліза полімерними структурами кремнієвої кислоти та полірування поверхні; при цьому процеси механічного і хімічного полірування проходять паралельно:



Встановлено, що вплив силікатів на мастильні й антифрикційні властивості МОТС і паст доцільно враховувати як коефіцієнт ефективності мастильної дії, визначений через співвідношення коефіцієнтів тертя



$$K_{ef} = f_{m_{H_2O}} / f_{m_{H_2O+n_i}},$$

(2)

де  $f_{m_{H_2O}}$  – коефіцієнт тертя при обробленні на воді;  $f_{m_{H_2O+n_i}}$  – коефіцієнт тертя при обробленні на водних розчинах рідкого скла.

Стан поверхні деформованого матеріалу, зокрема вкраплення та плівки на ній, кардинально впливає на процеси деформації і руйнування поверхневих шарів зразка під час терті, визначаючи кінетику генерації і переміщення дислокацій, а також утворення плоских деформаційних скупчень, що є початковими зародками тріщин. Дія кремнієвих структур виявляється в ефекті зміцнювання поверхні через виникнення відштовхувальних “сил зображення”. Це обумовлене високим модулем зсуву сполук кремнію, зменшення відстані між точками закріплення дислокацій і відповідно збільшенням напруження спрацьовування джерел генерації, а також утворення домішкових атмосфер навколо окремих дислокацій і їх скупчень під час дифузії кремнію біля поверхневих шарів.

Розглянуто випадок виникнення сил зображення для системи: чавун СП – поверхнева плівка сполук кремнію, компоненти якої мають модулі зсуву  $G_1$  і  $G_2$ .

Для випадку  $G_2 > G_1$  деформувальна дислокації відштовхується від поверхні, причому цей ефект тим сильніший, чим більша різниця між модулями зсуву і менша відстань до поверхні тертя.

Таким чином, уведення в середовище компонентів, зокрема силікатів, які утворюють у разі оброблення поверхні плівки з модулем зсуву, відмінним від модуля зсуву матеріалу матриці, забезпечує разом із більшою ефективністю процесу згладжування рельєфу поверхні й ефект зміцнення приповерхневого шару матеріалу. Цей ефект зберігається досить тривалий час при подальшій експлуатації деталей.

Результати рентгеноструктурного аналізу показують, що з переходом від обробки в гасі до обробки у силікатному середовищі і, далі до силікатної МОТС, активованої бікарбонатом натрію (А–МОТС), ступінь наклепу поверхні оброблюваного матеріалу зростає. Це корелює як з результатами електронно–мікроскопічного дослідження, так і з запропонованою моделлю впливу утворення поверхневих плівок при фінішній обробці деталей у кремніємістких середовищах. Це забезпечує прискорення процесу вироблення контактних поверхонь, і їхньої зносостійкості у подальшій експлуатації.

Для визначення раціональних властивостей і складів абразивних і мастильно–охолоджувальних середовищ виконане теоретичні дослідження контактної взаємодії пари „інструмент – деталь” із урахуванням руху МОТС між контактними поверхнями, а також різниці температур поверхонь інструмента і деталі (рис.2).

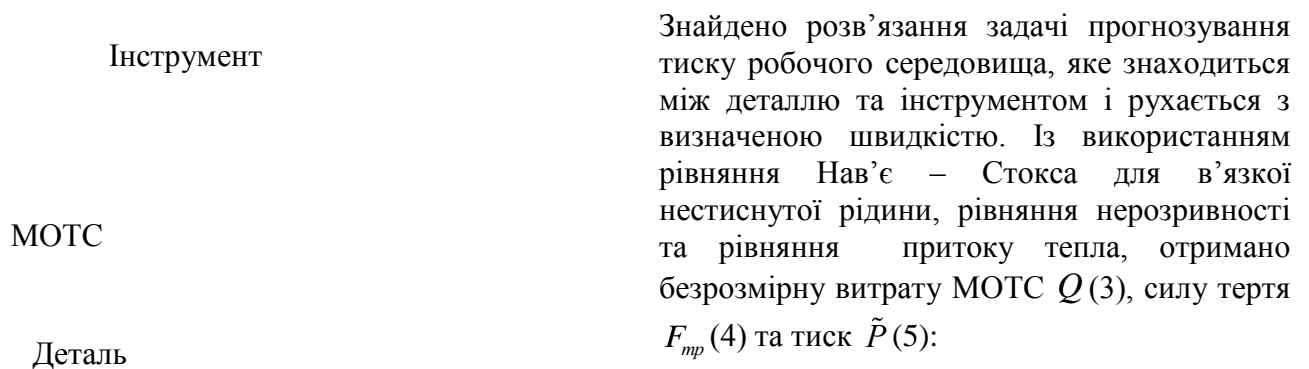


Рис.2 Рух МОТС у зоні обробки

$$Q = \int_{-1/2}^{1/2} u dZ = \frac{1}{2} - \frac{4D}{FS} + \frac{4\varphi}{S(1-\varphi)^2}; \quad (3)$$

$$\frac{F_{mp}}{\mu(U_t - U_w)} = \int_0^1 \frac{A_3 dx^*}{(1+h^*)^2} + \int_0^1 \frac{A_1 dx^*}{(1+h^*)^3} - \text{ для інструмента; } \quad (4)$$

$$\frac{F_{mp}}{\mu(U_t - U_w)} = \int_0^1 \frac{\tilde{c}_2 + A_3 dx^*}{(1+h^*)^2} + \int_0^1 \frac{\tilde{c}_1 + A_1 dx^*}{(1+h^*)^3} - \text{ для деталі;}$$

$$\tilde{P} = e^{\beta P_H} + \beta \left[ \int_0^x \frac{\tilde{c}_1 dx^*}{(1+h^*)^2} + \int_0^x \frac{\tilde{c}_2 dx^*}{(1+h^*)^3} \right], \quad (5)$$

де  $U_t, U_w$  – швидкість інструмента і деталі відповідно;  $h^*$  – шорсткість поверхні деталі;  $\beta = \alpha \cdot P^*$ ,  $P^*$  – безрозмірний тиск,  $\alpha$  – температурний коефіцієнт в'язкості.

$$F = - \frac{2c_1(1-\varphi)^2}{\left[ S(1-\varphi)^2 + 8 \right]^{1/2} \left[ S(1-\varphi)^2 + 8\varphi^2 \right]^{1/2}}, \quad (6)$$

$S = \mu \cdot a \cdot (U_w - U_t)^2 / \kappa$ ;  $\varphi = th(D/4)$ , де  $k$  – коефіцієнт теплопровідності.

Результати чисельного аналізу показали, що різниця температур інструмента і деталі впливає на в'язкість і перенесення МОТС, а отже, на швидкість видалення шламу із зони обробки. В умовах фінішної абразивної обробки за різниці температур між інструментом і деталлю істотно зменшується витрата МОТС (рис. 3), і це сприяє виникненню в зазорі специфічної системи – МПД.

Безрозмірна витрата Q

Рис 3 Вплив різниці температур інструмента і деталі та нагрівання, обумовленого зсувом, на витрату МОТС

Безрозмірна різниця температур D

Проведений аналіз показав, що максимальна температура і градієнт швидкості зсуву спостерігаються всередині шару. Через розходження температур деталі та інструменту зона максимальних температур і градієнта швидкості зсуву зміщується до більш гарячої поверхні, що призводить до істотного зниження сили тертя і, як наслідок, зниження шорсткості оброблюваної поверхні. Отримані співвідношення (3), (4), (5) вирішують задачу визначення температурного поля у зазорі між деталлю та інструментом, а з урахуванням прийнятої залежності в'язкості від температури дозволяють прогнозувати змінення в'язкості МОТС у процесі оброблення.

У четвертому розділі – „Модулювання робочих процесів із урахуванням впливу середовищ на продуктивність фінішної обробки та формування шорсткості поверхні” – розглядаються: процес контактної взаємодії абразивного інструменту з оброблюваною поверхнею; взаємодії знімання металу, які відбувається при цьому, і формування поверхні як результат сукупної дії процесів мікрорізання, пружної і пластичної деформації, що визначило схему модельного подання перерахованих явищ (рис. 4). Вхідними параметрами, які діють у зоні обробки, є: швидкість  $v$  для кожного виду обробки, навантаження  $P(\omega)$ ; склад і властивості мастильно–охолоджувального технологічного середовища  $C_p$ ; характеристики оброблюваних матеріалів  $M$  і абразивного інструменту  $I$ ; концентрація  $K_c$ , зернистість  $N_z$  абразиву і тривалість обробки  $t$ . Ці параметри визначають процес знімання найдрібніших об’ємів металу і його окислів з оброблюваної поверхні, а також згладжування мікронерівностей (блок *A*). За певних умов це призводить до пружної деформації локальних об’ємів (*B*), пластичної деформації (*C*) або до мікрорізання (*D*).

Вплив вхідних параметрів за наявності МОТС на блоки *B*, *C*, *D* дозволяє припустити, що між оброблюваними деталями та інструментами утвориться колоїдна система (*K*), складена із МОТС і продуктів диспергування – система МПД. Наявність ПАР в зоні обробки знижує енергію активації оброблюваної поверхні (*E*).

