

На правах рукописи



**ДУШКО Олег Викторович**

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
АЛМАЗНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ  
ИЗДЕЛИЙ ИЗ ВЫСОКОТВЕРДОЙ КЕРАМИКИ**

05.02.07 – Технология и оборудование механической  
и физико-технической обработки

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

г. Волгоград – 2019

Работа выполнена в научно-технологическом центре «Волжский научно-исследовательский институт абразивов и шлифования» Волжского политехнического института (филиал) ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»

Научный консультант:

**Шумячер Вячеслав Михайлович,**

доктор технических наук, профессор заведующий кафедрой «Строительство, технологические процессы и машины» Волжского политехнического института (филиал) ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»

Официальные оппоненты:

**Бекренев Николай Валерьевич,**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Техническая механика и детали машин» Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

**Веткасов Николай Иванович,**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой "Технология машиностроения" ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет»

**Носов Николай Васильевич,**

доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения», ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»

**Ведущая организация**

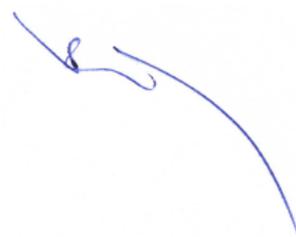
ФГБОУ ВО "Воронежский государственный технический университет"

Защита состоится 12 декабря 2019 г. в 10.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.028.06, созданного на базе ФГБОУ ВО Волгоградский государственный технический университет по адресу: 400005, Волгоград, пр. им. Ленина, 28, ауд.209

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Волгоградского государственного технического университета и на сайте [www.vstu.ru](http://www.vstu.ru).

Автореферат разослан «...» \_\_\_\_\_ 2019 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
Д 212.028.06



Крайнев  
Дмитрий Вадимович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### *Актуальность проблемы*

Развитие современного машиностроения связано с разработкой и внедрением новых материалов, а также прогрессивных технологических процессов их обработки. Необходимость этого обусловлена постоянным наращиванием интенсификации работы оборудования во всех отраслях промышленности. В ряде отраслей промышленности, в частности в нефтегазовой, атомной и химической, работоспособность, надежность, пожарная и экологическая безопасность производственных объектов существенно зависит от совершенства, надежности и ресурса работы тяжело нагруженных пар трения и уплотненных элементов различного назначения.

Наиболее перспективным и, пожалуй, единственным удовлетворительным решением столь сложной научной и инженерной задачи может быть применение различных композиционных материалов, например, карбидкремниевой керамики. Однако из-за высокой твердости этого материала механическая обработка заготовок возможна лишь с использованием синтетических алмазов. При этом, под воздействием зерен алмаза, керамика, испытывая сильные механические и термические нагрузки, выкрашивается. В результате этого возникает канавка, ширина которой превышает площадь соприкосновения алмазного зерна с материалом и в областях, прилегающих к канавке, возникают трещины (продольные, радиальные, латеральные), сколы и другие дефекты хрупкого происхождения, что отрицательно влияет на качество обработанных изделий.

Очевидно, что совершенствование способов обработки высокотвердых керамических материалов связано с изучением закономерностей сложного многофакторного процесса шлифования. При этом обращает на себя внимание факт отсутствия на данный момент математического аппарата управления процессом механической обработки высокотвердой керамики. Существующие формулы и уравнения для определения, например, сил шлифования металлов, не могут быть применены к керамике, так как основаны на эмпирических зависимостях и коэффициентах, полученных в результате длительной производственной и научной деятельности. Для керамики такого обширного банка данных пока нет.

Учитывая, что сочетание твердости, хрупкости и трещиностойкости является одним из ключевых вопросов технологии обработки деталей из керамики, возникает необходимость изучения влияния этих характеристик материала на готовые изделия в зависимости от силовых и тепловых воздействий при механической обработке.

Обеспечение высокого качества поверхности точных керамических деталей – сложная техническая задача. Наряду с низкой шероховатостью, ограничиваемой долями микрометров, специфическим требованием является отсутствие дефектов поверхности в виде сколов, микротрещин, микровыколов. В связи с этим возрастает роль финишной операции – суперфиниширования.

**Целью работы** является обеспечение эффективности алмазно-абразивной обработки изделий из высокотвердой керамики путем управления процессами в зоне обработки.

**Объект исследования** – процесс абразивной обработки заготовок из высокотвердой карбидкремниевой керамики.

**Предмет исследования** – физико-механические процессы в контакте «инструмент – заготовка», обеспечивающие бесколовую алмазно-абразивную обработку заготовок из карбидкремниевой керамики и заданную шероховатость обработанной поверхности.

**Задачи исследования:**

1. Разработать феноменологическую модель взаимодействия шлифовального круга и заготовки, описывающую процессы, протекающие в контакте «инструмент – заготовка» при шлифовании заготовок из карбидкремниевой керамики;

2. Разработать метод определения трещиностойкости карбидкремниевой керамики после абразивной обработки;

3. Установить влияние термосиловых нагрузок в контакте «шлифовальный круг – заготовка» с учетом неуравновешенности шлифовального круга на вертикальную составляющую силы резания;

4. Установить влияние на качество абразивной обработки допустимой ГОСТ неуравновешенности шлифовальных кругов;

5. Исследовать влияние состава смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) на процесс суперфиниширования заготовок из карбидкремниевой керамики и показатели качества обработки.

**Научная новизна работы** состоит в решении комплексной научно-технической проблемы, имеющей важное значение для отечественной промышленности, состоящей в обеспечении эффективности абразивной обработки изделий из высокотвердой керамики путем управления процессами в зоне обработки во взаимосвязи с прочностными и эксплуатационными характеристиками обрабатываемой поверхности. Существо решения заключается:

- в разработке феноменологической модели взаимодействия абразивного круга и заготовки, описывающей процессы, протекающие в контакте «инструмент – заготовка» при шлифовании заготовок из карбидкремниевой керамики;

- в определении зависимостей, позволяющих аналитическим путем рассчитывать значения составляющих сил шлифования с учетом характеристик абразивного инструмента и режимов обработки;

- в обосновании стохастического характера процесса формирования микронеровностей поверхности карбидкремниевой керамики при шлифовании, что подтверждено распределением значений высоты микронеровностей поверхности по нормальному закону Гаусса;

- в установлении влияния неуравновешенности шлифовальных кругов на колебания в плоскостях, перпендикулярных оси вращения, приводящего к увеличению вертикальной составляющей силы резания более 5%;

- в проведении термосилового анализа процесса шлифования карбидкремниевой керамики, исходя из условий ее трещиностойкости и рекомендации максимальных значений вертикальной составляющей силы шлифования ( $P_y$ );

- в разработке метода определения трещиностойкости карбидкремниевой керамики и аналитической зависимости между трещиностойкостью и длиной трещины;

- в установлении аналитических зависимостей, позволяющих рассчитывать значения коэффициента трения круга и заготовки в зоне шлифования и шероховатость обрабатываемой поверхности, от свойств смазочно-охлаждающей жидкости при суперфинишировании.

**Методы и средства исследований.** Системные исследования процессов шлифования базировались на положениях теории трения и износа, теории резания, физико-химической механики материалов, физической и коллоидной химии, неравновесной термодинамики. Теоретические исследования выполнены с использованием положений классической механики, теории вероятностей и математической статистики. Экспериментальные исследования проведены на аттестованных шлифовальных станках в испытательном центре ВНИИАШ, а также на автоматизированном испытательном комплексе (АИК). Для проведения исследований использовались как стандартные, так и оригинальные методики, а также математико-статистические методы планирования экспериментов и обработки их результатов.

**Практическая ценность и реализация результатов работы** заключается в разработке:

- феноменологической модели динамического взаимодействия «шлифовальный круг – заготовка»;

- аналитического метода определения сил шлифования;

- метода расчета режимов шлифования керамического материала из условия его трещиностойкости;

- метода расчета термосиловых нагрузок в контакте «шлифовальный круг – заготовка»;

- методики определения влияния степени неуравновешенности шлифовального круга на вертикальную составляющую силы резания;

- методики определения трещиностойкости высокотвердой керамики;

- метода экспресс-оценки трещиностойкости высокотвердых керамических материалов, позволяющего на всех этапах технологии механической обработки изделий прогнозировать их свойства.

**Результаты исследования внедрены:** в технологические службы ЗАО «ВИВ», г. Москва; АО «ЮНИМЕТ», г. Москва; «Нефтегазинжиниринг» (филиал ООО «Уралмаш НГО Холдинг» в Волгограде), что позволило реализовать выбор рациональных технологических режимов механической обработки изделий из высокотвердой керамики, обеспечивающих заданные требования к качеству готового изделия, что повышает надежность и увеличивает долговечность узлов трения в конструкции тяжело нагруженных пар трения буровых

насосов при эксплуатации в составе мобильных буровых установок не менее чем на 35 – 40%.

**Апробация работы.** Научные и практические результаты диссертационной работы докладывались на Международных научных и научно-практических конференциях: Уральском семинаре «Механика и процессы управления. Проблемы машиностроения», г. Миасс, 2003 – 2006 гг.; «Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы», г. Волжский, 2004 – 2010 гг.; «Динамика технологических систем», г. Саратов, 2004 г.; «Абразивное производство», г. Челябинск, 2005 г.; «Материалы и технологии XXI век», г. Пенза, 2005 г.; Российская школа по проблемам науки и технологий, г. Миасс, 2005 – 06 гг.; «Материалы и технологии XXI века», г. Пенза 2005 г.; «Науковий потенціал світу», г. Дніпропетровськ, 2005 г.; «Наука та інновації», г. Дніпропетровськ, 2005 г.; «Надежность и долговечность строительных материалов, конструкций и оснований фундаментов», г. Волгоград, 2005 г.; «Реконструкция», г. Санкт-Петербург, 2005 г.; «Региональные технологические и экономико-социальные проблемы развития строительного комплекса Волгоградской области. Наука. Практика. Образование», г. Волгоград, 2005 г.; «Инженерные проблемы современного материаловедения», г. Волжский, 2009 г.; «Наука и образование: проблемы, решения и инновации», г. Волжский, 2010 г.; «Материалы и технологии XXI века», г. Пенза, 2010 г.; «Наука и образование: архитектура, градостроительство и строительство», г. Волгоград, 2012 г.; Внутривузовская научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, г. Волжский, 2012– 2013 г.г.; «Инженерно-экологические проблемы строительного комплекса региона», г. Волгоград, 2014 г.; «Актуальные вопросы науки и техники», г. Самара, 2016 г.; «Евразийский союз ученых», г. Москва, 2016 г.; «Актуальные проблемы строительства, ЖКХ и техносферной безопасности», г. Волгоград, 2018 г.

**Публикации.** По материалам диссертационной работы опубликовано 75 статей, в том числе 29 из них в центральных изданиях, включенных в перечень периодических изданий ВАК РФ, 10 – в изданиях, индексируемых в БД СКОПУС и WoS, 2 монографии, получено 2 авторских свидетельства на изобретения.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения, библиографического списка из 342 наименований и 4 приложений. Материалы диссертации изложены на 253 страницах, содержит 100 рисунков и 31 таблицу.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Введение** содержит обоснование актуальности решаемой научной проблемы, цель и задачи, решение которых обеспечит ее достижение, информацию о научной новизне и практической ценности, реализации практических результатов, научные положения и результаты, выносимые на защиту.

**В первой главе** представлен аналитический обзор научно-технической информации о результатах исследований в области создания и механической обработки современных керамических и композиционных материалов, их свойств и характеристик. Благодаря многочисленным исследованиям

А. П. Гаршина, А. И. Голубева, И. В. Надеевой, Е. В. Славиной, Н. В. Новикова, О. И. Пушкарева, В. М. Шумячера, А. Adamiano, в настоящее время происходит пересмотр представлений о возможностях использования карбида кремния в машиностроении. Авторы показали, что материалы на его основе обладают повышенными физико-механическими свойствами и отвечают всем требованиям, предъявляемым к деталям и узлам, работающим в условиях больших нагрузок, при высоких температурах в агрессивных средах.

Следовательно, для успешного применения высокотвердой керамики в качестве деталей машин необходимо не только создать композиционный материал с требуемыми физико-механическими свойствами, но и найти способы их механической обработки.

В своих работах Н. Ю. Ковеленов, А. С. Дьяконов отмечают, что процесс шлифования керамического материала происходит дискретно и вокруг каждой режущей кромки образуется фронт хрупких микротрещин. Именно поэтому при определении оптимальных режимов шлифования необходимо учитывать как технологические ограничения (предельная шероховатость, требуемая точность обработки, максимальная контактная температура, максимальная глубина прижога), так и эксплуатационные требования, предъявляемые к изделиям из керамики, что показано в работах Л. В. Худобина, В. А. Назарьевой, В. П. Бахарева, В. В. Гусева, И. Е. Фрагина, А. Н. Тюрина, А. В., Балыкова, А. Б. Липатова.

В исследованиях А. В. Балыкова, З.И. Кремень, В.М. Шумячера, В. Г. Лебедева, Т. Н. Лоладзе, М. С. Наермана доказано, что решить задачу получения бесколовой поверхности у готового изделия возможно лишь завершающими операциями механической обработки – суперфинишированием. При этом следует иметь в виду, что состав и свойства смазочно-охлаждающей жидкости во многом определяют качество получаемой поверхности.

Теоретические аспекты алмазно-абразивной обработки высокотвердых материалов были изучены А. В. Королевым, Е. П. Мельниковой, В. В. Роговым, В. В. Гусевым, Г. А. Гогоци, В. А. Федоровичем, А. И. Голубевым, Л. А. Кондаковым, однако в основу их работ положены эмпирические зависимости, полученные для обработки металлов.

