НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ

**Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля**

* На правах рукописи

**Сидорко Владимир Игоревич**

* УДК 621.923

**НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССОВ ФИНИШНОЙ   
АЛМАЗНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ ПРИРОДНОГО И  
СИНТЕТИЧЕСКОГО КАМНЯ**

**Специальность 05.03.01 –**

**Процессы механической обработки, станки и инструменты**

Диссертация

на соискание научной степени

доктора технических наук

|  |  |
| --- | --- |
|  | * Научный консультант   **Филатов Юрий Даниилович**  доктор технических наук,  старший научный сотрудник |

Киев – 2006**СОДЕРЖАНИЕ**

Стр.

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | **ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ**.............................. | | | | | 9 | |
|  |  | | | | |  | |
|  | **ВВЕДЕНИЕ**......................................................................................... | | | | | 12 | |
|  |  | | | | |  | |
|  | **ГЛАВА 1**  **Проблема повышения эффективности финишной алмазно-абразивной обработки природного и синтетического камня (аналитический обзор)**....................................................................... | | | | | 24 | |
| 1.1. | Анализ процессов финишной обработки поверхностей деталей из неметаллических материалов........................................................... | | | | | 24 | |
|  | 1.1.1. | | Закономерности процессов шлифования деталей из ПСК алмазным инструментом........................................................... | | | 25 | |
|  | 1.1.2. | | Физико-химические закономерности полирования деталей из НМ инструментом со связанным полировальным порошком.................................................................................... | | | 29 | |
|  | 1.1.3. | | Особенности процессов финишной обработки изделий из неметаллических материалов методом алмазного микроточения............................................................................. | | | 37 | |
| 1.2. | Анализ требований к инструментам, применяемым в технологических процессах финишной обработки ПСК................... | | | | | 41 | |
|  | 1.2.1. | | Алмазный инструмент для шлифования................................. | | | 41 | |
|  | 1.2.2. | | Инструмент со связанным полировальным порошком для полирования неметаллических материалов...................... | | | 43 | |
| 1.3. | Параметры и характеристики точности формообразования и состояния поверхностей изделий из неметаллических  материалов при финишной обработке................................................. | | | | | 49 | |
|  | 1.3.1. | | Влияние режимных и кинематических параметров процесса шлифования на точность формообразования поверхностей.............................................................................. | | | 49 | |
|  | 1.3.2. | | Состояние поверхностей изделий из неметаллических материалов при финишной обработке..................................... | | | 50 | |
| 1.4. | Выводы. Основные задачи исследования............................................ | | | | | 56 | |
|  |  | | | | |  | |
|  | **ГЛАВА 2**  **Методика проведения исследований**............................................. | | | | | 60 | |
| 2.1. | Условия проведения исследований...................................................... | | | | | 62 | |
|  | 2.1.1. | | Обрабатываемые материалы..................................................... | | | 62 | |
|  | 2.1.2. | | Инструменты для проведения исследований.......................... | | | 65 | |
|  | 2.1.3. | | Оборудование для проведения исследований и режимы обработки деталей из ПСК........................................................ | | | 69 | |
| 2.2. | Оценка эффективности финишной обработки деталей из природного и синтетического камня.................................................... | | | | | 71 | |
|  | 2.2.1. | | Методика определения производительности обработки, интенсивности и равномерности износа рабочего слоя инструмента................................................................................ | | | 72 | |
|  | 2.2.2. | | Методика исследования износа кристаллов природного алмаза в процессе финишной обработки неметаллических материалов.................................................... | | | 73 | |
|  | 2.2.3. | | Исследование состояния поверхностей обрабатываемой детали и рабочего слоя инструмента....................................... | | | 78 | |
|  |  | 2.2.3.1. | | Оценка шероховатости обработанных поверхностей.... | | 79 | |
|  |  | 2.2.3.2. | | Оценка отражательной способности обработанных поверхностей деталей из неметаллических материалов.......................................................................... | | 81 | |
|  |  | 2.2.3.3. | | Исследование оптических констант неметаллических материалов с помощью метода эллипсометрии.............. | | 87 | |
|  |  | 2.2.3.4. | | Исследование частиц шлама обрабатываемого материала............................................................................ | | 91 | |
|  |  | 2.2.3.5. | | Исследование поверхности рабочего слоя инструмента и характеристик алмазных и полировальных порошков................................................. | | 94 | |
|  |  | 2.2.3.6. | | Химический состав обрабатываемых материалов.......... | | 96 | |
|  |  | 2.2.3.7. | | Методика определения глубины нарушенного слоя обработанных поверхностей............................................. | | 101 | |
| 2.3. | Выводы к главе....................................................................................... | | | | | 107 | |
|  |  | | | | |  | |
|  | **ГЛАВА 3**  **Исследование закономерностей съема обрабатываемого материала при финишной обработке поверхностей изделий из ПСК**................................................................................... | | | | | 109 | |
| 3.1. | Теплофизический анализ взаимодействия инструмента и обрабатываемой поверхности в контактной зоне............................... | | | | | 109 | |
| 3.2. | Закономерности съема обрабатываемого материала в процессе полирования............................................................................................ | | | | | 130 | |
|  | 3.2.1. | | Анализ взаимодействия поверхностей изделия и инструмента в неравновесном процессе полирования........... | | | 130 | |
|  | 3.2.2. | | Концентрация и объем частиц шлама на обрабатываемой поверхности................................................................................ | | | 137 | |
|  | 3.2.3. | | Расчет производительности съема обрабатываемого материала при полировании изделий из ПСК......................... | | | 140 | |
| 3.3. | Интенсивность съема обрабатываемого материала при шлифовании............................................................................................ | | | | | 155 | |
|  | 3.3.1. | | Производительность тонкого алмазного шлифования  (на примере обработки стекла)................................................. | | | 157 | |
|  | 3.3.2. | | Влияние кинематических параметров на производительность тонкого алмазного шлифования (на примере ТАШ плоских поверхностей изделий из стекла).............................. | | | 165 | |
