

На правах рукописи



Каменов Ренат Уахитович

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ ИЗ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ
ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ШЛИФОВАНИЯ

Специальность 2.5.5 – Технология и оборудование механической
и физико-технической обработки

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ульяновск – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Омский государственный технический университет»

Научный руководитель: **Реченко Денис Сергеевич**
доктор технических наук, доцент, проректор по научной работе ГБОУ ВО «Альметьевский государственный нефтяной институт», г. Альметьевск

Официальные оппоненты: **Носенко Владимир Андреевич**
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология и оборудование машиностроительных производств» Волжского политехнического института (филиала) ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», г. Волгоград
Рощупкин Станислав Иванович
кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения» ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», г. Челябинск

Защита состоится «26» декабря 2022 г. в 12 ч. 00 мин. на заседании объединенного диссертационного совета 99.2.001.02 созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ульяновский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «УлГТУ», почтовый адрес: 432027, ГСП, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32) и федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тольяттинский государственный университет» (ФГБОУ ВО «ТГУ», почтовый адрес: 445667, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14) по адресу: г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32, главный учебный корпус, ауд. 211.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Ульяновского государственного технического университета - www.ulstu.ru

Автореферат разослан «__» _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук



Н.И. Веткасов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Развитие машиностроения связано с разработкой и внедрением новых материалов, а также прогрессивных методов их обработки. Данная необходимость обусловлена постоянным ростом интенсификации работы оборудования во всех отраслях промышленности. Так в нефтегазовой, атомной и химической промышленности надежность и работоспособность производственных объектов напрямую зависит от тяжело нагруженных пар трения и уплотнительных элементов различного назначения из керамических материалов (КМ). К данным деталям предъявляются повышенные требования по параметрам качества контактных поверхностей (шероховатость $Ra < 0,1$ мкм при отсутствии дефектов поверхностного слоя, в основном микротрещин и микролунок), что обусловлено необходимостью обеспечения герметичности уплотнения при минимальной силе трения.

Современные КМ обладают высокой твердостью, термостойкостью и коррозионной стойкостью, что положительно сказывается на их долговечности, но данные свойства значительно усложняют процесс их механической обработки, что является актуальной научно-технической задачей.

Существующие методы обработки КМ (шлифование, гидроабразивная и электроэрозионная обработка и т.д.) не позволяют достигнуть требуемых параметров качества. После обработки данными методами удается достичь шероховатости поверхности $Ra = 0,32$ мкм, также на обработанной поверхности присутствуют микролуночки и микротрещины. Обеспечение требуемых параметров качества достигается путем применения доводочных и полировальных операций, которые значительно повышают трудоемкость изготовления и стоимость изделий из КМ. Поэтому предприятия, занимающиеся производством изделий из КМ, пытаются найти новые производительные методы и улучшить существующие технологии, обеспечивающие требуемое качество обработанной поверхности.

Результаты предварительно проведенных экспериментов показывают, что перечисленные выше проблемы могут быть решены за счет применения высокоскоростного шлифования. Однако для реализации данной технологии необходимо решить ряд научных и практических задач: определение основных факторов, влияющих на качество обработанной поверхности изделий из КМ; модернизация технологической системы, позволяющей производить высокоскоростное шлифование; моделирование процесса шлифования с целью определения влияния скорости резания на процесс зарождения и роста трещин и разрушения хрупкого материала и экспериментальное подтверждение полученных результатов моделирования. Таким образом, дальнейшие исследования, направленные на повышение качества изделий из КМ являются актуальными в решении обозначенных проблем.