Таким образом, на сегодняшний день пока нет достаточно надежных, проверенных на практике, предложений по определению сил резания в зоне контакта абразивного зерна и поверхности высокотвердой карбидкремниевой керамики.

**Вторая глава** посвящена теоретическим исследованиям алмазно-абразивной обработки изделий из высокотвердой керамики и рассмотрена феноменологическая модель взаимодействия алмазного круга и заготовки.

Отметим, что на нынешнем этапе развития научно-технического прогресса ученые, конструкторы и технологи располагают достаточно обширной информацией относительно процессов, протекающих в зоне контакта обрабатываемой металлической поверхности и режущего инструмента. Однако, при обработке керамики, к сожалению, возникают большие трудности, связанные с недостаточным опытом ее механической обработки, особенно, в отношении процессов шлифования. На сегодняшний день пока нет достаточно надежных,

проверенных на практике, предложений по определению сил резания в зоне контакта абразивного зерна и поверхности высокотвердой карбидкремниевой керамики.

Для определения напряженности процесса шлифования керамики и определения зависимостей удельных нагрузок, действующих в зоне контакта круга с заготовкой в широком диапазоне изменения режимов обработки, нами применялась следующая зависимость удельной нагрузки  $P$  (Па):

$$P = \frac{P_y}{F_y}, \quad (1)$$

где  $P_y$  — вертикальная составляющая силы шлифования, Н;  $F_y$  — проекция площади контакта круга и заготовки на горизонтальную плоскость,  $\text{м}^2$ .

Подчеркнем, что вертикальную составляющую силу шлифования ( $P_y$ ), применительно к металлам, можно определить по эмпирическим зависимостям, которые были получены, как правило, на основании длительных испытаний и производственных наблюдений при обработке металлов.

Принимая во внимание (1), данная модель позволяет аналитически определить площадь контакта круга с заготовкой  $F$  и составляющие силы шлифования  $P$ .

На рис. 1 показана схема взаимодействия шлифовального круга и заготовки, позволяющая наглядно изучить процесс контакта обрабатываемой поверхности и режущего инструмента в трех взаимно перпендикулярных плоскостях.

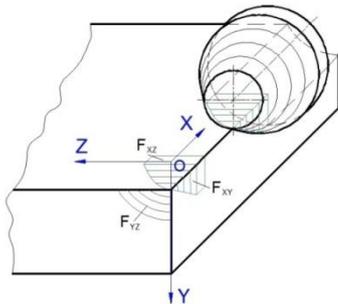


Рис. 1. Схема взаимодействия с заготовкой шлифовального кругом с конической заборной частью

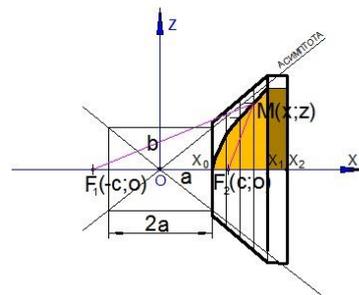


Рис. 2. Горизонтальная проекция сечения

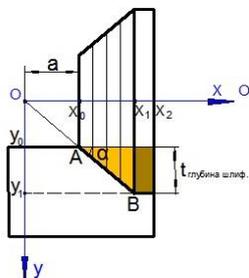


Рис. 3. Фронтальная проекция сечения

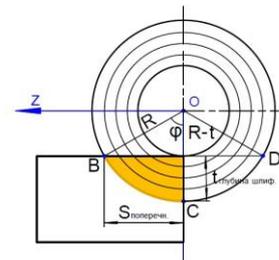


Рис. 4. Профильная проекция сечения

Нами рассматривался шлифовальный круг, имеющий форму цилиндра с конической заборной частью (в виде усеченного конуса), и заготовка в виде детали прямоугольного сечения.

Полученные в результате построения площади контакта инструмента с заготовкой отличаются друг от друга и формой и размерами. Эти площади являются результатом действия нормальных сил  $P_y, P_z, P_x$  на соответствующие плоскости детали, в которых возникают соответствующие напряжения  $\sigma_{xz}, \sigma_{xy}, \sigma_{yz}$ .

Принимая во внимание, что глубина шлифования несоизмеримо мала по сравнению с площадью шлифования, а обрабатываемый материал в трех направлениях однородный, с некоторым допущением можно предположить что:

$$\sigma_{xz} = \sigma_{xy} = \sigma_{yz} \text{ или } \frac{P_y}{F_{xz}} = \frac{P_z}{F_{xy}} = \frac{P_x}{F_{yz}}, \quad (2)$$

где  $F_{xz}, F_{xy}, F_{yz}$  — площади соответствующих сечений.

Уравнения (2) составляют основу предлагаемой феноменологической модели взаимодействия алмазного круга и заготовки, позволяющую определить все составляющие силы шлифования, если известна хотя бы одна из них, при условии, что площади контакта режущего инструмента и заготовки (детали) были аналитически определены.

В результате проведенных расчетов были получены зависимости, позволяющие аналитическим путем определить площади сечений  $F_{xz}, F_{xy}, F_{yz}$  (мм<sup>2</sup>):

$$F_{yz} = \frac{1}{2} \left[ R^2 \arccos \left( 1 - \frac{t}{R} \right) - (R-t) \sqrt{2Rt - t^2} \right], \quad (3)$$

$$F_{xy} = B \cdot t + \frac{t^2 \operatorname{ctg} \alpha}{2}, \quad (4)$$

$$F_{xz} = \frac{a + t \operatorname{ctg} \alpha}{2} \sqrt{(a + t \operatorname{ctg} \alpha)^2 - a^2} - \quad (5)$$

$$- \frac{a^2}{2} \ln \left[ (a + t \operatorname{ctg} \alpha) + \sqrt{(a + t \operatorname{ctg} \alpha)^2 - a^2} \right] + \frac{a^2}{2} \ln a + BS_{\text{попер}}.$$

Далее для решения поставленной задачи нами было проведено аналитическое определение поперечной (тангенциальной) составляющей силы резания  $P_z$ , рассчитанной с учетом кинетической энергии, затраченной на диспергирование материала. Обычно шлифование рассматривают как сумму силовых воздействий единичных абразивных зерен на обрабатываемый материал, в результате чего единичное зерно совершает работу по удалению припуска в виде стружки.

На рис. 5 показан процесс шлифования детали единичным зерном в направлении главного движения  $Z$ . При проведении исследований учитывалась скорость шлифования, размеры и структура шлифовального круга, свойства обрабатываемого материала и параметры стружки.

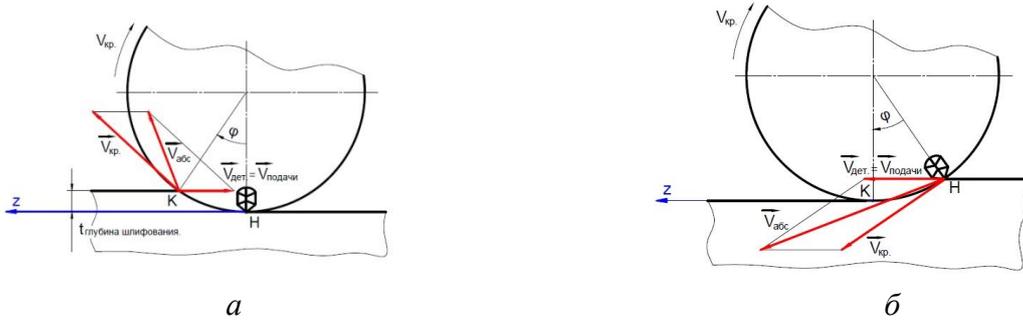


Рис. 5. Схема процесса шлифования: *a* — встречное шлифование; *б* — попутное шлифование

Рассматривая процесс диспергирования материала, можно отметить, что в начале врезания зерна в материал заготовки, глубина его внедрения в деталь небольшая (стружка не образуется) и поэтому принимаем скорость стружки равную  $\bar{V}_d$ . На завершающем этапе процесса диспергирования, стружка покидает деталь, приобретает максимальную скорость  $V_d + V_{кр} \cdot \cos \varphi$ . Изменение скорости стружки, происходит под действием силы  $P_z$ , которая совершает работу на пути снятия стружки. Математически это можно описать теоремой об изменении кинетической энергии точки:

$$\frac{m_i V_{ki}^2}{2} - \frac{m_i V_{ni}^2}{2} = A_i \quad (6) \quad \text{или} \quad \frac{m_i V_{ki}^2}{2} - \frac{m_i V_{ni}^2}{2} = P_z l_i, \quad (7)$$

где  $m_i$  — масса стружки;  $V_{ki}$  — конечная скорость стружки;  $V_{ni}$  — начальная скорость стружки;  $P_z$  — проекция силы резания на направление движения детали;  $l_i$  — длина стружки;  $A_i$  — работа силы  $P_z$ .

После преобразований (6, 7) было получено выражение для силы  $P_z$ , включающее свойства обрабатываемого материала, продольную подачу, глубину шлифования, частоту вращения и структуру круга при встречном и, соответственно, попутном шлифовании:

$$P_z = \frac{10^3 V_d \delta_{zi}^2 0,001 \rho B}{60 D_{кр} 0,01 C} (R - t) \left[ \frac{\pi n_{кр}}{30} (R - t) \pm 2V_d \right] \cdot 10^{-6}. \quad (8)$$

Аналитическое выражение (8) позволяет рассчитать значения проекции силы резания на направление, совпадающее с направлением окружной скорости шлифовального круга, в зависимости от основных параметров процесса шлифования и структуры (свойств) абразивного инструмента.

Вычислив  $P_z$ , можно по соотношениям (2) определить и другие составляющие силы резания —  $P_x$  и  $P_y$ :

$$P_y = \frac{\frac{a + t \operatorname{ctg} \alpha}{2} \sqrt{(a + t \operatorname{ctg} \alpha)^2 - a^2} - \frac{a^2}{2} \ln \left[ (a + t \operatorname{ctg} \alpha) + \sqrt{(a + t \operatorname{ctg} \alpha)^2 - a^2} \right] + \frac{a^2}{2} \ln a + BS_{\text{попер}}}{B \cdot t + \frac{t^2 \operatorname{ctg} \alpha}{2}} \times \quad (9)$$

$$\times \frac{V_d \delta_{a3} 0,001 \rho B (R - t) \left[ \frac{\pi n_{кр}}{30} (R - t) \pm 2V_d \right]}{60 D_{кр} 0,01 C \cdot 10^3},$$

$$P_x = \frac{\frac{1}{2} \left[ R^2 \arccos \left( 1 - \frac{t}{R} \right) - (R-t) \sqrt{2Rt - t^2} \right]}{B \cdot t + \frac{t^2 \operatorname{ctg} \alpha}{2}} \times \frac{V_d \delta_{a3} 0,001 \rho B (R-t) \left[ \frac{\pi n_{\text{кр}}}{30} (R-t) \pm 2V_d \right]}{60 D_{\text{кр}} 0,01 C \cdot 10^3}. \quad (10)$$

Таким образом, нами были получены зависимости (8), (9), (10), позволяющие аналитическим путем рассчитать составляющие силы резания  $P_z$ ,  $P_y$  и  $P_x$ .

Одной из основных причин образования трещин является повышенный нагрев обрабатываемой поверхности. Задача исследования состоит в том, чтобы установить при каких параметрах шлифования не будут образовываться трещины.

Для механической обработки керамики методик и ориентиров, позволяющих прогнозировать начало появления трещин пока нет. По теории Дебая существует температурная граница (температура Дебая), выше которой в твердом теле средняя энергия атомов с ростом температуры растет и начинается интенсивное изменение кристаллической решетки («последебаевские» температуры).

В наших исследованиях этот период можно принять за начало размягчения керамики и появления трещин при температурных воздействиях на шлифуемый материал. На основе анализа научной и справочной литературы, нами предлагается из интервала температур размягчения керамики (1500...1800°C) для расчетов принять температуру 1400°C и считать ее температурой начала размягчения керамики («температура появления трещин»). В настоящей работе эта температура учтена при анализе таблицы 1, позволяющей определять некоторые режимы шлифования из условий трещиностойкости керамики.

Таблица 1

Теоретические значения температур в контакте шлифовального круга и заготовки

D круга, мм	T, °C						
	n = 1000 об/мин	n = 1400 об/мин	n = 1600 об/мин	n = 1800 об/мин	n = 2000 об/мин	n = 2400 об/мин	n = 2600 об/мин
80	123	217	279	350	447	540	613
100	172	325	440	575	724	916	1060
120	230	416	610	776	990	1248	<b>1480</b>
140	305	618	805	1015	1265	<b>1610</b>	<b>1858</b>
160	391	825	1036	1295	<b>1665</b>	<b>2140</b>	<b>2352</b>
180	507	1025	1355	<b>1720</b>	<b>2056</b>	<b>2677</b>	<b>3070</b>
200	602	1265	<b>1716</b>	<b>2030</b>	<b>2530</b>	<b>3160</b>	<b>3530</b>
220	716	<b>1454</b>	<b>1849</b>	<b>2335</b>	<b>2675</b>	<b>3455</b>	<b>3885</b>
240	910	<b>1747</b>	<b>2214</b>	<b>2713</b>	<b>3210</b>	<b>4020</b>	<b>4510</b>

Второй причиной трещинообразования может быть вертикальное силовое воздействие инструмента на поверхность шлифуемого материала. Для теоретической оценки механического воздействия абразивного зерна на поверхность шлифования необходимо знать вертикальную составляющую силы резания  $P_y$ , которая и вызывает напряжения сжатия —  $\sigma_{\text{сж}}$  ( $\sigma_{\text{сж}} = 2000$  МПа). Сила  $P_y$  (9) определяется предложенным нами методом.