|  | 3.3.3. | | Производительность съема обрабатываемого материала при супертонком алмазном шлифовании (на примере обработки корунда).............................................. | | | 174 | |
| 3.4. | Закономерности съема обрабатываемого материала в процессе алмазного микроточения....................................................................... | | | | | 176 | |
| 3.5. | Энергетический анализ контактного взаимодействия инструмента и обрабатываемой поверхности при  финишной обработке ПСК.................................................................... | | | | | 181 | |
| 3.6. | Функциональная связь между производительностью финишной обработки ПСК и параметрами модели образования и удаления частиц шлама.......................................................................................... | | | | | 186 | |
| 3.7. | Выводы к главе....................................................................................... | | | | | 190 | |
|  |  | | | | |  | |
|  | **ГЛАВА 4**  **Исследование закономерностей износа рабочего слоя инструмента при финишной обработке изделий из природного и синтетического камня**............................................. | | | | | 193 | |
| 4.1. | Характер износа рабочего слоя инструмента при финишной обработке изделий из ПСК.................................................................... | | | | | 193 | |
|  | 4.1.1. | | Износ инструмента при финишной обработке изделий из ПСК на радиально-консольных станках.................................. | | | 202 | |
|  | 4.1.2. | | Износ инструмента при финишной обработке изделий из ПСК на автоматических линиях............................................... | | | 204 | |
|  | 4.1.3. | | Износ инструмента при обработке изделий на шлифовально-полировальных станках.................................... | | | 207 | |
| 4.2. | Влияние кинематических параметров процесса финишной обработки ПСК на характер износа инструмента............................... | | | | | 211 | |
| 4.3. | Определение оптимальной формы инструмента для финишной обработки изделий из ПСК................................................................... | | | | | 214 | |
|  | 4.3.1. | | Инструмент для обработки изделий из камня на станках радиально-консольного типа..................................................... | | | 215 | |
|  | 4.3.2. | | Инструмент для высокоточной обработки  поверхностей изделий из ПСК на шлифовально-полировальных станках............................................................. | | | 219 | |
|  | 4.3.3. | | Инструмент для обработки изделий из ПСК на мостовых шлифовальных станках, оснащенных феррасой..................... | | | 221 | |
| 4.4. | Износ резцов из природного алмаза при микроточении ПСК........... | | | | | 224 | |
| 4.5. | Выводы к главе....................................................................................... | | | | | 230 | |
|  |  | | | | |  | |
|  | **ГЛАВА 5**  **Исследование механизма формирования обработанной поверхности и рабочего слоя инструмента при финишной обработке природного и синтетического камня**.......................... | | | | | 231 | |
| 5.1. | Механизм формирования нарушенного слоя обработанных поверхностей.......................................................................................... | | | | | 231 | |
| 5.2. | Зависимость глубины нарушенного слоя от физико-механических свойств обрабатываемого материала и режимов обработки.............. | | | | | 236 | |
| 5.3. | Исследование качества поверхностей изделий из ПСК..................... | | | | | 247 | |
| 5.4. | Исследование состояния поверхностей детали и инструмента в процессе полирования........................................................................... | | | | | 256 | |
|  | 5.4.1. | | Кинетика формирования поверхности изделия из ПСК........ | | | 256 | |
|  | 5.4.2 | | Химический состав и особенности формирования налета на поверхности рабочего слоя инструмента и изделия.......... | | | 266 | |
|  | 5.4.3 | | Образование и удаление дефектов на поверхности изделия при финишной обработке ПСК................................................ | | | 273 | |
| 5.5. | Выводы к главе....................................................................................... | | | | | 284 | |
|  |  | | | | |  | |
|  | **ГЛАВА 6**  **Разработка, опытно-промышленная проверка и  внедрение инструментов и технологических процессов финишной обработки изделий из природного и синтетического камня**....................................................................... | | | | | 287 | |
| 6.1. | Разработка инструментов для шлифования изделий из  природного и синтетического камня.................................................... | | | | | 287 | |
|  | 6.1.1. | | Выбор характеристики рабочего слоя инструмента............... | | | 289 | |
|  | 6.1.2. | | Разработка конструкции рабочего слоя инструмента для обработки плоских и сложнопрофильных поверхностей  изделий из камня........................................................................ | | | 295 | |
| 6.2. | Разработка инструментов для полирования природного и синтетического камня.......................................................................... | | | | | 302 | |
|  | 6.2.1. | | Обоснование характеристики рабочего слоя инструмента.... | | | 302 | |
|  | 6.2.2. | | Оптимизация состава полировального инструмента............. | | 307 | |
| 6.3. | Разработка технологии изготовления шлифовальных и  полировальных инструментов и технологического процесса финишной алмазно-абразивной обработки ПСК................................ | | | | | 310 | |
|  | 6.3.1. | | Технологический регламент ТАШ, СТАШ и полирования поверхностей деталей из камня................................................ | | | 310 | |
|  | 6.3.2. | | Особенности технологии изготовления инструментов  для финишной обработки природного и синтетического камня........................................................................................... | | | 313 | |
|  | 6.3.3. | | Комплексная оценка качества поверхности изделий из ПСК......................................................................................... | | | 315 | |
|  | 6.3.4. | | Основные показатели работоспособности инструментов при финишной обработке ПСК................................................ | | | 323 | |
| 6.4. | Опытно-промышленная проверка и внедрение инструментов и технологических процессов финишной алмазно-абразивной обработки изделий из природного и синтетического камня.............. | | | | | 324 | |
| 6.5. | Выводы к главе....................................................................................... | | | | | 328 | |
|  |  | | | | |  | |
|  | **ОБЩИЕ ВЫВОДЫ**............................................................................ | | | | | 330 | |
|  |  | | | | |  | |
|  | **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**..................... | | | | | 335 | |
|  |  | | | | |  | |
|  | **ПРИЛОЖЕНИЯ**................................................................................. | | | | | 372 | |