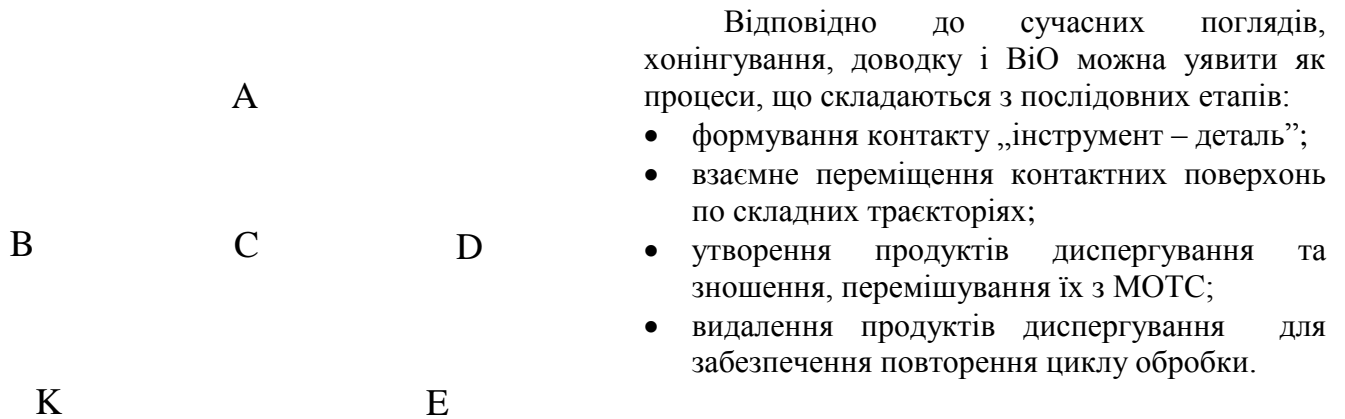


Рис. 4. Структурна схема процесів, що відбуваються в зоні мікрорізання

Схеми взаємодії абразивного інструменту з поверхнею деталі за відповідних видів обробки (рис. 5) повинні враховувати наявність рідкого середовища, складеного з гомогенної суміші МОТС із продуктів диспергування, та урахуванням складної реології цієї суміші.

**а** **б** **в**

Рис. 5 Схема взаємодії абразивного інструменту з оброблюваною поверхнею:  
а – вільним абразивом (ВіО); б – вільним і закріпленим абразивом (доводка);  
в – закріпленим абразивом (хонінгування).

З огляду на поставлені задачі розглянуто рух абразивного інструменту із різальним профілем, сформованим сукупністю абразивних зерен сферичної форми, який проникає під кутом  $\alpha$  у поверхню оброблюваної деталі та знаходиться при цьому в шарі МОТС. Оскільки МОТС містить присадки, у

вигляді кремніємістких сполук та продуктів диспергування, надалі мається на увазі, що рух шару МПД описується рівнянням Генки – Ільюшина для в'язкопластичного середовища

$$\rho(\bar{v} \cdot \nabla)\bar{v} = -\nabla \cdot p + \left( \mu + \frac{\tau_0}{H'} \right) \nabla^2 \bar{v} - \frac{2\tau_0}{H'^2} \cdot T_\varepsilon \nabla \cdot H', \quad (7)$$

де  $p$  – гідродинамічний тиск;  $\tau_0$  – граничне напруження зсуву;  $T_\varepsilon$  – тензор швидкостей деформації;  $\nabla$  – оператор Гамільтона;  $H'$  – інтенсивність швидкостей деформації;  $\bar{v}$  – вектор швидкості;  $\rho$  – щільність;  $\mu$  – динамічний коефіцієнт в'язкості.

Проникнення абразивної частки, поверхня якої утворює сукупність сферичних зерен, можна розглянути як незалежний процес формування абразивного сліду кожним сферичним зерном окремо. Рух жорсткої сферичної частки, яка контактує з деформованим півпростором (див. рис. 5), описується системою рівнянь:

$$\begin{cases} m \frac{d^2 h}{dt^2} = -P_N = -[N(h) + N_1 + N_x(h)]; \\ m \frac{d^2 x}{dt^2} = -P_\tau = -[F + F_1], \end{cases} \quad (8)$$

де  $m = \frac{4}{3} \pi R^3 \rho_r$  – маса частки;  $\tau$  – час;  $N$  – нормальне зусилля (за відсутності МОТС);  $N_1$  – нормальне зусилля, обумовлене впливом в'язкопластичної рідини;  $N_x$  – нормальне зусилля, обумовлене зовнішньою пружною силою;  $F, F_1$  – дотичні зусилля відповідно за відсутності та наявності шару рідини на поверхні оброблюваної деталі;  $R$  – радіус частки;  $\rho_r$  – щільність матеріалу частки;  $h$  – глибина проникнення абразивного зерна.

Для розв'язання системи рівнянь (8) виникає необхідність визначення додаткових зусиль  $N_1$  і  $F_1$ , обумовлених впливом на сферичне зерно в'язкопластичної рідини, і  $N_x$ , обумовленої впливом на зерно пружних елементів.

Контактна задача (для визначення додаткових зусиль  $N_1$  та  $F_1$ ) розв'язана у плоскій постановці (рис. 6) для схеми, коли абразивне зерно у кінцевому положенні (після проникнення на глибину  $h$ ) контактує з оброблюваним матеріалом по радіусу, а граничні умови мають вигляд

$$v_r = 0, \quad v_\theta = \omega R_2, \quad \text{при } r = R_2;$$

Рис. 6 Схема для визначення зусиль, обумовлених впливом системи МПД

$$v_r = 0, \quad v_\theta = 0 \quad \text{при } r = e \cos \theta + \sqrt{R_1^2 - e^2 \sin^2 \theta}; \quad (9)$$

$$P(\theta_1) = P(\theta_2) = 0, \quad \left. \frac{dP}{d\theta} \right|_{\theta=\theta_2} = 0,$$

тут  $e$  – ексцентриситет,  $u_r, u_\theta$  – компоненти вектора швидкості у полярних координатах,  $\theta_1, \theta_2$  – координати початку і кінця вхідної і вихідної границь зони контактування;  $R_1$  – радіус гранули;  $R_2$  – радіус кривизни оброблюваної поверхні;  $\omega$  – кутова швидкість обертання внутрішнього циліндра.

У безрозмірних змінних  $u_r = \omega \delta u$ ;  $v = \omega R_2 v$ ;  $\delta = R_1 - R_2$ ;  $r = R_2 + \delta R_1$ ;  $\lambda = e/\delta$ ;  $e = \delta/R_2$  задача матиме вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP}{dr} = 0; \quad \frac{\partial^2 v}{\partial r^2} = \frac{dP}{d\theta} + A; \quad \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial \theta} = 0 \end{array} \right. , \quad (10)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} u=0, v=1 \quad \text{при} \quad r=0; \\ u=0, v=0 \quad \text{при} \quad r=1+\lambda \cos \theta = \tilde{h}(\theta); \\ P(\theta_1) = P(\theta_2) = 0, \quad \left. \frac{dP}{d\theta} \right|_{\theta=\theta_2} = 0. \end{array} \right. \quad (11)$$

причому співвідношення (10), що є аналогом рівнянь Рейнольдса для в'язкопластичного мастила, містять комплексний безрозмірний показник  $A$ , який характеризує властивості технологічної системи фінішної обробки: динамічні, геометричні, гідродинамічні, пов'язані з наявністю МОТС

$$A = 2\tau_0 \delta / \mu \omega R_2 \quad (12)$$

Отримане точне автомодельне розв'язання задачі (10) – (11):

$$u = -\frac{\partial \Psi}{\partial \theta} + U(r, \theta), \quad v = \frac{\partial \Psi}{\partial r} + v(r, \theta); \quad \Psi = \tilde{\Psi}(\xi), \quad U(r, \theta) = \tilde{u}(\xi) \cdot \lambda \sin \theta, \quad v = \tilde{v}(\xi);$$

$$\frac{dP}{d\theta} + A = \frac{\tilde{c}_1}{h^2} + \frac{\tilde{c}_2}{h^3}; \quad \xi = \frac{r}{\tilde{h}}, \quad (13)$$

дозволило обчислити силу, прикладену до сферичного зерна (внутрішнього циліндра)

$$P = -A(\theta_2 - \theta_1) + \tilde{c}_1 \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{d\theta}{\tilde{h}^2} + \tilde{c}_2 \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{d\theta}{\tilde{h}^3}, \quad (14)$$

де параметри  $\tilde{c}_1, \tilde{c}_2$  визначаються через  $\theta_1$  і  $\theta_2$ .

Кути контакту  $\theta_1$  і  $\theta_2$  визначаються геометрією контактних поверхонь і силою взаємодії між ними. Для задання  $\theta_1$  використовувалося фізичне розуміння, відповідно до якого нормальне контактування абразивної сферичної частки і плоскої оброблюваної поверхні розвивається, в основному, у межах висоти виступання зерен зі зв'язки. Тоді кут  $\theta_1$  визначається з наближеної рівності  $\sin \theta_1 \approx \frac{\eta_{\max}}{R_2}$ , де

$\eta_{\max}$  - найбільша висота виступання зерен зі зв'язки. Кут  $\theta_2$  визначався в результаті чисельного розв'язання трансцендентного рівняння

$$\frac{6}{(1 + \lambda \cos \theta_2)^2} + \frac{A(\theta_2 - \theta_1) - 6 \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{d\theta}{(1 + \lambda \cos \theta)^2}}{\int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{d\theta}{(1 + \lambda \cos \theta)^3}} \cdot \frac{1}{(1 + \lambda \cos \theta_2)^3} = -A, \quad (15)$$

що впливає з граничної умови  $\frac{dP}{d\theta} = 0$  при  $\theta = \theta_2$ .