Степень разработанности темы исследования. Вопросам финишной механической обработки КМ посвящено большое количество работ известных зарубежных и российских ученых: *О.В. Душко, С.М. Братан, М.И. Шкарупа, В.В. Кузин, В.В. Гусев, М.Ю. Ерёмин, В.А. Горелов, А.Ю. Колодяжный, Л.Ю. Гусева, Д.Н. Шабалин, А.Ю. Попов, В.А. Рогов, Ping Li, Beizhi Li, A. G. Mamalis, J. Kundrak, T. Tawakoli* и др. В работах этих исследователей рассматриваются процессы,

протекающие в зоне обработки КМ, а также различные подходы к формированию поверхностного слоя. Большинство этих работ посвящены стандартным способам обработки, в которых материал обрабатываемой заготовки рассматривается как сплошная среда и не учитывается разность физико-механических свойств связки и зерен, что существенно сказывается на описании и прогнозировании процессов обработки подобных материалов. При этом считается, что достижение шероховатости обработанной поверхности $Ra < 0,1$ мкм возможно лишь при применении доводочных и полировальных операций.

Цель диссертационной работы:

Повышение качества изделий из керамических материалов за счет определения рациональных режимов обработки при высокоскоростном шлифовании.

Для достижения поставленной цели необходимо решить **следующие задачи:**

- провести анализ существующих методов и способов обработки КМ с целью определения основных факторов, влияющих на качество обработанной поверхности изделия;

- разработать технологическую систему, позволяющую производить высокоскоростное шлифование, обеспечивая требуемые параметры качества обработанной поверхности;

- смоделировать процесс шлифования с целью определения влияния скорости резания на процесс зарождения и роста трещин и разрушения хрупкого материала;

- экспериментально подтвердить результаты моделирования и получить зависимость шероховатости обработанной поверхности от режимов обработки.

Научная новизна:

1. Развита представления о характере разрушения КМ и перехода его с транскристаллитного на интеркристаллитный при повышении скорости шлифования;

2. Получены результаты численного моделирования роста трещин, характера разрушения КМ и шероховатости обработанной поверхности, позволившие выявить связь скорости шлифования с механизмом разрушения КМ и качеством обработанной поверхности;

3. Результаты экспериментальных исследований качества обработанной поверхности (шероховатость поверхности, наличие микротрещин и микролунок) КМ при высокоскоростном шлифовании;

4. Предложена эмпирическая зависимость шероховатости обработанной поверхности КМ от режимов резания и зернистости шлифовального круга.

Теоретическая значимость работы. Результаты, представленные в диссертационной работе, расширяют научные представления в области механики разрушения зернистого материала. Установлено влияние скорости резания на переход с транскристаллитного к интеркристаллитному разрушению КМ.

Практическая значимость работы.

1. Разработана конструкция шлифовального круга (Патент на полезную модель № RU 193951 РФ, МПК В24D 5/06, В24В 5/16, В24В 5/36. «Шлифовальный

круг для высокоскоростной обработки»), позволяющего реализовать способ высокоскоростного шлифования КМ.

2. Модернизирован технологический комплекс для высокоскоростного шлифования изделий из КМ со скоростями шлифования до 300 м/с, за счет установки специально спроектированного и изготовленного скоростного шпинделя, генератора масляного тумана, системы охлаждения и устройства очистки сжатого воздуха.

3. На основе проведенных экспериментов по шлифованию изделий из КМ марки *BK94-1* и керамокомпозита *SiC-SiC* сформулированы технологические рекомендации для их эффективной обработки.

Методы исследования. Исследования процессов шлифования высокоскоростным способом производились на основе положений теории резания, теории упругости и теории разрушения. Постановка экспериментальных исследований осуществлялась с использованием планирования экспериментов и методов оптимизации. При конструировании узлов лабораторной установки использовалось 3D-моделирование в системах автоматизированного проектирования *КОМПАС-3D* и *ANSYS*. Моделирование процесса шлифования производилось в программном комплексе *LS-DYNA*. Экспериментальные исследования проводились с использованием современных стандартных измерительных приборов: профилометр *Mahr MarSurf PS1*, высокоскоростная камера *EoSens CL*, контрольно-измерительная машина *Ланук КИМ-100*, инверсионный микроскоп *Axio Observer.A1m*, атомно-силовой микроскоп *NTEGRA PRIMA (NT-MDT)*, растровый электронный микроскоп *Jeol JCM-5700*.

Объект исследования. Операция высокоскоростного шлифования изделий из КМ.

Предмет исследования. Процессы резания при высокоскоростном шлифовании, закономерности между режимами обработки и качественными параметрами обработанной поверхности (шероховатость обработанной поверхности) КМ.