* **ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ**

ИCМ – Институт сверхтвердых материалов;

ПСК – природные и синтетические камни;

ТАШ – тонкое алмазное шлифование;

СТАШ – супертонкое алмазное шлифование;

АМ – алмазное микроточение;

СОТС – смазывающе-охлаждающая технологическая среда;

НМ – неметаллические материалы;

ПЭТФ – полиэтилентерефталат;

*E* – модуль упругости;

*G* – модуль сдвига;

 – коэффициент Пуассона;

 – поверхностная энергия;

K1c – коэффициент трещиностойкости;

H – микротвердость;

 – твердость по Виккерсу;

*K*п – коэффициент пористости;

*Еsv* – энергия связи;

*Екl* – энергия кластера;

*ki* – коэффициент заполнения поверхности инструмента рабочим слоем;

*Кi* – интегральный коэффициент заполнения;

*n2* – частота вращения инструмента;

*n1* – частота вращения обрабатываемого изделия;

*pa* – давление прижима инструмента к обрабатываемой поверхности;

*pg* – давление СОТС в промежутке между инструментом и обрабатываемой поверхностью;

*l* – толщина зазора между инструментом и деталью;

*u* – скорость относительного перемещения поверхностей обрабатываемой детали и инструмента;

*Q* – производительность обработки;

*I* – интенсивность износа рабочего слоя инструмента;

*r* – радиус круговой зоны;

– длина пути, который проходит элемент рабочего слоя инструмента по поверхности обрабатываемого изделия;

*T0* – время цикла отработки;

*, V2 –* скорость поступательного движения инструмента и детали, соответственно;

 – коэффициент равномерности износа;

 – глубина резания;

*Vs* – поперечная подача;

*rа* – радиус закругления режущей кромки резца;

*Р*y, *Р*z – нормальная и тангенциальная составляющие силы резания;

 – постоянная Планка;

ω01, ω02– собственные частоты колебаний фрагментов на поверхностях детали и инструмента;

 – числа фрагментов в *i*-м кластере;

,  – статические диэлектрические проницаемости обрабатываемого материала и инструмента;

 – константа Лифшица;

 – радиус инструмента;

 – площадь контакта инструмент-деталь;

 – плотность обрабатываемого материала;

 – плотность технологической среды;

 – число Авогадро;

 – молекулярная масса обрабатываемого материала;

 – ускорение свободного падения;

 – температура;

 – коэффициент теплопроводности;

 – тензор напряжений;

 – кинетические коэффициенты;

 – энергия переноса;

 – энергоемкость шлифования;

 – коэффициент объемного износа;

 – коэффициент массового износа;

 – концентрация кластеров на поверхности изнашиваемого тела;

 – концентрация частиц износа;

 – наивероятнейший размер частицы износа;

ϑ1, ϑ2 – углы смачивания СОТС поверхностей детали и инструмента;

 – коэффициент поверхностного натяжения;

 – вязкость СОТС;

*ϕn(z)* – функции параболического цилиндра;

,  – интегралы ошибок;

*L0* – длина штриха;

*e0, ep* – несимметрия и смещение штриха;

, ,  и *Rmax* – параметры шероховатости;

*Ko* – коэффициент отражения света;

*Kv* – среднее значение коэффициента рассеяния отраженного света;

 – глубина нарушенного слоя;

*n*, *k* – показатели преломления и поглощения;

,  – эллипсометрические параметры поляризованного света.