Вектор результуючої сили тиску і момент тертя, віднесені до одиниці довжини внутрішнього циліндра, визначено рівностями:

$$P_\tau = \frac{\mu\omega R_2^3}{\delta^2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} P(\theta) \cos \theta d\theta, \quad P_N = \frac{\mu\omega R_2^3}{\delta^2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} P(\theta) \sin \theta d\theta, \quad N_1 = \sqrt{P_\tau^2 + P_N^2}. \quad (16)$$

$$M_{mp} = -\frac{\mu\omega R_2^3}{\delta} \left[ \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{d\theta}{1 + \lambda \cos \theta} - \frac{\tilde{c}_2}{2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{d\theta}{(1 + \cos \theta)^2} \right] - R_2^2 \tau_0 (\theta_2 - \theta_1). \quad (17)$$

Співвідношення (16) і (17) повністю визначають значення величин  $N_1$  і  $F_1$ , які входять у праву частину системи рівнянь (8) руху абразивного інструмента.

Узагальнена модель формування одиничного сліду мікрорізання містить силу пружного підтиснення частки до поверхні, яка має місце при хонінгуванні та доводці (і відсутня у разі оброблення вільним абразивом)

$$N_x = p_o / V_z - c_{np} \cdot h / V_z, \quad (18)$$

де  $p_o, V_z$  – відповідно середній нормальний тиск на брусок і середня кількість різальних зерен на одиницю поверхні бруска  $c_{np}$  – твердість пружних елементів.

Розв'язання першого рівняння системи (8) міститься у припущенні про ідеально пластичний нормальний контакт (Н.М. Михін) і модифікований мастилом кулонівський тангенціальний контакт

$$P_N(h) = \pi R h c \sigma_T + N_1 + N_x(h), \quad P_\tau = f P_N, \quad (19)$$

де  $c\sigma_T$  – середнє напруження на контактї;  $\sigma_T$  – границя плинності матеріалу;  $C$  – коефіцієнт за А.Ю. Ішлинським, який дорівнює 3;  $f$  – коефіцієнт тертя;  $f = f_n \cdot k_{\text{эф}}$ ,  $f_n$  – початковий коефіцієнт тертя;  $k_{\text{эф}}$  – коефіцієнт ефективності мастильної дії.

Розв'язання системи (8) у граничному випадку переходу до процесу мікрорізання вільною сферичною часткою (ВіО) дає максимальне проникнення, що залежне від властивостей МОТС:

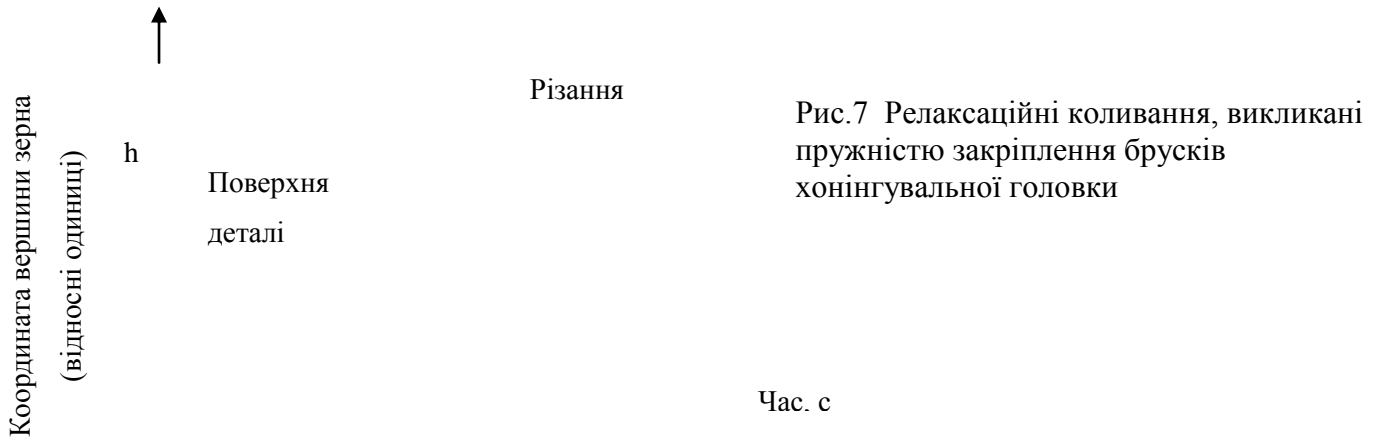
$$h_{\max}^{\text{ВіО}} = \frac{\frac{3N_1}{2\pi R^3 p_r} \pm \sqrt{\frac{9N_1^2}{4\pi^2 R^6 p_r^2} + 4v^2 \sin^2 \alpha \cdot \frac{3\sigma_T c}{4p_r R^2}}}{3\sigma_T c / 2\rho_r R^2} \quad (20)$$

і співпадає з відомою величиною  $h_{\max} = 2v_0R \sin \alpha \sqrt{p_r / 3c\sigma_T}$ , яка відповідає випадку відсутності рідини (Є.Ф. Непомнящий, І.В. Крагельський).

Крайова задача, яка описує рух за нормаллю пружно закріпленої частки, на етапі контактування з поверхнею деталі, має такий вигляд:

$$\begin{cases} \ddot{h} = -\alpha^+ h + \eta; \\ h(0) = 0; \\ \dot{h}(0) = V_N. \end{cases} \quad (21)$$

де  $\alpha^+ = \pi R c \sigma_T v / m_\sigma \sigma > 0$ ;  $\eta = p_o - N_1 v_z / m_\sigma \sigma > 0$ ,  $m_\sigma$  – маса бруска; "+" показує, що величина належить до етапу контактування,  $V_N$  – нормальна складова швидкості руху частки при контакті з оброблюваною поверхнею. Перший доданок у правій частині рівняння (21) визначає пружні коливання, другий – квазіпостійна сила, яка притискає зерно до поверхні. У зв'язку з тим, що сила, діюча на зерно при хонінгуванні, має розривний характер, система (21) розв'язувалась чисельно при варіації параметрів задачі в широких межах. Результати моделювання руху вздовж осі  $h$ , зображені на рис. 7, показують, що релаксаційні коливання в системі „пружно встановлений брусок – зерно – поверхня деталі” мають частоту, більшу за частоту вільних коливань бруска на підвіску в  $1,1 \div 1,4$  рази, причому величина цього відношення залежить від натягу (суцільна і пунктирна лінії на рис. 7)



Таким чином, період релаксаційних коливань виражається через період вільних коливань

$$T_r = 2\pi / k_r \sqrt{c_{np} / m_\sigma}, \quad (22)$$

де  $k_r = 1,1 \div 1,4$ , що дозволяє у підсумку виразити геометричні характеристики сліду абразивного зерна через параметри технологічної системи.

З частинного розв'язку задачі (21) визначаємо величину проникнення абразивної частки в оброблюваний матеріал

$$h^+(t) = \eta / \alpha^+ \left[ 1 - \sqrt{(1 + V_N^2 \alpha^+ / \eta^2)} \cos(\sqrt{\alpha^+} t + \theta^+) \right], \quad (23)$$

де  $\theta^+ = \arcsin \left( V_N \sqrt{\alpha^+ / (\eta^2 + V_N^2 \alpha^+)} \right)$  – кут фазового зрушення.

Для найбільшої глибини проникнення абразивного зерна при хонінгуванні отримано співвідношення

$$h_{\max}^{xOH} = \eta / \alpha^+ \left[ 1 + \sqrt{(1 + V_N^2 \alpha^+) / \eta^2} \right]. \quad (24)$$

Тривалість перебування частки в контактї з площиною отримується як мінімальна відмінна від нуля розв'язка рівняння

$$\sqrt{1 + V_N^2 \alpha^+ / \eta^2} \cos(\sqrt{\alpha^+} t_c + \theta^+) = 1,$$

яке впливає з (23) і початкових умов. Протягом знайденого часу контакту

$$t_{\text{конт}}^{xOH} = 2(\pi - \theta^+) / \sqrt{\alpha^+} \quad (25)$$

формується слід мікрорізання одиничним зерном. Оскільки при хонінгуванні швидкість дотичного руху брусків  $V_b$  завдан кінематично режимами обробки і не залежить від сил, що розвиваються під час мікрорізання зернами абразиву, тоді довжина слїду частки абразиву дорівнює

$$x_{\max}^{xOH} = V_b \cdot t_{\text{конт}}^{xOH}, \quad (26)$$

де  $V_b$  – швидкість дотичного руху брусків.