Положения, выносимые на защиту.

1. Представления о механизме разрушения КМ и перехода его с транскристаллитного на интеркристаллитный при повышении скорости шлифования.

2. Результаты численного моделирования и их экспериментальное подтверждение, устанавливающие взаимосвязь изменения механизма разрушения КМ с транскристаллитного на интеркристаллитный при повышении скорости резания и позволяющие прогнозировать качество обработанной поверхности.

3. Результаты экспериментальных исследований качества обработанной поверхности (шероховатость поверхности, наличие микротрещин и микролунок) КМ и экспериментально установленная зависимость шероховатости обработанной поверхности КМ марки *BK94-1* от режимов обработки и зернистости шлифовального круга при высокоскоростном шлифовании.

4. Экспериментально установленные режимы шлифования изделий из КМ марок *BK94-1* и *SiC-SiC*, обеспечивающие требуемые параметры качества

обработанной поверхности – $Ra < 0,1$ мкм, отсутствие микротрещин и микролунок.

Достоверность результатов исследований. Полученные теоретические и эмпирические закономерности, а также новые технические решения, использованные в конструкции лабораторной высокоскоростной установки, опробованы экспериментально в лабораториях кафедры «Металлорежущие станки и инструменты» ФГАОУ ВО «ОмГТУ». Метод скоростного шлифования применен при обработке деталей из широкого круга КМ, в том числе вакуум-плотной керамики *BK 94-1* и *BK 95*, керамокомпозита *SiC-SiC* и инструментальных керамических материалов *ЦМ-322* и *СС650 (СА)*. Все выводы диссертационного исследования имеют экспериментальное подтверждение.

Личный вклад автора заключается в разработке и техническом усовершенствовании экспериментального оборудования, моделировании процесса алмазного шлифования КМ единичным зерном, планировании, постановке и проведении экспериментов, обработке, обобщении и анализе полученных результатов. Автором сформулированы основные положения и выводы, выносимые на защиту. Совместно с руководителем подготовлены публикации по тематике данной работы.

Реализация и внедрение результатов работы. Результаты работы внедрены на производственном комплексе «Салют» АО «ОДК» при обработке пар трения из КМ *BK94-1*. Получен акт испытаний в АО «ОДК-АВИАДВИГАТЕЛЬ» при обработке изделий из композитов с керамической матрицей, армированной нитевидными кристаллами (керамокомпозит *SiC-SiC*). Работа поддержана Советом по грантам Президента Российской Федерации в виде стипендии Президента Российской Федерации молодым ученым и аспирантам, осуществляющим перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики на 2021-2023 гг.

Апробация работы. Основные научные результаты работы докладывались в 2015-2021 гг. на международных и всероссийских научно-технических конференциях: 48-ой международной научно-технической конференции преподавателей и студентов, посвященной 50-летию Витебского государственного технического университета; X международной научно-практической конференции «Успехи науки 2017»; III-V международной научно-технической конференции «Проблемы машиноведения»; V международной научной конференции «Моделирование нелинейных процессов и систем»; международной научной конференции «Самарские чтения».

Публикации. Основные результаты диссертационной работы отражены в 11 публикациях, из них 5 опубликованы в журналах, входящих в перечень ВАК, 4 опубликованы в журналах, входящих в базы цитирования *Scopus* и *Web of Science*, получен 1 патент РФ на полезную модель.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертационная работа изложена на 144 страницах машинописного текста и состоит из введения, четырех глав, выводов и списка литературы из 99 наименований, а также содержит 62 иллюстраций и 12 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В введении обоснована актуальность темы диссертации, ее научная новизна и практическая ценность, приведены основные положения, выносимые автором на защиту.

В первой главе приведен анализ литературы и практического опыта существующих методов и способов обработки КМ, который показал, что производство изделий из КМ реализуется в три этапа: заготовительный (формование и спекание); предварительная обработка (шлифование, гидро- и электроэрозионная обработка) и финишная обработка (доводочные и полировальные операции).