* **ВВЕДЕНИЕ**

В современных условиях интенсивного развития строительства отечественная камнеобрабатывающая промышленность не обеспечивает необходимых объемов высококачественного производства отделочных материалов и изделий из природного камня, не смотря на то, что в Украине имеются значительные по объему месторождения камня, в частности уникальных по цветовой гамме гранитов, которые конкурентоспособны на мировом рынке. По данным Государственного гемологического центра в общем объеме экспорта изделий из природного камня из Украины, изделия в виде слябов и плит с обработанной по точным размерам, в т.ч. полированной, поверхностью составляют только 26 %, остальное- это сырьевые блоки и брусчатка. Одной из причин дефицита высококачественной продукции из украинского природного камня, а также незначительного расширения объемов применения высококачественных и конкурентоспособных по стоимости изделий из синтетического камня (керамических гранитов, декоративных ситаллов, стекла, керамики, оптических и полупроводниковых кристаллов, применение которых постоянно расширяется, и т.п.) является ограниченое использование высокоэффективных технологических процессов их механической обработки и недостаточная обеспеченность отечественных каменеобрабатывающих предприятий современными оборудованием и инструментом.

Современное состояние проблемы высокопроизводительной финишной механической обработки природного и синтетического камня (ПСК) характеризуется отдельными достижениями в решении вопросов повышения производительности обработки и качества обработанной поверхности на технологических операциях тонкого (ТАШ), сверхтонкого (НТАШ) алмазного шлифования и полирования инструментом со связанными полировальными порошками.

В камнеобрабатывающей промышленности, наряду с широкомасштабным использованием алмазно-абразивного инструмента, все еще значительным остается объем применения паст и суспензий на основе токсичных материалов и дорогостоящих алмазных паст.

Возрастающие требования к экологической безопасности производственных процессов, не допускают применения токсичных веществ при изготовлении и использовании инструмента, а утилизация продуктов финишной обработки ПСК является сложной технико-экономической проблемой. Указанная проблема не решена до настоящего времени и при использовании инструментов со связанными порошками, в которых химически инертные алмазные или абразивные порошки закреплены в связках, в состав которых входят химически активные токсичные вещества или могут образовываться в процессах финишной обработки ПСК.

Применение алмазного инструмента позволяет существенно интенсифицировать режимы и повысить производительность обработки, однако их более высокая стоимость по сравнению с абразивными инструментами, которая определяется не только дорогостоящими алмазными порошками, но и высокими ценами материалов связки, является решающим аргументом в пользу обычного абразивного инструмента. Такой аргумент чаще всего является основным при выборе инструмента на предприятиях отечественной камнеобрабатывающей отрасли, особенно в мелкосерийном производстве при выборе из большого ассортимента, предлагаемых инструментов зарубежного (Италия, Китай и др.) и украинского производства. Вместе с тем, другие, кроме стойкости инструмента, важные для определения целесообразности применения инструмента критерии не учитываются. Среди них соответствие свойств инструмента химическому составу и физико-механическим характеристикам обрабатываемого материала, ведущее к снижению себестоимости обработки; оптимальный коэффициент заполнения поверхности шлифовального или полировального инструмента рабочим слоем и его характеристика, удовлетворяющая требованиям экологической безопасности.

Вместе с тем, при комплексной реализации технологических процессов финишной обработки ПСК существуют следующие нерешенные проблемы:

– известные модели процессов обработки разработаны только относительно конкретной технологической операции, что существенно усложняет обоснование рекомендаций по выбору полного комплекта инструментов со связанными алмазными и полировальными порошками для повышения эффективности процесса финишной обработки каждого из многочисленных видов ПСК;

– недостаточно изучены механизмы формирования поверхности изделия и образования на ней дефектного слоя;

– отсутствуют методы объективной оценки качества обработанных поверхностей (методы профилометрии не обеспечивают необходимой точности измерения параметров шероховатости, а отражающая способность поверхностей оценивается только визуально);

– возрастающие требования к экологической безопасности производственных процессов не допускают использования токсичных веществ, которое до сих пор имеет место при изготовлении и применении инструмента.

Существенное улучшение технико-экономических и экологических показателей камнеобрабатывающего производства при рациональном использовании сырьевых ресурсов (в т. ч. вторичных) на основе комплексного подхода к анализу и реализации процессов финишной обработки ПСК является актуальной научно-технической проблемой.

**Связь работы с научными программами, планами, темами**

Данная работа является частью исследований, которые проводились в Институте сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины в рамках госбюджетных тем 1719 «Разработать и освоить новые составы связок и технологию производства инструмента из микропорошков сверхтвердых материалов для финишных процессов обработки деталей электронной техники и оптических систем из неметаллических материалов, обеспечивающих требуемое качество поверхности и повышение производительности в 2 раза (№ государственной регистрации 01.83.0025492); 1726 «Исследование механизма и разработка фундаментальных принципов прецизионного формообразования оптической поверхности деталей из неметаллических материалов»; 1855 «Розробка та освоєння виробництва спеціального інструмента для декоративної фінішної обробки алюмосилікатних матеріалів з природних ресурсів України» (№ государственной регистрации 0198U002321); 1856 «Дослідження закономірностей процесів диспергування та формування декоративних поверхонь деталей із природного каміння при їх обробці» (№ государственной регистрации 0100U004915); 1954 «Дослідження закономірностей формування складнопрофільних поверхонь деталей з неметалевих матеріалів і загартованих сталей і розробка нових інструментальних композитів зі зв’язаними алмазними та абразивними порошками для їх обробки» (№ государственной регистрации 0103U006665); 1960 «Дослідження і впровадження процесів формування високоякісних поверхонь деталей з природного і штучного каменю інструментом із алмазного і абразивного волокна».