Розгляньмо процес доводки, за якої, на відміну від хонінгування, частки не утримуються пружними силами, тому рух вільної частки за нормаллю визначається початковою задачею.

$$\begin{cases} \ddot{h} = -\beta^+ h + \zeta; \\ h(0) = 0; \\ \dot{h}(0) = V_N, \end{cases} \quad (27)$$

уведімо позначення  $\beta^+ = \pi R c \sigma_T / m > 0$ ;  $\xi = -N_1 / m < 0$ .

Найбільша глибина проникнення частки

$$h_{\max}^{\partial} = \zeta / \beta^+ \left[ 1 - \sqrt{1 + V_N^2 \beta^+ / \zeta^2} \right]. \quad (28)$$

Тривалість перебування частки в контактї з оброблюваною поверхнею:

$$t_{\text{конт}}^{\partial} = -2\theta^+ / \sqrt{\beta^+}; \quad (29)$$

довжина слїду

$$x_{\max}^{\partial} = \gamma / \beta^+ (\cos \theta^+ - \sin \theta^+) - 2V_{\tau} \theta^+ / \sqrt{\beta^+}. \quad (30)$$

Уведено такі позначення  $\gamma = f \zeta / m \sqrt{1 + V_N^2 \beta^+ / \zeta^2}$

Отримані співвідношення (20) – (30) дозволяють вирішити задачу визначення розмірів нанесення слїдів мікрорізання одиничною абразивною часткою, що дозволяє визначити зняття оброблювального матеріалу як у разі одиничного мікрорізання, так і всією масою часток абразивного інструменту. Для розрахунку характеристик продуктивності процесу застосовують знайдені значення довжини шляху частки в контактї з поверхнею деталі  $x_{\max}$  і найбільшої глибини проникнення  $h_{\max}$ . При цьому припускається, що умови переходу до мікрорізання заздалегідь виконано. У наближенні форма слїду мікрорізання одиничного сферичного зерна двохосьовим параболоїдом, розміри якого визначаються



максимальною глибиною проникнення, довжиною шляху контакту і радіусом частки. Одиничне зняття абразивною часткою оброблювального матеріалу, в загальному випадку, із урахуванням гідродинамічних явищ і схеми процесу дорівнює

$$q = \pi h_{\max}^2 R \sqrt{1 + x_{\max}^2 / 8h_{\max}} R . \quad (31)$$

При визначенні питомого об'ємного зняття металу  $\tilde{Q}$  використовувався теоретико-ймовірний підхід

$$\tilde{Q} = N_p \cdot q = n_p \cdot q / S_{\text{кв.ун.}} , \quad (32)$$

де  $N_p$  – число актів мікрорізання за одиницю часу на одиниці площі деталі;  $S_{\text{кв.ун.}} = D^2 = 4R^2$  – площа квадрата упакування;  $D$  – діаметр абразивного зерна;  $n_p = P_1 P_2 f_b$  – число актів мікрорізання за одиницю часу на площі квадрата упакування абразивних часток;  $P_1$  – геометрична ймовірність події, яка полягає в тому, що будь-яка точка квадрата упакування покривається прямою контакту за один цикл впливу маси абразивних часток;  $P_2$  – імовірність того, що взаємодія абразивної частки з поверхнею деталі приведе до мікрорізання;  $f_b$  – частота циклів впливу маси абразивних часток на поверхню деталі.

Виходячи з рівняння (32), у загальному випадку величина питомого об'ємного зняття визначалася як

$$\tilde{Q} = \pi^2 a b h_{\max} P_2 f_b \sqrt{1 + a^2 / 4h_{\max}} D / 2D(\pi a^2 + 4Da + D^2) . \quad (33)$$

Зняття об'єму матеріалу у разі вібраційного оброблення в середовищі вільного абразиву (33) буде дорівнювати:

$$\tilde{Q}_{BiO} = \pi \cdot a \cdot b \cdot P_2 q_{BiO} f_b / D^2 (\pi \cdot a^2 + 4Da + D^2) . \quad (34)$$

Для хонінгувальної голівки з  $n_b$  брусками

$$\tilde{Q}_{\text{хон}} = k_r \cdot q_{\text{хон}} \cdot v_z \cdot S_b \cdot n_b \sqrt{m_b / c_{np}} / 2\pi \cdot S_d \quad (35)$$

Сумарне зняття об'єму матеріалу закріпленими зернами, які хаотично рухаються, у випадку доводки дорівнює

$$\tilde{Q}_d = \tilde{Q}_{\text{хон}} + \tilde{Q}_{BiO} = (k_{\text{хон}} \cdot q_{\text{хон}} + k_{BiO} \cdot q_{BiO}) f_b \cdot S_b / S_d \quad (36)$$

Результати чисельного аналізу отриманих співвідношень (рис. 8) показують, що:

Рис. 8 Вплив границі плинності матеріалу та властивостей МПД на:

а – максимальну глибину проникнення;

б – одиничне зняття;

в – питоме об'ємне зняття

1. Фізико-механічні властивості та характеристики на вихідні технологічні параметри фінішної обробки.

2. Збільшення граничного напруження зсуву МПД, тобто підвищення показника А приводить до зменшення глибини проникнення абразивного інструмента, одиничного зняття і питомого об'ємного зняття.

3. Збільшення показника  $A$  від 0 до 1,5 залежно від границі плинності оброблюваного матеріалу зменшує питоме зняття від 0,5 до 5 %.

Для опису процесу утворення розміру шорсткості поверхні під час обробки як критерій використовувався введений А.В. Корольовим параметр  $H_{ум}$ , названий „умовна висота нерівностей обробленої поверхні“:

$$H_{ум} = 0,58\sqrt{h_{max}/Z_o L_{od}}, \quad (37)$$

де  $Z_o$  – номінальна кількість зерен в об'ємі робочого шару інструмента;  $L_{od}$  – одиничний відрізок.

Уведемо аналогічний критерій для фінішних абразивних методів обробки та визначмо середнє арифметичне відхилення шорсткості, враховуючи відомий взаємозв'язок між параметрами  $\frac{H_{ум}}{R_a} = 6,4$

і отримаємо

$$R_a = 0,09\sqrt{h_{max}/Z_o L_{od}}. \quad (38)$$

Параметри шорсткості визначені з урахуванням розмірів і концентрації абразивних зерен в інструменті. Це дозволяє на етапі виготовлення абразивного інструмента прогнозувати шорсткість обробленої поверхні. Кількість зерен на одиничній площі

$$Z_{OS} = 2x \cdot K_c / V_3 = 12K_c / \pi \cdot x^2 \quad (39)$$

де  $K_c$  – коефіцієнт концентрації, який відбиває процентне співвідношення абразиву і зв'язки, змінюючись у діапазоні 0,1 ÷ 0,8;  $2x$  – товщина шару в одиниці об'єму (де  $x=x_{max}$  – найбільший розмір зерен цієї зернистості);  $V_3$  – еквівалентний об'єм зерна  $V_3 = \pi D^3 / 6$ , де  $D=x$ .

Середнє арифметичне відхилення профілю шорсткості як функція концентрації абразиву в складі інструменту з урахуванням залежності (39) має вигляд

$$R_a = 0,046 \cdot x \sqrt{h_{max}/K_c L_{od}}. \quad (40)$$

Результати обчислення математичного сподівання відхилення профілю шорсткості залежно від властивостей МОТС і границі плинності матеріалу показують, що шорсткість обробленої поверхні знижується у разі збільшення показника  $A$  (рис. 9, а).

Розрахункові та експериментальні значення середнього арифметичного відхилення профілю шорсткості за тих самих коефіцієнтів концентрації зерен відрізняються незначно. Оптимальні (з погляду ефективності обробки поверхні) значення верхніх і нижніх границь концентрації абразивних зерен в інструменті становлять від 20 до 60% (рис. 9, б).

**а**

**б**

Рис. 9 Значення середнього арифметичного відхилення профілю шорсткості під час ВіО абразивним інструментом із зернистістю  $N_3=100$  мкм (ДСТ 3647-71) зразків зі сталі 45 ( $\sigma_T=1000$  МПа) від властивостей матеріалу і МПД (а) і концентрації абразиву (б)

1 – розрахункові значення; 2 – експериментальні значення

Отримані співвідношення для зняття матеріалу і формування шорсткості обробленої поверхні залежно від концентрації і зернистості абразивних зерен в інструменті, складу і властивостей системи МПД були використані при розробленні методики визначення тривалості фінішних методів обробки.

Тривалість обробки  $t$  для змінення шорсткості від  $R^B$  до  $R^3$  становить:

$$t = -1/K_i \ln \left[ R_a^3 - R_a^C / (R_a^B - R_a^C) \right], \quad (41)$$

де  $R_a^B, R_a^3, R^C$  – середнє арифметичне відхилення профілю відповідно до вихідної, завданої і сталої шорсткості;  $K_i$  – коефіцієнт інтенсивності зменшення висоти мікронерівностей, що дорівнює загальному випадку

$$K_i = 0,75 P_1 P_2 f_b q / K_{проф} R_{max} R^2 = 3 n_p q / K_{проф} R_{max} S_{кв.уп.}, \quad (42)$$

де  $K_{проф}$  – коефіцієнт профілю вихідної шорсткості – відношення площі під профілограмою до повної площі  $R_{max} \cdot l_b$ , яка дорівнює 0,5 ÷ 0,7;  $R_{max}$  – максимальна висота вихідної шорсткості;  $l_b$  – базова довжина деталі.