Теоретические значения вертикальной составляющей силы резания  $P_y$ 

$D$ круга, мм	$P_y$ , Н								
	$n=1000$ об/мин	$n=1200$ об/мин	$n=1400$ об/мин	$n=1600$ об/мин	$n=1800$ об/мин	$n=2000$ об/мин	$n=2400$ об/мин	$n=2600$ об/мин	$n=2800$ об/мин
60	10,4	13,2	16,3	19,6	23,2	25,7	31,3	34,3	36,8
80	18,7	21,2	24,3	26,8	30,6	33,6	39,4	42,5	45,9
100	22,1	24,5	28,6	31,5	35,6	39,5	47,6	51,0	54,4
120	23,8	28,5	32,5	36,8	41,2	45,6	54,3	58,3	63,0
140	27,2	34,0	39,0	44,2	50,3	55,8	66,3	71,8	78,2
160	31,6	39,0	45,3	51,0	57,8	64,6	75,6	82,4	<b>88,4</b>
180	37,4	42,7	50,0	56,8	63,5	70,4	<b>84,3</b>	<b>92,3</b>	<b>99,0</b>
200	38,1	45,3	53,7	62,9	71,4	78,2	<b>93,4</b>	<b>102,0</b>	<b>110,5</b>
220	44,5	51,0	59,5	68,3	76,2	<b>84,4</b>	<b>102,3</b>	<b>110,5</b>	<b>119,0</b>
240	50,2	58,3	68,6	77,5	<b>87,3</b>	<b>96,7</b>	<b>116,4</b>	<b>126,5</b>	<b>136,0</b>

В таблице 2 представлены результаты теоретических исследований вертикальной составляющей силы резания в зависимости от изменения диаметра шлифовального круга и частоты его вращения, позволяющие выбирать режимы алмазной обработки высокотвердой керамики из условия получения бесколовой поверхности детали:  $P_y$  при этом не должны быть более 82,4 Н.

Из литературных источников и производственного опыта автора известно, что в процессе шлифования возникают колебания инструмента ввиду неуравновешенности вращающихся элементов станка и электродвигателя. Однако, особенно ощутимыми и вместе с тем малоизученными являются колебания, проявляющиеся при неуравновешенности (эксцентриситете) шлифовального круга, вызванной остаточным дисбалансом, допускаемым ГОСТ Р 53922-2010. В результате неуравновешенности снижается точность обработки деталей, увеличивается шероховатость поверхностей изделий, появляются прижоги и вырывы, а для керамики, ввиду ее хрупкости и свойств разрушаться без остаточных деформаций, появляются трещины. Особо подчеркнем, что для керамики отдельных рекомендаций или международных стандартов на обработку шлифованием пока нет. Очевидно, что действующие ГОСТы и рекомендации по допустимым дисбалансам шлифовальных кругов разрабатывались с учетом обработки металлов. Поэтому при проведении настоящих исследований появилась необходимость определить, какие динамические добавки к статическим реакциям опор возникают при рекомендованной ГОСТ допустимой неуравновешенности шлифовальных кругов.

Проведенные теоретические исследования показали, что вертикальная составляющая силы резания ( $P_y$ ) может возрасти на величину более 5 % (по причине неуравновешенности инструмента), а с увеличением диаметра, массы круга и частоты его вращения дополнительная сила при допустимой неуравновешенности резко возрастает до 10 %. Полученная величина не оказывает заметного влияния на качество обработанной металлической поверхности, в то время как для высокотвердой керамики это неизбежно приводит к появлению различного рода дефектов на поверхности готового изделия (трещины, сколы и т.п.). При этом было установлено, что вертикальная составляющая силы резания  $P_y$  есть величина переменная и изменяется в некоторых значениях от  $P_{y \text{ стат}}$  до  $P_{y \text{ дин}}$ . Предла-

гаем эту величину определить как динамический коэффициент неуравновешенности шлифовального круга —  $K_{\text{дш}} = P_{\text{у дин}} / P_{\text{у стат}}$ , а динамическая нагрузка на заготовку с учетом неуравновешенности шлифовального круга будет равна:  $P_{\text{удин}} = P_{\text{устат}} \cdot K_{\text{дш}}$ .

Таким образом, предлагаемая нами феноменологическая модель, позволяет наглядно изучить контакт заготовки и режущего инструмента во всех плоскостях шлифования и аналитическим путем определить силы резания с учетом площадей шлифования. При этом, следует иметь в виду, что для гарантированной алмазно-абразивной обработки керамики без трещин максимальные напряжения сжатия следует ограничить величиной 2000 МПа, а значения вертикальной составляющей силы резания  $P_y$  не должны быть более 82,4 Н.

**В третьей главе** рассмотрено экспериментальное оборудование и методология исследования основных характеристик процессов абразивной обработки изделий из высокотвердой керамики.

**В четвертой главе** дано обоснование выбора объекта исследований и приведены полученные результаты физико-механических свойств опытных образцов карбидкремниевой керамики. Следует иметь в виду, что исследование карбидкремниевой керамики, как и любого другого материала, должно проводиться на образцах, химический состав и механические свойства которых достоверно известны. Это связано, в первую очередь, с тем, что в отличие от металлов, для керамики пока не выработано единых требований на химический состав, механические и технологические показатели. Таким образом, для получения максимально достоверных результатов исследований, нами опытным путем были определены механические свойства образцов карбидкремниевой керамики, изготовленных на Волжском абразивном заводе.

В ходе наших исследований предполагалось, что получение композиционных материалов в системах SiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и SiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-AlN позволит сочетать высокую химическую стойкость, износостойкость, низкий коэффициент трения, присущие оксиду и нитриду алюминия, с высокой теплопроводностью и прочностью, характерных для карбида кремния. В качестве объектов исследования были выбраны материалы в системе SiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, содержащие 20, 50 и 80 процентов оксида алюминия — Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

В производственных условиях Волжского абразивного завода опытным путем были определены физико-механические характеристики полученных образцов карбидкремниевых материалов, которые в дальнейшем были использованы в наших исследованиях.

Обращает на себя внимание тот факт, что в процессе шлифования керамики появляются различного рода трещины, которые нарушают сплошность материала, его способность сопротивляться внешним силовым воздействиям. Поэтому трещиностойкость керамики следует считать одной из основных характеристик материала, наряду с упругостью и твердостью.

Из сравнения изменения длины трещины от величины нагрузки индентирования (рис. 6) можно сделать вывод о том, что снижение шероховатости приводит к увеличению коэффициента трещиностойкости материала. На рис. 7 приведена зависимость коэффициента трещиностойкости  $K_{1C}$  карбидкремниевой керамики от длины трещины, построенная по уравнению Анстиса на

основании полученных нами экспериментальных данных для материала 50%SiC-50%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.  $C = 400$  мкм;  $a = 35$  мкм;  $l = 365$  мкм;  $HV = 17$  ГПа;  $E = 302$  ГПа;  $P = 400$  Н;  $\Phi = 3$  — константа К. Ниихара, по утверждению автора, представляющая собой отношение твердости материала  $HV$  к пределу текучести  $\sigma_T$ , т. е.  $\Phi = HV/\sigma_T$ .

$$K_{1C} = 0,016 \left( \frac{E}{HV} \right)^{1/2} \frac{P}{C^{3/2}}, \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}. \quad (11)$$

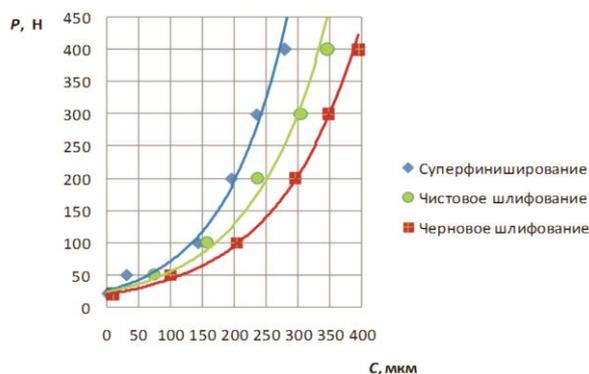


Рис. 6. Зависимость длины трещины в углах отпечатка пирамиды Виккерса от нагрузки индентирования для различных способов механической обработки керамики

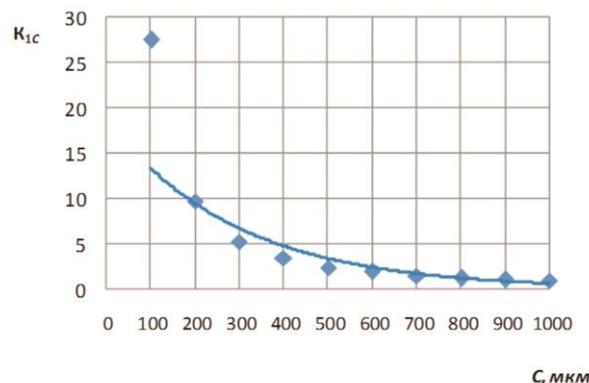


Рис. 7. Зависимость коэффициента трещиностойкости  $K_{1C}$  карбидкремниевой керамики 50%SiC-50%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> от длины трещины  $C$  в углах отпечатка пирамиды Виккерса

Если согласиться с утверждениями Лоуна (*Lawn H. R.*), что отношения  $(E/H)^{1/2}$  к нагрузке  $P$  должны быть постоянными, то зависимость трещиностойкости в координатах « $K_{1C} - C$ » предлагаем описать уравнением:

$$K_{1C} = 18,896e^{-0,003C}. \quad (12)$$

Функция (12) представляет собой расчетное уравнение, которое позволяет прогнозировать появление и величину трещин в материале и может быть использовано при экспресс-контроле состояния обработанной поверхности на различных этапах технологического процесса.

**В пятой главе** приведены методика и результаты экспериментальных исследований алмазно-абразивного шлифования изделий из высокотвердой керамики. На основании обзора литературы по механической обработке карбидкремниевой керамики и теоретических исследований процессов шлифования нами было установлено целесообразным характеризовать обработку материала из условий трещиностойкости: предельными значениями нормальной составляющей силы шлифования, мгновенной температурой в зоне контакта «инструмент — заготовка», а качество получаемой поверхности — шероховатостью, с учетом того, что выступы и впадины неровностей носят случайный характер.

В результате проведенных экспериментальных исследований сил шлифования в контакте «инструмент — заготовка» были получены осциллограммы записи нормальной  $P_y$  ( $I$ ) силы при встречном и попутном шлифования, полученная для окружной скорости 21 м/с и диаметре круга 200 мм (рис. 8).

Из приведенных данных видно, что нормальная сила  $P_y$  является величиной непостоянной и в процессе шлифования меняется от  $P_{y \min}$  до  $P_{y \max}$ . При

этом, если проанализировать связь между ординатами  $P_y$  с течением времени, то можно утверждать, что изменения нормальной силы имеет элемент периодичности. При допустимой неуравновешенности шлифовального круга результирующие колебания для выбранных условий шлифования можно рассматривать как биение.

Из проведенного анализа осциллограмм было установлено, что имеет место рассеивание сил относительно среднего арифметического значения, которое можно принять за математическое ожидание ввиду большого числа наблюдений. В теории вероятности и математической статистики такое рассеивание (разброс) характеризуется средним квадратическим отклонением  $\sigma$ . Считаем, при определении сил, действующих на заготовку во время шлифования карбидкремниевой керамики, следует учитывать неуравновешенность инструмента и принимать максимальное динамическое давление на заготовку как сумму среднего значения и величины среднего квадратического отклонения вертикальной нагрузки:

$$P_{\text{удин}} = P_{\text{уср}} + \lambda^* \sigma, \quad (13)$$

где  $\lambda^*$  — нормирующий множитель, определяющий вероятность события (в нашем случае система принята за идеальную и  $\lambda^*$  равен единице).