**Целью диссертационной работы** являетсяразвитие научных основ процессов финишной алмазно-абразивной обработки разных видов природного и синтетического камня для повышения производительности технологических операций и качества изделий за счет создания и применения новых инструментов с функционально-ориентированными конструкциями и характеристиками рабочего слоя и усовершенствования технологии их изготовления.

**Задачи исследования:**

1. Провести анализ современного состояния развития и особенностей высокопроизводительной технологии финишной алмазно-абразивной обработки природного и синтетического камня, разработать методологию экспериментально-аналитических исследований указанных процессов, установить закономерности влияния режимных и кинематических параметров процессов финишной обработки, конструкции и характеристики инструментов и свойств обрабатываемого и инструментального материалов на производительность обработки и интенсивность износа рабочего слоя инструмента при ТАШ, НТАШ, полировании и алмазном микроточении (АМ).

2. В развитие научных основ финишной алмазно-абразивной обработки природного и синтетического камня инструментами со связанными алмазными и другими по составу полировальными порошками провести аналитическое исследование контактного взаимодействия шлифовального и полировального инструментов с поверхностью изделия, создать модель процесса образования и направленного удаления частиц шлама обрабатываемого материала и износа инструмента с учетом особенностей массопереноса и характера распределения частиц по размерам и определить условия повышения производительности обработки ПСК.

3. Исследовать кинетику формирования поверхностного слоя изделия из ПСК в процессе финишной алмазно-абразивной обработки с учетом изменений состояния рабочей поверхности инструмента, а также дефектность, отражающую способность и колорометрические характеристики обработанной поверхности. Определить параметры для комплексной оценки качества изделий.

4. Разработать методику расчета конструктивных параметров рабочего слоя инструмента, которые обеспечивают его равномерный износ, для существующих технологических систем и кинематических схем финишной алмазно-абразивной обработки ПСК. Обосновать выбор характеристики рабочего слоя инструмента для повышения производительности обработки и качества изделий.

5. Разработать методику комплексной оценки качества изделий из природного и синтетического камня при финишной обработке на основе расчетно-экспериментального определения параметров поверхности изделия, которые характеризуют ее состояние – шероховатости, глубины нарушенного слоя, эллипсометрических параметров, коэффициентов отражения и рассеяния света, оптических постоянных обрабатываемого материала.

6. Разработать технологический регламент финишной алмазно-абразивной обработки ПСК и рекомендации по применению новых инструментов с функционально-ориентированными конструкциями и характеристиками рабочего слоя разработать способы их изготовления, провести испытания и осуществить практическую реализацию.

**Объектом исследования** являются процессы финишной алмазно-абразивной обработки инструментами со связанными алмазными и другими по составу полировальными порошками изделий из природного и синтетического камня с относительной обрабатываемостью *Kо* = 0,2-2,0, которые обеспечивают качество обработанной поверхности, характеризуемое параметром шероховатости *Ra* 0,01-0,03.

**Предмет исследования** – закономерности съема обрабатываемого материала, износа инструмента и формирование поверхностного слоя изделия при тонком и супертонком алмазном шлифовании и полировании изделий из природного и синтетического камня.

**Методы исследования.** Аналитические и экспериментальные исследования проводили с использованием основных положений термодинамики и статистической физики, теорий резания и шлифования, трибологии, теории машин и механизмов и структурного анализа.

При экспериментальных исследованиях использовали современные методы и средства оптической, электронной и атомно-силовой микроскопии, профилометрии, ИК спектроскопии, интерферометрии, микроструктурного и микрорентгеноспектрального анализа, рефрактометрии, фотометрии, эллипсометрии. Для проведения исследований кинетики формирования поверхности изделия в процессе финишной обработки были применены разработанные методика in situ контроля эллипсометрических параметров и специальный макет шлифовально-полировального станка, оснащенный лазерным эллипсометром.

При анализе результатов измерений и их погрешностей, математической обработке экспериментальных данных и результатов теоретических расчетов и их достоверности использовались методы математической статистики.

**Научная новизна полученных результатов:**

1. Впервые в развитие научных основ процессов финишной алмазно-абразивной обработки ПСК с учетом особенностей массопереноса и направленного удаления частиц шлама обрабатываемого материала разработана модель взаимодействия инструмента и изделия в контактной зоне, установлена функциональная связь между производительностью финишной алмазно-абразивной обработки ПСК и параметрами разработанной модели и показано, что производительность обработки экспоненциально возрастает при уменьшении безразмерного параметра, который зависит от технологических и конструктивных параметров процесса обработки.