На этапе предварительной обработки формируются большие остаточные напряжения в поверхностном слое детали, что в свою очередь приводит к трещинообразованию. Финишная обработка является малопродуктивной, что значительно повышает трудоемкость и, как следствие, стоимость обработки изделий из КМ. При этом именно на операциях механической обработки, составляющих порядка 70-80% от общей трудоемкости, формируются дефекты, приводящие к браку, который может достигать 50 %.

Гидроабразивная обработка имеет ограничения по габаритам обрабатываемого изделия, а электроэрозионная – по электропроводности марок обрабатываемого материала. Шлифование является наиболее распространенным и универсальным способом обработки КМ.

Анализ литературы показал, что процессы обработки со скоростями резания до 100 м/с уже достаточно хорошо исследованы, существует оборудование и технологические рекомендации для обработки КМ. Исследованием скоростного шлифования занимались такие ученые как: *Филимонов Л.Н., Резников А.Н., Носенко В.А, Пилинский В.И., Арндт К., Братья Ву, Пинг Ли и другие*. В этих работах представлены результаты, полученные при шлифовании изделий из конструкционных сталей, инструментальных и керамических материалов на скоростях резания свыше 65 м/с.

При повышении скорости резания до значений порядка 100-120 м/с происходит стабилизация тепловых и силовых процессов (снижение роста контактной температуры и сил резания) и улучшаются параметры качества (снижение шероховатости обработанной поверхности до значений Ra 0,15-0,20 мкм, уменьшение дефектов на поверхностном слое и т.д.). Однако обработка в данном диапазоне скоростей не позволяет получать требуемые параметры качества (отсутствие микролунок и микротрещин, шероховатость $Ra < 0,1$ мкм). В связи с этим становится все более актуальной научно-техническая задача поиска новых технологий повышения качества обработанной поверхности КМ. Перспективным направлением может стать высокоскоростное шлифование КМ со скоростями свыше 100 м/с. В тоже время, данные о влиянии высокоскоростного шлифования на качество обработанной поверхности КМ в литературе практически отсутствует. Не выявлен механизм разрушения КМ при переходе к высокоскоростному шлифованию и возможного влияния его на качество обработанной поверхности. Проблемой широкого применения высокоскоростного шлифования является отсутствие оборудования,

приспособлений и шлифовальных кругов, способных стабильно производить обработку КМ на данных скоростях резания. В заключении сформулированы цель и задачи работы, приведенные выше.

Во второй главе представлено технологическое оборудование, позволяющее производить обработку КМ высокоскоростным способом шлифования при скоростях резания до 300 м/с, который реализован за счет

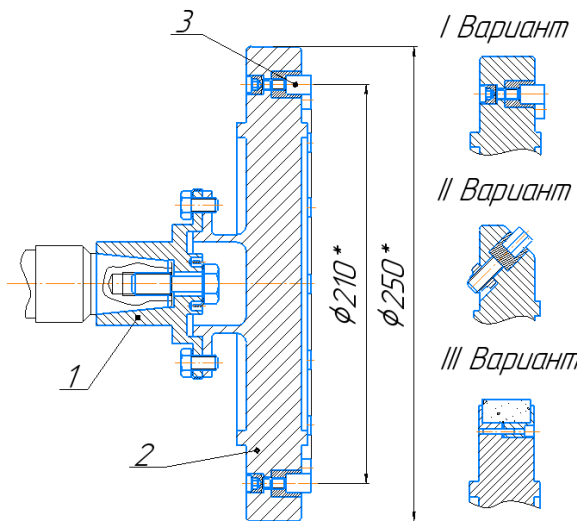


Рисунок 1 – Спроектированные шлифовальные круги: 1 – оправка; 2 – корпус; 3 – шлифовальная головка

модернизированной установки и разработанных шлифовальных кругов, с возможностью применения различных характеристик шлифовальных головок.