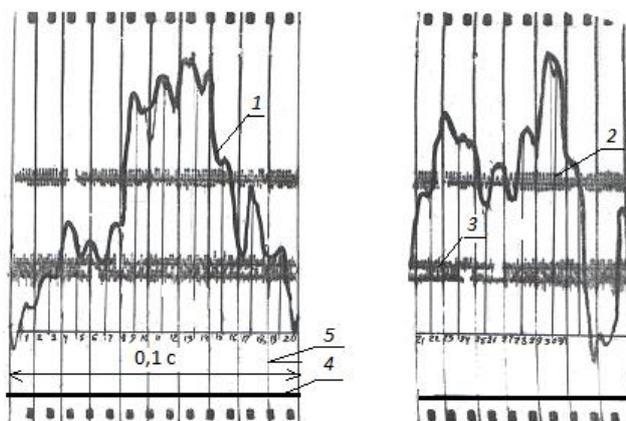


Рис. 8. Осциллограмма записи вертикальных усилий  $P_y$  и вибраций инструмента и стола станка 3Г71М: 1 — нормальная сила  $P_y$  (Н); 2 — вибрация инструмента; 3 — вибрация стола; 4 — путь, пройденный столом за 0,1 сек; 5 — время, равное 0,01 сек

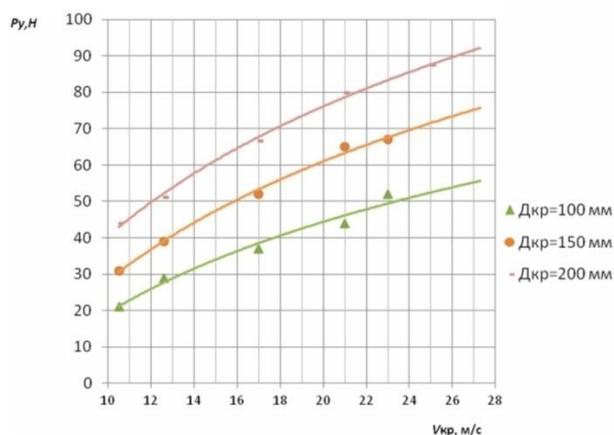


Рис. 9. Экспериментальные значения нормальных сил шлифования карбидкремниевой керамики  $50\%SiC-50\%Al_2O_3$

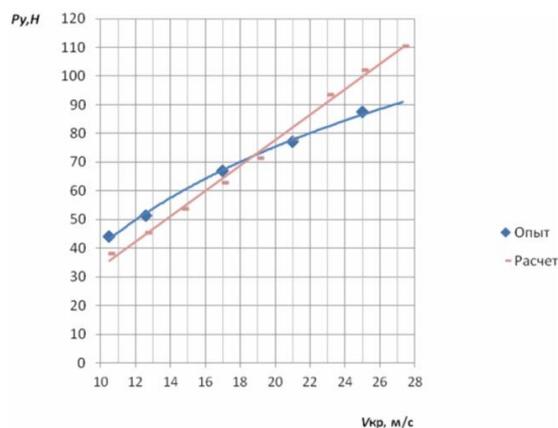


Рис. 10. Сравнение экспериментальных и расчетных значений нормальных сил шлифования  $P_y$  карбидкремниевой керамики  $50\%SiC-50\%Al_2O_3$   $D_{кр} = 200$  мм

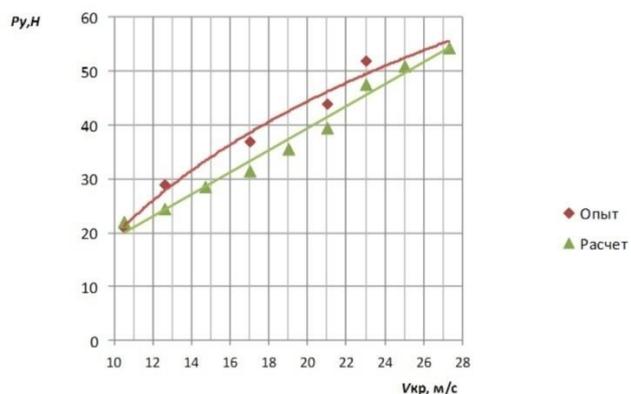


Рис. 11. Сравнение экспериментальных и расчетных значений нормальных сил шлифования  $P_y$  карбидкремниевой керамики 50% SiC-50% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> для круга  $D_{кр} = 100$  мм

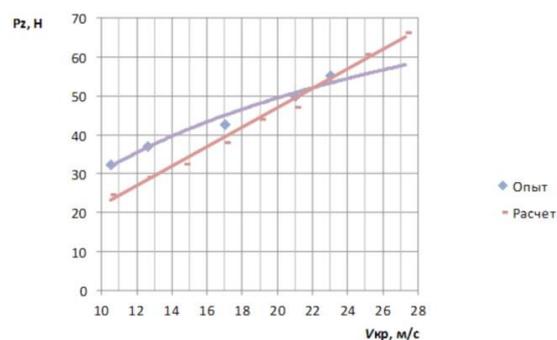


Рис. 12. Сравнение экспериментальных и расчетных значений тангенциальных сил шлифования  $P_z$  карбидкремниевой керамики 50% SiC-50% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> для круга  $D_{кр} = 200$  мм

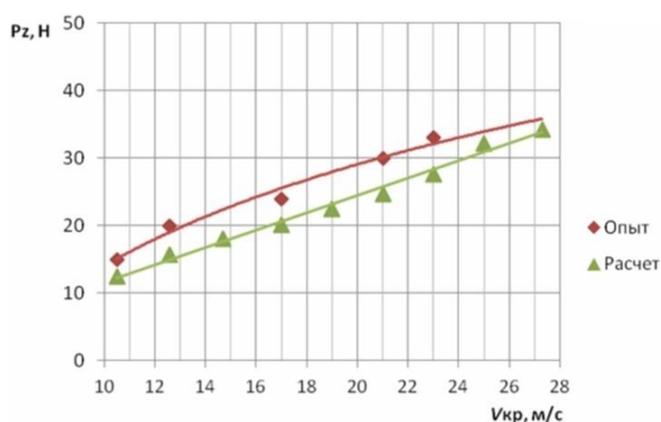


Рис. 13. Сравнение экспериментальных и расчетных значений тангенциальных сил шлифования  $P_z$  карбидкремниевой керамики 50% SiC-50% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> для круга  $D_{кр} = 100$  мм

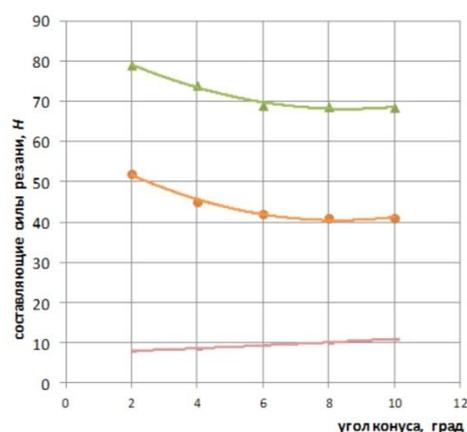


Рис. 14. Динамика процесса шлифования керамики 50% SiC-50% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> при различных углах заправки алмазного круга:  $D_{кр} = 200$  мм;  $V_{кр} = 27$  м/с

На рис. 12 и 13 представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований тангенциальных сил шлифования карбидкремниевой керамики, полученные при одинаковых режимах, а на рис. 14 показана динамика процесса шлифования карбидкремниевой керамики при различных углах заправки круга. Из анализа полученных результатов можно утверждать, что применение алмазного круга с углом заправки, например,  $6^\circ$  уменьшает нормальную  $P_y$  и касательную составляющую силы шлифования примерно на 8...13 %.

В настоящих исследованиях основным измерителем качества шлифования карбидкремниевой керамики была принята шероховатость обработанной поверхности. Теоретически установлено и практически доказано, что основной причиной возникновения микронеровностей на поверхности обрабатываемой детали является силовое воздействие инструмента и неуравновешенность системы: «станок — приспособление — инструмент — деталь», что видно из записей колебаний инструмента (1) и стола (2) (рис. 15).

Статистические наблюдения микронеровностей поверхности шлифованной керамики были проведены при различных режимах шлифования алмазными кругами типа 1А1 (диаметром от 100 до 200 мм) в среде СОЖ (0,3% содовый раствор). Скорость шлифовального круга менялась от 10,5 м/с до 25 м/с; скорость стола — от 10 м/мин до 15 м/мин; глубина подачи от 0,1 мм до 0,05 мм.

При расшифровке профилограммы было принято увеличение горизонтальное  $\times 500$ , а вертикальное —  $\times 1000$ .

Подобным образом были исследованы на предмет шероховатости поверхности образцов из материалов SiC-20% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и SiC-80% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Приведенные экспериментальные данные подтверждают, что шероховатость поверхности керамики с увеличением содержания Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, при одних и тех же режимах шлифования, снижается (рис. 19).

Анализ профилограмм шлифованных поверхностей (рис. 16—18) показывает, что кроме наибольших выступов и впадин имеется целое множество неровностей самой разнообразной формы и размеров. При этом в чередовании этих неровностей нельзя установить четкой закономерности. То обстоятельство, что после выступа на поверхности обязательно будет впадина определенной формы, явление случайное.

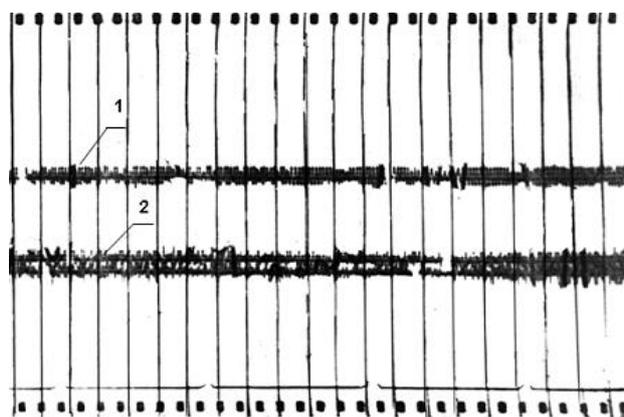


Рис. 15. Оциллограмма записей колебаний инструмента (1) и стола (2)

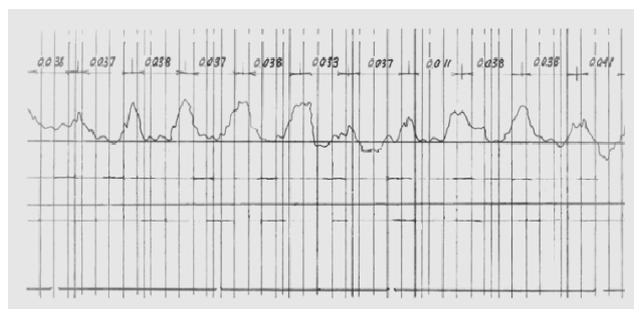


Рис. 16. Профилограмма поверхности образца из карбидкремниевой керамики — черновое шлифование

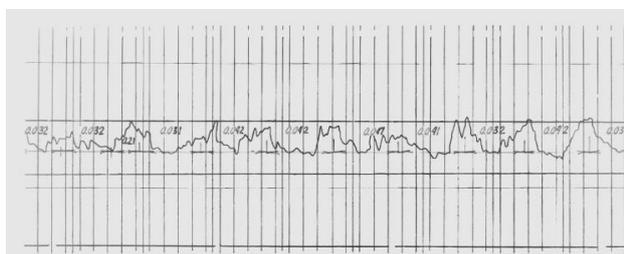


Рис. 17. Профилограмма поверхности образца из карбидкремниевой керамики — чистовое шлифование

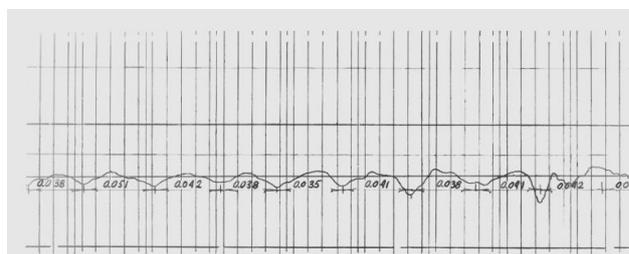


Рис. 18. Профилограмма поверхности образца из ца из карбидкремниевой керамики — суперфиниширование

Поэтому, считаем возможным и правомерным утверждать, что поверхность шлифования карбидкремниевой керамики представляет собой беспорядочное количество больших и малых неровностей и носит случайный характер. При шлифовании металлов этот факт не учитывается, так как процесс

воздействия зерна направлен на упругие деформации выступов и их оснований. При шлифовании керамики происходит хрупкое разрушение поверхностного слоя и не только большие, но и микроскопические выступы и впадины могут быть концентраторами трещин, для чего необходимо и весьма важно рассмотреть шероховатость поверхности за пределами значений  $R_a$  и  $R_z$  методами теории случайных функций. В наших исследованиях горизонтальная плоскость профиля шероховатости принималась нами как математическое ожидание ( $M(H_i) = H$ ). Используя выражения  $D(H_i) = \sum_{i=1}^n P(H_i)H_i^2$  и  $\sigma = +\sqrt{D(H_i)}$ , где  $P(H_i)$  — частота событий, были определены экспериментальные значения распределения случайных величин неровностей шероховатости по базовой длине образцов (табл. 3, 4, 5 и рис. 20—22).