Для кожного з досліджених методів фінішної обробки коефіцієнт інтенсивності виражається узагальненим співвідношенням через питоме об'ємне зняття матеріалу

$$K_i = 3 \tilde{Q} / K_{проф} R_{max}, \quad (43)$$

причому для ВіО  $\tilde{Q} = \tilde{Q}_{ВіО}$ ; для хонінгування  $\tilde{Q} = \tilde{Q}_{хон}$ ; для доводки  $\tilde{Q} = \tilde{Q}_o$ , де  $\tilde{Q}_{ВіО}, \tilde{Q}_{хон}, \tilde{Q}_o$  визначені згідно з (34) – (36).

Подане співвідношення (41) об'єднує показники якості і продуктивності, дозволяє вибирати раціональну тривалість оброблення за наявності додаткових умов технологічного чи економічного характеру.

Таким чином, схарактеризований комплекс моделей дозволяє:

- прогнозувати на стадії виготовлення абразивного інструменту, паст і МОТС параметри формування шорсткості поверхні, зняття матеріалу і тривалість оброблення для досягнення завданої шорсткості при фінішних методах обробки;

- за умови розв'язання задачі експериментального синтезу технологічних рідин, які мають необхідні реологічні характеристики – призначати раціональну структуру склад і технологію приготування абразивного інструменту, паст і МОТС, що дозволяє досягти необхідних параметрів якості і продуктивності.

**У п'ятому розділі – „Експериментальні дослідження технологічних характеристик параметрів інструментів, паст і МОТС їх вплив на продуктивність процесу та шорсткість поверхні”** – подано результати експериментальних досліджень. До задач експериментів належали:

1. Визначення реологічних характеристик МПД, а також їхнього впливу на коефіцієнт тертя абразивної частки по оброблюваній поверхні і вихідні технологічні параметри: продуктивність та шорсткість.

2. Перевірка адекватності розроблених математичних моделей.

3. Дослідження впливу властивостей матеріалів деталей та інструментів на інтенсивність процесу обробки і змінення параметрів шорсткості поверхні.

4. Проведення порівняльних випробувань розроблених видів абразивного інструменту, МОТС і паст з тими, що застосовуються зараз у промисловості.

5. Оцінювання триботехнічних характеристик поверхневого шару матеріалу, отриманого в результаті фінішної обробки з використанням розроблених видів абразивних і мастильно-охолоджувальних технологічних середовищ.

При експериментальних дослідженнях визначено і рекомендовано як довідкові значення граничних напружень зсуву і в'язкостей слоя МПД за різних температур і концентрацій рідкого скла.

Дослідження МОТС, виготовлених на технічній і дистильованій воді (рис.10), у які послідовно вводились її основні компоненти, підтвердило висунуту гіпотезу про механіко-хімічні процеси, які відбуваються в зоні обробки у разі використанні силікатних МОТС, активованих бікарбонатом натрію (А-МОТС).

а

б

Рис.10 Змінення втрати маси ( $q$ ), коефіцієнта тертя ( $f$ ) і шорсткості поверхні ( $R_a$ ) зразків зі сталі при обробленні брусками АС6 50/40 М2–01 з використанням

У всіх експериментах кальцити утворювалися тільки в технічній воді завдяки наявності в ній сполук бікарбонату натрію. Також на основі хімічного аналізу підтверджено висунуту теоретично гіпотезу про утворення кремнієкислих сполук на поверхні, оброблюваній з використанням А–МОТС.

Зіставлення дослідних даних щодо визначення глибини проникнення абразивного зерна при ВіО з безупинним промиванням і разовим zalиванням МОТС підтверджує наявність шару МПД у зоні обробки. Встановлено, що шар МПД зменшує глибину проникнення інструмента при ВіО на 10 – 15 %.

Результати досліджень показують, що найістотніший вплив на продуктивність (зняття металу), шорсткість та експлуатаційні властивості поверхонь при фінішних методах обробки поряд з режимами має зернистість, концентрація абразиву, механічні властивості матеріалу, склад абразивного інструменту, паст і МОТС.

При цьому дія кожного технологічного фактора з усього перерахованого комплексу досліджень виявлені характерні особливості їх впливу:

- при збільшенні зернистості абразивного інструменту інтенсивність зняття металу зростає внаслідок збільшення глибини проникнення абразивних зерен у поверхню оброблюваних деталей. До того ж зернистість серед усіх параметрів інструменту найістотніше впливає на продуктивність процесу, а також на шорсткість, що узгоджується з аналітичною залежністю (40);

- застосування хімічно і поверхнево–активних речовин підвищує інтенсивність фінішних методів обробки. Кожному оброблювальному матеріалу і виду операції повинен відповідати свій вид абразивних і мастильно–охолоджувальних технологічних середовищ;

- встановлено, що зі збільшенням границі плинності оброблювального матеріалу об'єми зняття продуктів диспергування знижуються внаслідок більшого опору проникненню абразивних зерен, що веде до зниження продуктивності процесу обробки. Це відповідає отриманим аналітичним залежностям для відповідних способів обробки: ВіО (34), хонінгування (35) та доводки (36).

Таким чином встановлено, що отримані теоретичні залежності (34), (35), (36), (40) з достатньою мірою точності відбивають вплив вище перерахованих параметрів на продуктивність фінішних методів обробки і дозволяють (у межах 20 %) прогнозувати зняття металу з поверхні деталі та шорсткість оброблювальної поверхні.

Перевірка адекватності аналітичних моделей продуктивності фінішних абразивних методів обробки для хонінгування, доводки та ВіО показана на рис. 11 а, б, в, із яких видно, що отримані аналітичні моделі, в заданих діапазонах варіювання технологічних факторів, відповідають отриманим експериментальним залежностям з похибками, які не перевищують 20 %.

Виконано дослідження з пошуку можливостей використання нетрадиційних матеріалів зв'язки і абразивного зерна для гранул вібраційної обробки. Для зв'язки абразивних гранул використано відходи виробництва полістіролу, а також метілметокрилату з поліметілметакрилату. Розроблені технології виготовлення абразивно–полімерних композицій дозволили довести їх різальну здатність та зношувальність до рівня гранул з традиційними зв'язками. Запропоновані зв'язки забезпечують рівномірний розподіл абразиву по гранулі, усувають його розшарування, підвищують працездатність, що сприяє зниженню шорсткості оброблювальної поверхні.

Проведені теоретико–експериментальні дослідження створили основу для розроблення дослідних, а потім і промислових технологій виробництва. На види МОТС, паст і абразивних інструментів (гранул для ВіО) отримані авторські свідоцтва і патенти, а також висновки санітарно–епідеміологічних служб про їх екологічну безпеку.

Працездатність поверхонь після обробки на різних складах МОТС оцінювалася за триботехнічними характеристиками пари тертя чавуну СП–У8А під час роботи в середовищі мастила М–8–А. Випробування проводилися на торцевій машині тертя при навантаженні 1,75 МПа, швидкості ковзання 1,7 м/с (ДСТ 9490-75). Тривалість випробувань – 3 год. Аналіз результатів показав, що зразки, оброблені з використанням А–МОТС, дозволяють одержати в парі тертя високі антифрикційні і протизношувальні властивості.

Зіставлення мікротвердості поверхневого шару зразків показує, що у зразках, оброблених з використанням А–МОТС, мікротвердість поблизу поверхні на 20 – 25 % більша порівняно з мікротвердістю металу в об'ємі.

Для оцінювання ступеня поверхневого наклепу при обробленні на різних складах МОТС проводився рентгеноструктурний аналіз поверхні зразків за методом зворотного мікропучка. Для поверхонь, оброблених із використанням А–МОТС, рефлекси від окремих зерен в азимутальному напрямку практично злилися. Це вказує на досить високу щільність дислокацій в об'ємі зерен і відсутність поділу зерен на окремі фрагменти і субзерна. На рентгенограмі інших зразків фон між окремими рефлексами зменшується, при цьому кількість розділених рефлексів від окремих зерен зростає.

Протизадирна стійкість зразків чавуну СП після оброблення з використанням різних видів МОТС визначалася за навантаженням і ростом температури мастильного середовища (М–8–А) перед заїданням. Отримані результати показали, що зносостійкість і протизадирна стійкість поверхні, обробленої з використанням А–МОТС, на 20 – 25 % вища порівняно з поверхнями після обробки на традиційних МОТС.

Експериментальне визначення показників ефективності розроблених видів абразивних і мастильно–охолоджувальних технологічних середовищ у порівняльних лабораторних дослідах з різними матеріалами дозволило виробити комплекс технологічних рекомендацій щодо раціонального застосування в технології фінішної обробки, сформульованих у вигляді довідкових таблиць, де наведено вихідні дані (параметри заготовок, вимоги до поверхні деталей), рекомендовані інструменти, режими обробки та очікувані параметри продуктивності і якості.

**У шостому розділі – „Практична реалізація результатів досліджень”** – наведено результати промислової апробації розроблених видів абразивних інструментів, паст і МОТС на машинобудівних і ремонтних підприємствах України і Російської Федерації.