Одной из основных проблем при проектировании установки является то, что существующие скоростные шпиндели, способные развивать частоту вращения до 100 тыс. об/мин, не позволяют производить обработку инструментом с большим диаметром (~250...300 мм). Поэтому в работе разработана конструкция шпиндельного узла и шлифовальных кругов с точки зрения повышения скорости резания и с учетом оснастки для закрепления деталей из КМ. Для реализации метода

высокоскоростного шлифования модернизирован шлифовально-заточной станок ВЗ-326Ф4, за счет установки специально спроектированного и изготовленного для этой цели скоростного шпинделя St-140-40/7.5с, генератора масляного тумана ГМТ-1, системы охлаждения СО-0,5, устройства очистки сжатого воздуха ПФВМК-16.2 отечественного производства. Это позволило производить обработку со скоростью резания до 300 м/с с применением разработанных шлифовальных кругов.

Шлифовальный круг представляет собой металлический диск, на торце которого выполнены технологические отверстия для закрепления шлифовальных головок типа АW с наружным диаметром 10 мм (рисунок 1). Конструкции шлифовальных кругов проектировались, рассчитывались и далее испытывались в разрывной камере при частоте вращения до 65 тыс. об/мин. По результатам расчетов и испытаний материалом корпуса выбрана марка 30ХГСН2А.

Повышение скорости резания приводит к повышению вибрационной составляющей, поэтому одним из основных вопросов является балансировка шлифовального круга. Предварительно проводилась статическая балансировка на высокоточной оправке, а после динамически определялась неуравновешенность шлифовального круга с применением вибродиагностического прибора Диана-2М. Устранение неуравновешенности производилось съёмом металла с балансировочных буртов шлифовального круга. Класс точности балансировки шлифовальных кругов достигал G6,3 по ГОСТ ИСО 1940-1-2007. Допустимый дисбаланс шлифовального круга составляет 5 г·мм. Балансировка позволила

снизить амплитуду вибраций в 12-15 раз до значений менее 1 мкм, а разгон-выбег позволил определить резонансные зоны и наиболее благоприятные зоны частот вращения высокоскоростного шпинделя.

На основании проведенных работ модернизирована установка, позволяющая производить обработку способом высокоскоростного шлифования со скоростью резания до 300 м/с, при этом предварительно проведенные эксперименты подтвердили рекомендации ряда зарубежных авторов о том, что шлифовальную обработку КМ необходимо проводить инструментом на бакелитовой связке, так как использование металлической и керамической связок приводит к трещинообразованию обработанной поверхности.

В третьей главе на основе анализа литературы выдвинута рабочая гипотеза об изменении механизма разрушения КМ с транскристаллитного на интеркристаллитный с повышением скорости резания и перехода на высокоскоростное шлифование, что должно привести к повышению качества обработанной поверхности – снижению шероховатости, уменьшению количества и размеров микролунок и микротрещин или их устранению.

Для подтверждения данной гипотезы проведено численное моделирование влияния скорости резания при шлифовании КМ на рост трещины, под которым понимается угол её направления и глубина залегания напряжений; механизма разрушения КМ и шероховатости обработанной поверхности.

Численное моделирование влияния скорости резания при шлифовании на рост трещины проводили методом перидинамики.