2. Впервые установлено, что скорость износа рабочего слоя инструмента зависит одновременно с режимными и кинематическими параметрами процесса обработки, геометрическими размерами и формой поверхности изделия и от коэффициента удельного износа инструментального материала, и определены коэффициенты заполнения поверхности инструмента рабочим слоем при условии обеспечения его равномерного износа для существующих технологических систем и кинематических схем обработки.

3. Впервые получены аналитические зависимости глубины нарушенного слоя поверхности изделия из ПСК от наиболее вероятного размера частиц шлама, шероховатости обработанной поверхности, микротвердости и трещиностойкости материала изделия и установлена связь между глубиной нарушенного слоя поверхности и показателем поглощения.

4. Впервые установлено, что при взаимодействии поверхностей инструмента и изделия в процессе полирования ПСК их состояние периодически изменяется вследствие локализации на контактирующих поверхностях частиц обрабатываемого материала и износа инструмента в виде слоев налета и его удаления вместе со смазывающе-охлаждающей технологической средой (СОТС), а заданное качество полированной поверхности изделия может быть достигнутая только в момент отсутствия налета.

**Практическая ценность полученных результатов:**

1. Разработана методика расчета производительности обработки (ТАШ, СТАШ, полирования инструментом со связанным полировальным порошком) и оценки качества обработанных поверхностей изделий из ПСК, а также прогнозирования работоспособности инструмента с различными характеристиками рабочего слоя.

2. Разработана методика расчета коэффициентов заполнения поверхности инструмента рабочим слоем, при которых обеспечивается его равномерный износ для существующих технологических систем и кинематических схем финишной обработки ПСК.

3. Разработаны новые инструменты для ТАШ, СТАШ и полирования поверхностей изделий из ПСК с функционально-ориентированными конструкциями и характеристиками рабочего слоя и способы их изготовления с применением нетоксичных порошков (оксида алюминия и ультрадисперсных алмазов (УДА)) и связующего (полиэтилентерефталата (ПЭТФ), в том числе, армированного базальтовыми волокнами, кремнийорганических соединений).

4. Усовершенствован технологический регламент процесса финишной обработки природного и синтетического камня разработанными инструментами, который включает комплексную оценку качества поверхности изделия по шероховатости, отражающей способности, идиохроматичности окраски, глубине нарушенного слоя и эллипсометрическим параметрам. Определены режимные параметры процесса АМ кристаллических материалов.

5. Осуществлена опытно-промышленная проверка разработанных инструментов и процессов, которые применены в производстве на камнеобрабатывающих предприятиях. Комплексное решение проблемы обеспечивает повышение в 1,5-2,0 раза технико-экономических показателей технологических процессов финишной обработки природного и синтетического камня, их соответствие мировому уровню.

**Личный вклад соискателя**

1. Разработана методика расчета производительности обработки (ТАШ, СТАШ, полирования инструментом со связанным полировальным порошком) и оценки качества обработанных поверхностей изделий из ПСК, а также прогнозирование трудоспособности инструмента с различными характеристиками рабочего слоя.

2. Разработана методика расчета коэффициентов заполнения поверхности инструмента рабочим слоем, при которых обеспечивается его равномерный износ, для существующих технологических систем и кинематических схем финишной обработки ПСК.

3. Разработаны новые инструменты для ТАШ, СТАШ и полирования поверхностей изделий из ПСК с функционально-ориентированными конструкцией и характеристикой рабочего слоя и способы их изготовления с применением нетоксичных порошков (оксида алюминия и ультрадисперсных алмазов (УДА)) и связующего (ПЭТФ, армированный базальтовыми волокнами ПЭТФ, кремнийорганические соединения).

4. Усовершенствован технологический регламент процесса финишной обработки природного и синтетического камня разработанными инструментами, который включает комплексную оценку качества поверхности изделия по шероховатости, отражающей способности, идиохроматичности окраски, глубиной нарушенного слоя и эллипсометрическими параметрами. Определены режимные параметры процесса АМ кристаллических материалов.

5. Осуществлена опытно-промышленная проверка разработанных инструментов и процессов, которые применены в производстве на камнеобрабатывающих предприятиях. Комплексное решение проблемы обеспечивает повышение в 1,5-2,0 раза технико-экономических показателей технологических процессов финишной обработки природного и синтетического камня, их соответствие мировому уровню.