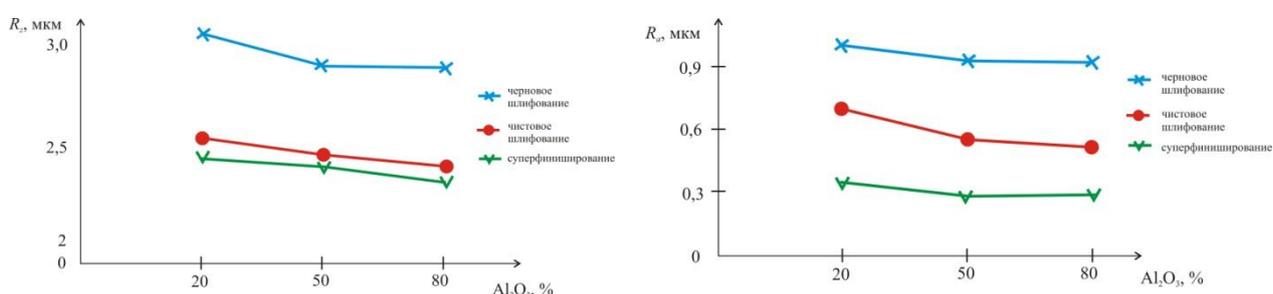


Рис. 19. Зависимость шероховатости обработанной поверхности от состава карбидкремниевой керамики

Таблица 3

#### Черновое шлифование

	Величина отклонений неровностей от условной горизонтальной плоскости в мкм								
	0	0,1...0,2	0,3...0,5	0,6...0,8	0,9...1,1	1,2...1,4	1,5...1,7	1,8...2	2,1...2,2
Число событий	6	12	17	21	19	9	7	5	2
Частота событий $P(H_i)$	0,06	0,12	0,17	0,21	0,19	0,09	0,07	0,05	0,02

Таблица 4

#### Чистовое шлифование

	Величина отклонений неровностей от условной горизонтальной плоскости в мкм								
	0	0,1...0,2	0,3...0,5	0,6...0,8	0,9...1,1	1,2...1,4	1,5...1,7	1,8...2	2,1...2,2
Число событий	7	15	26	25	7	4	3	3	
Частота событий $P(H_i)$	0,07	0,15	0,26	0,25	0,07	0,04	0,03	0,03	

Таблица 5

#### Суперфиниширование

	Величина отклонений неровностей от условной горизонтальной плоскости в мкм								
	0	0,1...0,2	0,3...0,5	0,6...0,8	0,9...1,1	1,2...1,4	1,5...1,7	1,8...2	2,1...2,2
Число событий	16	33	32	14	3	2			
Частота событий $P(H_i)$	0,16	0,33	0,32	0,14	0,03	0,02			

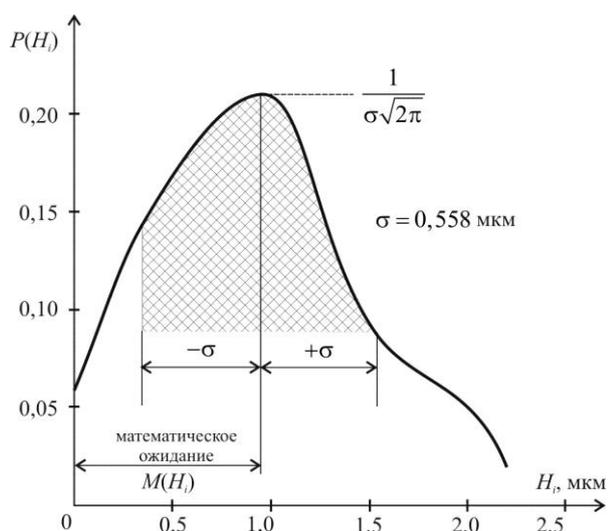


Рис. 20. Плотность распределения вероятности микронеровностей шлифованной керамики (черновое шлифование)

На рисунках отражена ситуация, когда полученные опытным путем кривые в координатах « $P(H_i)$ – $H_i$ » определяются двумя факторами: центром группирования неровностей  $M(H_i)$  (математическим ожиданием) и отклонением от этого группирования — дисперсией  $D(H_i)$ .

Таким образом, с некоторым приближением, можно утверждать, что случайные неровности поверхности шлифованной керамики распределяются по нормальному закону и могут быть описаны кривой Гаусса. Сравнивая функцию Гаусса и полученные экспериментальные зависимости, можно утверждать, что при значительном увеличении наблюдений экспериментальные кривые могут совпадать с классическими. Считаем, что при использовании ГОСТ 2789—73 необходимо в части обработки высокотвердой керамики, например, карбидкремниевой, добавить новый параметр, характеризующий дисперсионный разброс параметров шероховатости.

Весьма важно, по нашему мнению, при дальнейшем изучении шероховатости керамики знать не только, какие значения она принимает при определенных параметрах, но и как часто, или с какой вероятностью, появляются эти значения. В теории вероятностей эту задачу может решить интегральная функция распределения случайной величины  $F(x) = P(H_i < x_i)$ , где  $P(H_i < x_i)$  — вероятность

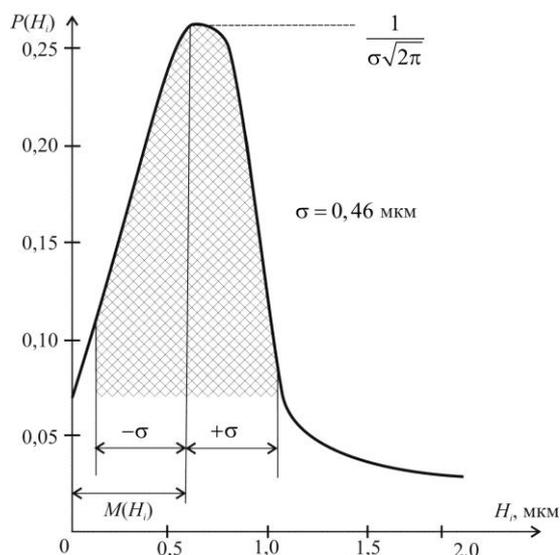


Рис. 21. Плотность распределения вероятности микронеровностей шлифованной керамики (чистовое шлифование)

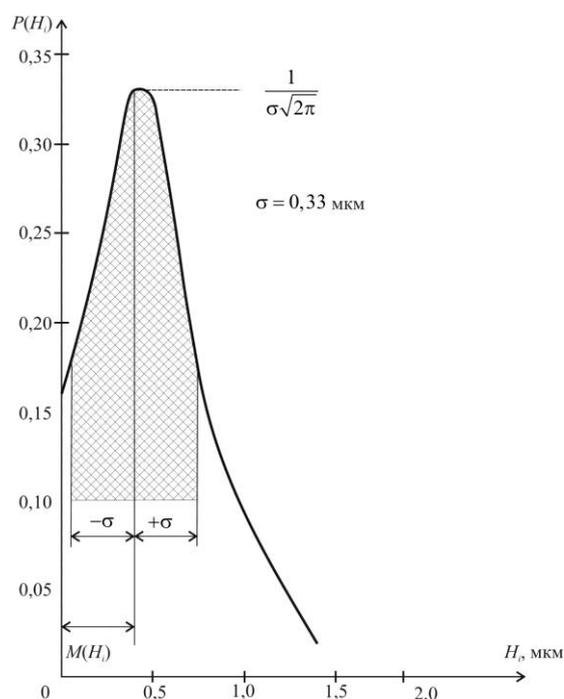


Рис. 22. Плотность распределения вероятности микронеровностей шлифованной керамики (суперфиниширование)

того, что случайная величина  $H_i$  примет значение меньше  $x_i$ . На рис. 23 показаны кривые интегрального распределения вероятности шероховатости при черновом, чистовом шлифовании и суперфинишировании. Таким образом, из рис. 23 видно, что среднее арифметическое отклонение  $R_a$ , определенное по ГОСТ, не отображает истинного характера неровностей реальной поверхности, и было бы желательно шероховатость определять на основе дисперсионного анализа, что очень важно при оценки трещинообразования поверхности высокотвердых керамических материалов, как:  $H_i = R_a \pm \sigma$ .

Следует подчеркнуть, что на качество обработанной поверхности карбидкремниевой керамики заметно влияет состав и свойства смазочно-охлаждающей жидкости. Учитывая, что при проведении нами экспериментальных исследований в качестве СОЖ использовался 0,3% раствор кальцинированной соды при его подаче по замкнутому циклу.

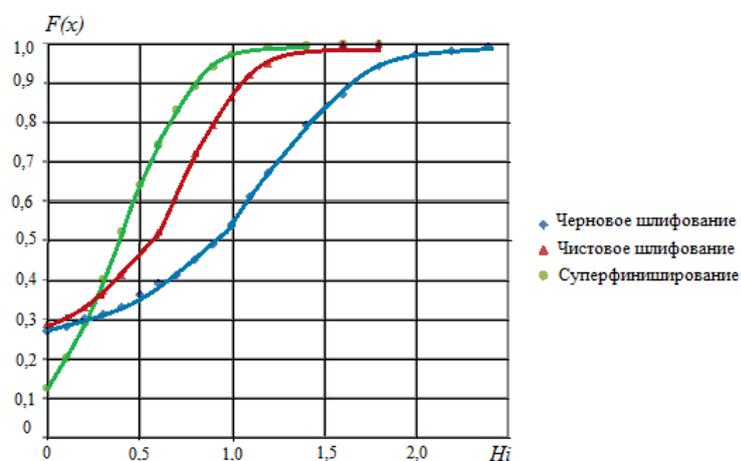


Рис. 23. Интегральные кривые распределения вероятности шероховатости при шлифовании карбидкремниевой керамики

Именно с этим раствором сравнивались результаты испытаний трех СОЖ: синтетической ВФ-3, полусинтетической В26 и эмульсии ИХП-45Э (концентрации 10 %) на предмет их влияния на силы шлифования (рис. 24, 25). Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что применение СОЖ ИХП-45Э не дало заметного результата, и ее применение при обработке карбидкремниевой керамики представляется нам малоэффективным. Лучшие результаты были получены при шлифовании с ВФ-3. Несколько уступает ей СОЖ В26, хотя при ее использовании было также отмечено снижение сил шлифования. Установлено, что применение СОЖ ВФ-3 обеспечило снижение нормальной составляющей силы шлифования  $P_y$  в среднем на 30 % при одновременном снижении тангенциальной составляющей силы шлифования  $P_z$  примерно на 20 %.

При наблюдениях за состоянием режущей поверхности круга при работе с разными жидкостями было отмечено наличие на ней белой пленки при работе с В26 и ВФ-3, что свидетельствует о высоких моющих свойствах этих СОЖ. Кроме того, наличие поверхностно-активных веществ (ПАВ) способствует образованию защитных пленок, препятствующих развитию адгезии, что приводит, в свою очередь, к снижению коэффициента трения. Установлено, что СОЖ, содержащие поверхностно-активные вещества, обеспечивают удаление шлифовального шлама, предотвращают скапливание мелкодисперсных частиц керамики на рабочей поверхности круга (в межзеренном пространстве). Все это приводит к снижению усилий резания,

облегчению диспергирования шлифуемого материала, уменьшению вероятности образования трещин, сколов и скрытых дефектов.

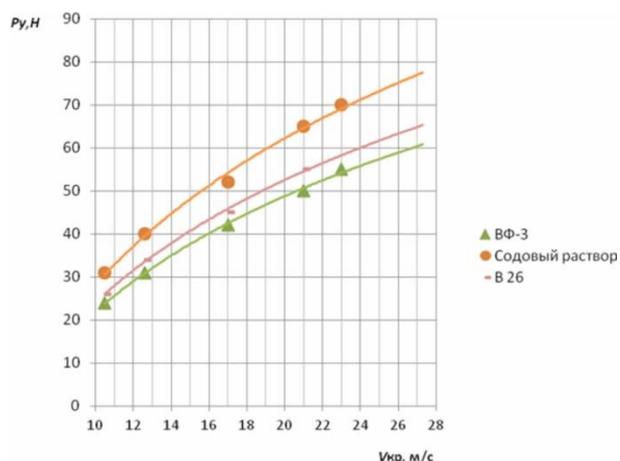


Рис. 24. Зависимость силы  $P_y$  от СОЖ при шлифовании карбидкремниевой керамики 50% SiC-50% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: глубина шлифования 0,20 мм/ход; диаметр круга 150 мм

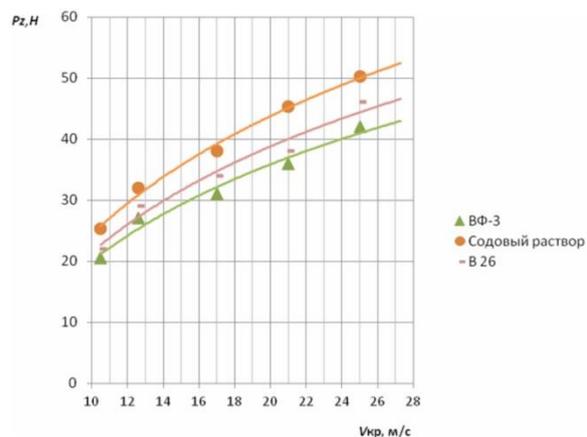


Рис. 25. Зависимость силы  $P_z$  от СОЖ при шлифовании карбидкремниевой керамики 50% SiC-50% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: глубина шлифования 0,20 мм/ход; диаметр круга 150 мм

Таким образом, можно утверждать, что при операциях шлифования высокотвердых керамических материалов необходимо применять синтетические СОЖ, в состав которых входят поверхностно-активные вещества.

Практически установлено, что в процессе механической обработки высокотвердой керамики алмазным инструментом неизбежно возникают различные дефекты в виде трещин, сколов и т.п. не только на рабочей поверхности, но и на некоторой глубине детали. Поэтому для получения керамических изделий заданного качества особо важную роль играют финишные операции - суперфиниширование. При этом крайне важно применять ту СОЖ, которая в максимальной степени будет способствовать решению этой сложной технической задачи.

Несмотря на крайне малые зазоры (до 0,05 мкм) между инструментом и деталью, смазочно-охлаждающая жидкость должна максимально эффективно удалять продукты диспергирования из зоны контакта и предотвращать возможную в этих условиях адгезию пары «инструмент – деталь». Это во многом зависит от характера внешнего силового воздействия в среде СОЖ и ее гидродинамического влияния на вынос продуктов диспергирования.

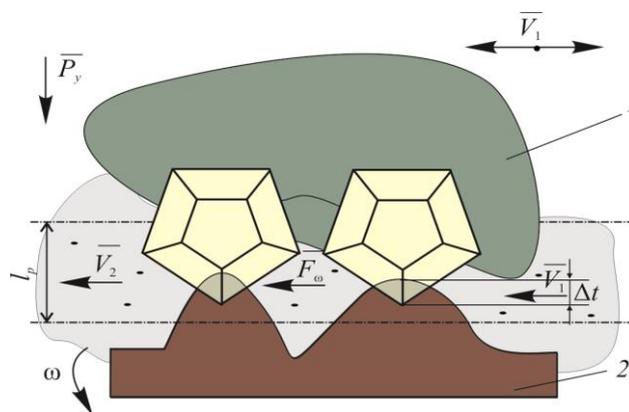


Рис. 26. Схема контакта бруска и обрабатываемой поверхности: 1 — брусок; 2 — деталь

На самом деле, если рассмотреть схему контакта «брусок — заготовка» (рис. 26) и принять, что в зону контакта (зазор  $l_p$ ) поступает жидкость со скоростью  $V$ , то ввиду изменения скорости частиц на входе и выходе из контактной зоны, изменяется кинетическая энергия ( $T$ ) жидких и твердых частиц в объеме  $W$ , т. е.  $dT = \frac{\rho V^2}{2} dW$  (где  $V$  — скорость частицы (м/с), меняющаяся от  $V_1$  на входе, до  $V_2$  на выходе из объема  $W$ ;  $\rho$  — плотность суспензии (кг/м<sup>3</sup>)).