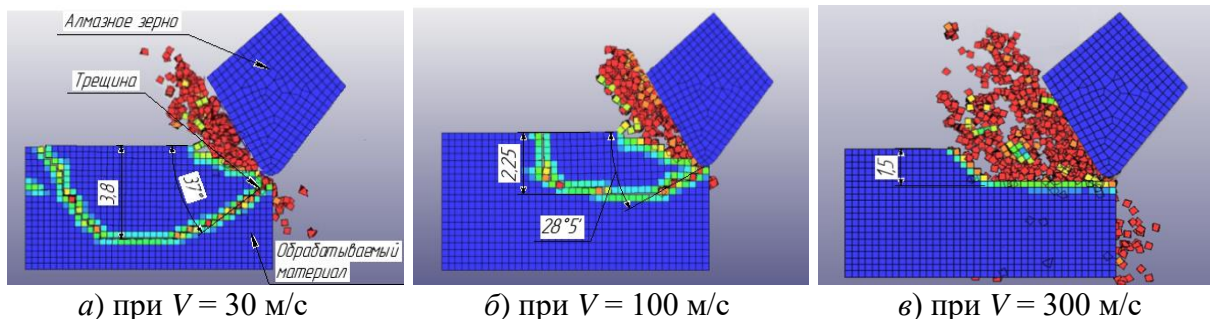
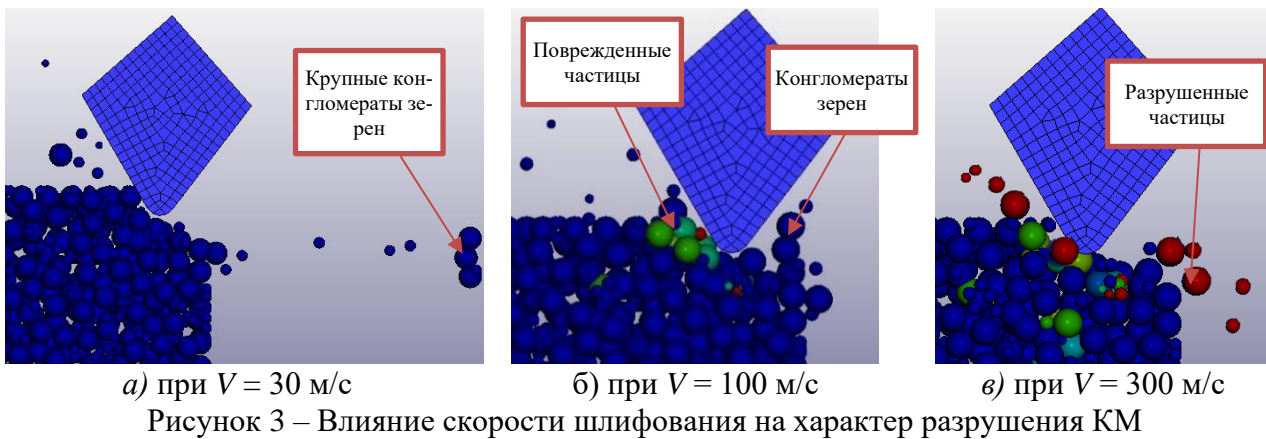


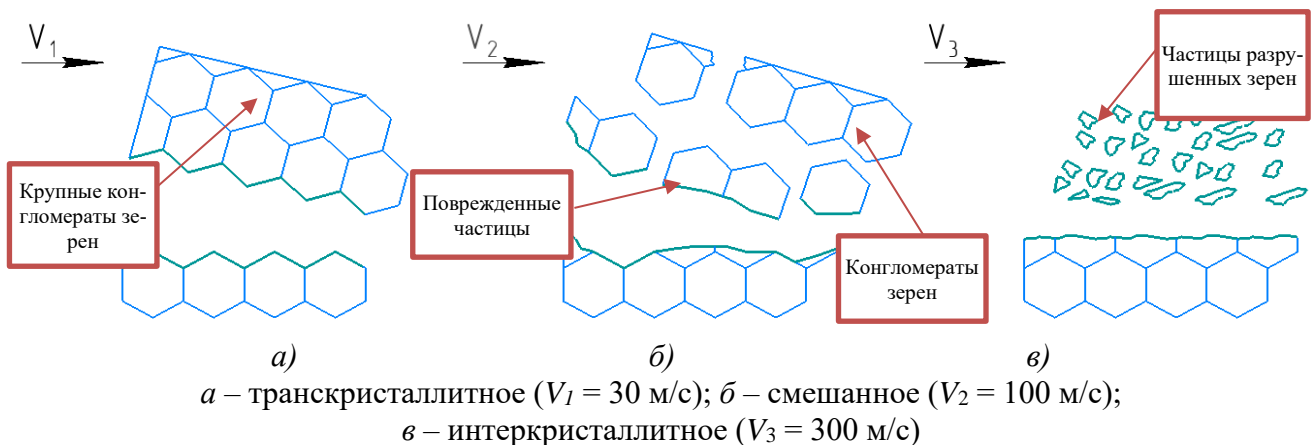
Рисунок 2 – Влияние скорости шлифования на угол направления трещин и глубину залегания напряжений при резании КМ единичным алмазным зерном

Анализ результатов моделирования (рисунок 2) показал, что увеличение скорости резания с 30 м/с до 300 м/с уменьшает глубину залегания напряжений в 2,5 раза, а угол направления трещины с 37° до практически нулевого значения. Полученные данные позволяют сделать предположение, что повышение скорости шлифования до 300 м/с должно привести к уменьшению количества микротрещин, микролунок и снижению шероховатости обработанной поверхности.