Зокрема, на ВАТ „1–й Донецький АРЗ” при хонінгуванні гільз циліндрів двигуна ЗІЛ–130 запроваджено розроблену автором А–МОТС (патент RU 2227156). Зазначена А–МОТС успішно замінила пожаро– і вибухонебезпечний гас. Її впровадження у виробництво дозволило підвищити якість і знизити собівартість виготовленої продукції, поліпшити екологічний стан, вивести із споживання цінне вуглеводневе паливо і змащення. Надалі А–МОТС запроваджено у виробництво на АТЗТ „Горлівський АРЗ” на операції хонінгування гільз циліндрів двигунів ЗМЗ–53, а також на ВАТ „Сімферопольський АРЗ” для хонінгування нижніх головок шатуна двигуна ЗМЗ–53.

На АТЗТ „Горлівський АРЗ” пройшов апробацію абразивний інструмент (патенти UA 35371A і UA35266A) при ВіО автомобільних деталей складної конфігурації, вагою до 2-х кг, одержуваних методом точного сталевого лиття за виплавлюваними моделями. Ефект від запровадження гранул для ВіО характеризується підвищенням продуктивності праці, усуненням ручних робіт, підвищенням якості поверхні, поліпшенням культури виробництва.

Упроваджені у виробництво на АТЗТ „ГАРЗ” для притирання клапанів нова силікатна абразивна паста (рішення про видачу деклараційного патенту на корисну модель, заявка №20041008801 від 27.10.2004), а також склад для припрацювань шестерень редуктора ведучого моста автомобілів ГАЗ–53А на ВАТ „Лозовський АРЗ”. Упровадження абразивного і припрацьованого видів середовищ у виробництво дозволило підвищити продуктивність, якість припрацювання і точність оброблених деталей, зменшити витрати внаслідок зниження вартості складів і поліпшити екологічний стан на виробництві.



Проведені експлуатаційні випробування двигунів внутрішнього згорання, зібраних з гільзами, обробленими із застосуванням А–МОТС і використовуваного на підприємствах гасу, показали, що зношування при пробігах 12 тис. км і 80 тис. км на гільзах після хонінгування з використанням А–МОТС на 0,01 – 0,02 мм менше, ніж на гільзах, оброблених з використанням гасу (рис.12).

Причому в першому випадку при обробці гільз циліндрів двигуна з використанням А–МОТС їх зношування було більш рівномірне порівняно з гільзами, обробленими з використанням гасу. Зменшення шорсткості і підвищення зносостійкості робочої поверхні гільз циліндрів двигуна дозволило подовжити ресурс роботи сполучення „гільза – кільце” на 20 %.

Закономірності отримані на деталях ДВЗ, як показали виконані дослідження, можливо використовувати для виробів іншого класу. Наприклад, для ВАТ “Концерн Стирол” розроблено технологію віброабразивного очищення зовнішніх поверхонь балонів з-під медичного закису азоту з використанням створених автором видів абразивного інструменту (патенти RU 2155196, RU2155197, RU2169067). Запропонована технологія є більш ефективною порівняно з застосовуваними

механічними способами очищення і дозволяє отримати більш якісне очищення зовнішньої поверхні балонів, усунути ручну працю, підвищити продуктивність, поліпшити умови праці і культуру виробництва.

Також А–МОТС рекомендована для застосування на підприємстві ЗАТ “Сантарм” (м. Ростов–на–Дону, РФ), для очисних і обробних операцій санітарно–технічної арматури. На цьому ж підприємстві апробовано і рекомендовано до застосування новий вид абразивного інструменту для ВіО на основі відходів металургійної промисловості (патент UA 68669A) для оброблення сантехнічних деталей. Використання нового абразивного інструменту дозволяє скоротити споживання дефіцитного абразивного мікропорошку при збереженні продуктивності та якості оброблюваних поверхонь.

Рис. 12 Графіки зношування гільз циліндрів двигуна ЗІЛ–130 після пробігу автомобіля 12 тис.км. (I) і 80 тис.км. (II). Гільзи оброблені з використанням МОТС: ; МОТС.  
НМТ, ВМТ – нижня і верхня мертві точки.

Аналіз результатів промислового застосування, експлуатаційних випробувань і розрахунків економічної ефективності використання розроблених технологій і абразивних інструментів на різних підприємствах показує, що залежно від конкретних умов досягається підвищення продуктивності, поліпшення умов праці за рахунок використання екологічно чистих технологій, зниження вартості, використання менш дефіцитних і дешевих компонентів для виготовлення інструментів, паст і МОТС, поліпшення якості поверхні і збільшення ресурсу роботи сполучень.

Економічний ефект від упровадження результатів роботи отримується збільшенням ресурсу роботи деталей, вузлів і машин, а також зниженням вартості інструментів, паст і МОТС приблизно втричі. Економічний ефект від упровадження А–МОТС на операціях хонінгування, наприклад на ВАТ „1–й Донецький авторемонтний завод” при річній програмі 18900 гільз циліндрів двигунів ЗІЛ–130, внаслідок збільшення їх моторесурсу становив 100,25 тис.грн. (на 1.01.2001р.).

## ВИСНОВКИ

Створено наукові основи підвищення якості та експлуатаційних властивостей деталей ДВЗ через удосконалення фінішних абразивних способів обробки та нових властивостей абразивних та мастильно–охолоджувальних технологічних середовищ, які вирішують важливу наукову народногосподарську проблему.

1. Розроблено узагальнену модель контактної взаємодії пари “інструмент – деталь”, яка вперше враховує особливості способів фінішної обробки: хонінгування, доводки і вібраційної обробки та аналітично визначає через комплексний безрозмірний параметр  $A$  вплив реологічних властивостей шару "МОТС + продукти диспергування" що дозволяє прогнозувати продуктивність технологічної системи.

2. Отримано аналітичне розв’язання контактної задачі при взаємодії двох поверхонь, розділених шаром „МОТС + продукти диспергування” (МПД), в якій уперше враховуються вплив теплових ефектів на швидкість руху робочого середовища, тиск і силу тертя в зоні пластичної деформації. Установлено, що із збільшенням тиску робочого середовища спостерігається збільшення шорсткості оброблюваної поверхні.

3. Розроблено нові принципи прогнозування величини шорсткості поверхні та визначено необхідний на її досягнення час, на основі математичної моделі, яка враховує, на відміну від відомих, вплив складу і властивостей МОТС, концентрації абразиву в інструменті. Перевірка адекватності аналітичних моделей показала достатню збіжність розрахункових та експериментальних значень: відхилення від розрахункових значень за продуктивністю та шорсткістю поверхні для хонінгування і доводки – 5 – 15 %, для ВіО – 10 – 25 %.

4. Запропоновано спосіб абразивної обробки із застосуванням нових активованих кремніємістких середовищ, які забезпечують утворення поверхневих плівок з модулем зсуву більшим за модуль зсуву оброблюваного матеріалу, що приводить до формування дислокаційних структур наклепаного зміцненого металу, які дозволили підвищити мікротвердість поверхневого шару після обробки на 20 –

25 % порівняно з поверхнями, обробленими на традиційних абразивних та мастильно-охолоджувальних технологічних середовищах.

5. Виконано експериментальні дослідження під час оброблення матеріалів, з яких виготовлено відповідні деталі типу гільза циліндрів двигуна, шатун, клапан, сідло клапана, важіль натисного диска зчеплення, важіль вилки вимикання зчеплення способами обробки, досліджуваних з використанням абразивних та мастильно-охолоджувальних технологічних середовищ з кремнієм. Установлено, що шорсткість поверхні знизилась: при ВіО на 10 %, при доводці на 15 % і хонінгуванні на 20 %. Продуктивність обробки збільшилась: при ВіО на 20 %, доводці та хонінгуванні на 15 %.

6. На основі експериментальних досліджень установлено, що матеріали типу: сталі 45, У8А, чавуну СЧ 18–36, СП після оброблення з використанням нових видів середовищ, які містять кремній, дозволяють отримати у пари тертя високі антифрикційні та протизношувальні властивості, а також підвищують на 20 % протизадирні властивості оброблюваних поверхонь.

7. Запропоновані нові види абразивних та мастильно-охолоджувальних технологічних середовищ дозволили підвищити продуктивність обробки на 15 % за рахунок скорочення часу необхідного для досягнення завданої шорсткості, зменшити шорсткість поверхні на 10 – 15 %. Внаслідок чого при експлуатаційних випробуваннях різних типів деталей, оброблених з використанням запропонованих видів абразивних та мастильно-охолоджувальних технологічних середовищ, ресурс роботи пар тертя для деталей типу „гільза – поршень”, „шатун – вкладиш – вал”, „клапан – сідло” збільшився на 15 – 20 %.

8. За результатами роботи розроблено рекомендації щодо використання виконаних досліджень у промисловості. Результати роботи впроваджені на ВАТ „1-й Донецький авторемонтний завод”, АТЗТ „Горлівський АРЗ”, ВАТ „Концерн Стирол”, ЗАТ „Сантарм” (м. Ростов-на-Дону, РФ). Економічний ефект од впровадження А-МОТС на операціях хонінгування, в умовах ВАТ „1-й Донецький авторемонтний завод” при річній програмі виготовлення 18900 гільз циліндрів двигунів ЗІЛ–130, за рахунок збільшення їх моторесурсу становив 100,25 тис.грн. (на 1.01.2001р.).