**Апробация результатов диссертации**

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных конференциях, симпозиумах, семинарах: «Прогрессивная технология и автоматизированное оборудование для обработки деталей из неметаллических материалов микроэлектронных устройств» (1988 г., г. Львов), «Современные материалы, технологии, оборудование и инструмент в машиностроении» (2000 г., г. Киев), «Прогрессивные технологии в машиностроении» (2000г., г. Одесса), «Технология ремонта машин, механизмов, оборудования» (2000 г., г. Ялта), Conference of production engineering with international participation (2000 г., Kraljevo, Югославия), «Прогрессивные технологии и системы машиностроения» (2000 г., 2001 г., 2002 г., г. Донецк), «Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технологии его изготовления и применения» (2000 г., 2001 г., 2003 г., 2004 г., 2005 г., п. Морское, Украина), «Современные материалы, технологии, оборудование и инструменты в машиностроении» (2001 г., г. Киев), «Сверхтвердые инструментальные материалы на рубеже тысячелетий: получение, свойства, применение» (2001 г., г. Киев), «Современные материалы, технологии, оборудование и инструменты в машино- и приборостроении» (2001 г., г. Киев), «Наукові проблеми оптики та сучасного матеріалознав­ства» (2001 г., г. Киев), International conference «Physics of liquid matter: Modern problems» (2001 г., г. Киев), International Young Scientists Conference «Problems of Optics and High Technology Material Science» SPO (2002 г., 2003 г., 2004 г., г. Киев), «Прогрессивные технологии в машиностроении и приборостроении» (2003 г., г. Запорожье), «Сучасні процеси механічної обробки інструментами з НТМ та якість поверхні деталей машин» (2003 г., г. Киев), «Инженерия поверхности и реновация изделий» (2003 г., г. Ялта), Konferencija «NU-ROBOTI-FTS» (2003 г., Beograd, Югославия), «Наука. Техника. Технология» (2003 г., п. Славское, Украина), «Новые процессы и их модели в ресурсо- и энергосберегающих технологиях» (2003 г., г. Одесса), «Качество, стандартизация, контроль: теория и практика» (2003 г., 2006 г., Ялта), «Современные проблемы подготовки производства, заготовительного производства, обработки и сборки в машиностроении и приборостроении» (2003 г., 2004 г., 2006 г., г. Свалява, Украина), «Физические и компьютерные технологии» (2004 г., г. Харьков, Украина), Наук.-практ. конф., присвяч. 100-річчю з дня народження засновника кафедри оптики професора Шишловського О.А. (2005 г., г. Киев), ІV науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи» (2005 г., г. Киев), «Резание и инструмент в технологических системах» (2005 г., г. Алушта), «Прогресивні технології і системи машинобудування» (2005 г., г. Севастополь), «Процеси механічної обробки в машинобудуванні» (2005 г., г. Житомир), «Новые материалы и инструменты» (2005 г., г. Киев), XV международном научно-техническом семинаре «Высокие технологии, тенденции развития» (2006 г., г. Алушта).

* **Публикации**

По теме диссертационной работы опубликовано 88 научных работ, среди которых – 1 монография, 33 статьи в специализированных изданиях, утвержденных ВАК Украины, 48 статей и тезисов докладов на научно-технических конференциях и семинарах и 6 патентов Украины на изобретения.

Автор признателен научному консультанту д.т.н. Филатову Ю.Д. за помощь в постановке задач научных исследований, выполнении работы и обсуждении полученных результатов, коллегам по работе Рогову В.В., Бурману Л.Л., Майстренко А.Л., Дубу С.Н., Ткачу В.Н., Ящуку В.П., Поперенко Л.В., Крамару В.Г., Скрябину В.В., Вассерман Ф.М., Ветрову А.Г., Денисенко А.П., Дракиной Т.М., Ляхову В.Н., Пегловскому В.В., Сыроватскому М.Ф, Харитоненко Г.И. и Филатову А.Ю. за помощь в проведении экспериментов и обработке результатов.

Автор выражает большую благодарность академику НАН Украины Новикову Н.В. за поддержку и внимание к работе, методическую помощь, полезные замечания и советы при обсуждении и анализе результатов.

**ОБЩИЕ ВЫВОДЫ**

В результате выполненных экспериментально-аналитических исследований взаимодействия инструмента с изделием в контактной зоне при финишной алмазно-абразивной обработке различных видов природного и синтетического камня установлены закономерности формирования высококачественной поверхности изделия и износа рабочего слоя инструмента с учетом особенностей массопереноса и статистического характера распределения частиц шлама по размерам. На основе этого решена научно-техническая проблема повышения производительности и качества финишной алмазно-абразивной обработки природного и синтетического камня инструментами со связанными алмазными и другими по составу полировальными порошками путем усовершенствования технологических процессов обработки и применения новых инструментов с функционально-ориентированными конструкциями и характеристиками рабочего слоя. Полученные в диссертационной работе результаты рекомендованы и используются на камнеобрабатывающих предприятиях при применении новых инструментов и технологических процессов финишной алмазно-абразивной обработки ПСК в соответствии с современными требованиями к производительности производственных операций и качеству изделий.

Основные научные и практические результаты диссертационной работы состоят в следующем:

1. Разработана модель образования и направленного удаления частиц обрабатываемого материала и формирования высококачественной поверхности при финишной алмазно-абразивной обработке ПСК, согласно которой: частицы шлама обрабатываемого материала образуются в результате силового воздействия инструмента на поверхность изделия и перемещаются в объеме контактной зоны; удаление обрабатываемого материала представляется как массоперенос частицами шлама; возникновение и распространение дефектов и повреждений в поверхностном слое изделия обусловлены удалением частиц шлама и перемещением границы раздела инструмент-обрабатываемая поверхность.