Исследование механизма разрушения КМ проводили методом моделирования дискретных элементов (*Discrete element method – DEM*), который позволяет представить материал обрабатываемой заготовки как связанные между собой частицы. Моделирование процесса резания осуществляли при глубине резания 3 мкм и скоростях резания 30, 100 и 300 м/с.



На основе результатов моделирования (рисунок 3) установлено, что при скорости резания 30 м/с (рисунок 3, а) происходит откол конгломератов частиц без их разрушения (цвет частиц остается синим, что говорит об отсутствии повреждений). При скорости резания 100 м/с (рисунок 3, б) конгломераты становятся меньше, цвет частиц, контактирующих с алмазным зерном, начинает меняться на зеленый, что свидетельствует о повреждении частицы без разрушения. При скорости резания 300 м/с (рисунок 3, в) все частицы, контактирующие с алмазным зерном, становятся красными, что свидетельствует об их разрушении.



Анализ полученных результатов показал, что при скорости резания 30 м/с процесс разрушения происходит путем отделения крупных конгломератов от обрабатываемой заготовки (рисунок 4, а). В этом случае прерывается связь между частицами КМ без их разрушения, что характерно для транскристаллитного механизма разрушения, где трещина проходит по связке не разрушая зерна. При повышении скорости резания до 100 м/с процесс разрушения имеет смешанный характер, при котором отделяются менее крупные конгломераты и начинают повреждаться сами частицы КМ (рисунок 4, б). Данный этап является переходным между разрушением КМ по связке и разрушением по зерну. При повышении скорости резания до 300 м/с все частицы, взаимодействующие с алмазным зерном, разрушаются, что характерно для интеркристаллитного механизма разрушения (рисунок 4, в). Таким образом, результаты моделирования подтвердили

выдвинутую гипотезу об изменении механизма разрушения КМ с транскристаллитного на интеркристаллитный при повышении скорости резания.

Для определения влияния скорости резания на шероховатость обработанной поверхности проводили моделирование методом сглаженных частиц (*Smooth Particle Hydrodynamics – SPH*). В результате численного моделирования получены профили обработанных поверхностей, расчет шероховатости которых производился с помощью специально написанной программы для ЭВМ на языке программирования *Python*. На основе расчета построена зависимость шероховатости обработанной поверхности от скорости резания, представленная на рисунке 5. Видно, что при увеличении скорости резания уменьшается расчетная шероховатость обработанной поверхности.

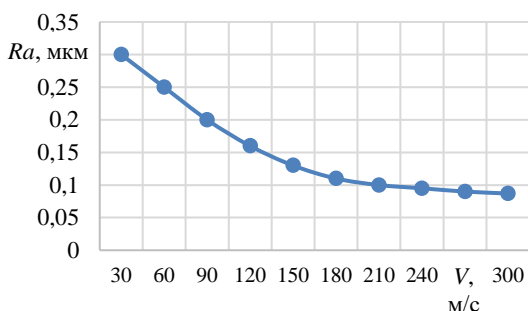


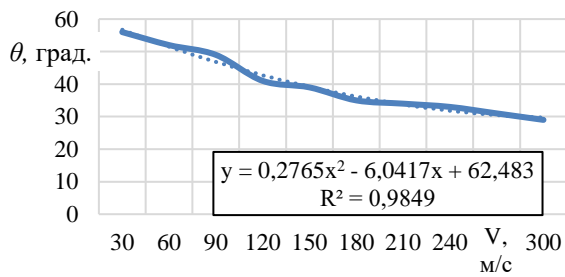
Рисунок 5 – Зависимость расчетной шероховатости (Ra) от скорости резания (V)

Результаты численного моделирования методами перидинамики, дискретных элементов и сглаженных частиц позволили установить, что для достижения требуемых параметров качества обработанной поверхности необходимо повысить скорость резания до 300 м/с.