#### **Зміст дисертації відбито у 33-х основних роботах:**

1. Мельникова Е.П. Интенсификация вибрационной обработки за счет совершенствования состава СОТС // Зб. наук. праць. Серія: „Галузеве машинобудування, будівництво”. Випуск 16. – Полтава, 2005. – С. 155 – 159.
2. Мельникова Е.П. Взаимодействие параметров технологической системы при финишных методах обработки// Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія „Машинобудування і машинознавство”. – Випуск 92. – Донецьк. – 2005. – С. 55 – 61.
3. Мельникова Е.П. Влияние СОТС на триботехнические свойства обработанных поверхностей// Вестник двигателестроения: Научно-технический журнал.–Запорожье: ОАО “Мотор Сич”, 2004. – № 4. – С. 35 – 38.
4. Мельникова Е.П. Влияние концентрации абразивного наполнителя гранул на интенсивность процесса вибрационной обработки// Вибрации в технике и технологиях. – 2004.–№ 3 (35).– С. 71 – 74.
5. Мельникова Е.П. Исследование технологических характеристик абразивных рабочих сред// Вибрации в технике и технологиях. – 2004. – № 4 (36). –С. 130 – 133.
6. Мельникова Е.П. Эффективность применения силикатных абразивных паст// Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В.Даля: Науковий журнал. – 2004. – № 7 (77), Частина 2. – С. 225 – 228.
7. Мельникова Е.П. Физико-химические процессы при финишной обработке деталей с использованием силикатных композиций// Високі технології у машинобудуванні: Зб. наук. праць. – Харків: НТУ „ХПИ”, 2004. – № 2. – С. 265 – 271.
8. Мельникова Е.П. Повышение износостойкости гильз цилиндров двигателя// Двигатели внутреннего сгорания. – 2004. – № 1. – С. 70 – 73.
9. Мельникова Е.П. Характер разрушения металлов при взаимодействии с абразивным инструментом// Резание и инструмент в технологических системах: Международ. науч. –техн. сб. – Харьков: НТУ “ХПИ”, 2004. – № 66. – С. 241– 244.
10. Мельникова Е.П. Эффективность применения полимеризующихся композиций при обработке металлических поверхностей// Вестник ХПИ: Сб. науч. трудов. Тематический выпуск “Химия, химические технологии и экология”. – Харьков: НТУ “ХПИ”, 2004. – № 14. – С. 146 – 151.

11. Мельникова Е.П. Взаимодействие технологических факторов финишной абразивной обработки при направленном формировании качества деталей машин// Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.–техн. сб.–Харьков: НТУ“ХПИ”, 2004.–№ 67.–С.175–179.
12. Мельникова Е.П. Обобщенная аналитическая модель съема слоя материала детали при финишных методах обработки // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія „Машинобудування і машинознавство”. Випуск 71. – 2004. – С. 47– 55.
13. Мельникова Е.П. Формулировка и аналитическое решение краевой задачи для определения основных параметров финишных методов обработки//Вестник ХАДИ. – 2004. – №3. – С.45 – 48.
14. Мельникова Е.П. Математическая модель течения смазочно-охлаждающей технологической среды между поверхностями инструмента и детали с учетом разности их температур//Ресурсозберігальні технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні: Зб. наук. праць. – Луганськ: СНУ ім. В.Даля, 2004. – Ч.1. – С. 123 – 131.
15. Мельникова Е.П. Влияние смазочно-охлаждающей технологической среды на шероховатость и эксплуатационные свойства обрабатываемых поверхностей// Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2004. – №2. – С. 66 – 68.
16. Мельникова Е.П. Исследование технологических характеристик абразивных гранул для вибрационной обработки из отходов металлургического производства// Технология машиностроения. – 2003. – №3. – С. 21 – 22.
17. Мельникова Е.П. Повышение эффективности абразивной обработки за счет управления параметрами контактного взаимодействия// Вестник машиностроения. – 2003. – № 10. – С. 60 – 64.
18. Бабичев А.П., Мельникова Е.П., Джемелинский В.В., Маник А.Н. Экспериментальные исследования абразивного инструмента с силикатными компонентами// Вибрации в технике и технологиях. – 2002. – № 3 (24). – С. 5 – 8. (Автором розроблено методику проведення експериментальних досліджень у абразивного инструмента для ВіО).
19. Ахвердиев К.С., Мельникова Е.П. Неизотермическое движение СОТС между поверхностями инструмента и детали при наличии возмущающего давления// Трение и износ. – 2002. – Т. 23, № 1. – С. 41 – 46. (Автором розроблено модель плинину МОТС у контактi „інструмент–деталь” та досліджено вплив різниці температур інструменту та деталі на швидкість і витрату МОТС).
20. Мельникова Е.П. Математическая модель прогнозирования съема поверхностного слоя деталей при виброабразивной обработке // Научная мысль Кавказа. Приложение. – 2002. – № 15. – С. 98 – 107.
21. Мельникова Е.П. Математическая модель движения смазочно-охлаждающей технологической среды между контактирующими поверхностями в системе „инструмент – деталь” // Изв. ВУЗов. Сев. – Кавк. регион. Техн. науки. – 2002. – № 4. – С. 85 – 87.
22. Бабичев А.П., Мельникова Е.П., Маник А.Н. Использование водорастворимой АЦФ и ЖС, как связующего инструмента для вибрационной обработки// Вибрации в технике и технологиях. – 2001. – № 1 (17). – С. 20 – 22. (Автор запропонував зміни у складі абразивних гранул для ВіО з метою підвищення їх зносостійкості).
23. Мельникова Е.П. Исследование технологических возможностей виброабразивной обработки в условиях авторемонтного производства// Автоторожник Украины. – 2001. – №1. – С. 22 – 23.
24. Мельникова Е.П. Вариационный подход к исследованию явлений, возникающих в зоне микрорезания//Вопросы вибрационной технологии: Межвуз. сб. науч. ст.–Р–н/Д: ДГТУ. – 2000.– С. 34 – 37.
25. Мельникова Е.П., Кожухова А.В. Исследование процесса вибрационной обработки (ВиО) с использованием силикатной смазочно–охлаждающей технологической среды // Високі технології в машинобудуванні: Зб. наук. праць. – Харків: ХДПУ, 1999. – С. 202 – 204. (Автором теоретично обґрунтовано ефективність використання рідкого скла як основи МОТС для ВіО).
26. Головченко И.П., Мельникова Е.П., Чумичев А.А. Изучение взаимосвязи процесса приработки и возникающих при этом электрохимических явлений// Трение и износ. – 1998. – Т. 20, № 1. – С. 103 – 106. (Автором запропонувано спосіб контролю тривалості процесу припрацювання за динамікою змінення електрохімічного потенціалу трибосполуки).



27. Пат. 2227156 Россия, МПК<sup>7</sup> С10М 173/02. Способ активации смазочно–охлаждающей технологической среды: Пат. 2227156 Россия, МПК<sup>7</sup> С10М 173/02 К.С. Ахвердиев (Россия); А.П. Бабичев (Россия), Е.П. Мельникова (Украина). – № 2003107782/04; Заявл. 24.03.2003; Опубл. 20.04.2004, Бюл. № 11. (Автором запропоновано і теоретично обґрунтовано спосіб активації рідкого скла).
28. Пат. № 35371А Україна, С 08J 5/14, В24D 17/00, В 24D 18/00. Спосіб виготовлення абразивного інструменту: Пат. № 35371А Україна, С 08J 5/14, В24D 17/00, В 24D 18/00 А.П. Бабичев (Росія), Б.В. Кравченко, О.П. Мельникова, О.В. Петухова (Україна). – № 99095363; Заяв.29.09.1999; Опубл. 5.03.2001, Бюл. №2. (Автором запропоновано спосіб отримання абразивно–полімерної композиції для ВіО).
29. Пат. № 35266А Україна, В24D 3/24, В 24D 3/26. Абразивно–полімерна композиція для одержання абразивного інструменту: Пат. № 35266А Україна, В24D 3/24, В 24D 3/26. А.П. Бабичев (Росія), Б.В. Кравченко, О.П. Мельникова, О.В. Петухова (Україна). – № 99095084; Заяв. 14.09.1999; Опубл. 15.03.2001, Бюл. №2. (Автором визначено раціональний склад абразивного інструменту для вібраційної обробки).
30. Пат. № 68669А Україна, 7 В24Д3/20. Спосіб виготовлення абразивного інструменту з відходів металургійної промисловості: Пат. № 68669А, Україна, 7 В24Д3/20 О.П. Мельникова, А.П. Чурносков, О.В. Петухова, О.М. Маник – №2003098701; Заяв.24.09.03; Опубл.16.08.04, Бюл.№8. (Автором запропоновано спосіб отримання абразивного інструменту для ВіО)
31. Бабичев А.П., Тамаркин М.А., Мельникова Е.П., Кожухова А.В., Бойко М.А. О возможности использования полистирола в качестве связки для абразивных гранул //Прогрессивные технологии и системы машиностроения. Междунар. сб. науч. трудов. Выпуск 6. – Донецк, 1998.– Т. 1. – С. 178 – 179. (Автором запропоновано склад абразивних гранул для ВіО на основі відходів виробництва полістиролу).
32. Бабичев А.П., Головченко И.П., Чумичев А.А., Мельникова Е.П., Кожухова А.В. Исследование эксплуатационных характеристик виброобработанных поверхностей// Вибрация в технике и технологии. Труды III междунар. науч. – техн. конф. 8 – 12 сентября 1998. – Евпатория, 1998. – С. 33 – 39. (Автором теоретично обґрунтовано підвищення експлуатаційних характеристик оброблюваних поверхонь при використанні гранул на полімерній основі).
33. Мельникова Е.П. О возможности применения жидкого стекла в качестве основы СОТС и прирабочных составов// Сб. трудов междунар. науч. –техн. конф. “Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы”. Шлифабразив–99. 6 – 11 сентября 1999. – Волжский, 1999.– С. 197 – 199.