2. На основе разработанной модели и экспериментально-аналитического исследования взаимодействия инструмента с изделием и изменения состояния их контактирующих поверхностей получены следующие закономерности:

- объем удаленного материала зависит от объема и концентрации частиц шлама с учетом статистического характера их распределения по площадям поверхности и определяется законом движения границы раздела инструмент-обрабатываемая поверхность;

- концентрация частиц шлама, удаленных в процессе финишной алмазно-абразивной обработки ПСК, тем больше, чем меньше коэффициент объемного износа, а их размеры  удовлетворяют неравенствам:  *Rmax* для процесса полирования и  *Rmax* для процесса шлифования;

- энергия  переноса обратно пропорциональна коэффициенту массового износа, линейно зависит от коэффициента теплопроводности материала изделия и температуры и определяет энергетические затраты на удаление обрабатываемого материала в процессе финишной алмазно-абразивной обработки ПСК (величина  при полировании в тысячу раз превосходит значение, характерное для шлифования);

- производительность финишной алмазно-абразивной обработки ПСК экспоненциально возрастает при уменьшении параметра  согласно формуле ( – предельная величина производительности обработки);

- скорость износа рабочего слоя инструмента зависит от режимных и кинематических параметров процесса обработки, геометрических размеров и формы поверхности изделия, коэффициента удельного износа инструментального материала и определяется для существующих технологических систем и кинематических схем обработки коэффициентами заполнения поверхности инструмента рабочим слоем, при которых обеспечивается его равномерный износ.

3. Экспериментально показано, что при взаимодействии поверхностей инструмента и изделия в процессе полирования показатели преломления и поглощения, коэффициент отражения света ПСК и состояние поверхности рабочего слоя инструмента периодически изменяются вследствие образования продуктов износа (частиц шлама и частиц износа инструмента), их локализации на контактирующих поверхностях в виде пластов налета и удаления с СОТС.

4. Расчетно-экспериментальным методом определены параметры, которые совместно с параметрами шероховатости *Ra*, *Rq* и *Rmax* характеризуют качество поверхности изделия и в совокупности дают возможность ее комплексной оценки:

- глубина нарушенного слоя поверхности изделия из ПСК, которая при шлифовании и полировании определяется законом движения границы раздела инструмент-обрабатываемая поверхность и зависит от средневероятностного размера частиц шлама и параметров шероховатости обработанной поверхности;

- показатель поглощения света изделия из природного камня, который линейно зависит от глубины нарушенного слоя обработанной поверхности;

- коэффициент отражения света поверхностей изделий из ПСК (на длине волны 530 нм), который экспоненциально увеличивается при уменьшении параметров их шероховатости;

- эллипсометрический параметр , который чувствителен к колориметрическим характеристикам ПСК и линейно уменьшается с увеличением параметров шероховатости *Ra*, *Rz*, *Rmax*;

- эллипсометрический параметр Ψ, зависимости которого от параметров шероховатости описываются возрастающими функциями, имеющими два линейных участка и разрыв при значениях параметров шероховатости, которые являются предельными при переходе от шлифованной к полированной поверхности;

- характеристика идиохроматической окраски (отношение спектров рассеяния света обработанной и эталонной поверхностями).

5. Разработаны методики: расчета производительности обработки ПСК (ТАШ, СТАШ, полирования инструментом со связанным полировальным порошком); расчета коэффициентов заполнения поверхности инструмента рабочим слоем, при которых обеспечивается его равномерный износ, для существующих технологических систем и кинематических схем финишной обработки ПСК; оптимизации характеристик рабочего слоя инструмента и прогнозирования его работоспособности; комплексной оценки качества поверхностей изделий с ПСК.

6. Разработаны новые инструменты с функционально-ориентированными конструкцией и характеристикой: для финишной обработки плоских поверхностей изделий из ПСК на станках радиально-консольного типа и мостовых шлифовально-полировальных станках (Патенты Украины №№ 51091, 64524 А); для ТАШ, СТАШ и полирования ПСК и способы их изготовления (Патенты Украины №№ 55047 А, 55048 А, 10751, 15433) из алмазных микропорошков, нетоксичных порошков оксида алюминия и ультрадисперсных алмазов, ПЭТФ после вторичной переработки и кремнийорганических соединений, которые обеспечивают повышение производительности и качества обработки.

7. Усовершенствован технологический регламент финишной обработки природного и синтетического камня новыми инструментами, который включает комплексную оценку качества обработанной поверхности по шероховатости, отражающей способности, идиохроматичности окраски, глубине нарушенного слоя и эллипсометрическим параметрам. По сравнению с технико-экономическими показателями процессов обработки природного и синтетического камня по традиционным технологиям обеспечивается повышение производительности обработки в 1,5 раза, параметров шероховатости поверхностей изделий из природного камня (габбро, гранита) с *Ra* 0,10-0,12 до *Ra*0,012-0,030, отражающей способности поверхностей изделий из синтетического камня (керамического гранита) в 1,2-2,0 раза.

8. Научные и практические результаты прошли опытно-промышленную проверку и применены на 10 предприятиях камнеобрабатывающей, оптико-механической и электронной промышленности.