Дальнейшие рассуждения позволили получить расчетное уравнение для гидродинамической силы  $F_w$ , которая действует в замкнутом объеме  $W$  и удаляет продукты диспергирования из зазора  $l_p$ , пропорциональная плотности и ускорению частиц суспензии:

$$F_w = m_w \frac{dV}{dt}. \quad (14)$$

Для наших исследований были выбраны СОЖ из трех распространенных групп (углеводородные, эмульсии, водные) и определены их физико-химические показатели.

Учитывая особенности суперфиниширования алмазными брусками (малые зазоры между связкой инструмента и обрабатываемой поверхностью), в качестве одного из основных требований к СОЖ необходимо считать ее способность проникать в зону контакта «инструмент — деталь», т. е. образование замкнутого объема массы  $m_w$  и появление на рабочих поверхностях смазочного слоя. Считаем, что смачивающая способность СОЖ является важным показателем для оценки ее эффективности в процессах финишных операций обработки высокотвердой технической керамики алмазными брусками.

Из анализа полученных нами экспериментальных данных можно заключить, что с точки зрения смачивающих свойств наибольшее предпочтение следует отдать углеводородным СОЖ ( $\theta = 2^\circ$ ) или эмульсиям ( $\theta = 15^\circ$ ), а с точки зрения удаления продуктов диспергирования (зависимость (14)) — эмульсионным или водным жидкостям ( $\rho = 1007 \dots 1009$  кг/м<sup>3</sup>). Применение водных растворов при финишной обработке изделий из высокотвердой керамики нам представляется нецелесообразным, поскольку они не позволяют получить поверхность высокого качества в силу низких смачивающих способностей, что приводит к прекращению диспергирования материала, к адгезионному схватыванию в зоне контакта «инструмент — деталь».

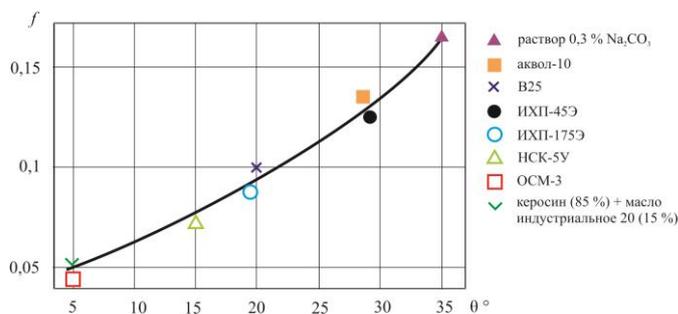


Рис. 27. Зависимость коэффициента трения в контакте «абразивное зерно — образец» от смачивающих свойств СОЖ (образец — карбидкремниевая керамика 50%SiC-50%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)

При исследовании опытного образца карбидкремниевой керамики 50%SiC-50%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> методом микроиндентирования установлено, что смазоч-

но-охлаждающие жидкости оказывают влияние на его микротвердость по-разному: углеводородные СОЖ способствуют снижению микротвердости на 4...5 %; эмульсии — на 1,5...2,5 %; водные жидкости не влияют на микротвердость образцов из высокотвердой карбидкремниевой керамики. Таким образом, определяющим свойством СОЖ при суперфинишировании высокотвердых керамических материалов необходимо считать их проникающие и смачивающие свойства. Это приводит к увеличению глубины внедрения индентора в поверхность образца за счет снижения силы трения в контакте «грань пирамиды — образец», что подтверждается опытными данными. При этом, полученная экспериментальная зависимость коэффициента трения ( $f$ ) от краевого угла смачивания ( $\theta$ ) (рис. 27) может быть описана уравнением:

$$f = 0,0418e^{0,04\theta}. \quad (15)$$

Функция (15) позволяет прогнозировать величину изменения силы трения в контакте индентора и поверхности материала в зависимости от свойств смазочно-охлаждающей жидкости, что является одним из определяющих факторов повышения эффективности алмазной обработки высокотвердой керамики.

Следовательно, высокие смачивающие способности СОЖ позволяют образовывать на поверхностях взаимодействующих тел защитный слой смазки, который препятствует возникновению адгезионных процессов, что, несомненно, можно считать основным фактором эффективного суперфиниширования карбидкремниевой керамики (рис. 28). Данное утверждение наглядно подтверждается результатами экспериментальных исследований зависимости шероховатости получаемой поверхности ( $R_a$ ) от краевого угла смачивания ( $\theta$ ) (рис. 29), позволивших получить зависимость  $R_a = f(\theta)$ :

$$R_a = 0,0187\ln(\Theta) + 0,0749. \quad (16)$$

Таким образом, используя уравнение (16), можно рассчитать ожидаемое качество обработанной поверхности карбидкремниевой керамики при выполнении операций суперфиниширования в среде различных смазочно-охлаждающих жидкостей.

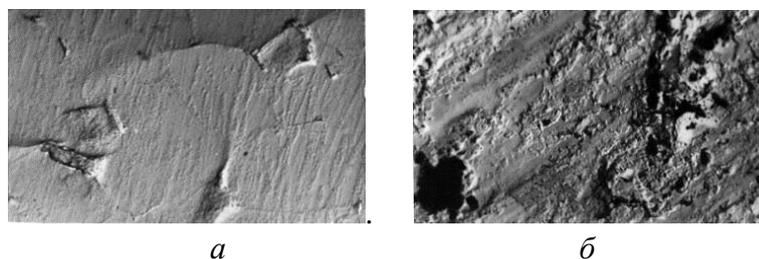
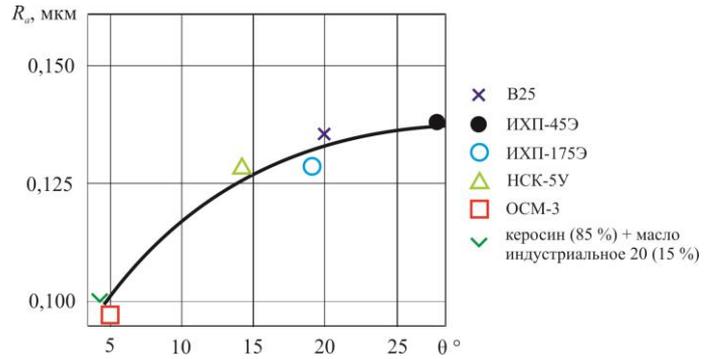


Рис. 28. Поверхность керамики 50% SiC-50% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> после суперфиниширования,  $\times 7800$ : *a* — применение углеводородных СОЖ; *б* — применение водных СОЖ

Рис. 29. Зависимость шероховатости обработанной поверхности образца из карбидкремниевой керамики 50%SiC-50%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> от смачивающих свойств СОЖ при суперфинишировании



Следует отметить, что в процессе механической обработки высокотвердой керамики и, в частности, карбидкремниевой, наблюдается весьма активный износ инструмента, который, как показывает практика, может превышать величину диспергирования керамики. Необходимо подчеркнуть, что на износ инструмента (шлифовального бруска) оказывают влияние не только свойства обрабатываемого материала, но и смазочно-охлаждающая жидкость. В ходе экспериментов установлено, что твердость шлифовального бруска, например 5410 20x10x100 63С 6 СТЗ 33 В, может снижаться практически в два раза после контакта со смазочно-охлаждающими жидкостями. Очевидно, что снижение прочностных свойств инструмента неизбежно приводит к возрастанию его износа при обработке изделия. Однако следует обратить внимание на тот факт, что СОЖ, имеющие низкие смачивающие свойства и снижающие прочность шлифовального бруска незначительно, не могут эффективно удалять продукты диспергирования из рабочей зоны в силу тех же свойств. Таким образом, для достижения высокого качества финишной обработки изделий из высокотвердых керамических материалов одним из основных условий следует считать рациональный выбор смазочно-охлаждающей жидкости. При этом предпочтение следует отдавать углеводородным СОЖ, учитывая, что заданного качества поверхности удастся достичь при повышенном износе инструмента.

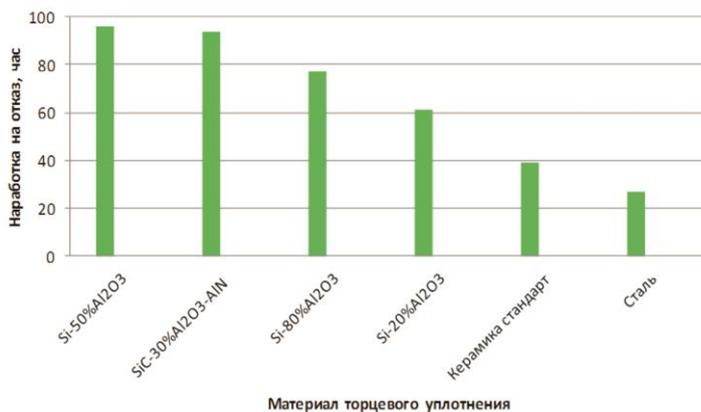


Рис. 30. Показатели наработки на отказ торцевых уплотнений, выполненных из различных материалов

Лабораторные исследования изделий из карбидкремниевой керамики показали, что они по своим свойствам достаточно полно отвечают требованиям, предъявляемым к изделиям для тяжело нагруженных узлов и агрегатов. Таким образом, можно утверждать, что проведенные нами исследования позволили в значительной степени повысить надежность работы уплотнительных элементов гидроагрегатов, работающих в абразивосодержащих и химически активных средах (рис. 30). Анализ графиков показывает, что изделия из карбидкремниевой керамики, алмазно-абразивная обработка которых осуществлялась по техноло-

гии, разработанной на основе наших исследований и рекомендаций, обеспечивают ресурс работы в 2,2...4,3 раза выше стандартных изделий, серийно выпускаемых отечественной промышленностью.

*В шестой главе* приводятся результаты промышленной апробации результатов исследований.

*В заключении работы* изложены основные результаты проведенных исследований.

*В приложениях* представлены акты внедрения результатов исследований.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана феноменологическая модель, позволившая предложить метод аналитического определения сил резания на основе взаимосвязи сил и площадей взаимодействия инструмента и детали с учетом законов классической механики, что позволило вывести зависимости для определения продольной, поперечной и вертикальной составляющих силы резания с учетом диаметра шлифовального круга, глубины шлифования, структуры абразивного круга, угла заправки инструмента, продольной и поперечной подачи заготовки.

Предложены теоретические и практические рекомендации, позволяющие ускоренным методом установить зависимость вертикальных и касательных сил шлифования от геометрических размеров инструмента и окружной скорости шлифовального круга. Это позволило заключить, что нормальные напряжения в зоне контакта инструмента и заготовки могут возрасти до значений более 3000 МПа, что совпадает с пределом прочности керамики на сжатие и поэтому вполне возможно появление трещин. Для гарантированного шлифования керамики без трещин предложено максимальные напряжения сжатия ограничить величиной 2000 МПа, а значения вертикальной составляющей силы резания  $P_y$  не должны быть более 82,4 Н.

2. На основании экспериментальных исследований предложены аналитическая и графическая зависимости, позволяющие определить трещиностойкость керамики от длины трещины по углам пирамиды Виккерса и показано, что эти зависимости изменяются по экспоненциальному закону, что дает возможность прогнозировать появление трещин на различных стадиях механической обработки изделий из высокотвердых керамических материалов (экспресс-контроль).

Экспериментальными исследованиями подтверждено, что для расчета трещиностойкости высокотвердых керамических материалов можно использовать формулу Анстиса.

В отличие от металлов, в настоящее время для технической керамики как исходного материала для изготовления деталей единых стандартов (ГОСТ) по химическим и физико-механическим характеристикам не разработано. При исследовании керамических материалов необходимо опытным путем определять основные характеристики, уточняющие свойства композиционных материалов.

Из существующего разнообразия измерения твердости материалов для керамики следует применять метод измерения под большой нагрузкой при помощи четырехгранной пирамиды Виккерса.

С практической точки зрения хрупкость керамики целесообразно считать мерой механического поведения материала и определять её упрощенным методом по формулам Г. А. Гогоци.

3. Установлено, что смещение центра масс шлифовального круга относительно центральной оси вращения, допускаемое ГОСТ Р 53922-2010, вызывает дополнительные колебания инструмента в плоскостях, перпендикулярных оси вращения, и приводит к увеличению вертикальной составляющей до 5...8%. При этом, данные колебания имеют периодический характер и изменяются по закону синуса или косинуса, что является одной из причин образования трещин на поверхности обрабатываемого материала из высокотвердой керамики.

Для оценки степени влияния изменяющейся вертикальной составляющей силы шлифования введено понятие динамического коэффициента неуравновешенности шлифовального круга и предложен метод его расчета, а также разработана методика определения динамических нагрузок на опоры вала шлифовального станка при его статической неуравновешенности.