## АНОТАЦІЇ

**Мельникова О.П.** Підвищення експлуатаційних властивостей деталей двигунів внутрішнього згоряння за рахунок удосконалення фінішних абразивних способів обробки. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.08 – технологія машинобудування. – Донецький національний технічний університет, Донецьк, 2006.

Дисертацію присвячено створенню принципів підвищення продуктивності фінішних абразивних методів обробки, якості та експлуатаційних властивостей деталей ДВЗ із урахуванням особливості контактної взаємодії пари „інструмент–деталь” на основі використання раціональних видів абразивних і мастильно–охолоджувальних технологічних середовищ.

Розроблено модель контактної взаємодії пари “інструмент – деталь”, яка вперше враховує вплив різних способів фінішної абразивної обробки і дозволяє аналітично визначити вплив складу і властивостей абразивних і мастильно–охолоджувальних технологічних середовищ на продуктивність технологічної системи.

Уперше запропоновано спосіб абразивної обробки із застосуванням нових середовищ із вмістом кремнію, які забезпечують утворення поверхневих плівок із модулем зсуву вищим за модуль зсуву оброблюваного матеріалу, що приводить до формування дислокаційних структур наклепаного, зміцненого металу.

**Ключові слова:** технологія обробки, хонінгування, доводка, вібраційна обробка, система МПД, абразивні і мастильно-охолоджувальні кремніємісткі середовища, модель, продуктивність, шорсткість, експлуатаційні властивості, деталі ДВЗ, рекомендації щодо впровадження.

**Melnikova E.P.** The increase of the operational behaviour of the internal combustion engine details due to the perfection finishing abrasive methods of working. – Handwriting.

The thesis for technical science Doctor's degree, speciality 05.02.08 – engineering techniques. – Donetsk National Technical University, Donetsk, 2006.

The thesis is devoted to the establishment of the principles of the efficiency increase of the finishing abrasive methods of working, quality and operational behaviour of the internal combustion engine details taking into account the peculiarities of the contact interaction of the pair "instrument – detail" on the basis of the usage of the rational forms of abrasive and lubrication-cooling technological media.

The model of contact interaction of the pair "instrument – detail", first to take into account the influence of different finishing abrasive methods of working and to analytically define the influence of composition and behaviour of the abrasive and lubrication-cooling media on the technological system capacity is worked out.

The method of abrasive working with the application of new media that guarantee the formation of surface films with a shear module exceeding the shear module of working material that leads to the formation of dislocational structures of work-hardened metal with the case is pioneered.

**Key-words:** technology of working, honed finishing tweaking, vibromechanical treatment, the system „lubrication-cooling technological media + products of dispersion" (LPD), abrasive and lubrication-cooling technological media, model, productivity, as – turned finish, operational behaviour, internal combustion engine details, recommendation.

**Мельникова Е.П.** Повышение эксплуатационных свойств деталей двигателей внутреннего сгорания за счет совершенствования финишных абразивных способов обработки. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.02.08 – технология машиностроения. – Донецкий национальный технический университет, Донецк, 2006.

Диссертация посвящена созданию принципов повышения производительности финишных абразивных методов обработки, качества и эксплуатационных свойств деталей двигателей внутреннего сгорания (ДВС), с учетом особенности контактного взаимодействия пары "инструмент–деталь", на основе использования рациональных видов абразивных и смазочно–охлаждающих технологических сред.

Одной из причин преждевременного выхода из строя ДВС являются низкие эксплуатационные характеристики его деталей. Поэтому повышение технического ресурса автомобильных двигателей является актуальной проблемой, имеющей важное народно–хозяйственное значение. Число деталей, лимитирующих срок службы технических средств до капитального ремонта (КР), не превышает нескольких десятков наименований. Задача заключается в том, чтобы повысить долговечность этих деталей до уровня тех, которые имеют наибольший срок службы.

В решении указанных задач важное место отводится совершенствованию и развитию финишных абразивных методов обработки, типичными представителями которой являются: вибрационная обработка (ВиО), доводка и хонингование, при которых окончательно формируется поверхностный слой деталей, определяющий их эксплуатационные свойства. Реальным резервом роста эффективности абразивной обработки является разработка и рациональное применение абразивных и смазочно-охлаждающих технологических сред (СОТС).

Исследованы механико–химические процессы, протекающие в зоне контакта "инструмент – деталь" с учетом влияния состава и свойств абразивных и смазочно-охлаждающих сред при финишных методах обработки. Рассмотрено взаимодействие различных факторов, потенциально влияющих на шероховатость, степень прирабатываемости и износостойкость поверхностного слоя детали при его обработке в различных средах, в частности, упрочняющее влияние поверхностных пленок, образующихся при взаимодействии материалов с компонентами кремнесодержащих абразивных и смазочно–охлаждающих технологических сред. Впервые предложен способ абразивной обработки с применением новых сред, обеспечивающих образование поверхностных пленок с модулем сдвига,

превышающим модуль сдвига обрабатываемого материала, приводящих к формированию дислокационных структур наклепанного, упрочненного металла. В рамках предложенной модели, упрочнения поверхностного слоя, взаимодействие внешних нагрузок и сил изображения приводят к формированию в приповерхностных слоях металла специфических дислокационных структур наклепанного, упрочненного металла, причем, созданная в процессе приработки поверхности субструктура достаточна стабильна в типичных для последующей эксплуатации.

Разработана модель контактного взаимодействия пары “инструмент – деталь”, впервые учитывающая влияние различных способов финишной абразивной обработки и позволяющая аналитически определить влияние состава и свойств абразивных и смазочно-охлаждающих сред на производительность технологической системы. В результате решения задачи контактного взаимодействия абразивной частицы с поверхностью детали введен новый параметр  $A$ , характеризующий свойства системы “СОТС + продукты диспергирования” (СПД). Учитывая реологические свойства этот параметр является комплексной обобщенной характеристикой, позволяющей прогнозировать производительность технологической системы.

Разработана обобщенная модель формирования шероховатости поверхности в процессе финишной абразивной обработки, где, в отличие от известных, учтено влияние состава и свойств абразивных и смазочно-охлаждающих технологических сред, концентрации абразива в инструменте.

Представленный комплекс моделей, учитывающих взаимосвязь входных параметров технологической системы с выходными, позволяет прогнозировать на стадии проектирования технологического процесса параметры формирования шероховатости, съем металла и время обработки для достижения заданного качества при финишных методах обработки.

Полученные аналитические модели, описывающие рабочие процессы, протекающие при финишных методах обработки, в результате экспериментальной проверки показали, что разработанная обобщенная модель процесса съема металла с учетом гидродинамического эффекта абразивных и смазочно-охлаждающих сред позволяет с точностью до 25 % прогнозировать показатели производительности и формирование шероховатости для ВиО, хонингования и доводки.

Осуществлена экспериментальная проверка теоретических положений, устанавливающих влияние технологических параметров на производительность, шероховатость поверхности, стойкость абразивного инструмента, толщину смазочной пленки, распределение давлений и температур. Установлено, что найденные теоретические зависимости адекватно отражают экспериментальные результаты, и расхождение расчетных и полученных данных составляет не более 20 %.

Полученные результаты теоретических и экспериментальных исследований использованы при создании экологически чистых, не содержащих дефицитных компонентов, дешевых, пожаро- и взрывобезопасных СОТС и абразивного инструмента для ВиО и хонингования, абразивных паст для доводки, обеспечивающих повышение производительности, качества и эксплуатационных свойств обработанной поверхности. Новизна указанных решений на составы и способы получения абразивных и смазочно-охлаждающих сред подтверждена охранными документами (патентами).

Эксплуатационные испытания различных типов деталей, обработанных с использованием разработанных составов абразивных и смазочно-охлаждающих сред, показали, что их применение на 10–15 % снижает шероховатость поверхности, на 15% повышает производительность за счет сокращения времени обработки, для достижения заданной шероховатости и увеличивает ресурс работы пар трения на 15 – 20 %. Результаты работы прошли промышленную апробацию и внедрены на ряде предприятий различных отраслей.

Ключевые слова: технология обработки, хонингование, доводка, вибрационная обработка, система СПД, абразивные и смазочно-охлаждающие кремнесодержащие среды, модель, производительность, шероховатость, эксплуатационные свойства, детали ДВС, рекомендации по внедрению.