Опытным путем с учетом неуравновешенности шлифовального круга определены нормальные и тангенциальные силы шлифования высокотвердой керамики в зависимости от окружной скорости и размеров инструмента. Значения сил шлифования, полученные теоретическим путем, отличаются от экспериментальных значений на величину не более 10 %. Это можно объяснить тем, что при теоретических исследованиях не рассматривалось применение СОЖ и не учитывались динамические «добавки» от неуравновешенности шлифовального круга.

Показано, что выявить остаточные технологические напряжения после шлифования высокотвердой карбидкремниевой керамики практически невозможно: индентирование отображается только одной ветвью нагружения.

4. Теоретически установлено и практически подтверждено, что мгновенные температуры в зоне контакта «инструмент – заготовка» могут достигать значений начала размягчения керамики (дебаевская температура) и быть определяющими в процессе образования трещин. Для получения поверхности изделия заданного качества предложено температуру в контакте ограничить величиной 1400 °С.

5. Проведенные исследования позволили установить, что шлифованная поверхность высокотвердой керамики представляет собой беспорядочное количество больших и малых неровностей и носит случайный характер. В связи с этим, при определении сил, действующих на заготовку во время шлифования, необходимо принимать максимальное динамическое давление на деталь как сумму среднего значения и дополнительной величины, вызванной неуравновешенностью шлифовального круга. Установлено, что максимальные значения нормальных сил шлифования следует ожидать в пределах 70...80 Н, а тангенциальных — 55...65 Н.

При шлифовании керамики, в отличие от металлов, происходит хрупкое разрушение поверхностного слоя и не только большие, но и малые выступы и впадины могут быть концентраторами трещин. Поэтому считаем необходимым рассматривать шероховатость поверхности керамики за пределами значений  $R_a$  и  $R_z$ .

С некоторым приближением можно утверждать, что неровности поверхности шлифованной керамики распределяются по нормальному закону и могут быть описаны кривой Гаусса.

6. Качество обработки поверхности изделий из высокотвердой керамики является фактором повышения трещиностойкости, а суперфиниширование — обязательной заключительной операцией механической обработки высокотвердых керамических материалов.

Установлено, что для достижения высокого качества финишной обработки изделий из высокотвердых керамических материалов одним из основных условий следует считать рациональный выбор смазочно-охлаждающей жидкости, отдавая предпочтение углеводородным СОЖ.

На основании проведенных экспериментальных исследований получены расчетные уравнения, которые позволяют прогнозировать величину изменения силы трения и качество обработанной поверхности карбидкремниевой керамики при выполнении операций суперфиниширования в среде смазочно-охлаждающих жидкостей с различными реологическими свойствами.

7. Результаты исследования внедрены в технологическую службу ЗАО «ВИВ», г. Москва; в технологическую службу АО «ЮНИМЕТ», г. Москва; в технологическую службу «Нефтегазинжиниринг» (филиал ООО «Уралмаш НГО Холдинг» в Волгограде).

Внедрение результатов исследований в производство позволило реализовать выбор рациональных технологических режимов механической обработки изделий из высокотвердых керамических материалов, состава СОЖ, обеспечивающих заданные в технической документации требования к качеству готового изделия. Применение таких изделий в конструкции тяжело нагруженных пар трения буровых насосов с приводной мощностью 600 кВт при эксплуатации в составе мобильных буровых установок повышает надежность и увеличивает долговечность узлов трения не менее чем на 35 – 40%.

**Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:**

***Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ***

1. Душко, О. В. Повышение износостойкости резинометаллических поршней бурового насоса методом диффузионной поверхностной модификации [Текст] / О. В. Душко, Ю. Н. Дроздов, П. В. Поляков // Вестник машиностроения. - 1989. - № 9. - С. 17-19.
2. Душко, О. В. Автоматизированные пневмогидравлические испытательные установки [Текст] / О. В. Душко, В. И. Пындак // Техника машиностроения. - 2000. - № 2. - С. 74-76.
3. Душко, О. В. Сборный поршень для буровых и цементировочных агрегатов [Текст] / О. В. Душко, В. И. Пындак // Нефтяное хозяйство. - 2000. - № 12. - С. 49-50.
4. Душко, О. В. Математическая модель процесса абразивного диспергирования металла [Текст] / О. В. Душко, В. М. Шумячер, И. В. Башкирцева // Технология машиностроения. - 2005. - № 12. - С. 46-50.

5. Душко, О. В. Исследование влияния смазочно-охлаждающей жидкости на коэффициент трения абразива по металлу [Текст] / О. В. Душко, В. М. Шумячер, И. В. Башкирцева // Технология машиностроения. - 2005. - № 12. - С. 39–41.
6. Душко, О. В. Композиционные износостойкие материалы на основе карбида кремния [Текст] / О. В. Душко, Д. О. Пушкарев, А. П. Уманский // Огнеупоры и техническая керамика. - 2005. - № 2. - С. 22–24.
7. Душко, О. В. Методология прогнозирования эффективности шлифования высокотвердых керамических материалов по энергетическому критерию их поверхностной хрупкости [Текст] / О. В. Душко, В. М. Шумячер, Д. О. Пушкарев // Станки и инструменты. - 2009. - № 3. - С. 22–24.
8. Душко, О. В. Экспериментальная установка для исследования процессов абразивной обработки при доводочных операциях [Текст] / О. В. Душко, В. М. Шумячер // Станки и инструменты. - 2010. - № 2. - С. 38–40.
9. Душко, О. В. Влияние состава смазочно-охлаждающей жидкости на процесс финишной обработки высокотвердых керамических материалов [Текст] / О. В. Душко // Вестник ВолгГАСУ. Сер.: Стр-во и архитектура, 2011. - Вып. 25 (44). - С. 171–177.
10. Душко, О. В. Установка для оценки эффективности процессов алмазно-абразивной обработки материалов доводочными брусками [Текст] / О. В. Душко, В. М. Шумячер, Д. О. Пушкарев // Станки и инструменты. - 2011. - № 4. - С. 38–40.
11. Душко, О. В. Повышение эффективности алмазного шлифования высокотвердых керамических материалов [Текст] / О. В. Душко, В. М. Шумячер // Станки и инструменты. - 2011. - № 3. - С. 32–37.
12. Душко, О. В. Пути снижения толщины дефектного слоя на поверхности высокотвердых керамических материалов [Текст] / О. В. Душко // Вестник ВолгГАСУ. Сер.: Стр-во и архитектура, 2011. - Вып. 25 (44). - С. 163–170.
13. Душко, О. В. Метод математической обработки микроструктуры поверхности трущихся тел [Текст] / О. В. Душко // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер.: Политемат. - 2012. - Вып. 2 (22). - URL: [www.vestnik.vgasu.ru](http://www.vestnik.vgasu.ru) (дата обращения: 22.01.2013).
14. Душко, О. В. Повышение надежности объемных гидроагрегатов путем применения керамических материалов [Текст] / О. В. Душко // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер.: Политемат. - 2012. - Вып. 2 (22). - URL: [www.vestnik.vgasu.ru](http://www.vestnik.vgasu.ru) (дата обращения: 22.01.2013).
15. Душко, О. В. Испытательное оборудование и методология экспресс-оценки работоспособности алмазных порошков [Текст] / О. В. Душко // Известия ВолгГТУ. Сер.: Прогрессивные технологии в машиностроении. - 2013. - Вып. 9, № 7 (110). - С. 17-19.
16. Душко, О. В. Оценка толщины дефектного слоя высокотвердой керамики при алмазном шлифовании [Текст] / О. В. Душко // Известия ВолгГТУ. Сер.: Прогрессивные технологии в машиностроении. - 2013. - Вып. 9, № 7 (110). - С. 19-21.
17. Душко, О. В. Универсальное испытательное оборудование для тяжелонагруженных пар трения [Текст] / О. В. Душко // Справочник. Инженерный журнал. - 2013. - № 8. - С. 23-26. - Библиогр.: с. 26 (11 назв.).
18. Душко, О. В. Повышение качества изделий из высокотвердой керамики для тяжелонагруженных пар трения [Текст] / О. В. Душко, И. Х. Мышлинская // Надежность. - 2014. - № 3 (50). - С. 62 - 66.
19. Душко, О. В. Нагруженность и износостойкость резинометаллических поршней буровых и нефтепромысловых насосов [Текст] / О. В. Душко, В. И. Пындак // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. - 2014. - № 5. - С. 23-25.
20. Душко О. В. Проценко О. В. Аналитическое определение поперечной силы резания при шлифовании керамики [Текст] / О. В. Душко, О. В. Проценко // Вестник ВолгГАСУ. Сер.: Стр-во и архитектура. - 2014. - Вып. 37 (56). - С. 139-142. - Библиогр.: с. 141.
21. Душко, О. В. Феноменологическая модель взаимодействия инструмента и заготовки при шлифовании карбидкремниевой керамики [Текст] / О. В. Душко, О. В. Проценко

- ко // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер.: Политематическая. - 2014. - Вып. 3 (34). - URL: [www.vestnik.vgasu.ru](http://www.vestnik.vgasu.ru).
22. Душко, О. В. Определение сил резания при шлифовании карбидокремниевой керамики [Текст] / О. В. Душко, О. В. Проценко // Справочник. Инженерный журнал. - 2015. - № 10 (223). - С. 38-40.
23. Душко, О. В. Влияние термосиловых нагрузок на образование трещин при обработке высокотвердой керамики [Текст] / О. В. Душко // Вестник ВолгГАСУ. Сер.: Стр-во и архитектура. - 2015. - № 40. - С. 155-165.
24. Душко, О. В. Гидродинамический анализ условий диспергирования карбид-кремниевой керамики в среде СОЖ [Текст] / О. В. Душко // Вестник ВолгГАСУ. Сер.: Стр-во и архитектура. - 2015. - № 40. - С. 144-154.
25. Душко, О. В. Определение трещиностойкости высокотвердой керамики [Текст] / О. В. Душко // Огнеупоры и техническая керамика. - 2016. - № 1-2. - С. 24-27.
26. Душко, О. В. Анализ влияния состава смазочно-охлаждающей жидкости на качество финишной обработки изделий из высокотвердых керамических материалов [Текст] / О. В. Душко [и др.] // Справочник. Инженерный журнал с приложением. - 2016. - № 10 (235). - С. 3-6.
27. Повышение износостойкости деталей нефтегазового оборудования, изготовленных из композиционных материалов на основе SiC-AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и SiC-AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ALN [Текст] / О. В. Душко [и др.] // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. - 2017. - № 1. - С. 30-32.
28. Душко, О. В. Исследование напряжённо-деформированного состояния уплотнителя поршня и системы "уплотнитель-цилиндр" [Текст] / О. В. Душко, Г. В. Воронкова, С. С. Рекунов // Международный научно-исследовательский журнал. - 2017. - № 4 (58), ч. 4. - С. 43-47. - Библиогр.: с. 47 (5 назв.).
29. Душко, О. В. Влияние контактной температуры на образование трещин при шлифовании высокотвердых керамических материалов [Текст] / О. В. Душко // Огнеупоры и техническая керамика. - 2017. - № 1-2. - С. 11-13.
- Публикации в изданиях, индексируемых в БД СКОПУС, WoS**
30. Душко, О. В. Optimization of Piston Compressor Geometric Size Using the Genetic Algorithm Method [Электронный ресурс] / О. В. Душко, Г. В. Воронкова, С. С. Рекунов // Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2018) (Moscow, Russia, 15-18 May, 2018) / ed. by A. A. Radionov [et al.] ; Moscow Polytechnic University [et al.]. - Cham (Switzerland) : Springer, 2019. - P. 1097-1105. - URL : [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-95630-5\\_115](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-95630-5_115)
31. Борисова, Н. И. Modern problems of energy efficiency programs implementation at the enterprises of mechanical engineering [Электронный ресурс] / Н. И. Борисова, А. В. Борисов, О. В. Душко // МАТЕС Web of Conferences. - [Publisher: EDP Sciences], 2017. - Vol. 129. - Режим доступа: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201712901040>
32. Душко, О. В. Optimization of geometry of the sealing cuff of the piston of volumetric oil and gas hydraulic aggregates [Электронный ресурс] / О. В. Душко, В. А. Перфилов, В. В. Ярошик // МАТЕС Web of Conferences. - [Publisher: EDP Sciences], 2017. - Vol. 129. - Режим доступа: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201712906003>
33. Душко, О. В. Assessing the efficiency of diamond-abrasive machining by finishing bars [Text] / О. В. Душко, В. М. Шумячер, О. И. Пушкарев // Russian Engineering Research. - 2011. - Vol. 31, No. 7. - С. 723-724.
34. Душко, О. В. More efficient diamond grinding of superhard ceramics [Text] / О. В. Душко, В. М. Шумячер // Russian Engineering Research. - 2011. - Т. 31, № 6. - С. 619-622.
35. Шумячер, В. М. Experimental apparatus for the investigation of abrasive finishing [Text] / В. М. Шумячер, О. В. Душко // Russian Engineering Research. - 2010. - Т. 30, № 5. - С. 533-534.

36. Душко, О. В. Predicting the grinding efficiency of hard ceramics in terms of surface brittleness [Text] / О. В. Душко, В. М. Шумячер, О. И. Пушкарев // Russian Engineering Research. - 2009. - Т. 29, № 6. - С. 623-624.

37. Umanskij, A.P. Composite wear-resistant materials based on silicon carbide [Text] / A. P. Umanskij, O.V. Dushko, D. O. Pushkarev // Ogneupory i Tekhnicheskaya Keramika. - 2005. - № 2. - С. 22-24.

38. Pindak, V. I. Sectional piston for drilling and cementing pumps [Text] / V. I. Pindak, O. V. Dushko // Neftyanoe khozyaistvo. - 2000. - № 12. - С. 49-50.

39. Drozdov, Yu. N. Improvement of the wear resistance of rubber-metal pistons of a drill pump by the method of diffusive surface modification [Text] / Yu. N. Drozdov, O. V. Dushko, P. V. Polyakov // Soviet engineering research. - 1989. - № 9. - С. 14-17.

#### **Монографии**

40. Душко, О. В. Трибология уплотнителей нефтегазовых объемных гидроагрегатов [Текст] : моногр. / О. В. Душко. - Волгоград : Изд-во ВолгГАСУ, 2005. - 142 с.

41. Душко, О. В. Алмазное шлифование карбидкремниевой керамики для машиностроения [Текст] : моногр. / О. В. Душко, В. М. Шумячер. - Волгоград : Изд-во ВолгГАСУ, 2009. - 80 с.

#### **Охранные документы**

42. А. с. 1285238 СССР. МКИ<sup>4</sup> F 16 j 15/00. Стенд для испытания уплотнений поршней гидравлических насосов [Текст] / О. В. Душко [и др.]. - № 3932910 ; заявл. 22.07.85 ; опубл. 23.01.87, Бюл. № 7. - 3 с.

43. А. с. 1158807 СССР. МКИ<sup>4</sup> F 16 j 15/00. Стенд для испытаний уплотнений [Текст] / О. В. Душко [и др.]. - № 3637877 ; заявл. 16.08.83 ; опубл. 30.05.85, Бюл. № 20. - 4 с.

#### **Публикации в других изданиях**

44. Душко, О. В. Экологически безопасная гидротехника сверхвысокого давления [Текст] / О. В. Душко, В. И. Пындак // Процессы и оборудование экологических производств : тез. докл. V традицион. науч.-техн. конф. стран СНГ / ВолгГТУ [и др.]. - Волгоград : РПК "Политехник", 2000. - С. 92-94.

45. Душко, О. В. Модифицированный резинометаллический уплотнитель [Текст] / О. В. Душко, В. И. Пындак // Изобретатели – машиностроению. - 2000. - № 1. - С. 44.

46. Душко, О. В. Высокоэффективное универсальное уплотнение [Текст] / О. В. Душко // Изобретатели – машиностроению. - 2000. - № 1. - С. 49.

47. Душко, О. В. Совершенствование и повышение долговечности уплотнений объемных нефтегазовых гидроагрегатов возвратно-поступательного действия [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Душко Олег Викторович. - Волгоград : Изд-во ВолгГАСУ, 2001. - 23 с.

48. Душко, О. В. Поиск оптимального решения методом генетических алгоритмов для инженерных задач [Текст] / О. В. Душко, С. И. Родин // Надежность и долговечность строительных материалов и конструкций : материалы III Междунар. науч.-техн. конф., (27-29 марта 2003 г.) : [в 4 ч.]. - Волгоград : Изд-во ВолгГАСА, 2003. - Ч. II. - С. 81-83.

49. Душко, О. В. Износостойкие керамические торцовые уплотнения для нефтехимической промышленности [Текст] / О. В. Душко, Д. О. Пушкарев // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы : Шлифабразив-2004 : сб. ст. междунар. науч.-техн. конф., 6-12 сент. 2004 г. - Волгоград ; Волжский : [ОАО "Альянс "Югполиграфиздат"], 2004. - С. 61-63.

50. Душко, О. В. Поверхностная прочность и износостойкость покрытий оксида алюминия при абразивном изнашивании [Текст] / О. В. Душко, Д. О. Пушкарев // Динамика технологических систем : сб. тр. VII междунар. науч.-техн. конф. - Саратов : СГТУ, 2004. - С. 112-114.

51. Душко, О. В. Повышение эффективности алмазной обработки корундовых покрытий на деталях из алюминиевых сплавов [Текст] / О. В. Душко, Д. О. Пушкарев // Абразивное производство : сб. науч. тр. - Челябинск : ЮУрГУ, 2004. - С. 170-172.

52. Душко, О. В. Оптимизация параметров алмазной обработки карбидкремниевой керамики [Текст] / О. В. Душко, В. М. Шумячер, Д. О. Пушкарев // Наука и технологии : тр. XXIV Рос. шк. - Москва : РАН, 2004. - Т. 2. - С. 126-131.

53. Душко, О. В. Динамика контактного взаимодействия инструмента и детали при абразивном диспергировании [Текст] / О. В. Душко, В. М. Шумячер, И. В. Башкирцева // Абразивное производство : сб. науч. тр. - Челябинск : ЮУрГУ, 2005. - С. 131-138.

54. Душко, О. В. Исследование влияния смазочно-охлаждающей жидкости на износ доводочных брусков и качество обработанной поверхности [Текст] / О. В. Душко, В. М. Шумячер, И. В. Башкирцева // Сборник научных трудов XXV Российской школы по проблемам науки и технологий. - Екатеринбург : Уро РАН, 2005. - С. 212-214.

55. Душко, О. В. Исследование влияния смазочно-охлаждающей жидкости на процессы финишной обработки [Текст] / О. В. Душко, В. М. Шумячер, И. В. Башкирцева // Материалы и технологии XXI века : сб. ст. Междунар. науч.-техн. конф. - Пенза : Поволж. Дом знаний, 2005. - С. 85-87.

56. Душко, О. В. Метод математической обработки микроструктуры поверхностей трущихся тел [Текст] / О. В. Душко // Науковий потенціал світу - 2005: матеріали II міжнар. наук.-практ. конф., 19-30 вересня 2005 р. - Дніпропетровськ : Наука і освіта, 2005. - Т. 17. - С. 30-32.

57. Душко, О. В. Поиск оптимальных решений в инженерных задачах методом генетических алгоритмов [Текст] / О. В. Душко, О. В. Мойжес // Реконструкция. Санкт-Петербург-2005 : сб. докл. Междунар. науч.-практ. конф., 19-21 окт. 2005. - Санкт-Петербург : СПбГАСУ, 2005. - Ч. 1. - С. 321-324.

58. Душко, О. В. Метод оценки поверхностной хрупкости корундовых покрытий [Текст] / О. В. Душко // Наука та інновації - 2005 : матеріали II міжнар. наук.-практ. конф., 17-31 жовтня 2005 р. - Дніпропетровськ : Наука і освіта, 2005. - Т. 1. - С. 21-24.

59. Душко, О. В. Микромеханика контактного взаимодействия абразива с материалом в присутствии смазочно-охлаждающей жидкости [Текст] / О. В. Душко, В. М. Шумячер, И. В. Башкирцева // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы : Шлифабразив-2005 : сб. ст. междунар. науч.-техн. конф., 12 сент. 2005 г. - Волгоград ; Волжский : [Изд-во ВИСТех], 2005. - С. 198-203.

60. Душко, О. В. Повышение эффективности алмазной обработки корундовых покрытий [Текст] / О. В. Душко // Надежность и долговечность строительных материалов, конструкций и оснований фундаментов : материалы IV Междунар. науч.-техн. конф., 12-14 мая 2005 г. : [в 4 ч.]. - Волгоград : Изд-во ВолгГАСУ, 2005. - Ч. IV. - С. 37-39.

61. Душко, О. В. Повышение эффективности абразивной и физико-технической обработки высокотвердых композиционных материалов для торцовых уплотнителей центробежных насосов [Текст] / О. В. Душко, В. М. Шумячер, Д. О. Пушкарев // Сборник научных трудов XXV Российской школы по проблемам науки и технологий. - Екатеринбург : Уро РАН, 2005. - С. 191-193.

62. Душко, О. В. Применение теории случайных чисел при расчете на износ [Текст] / О. В. Душко // Региональные технологические и экономико-социальные проблемы развития строительного комплекса Волгоградской области. Наука. Практика. Образование : материалы II науч.-техн. конф., (20-21 сентября 2005 г.) : [в 4 ч.]. - Волгоград : Изд-во ВолгГАСУ, 2005. - Ч. 1. - С. 153-155.

63. Душко, О. В. Определение поверхностной хрупкости керамических материалов по диаграмме вдавливания индентора [Текст] / О. В. Душко, Д. О. Пушкарев, Е. В. Славина // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы : Шлифабразив-2005 : сб. ст. междунар. науч.-техн. конф., 12 сент. 2005 г. - Волгоград ; Волжский : [Изд-во ВИСТех], 2005. - С. 41-46.

64. Душко, О. В. Изучение технологической эффективности смазочно-охлаждающих жидкостей в процессах абразивной обработки с использованием методов математического планирования [Текст] / О. В. Душко, В. М. Шумячер, Д. О. Пушкарев //

Сборник научных трудов XXVI Российской школы по проблемам науки и технологий. - Екатеринбург : УрО РАН, 2006. - С. 347–349.

65. Душко, О. В. Дальняя подача смесей с морских объектов нефтегазодобычи [Текст] / О. В. Душко, Ф. Г. Булычев, Г. А. Булычев // Вестник ВолгГАСУ. Сер.: Техн. науки. - Волгоград : Изд-во ВолгГАСУ, 2006. - Вып. 6 (20). - С. 164-168.

66. Душко, О. В. Метод оценки эффективности процессов финишной абразивной обработки материалов [Текст] / О. В. Душко, В. М. Шумячер, И. В. Башкирцева // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы : Шлифабразив-2006 : сб. ст. Междунар. науч.-техн. конф., 11 сент. 2006 г. - Волгоград ; Волжский : [Изд-во ВИСТех], 2006. - С. 198-201.

67. Душко, О. В. Оценка упругой податливости системы образец – прибор при испытании материалов методом микровдавливания [Текст] / О. В. Душко, Д. О. Пушкарев // Инженерные проблемы современного материаловедения : внутривуз. науч.-техн. конф. : сб. ст. - Волгоград : Изд-во ВолгГАСУ, 2008. - С. 111–113.

68. Душко, О. В. Повышение ресурса работоспособности износостойких изделий из карбидкремниевой керамики для машиностроения [Текст] / О. В. Душко, В. М. Шумячер // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы : Шлифабразив - 2009 : сб. ст. междунар. науч.-техн. конф. - Волгоград : Изд-во ВолгГАСУ, 2010. - С. 42-44.

69. Душко, О. В. Оценка толщины дефектного слоя карбидкремниевой керамики при алмазном шлифовании [Текст] / О. В. Душко // Наука и образование: проблемы, решения и инновации : науч.-практ. конф. проф.-препод. состава ВИСТех, г. Волжский, 9-10 дек. 2010 г. : сб. ст. : в 2 ч. - Волгоград : Изд-во ВолгГАСУ, 2010. - Ч. 1. - С. 51-57.

70. Душко, О. В. Оценка эффективности смазочно-охлаждающих жидкостей при алмазном шлифовании карбид кремниевой керамики [Текст] / О. В. Душко // Материалы и технологии XXI века : сб. ст. VIII Междунар. науч.-техн. конф. - Пенза : Поволж. Дом знаний, 2010. - С. 102–104.

71. Душко, О. В. Обеспечение качества материалов в процессах алмазно-абразивной обработки [Текст] / О. В. Душко, М. Н. Киселева // Наука и образование: архитектура, градостроительство и строительство : материалы Междунар. конф. посвящ. 60-летию образования вуза, 18-19 сент. 2012 г., Волгоград : в 2 ч. - Волгоград : Изд-во ВолгГАСУ, 2012. - Ч. I. - С. 94-100.

72. Душко, О. В. Повышение износостойкости деталей насосов путем применения керамических материалов [Текст] / О. В. Душко // Внутривузовская научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, 20-22 ноября 2012 г., г. Волжский : сб. ст. – Волгоград: Изд-во ВолгГАСУ, 2012. – С. 20-25. – Библиограф.: с 25 (2 назв).

73. Душко, О. В. Повышение износостойкости деталей объемных гидроагрегатов путем применения керамических материалов [Текст] / О. В. Душко // Наука и образование: архитектура, градостроительство и строительство : материалы Междунар. конф. посвящ. 60-летию образования вуза, 18-19 сент. 2012 г., Волгоград : в 2 ч. - Волгоград : Изд-во ВолгГАСУ, 2012. - Ч. I. - С. 100-107.

74. Душко, О. В. Влияние дисбаланса инструмента на качество изделий из высокопрочной керамики [Текст] / О. В. Душко, Е. В. Калашникова // Инженерно-экологические проблемы строительного комплекса региона : материалы Междунар. науч.-техн. конф., 3-4 июля 2014 г., г. Волгоград. - Волгоград : Изд-во ВолгГАСУ, 2014. - С. 68-73.

75. Душко, О. В. Оценка шероховатости поверхности при шлифовании карбидкремниевой керамики [Текст] / О. В. Душко // Евразийский союз ученых. - 2016. – № 2-4. - С. 51-54.

76. Душко, О. В. Влияние гидродинамических процессов в зоне контакта инструмента и заготовки на качество суперфиниширования высокотвердой керамики [Текст] / О. В. Душко // Актуальные вопросы науки и техники : сб. науч. тр. по итогам III междунар. науч.-практ. конф. - 2016. – С. 36-39.

**ДУШКО Олег Викторович**

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛМАЗНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ  
ИЗДЕЛИЙ ИЗ ВЫСОКОТВЕРДОЙ КЕРАМИКИ**

Автореферат

Подписано в печать . . .16. Формат 60x84/16.

Бумага Union Prints. Гарнитура Times New Roman. Печать трафаретная

Усл. печ. л. . . Уч.-изд. л. 2,0. Тираж 120 экз.

Волжский политехнический институт (филиал) ФГБОУ ВО  
«Волгоградский государственный технический университет»  
404121, г. Волжский Волгоградской области, ул. Энгельса, 42а