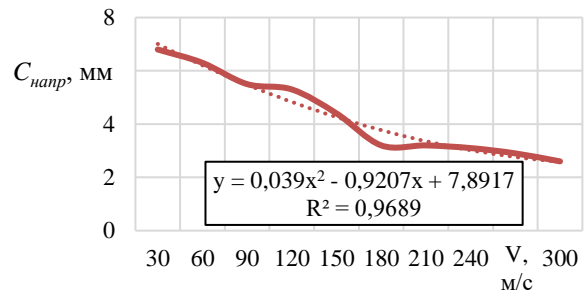
В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований, подтверждающих результаты моделирования, эмпирическая

зависимость влияния режимов обработки и размера абразивного зерна на шероховатость обработанной поверхности, практические рекомендации по использованию на производстве предлагаемого способа высокоскоростного шлифования для обеспечения требуемых параметров качества и повышения производительности обработки при изготовлении изделий из КМ.

Для подтверждения результатов моделирования по влиянию скорости резания на изменение угла направления трещины и глубины залегания напряжений провели экспериментальные исследования по обработке оптического материала, обладающего пьезооптическим эффектом. Оптический метод исследования напряжений заключается в том, что прозрачная модель из оптически-активного материала (органическое стекло) в нагруженном состоянии просвечивается в поляризованном свете. Изображение модели на экране оказывается при этом покрытым системой полос (полосы Муара), форма и расположение которых определяются напряженным состоянием модели. Анализ изменений получаемой картины позволил определить область напряжений. Изменение напряжений фиксировали при помощи высокоскоростной камеры модели *EoSens CL*. Установлено, что с увеличением скорости резания угол направления трещины и глубина залегания напряжений снижаются (рисунок 6), что согласуется с результатами моделирования. Как видно из рисунка 6, повышение скорости резания в 10 раз с 30 до 300 м/с уменьшает угол распространения трещин в 1,9 раза с 56° до 29° и глубину залегания напряжений в 2,6 раза с 6,8 до 2,6 мм.

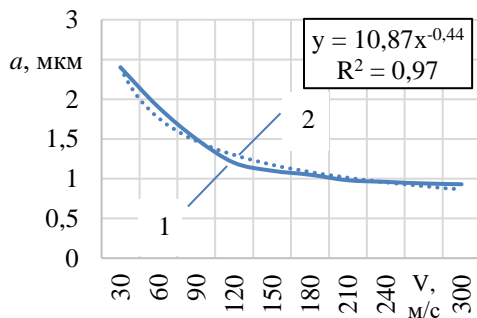


а)



б)

Рисунок 6 – Зависимость угла распространения трещин (θ) и глубины залегания напряжений ($C_{напр}$) от скорости резания (V) при обработке оптически-активного материала



1 – экспериментальные данные;
2 – линия тренда

Рисунок 7 – Зависимость среднего размера частиц (a) от скорости резания (V)

Для подтверждения результатов моделирования механизма разрушения КМ и перехода его с транскристаллитного на интеркристаллитный с повышением скорости резания, проведены экспериментальные исследования отколотых в процессе высокоскоростного шлифования частиц КМ (марки *ВК94-1*).

Отколотые в процессе шлифования частицы исследовали на растровом электронном микроскопе *Jeol JCM-5700*. Зависимость среднего размера частиц от

скорости шлифования представлена на рисунке 7.

Установлено, что при увеличении скорости шлифования с 30 до 300 м/с средний размер частиц уменьшается в 2,5-2,6 раза с 2,40 до 0,93 мкм. При этом размер отколотых частиц, полученных на скорости шлифования 300 м/с, меньше размера частиц, используемых при изготовлении КМ, что подтверждает протекание интеркристаллитного механизма разрушения КМ. Полученные данные подтверждают результаты моделирования механизма разрушения КМ.

Для подтверждения результатов моделирования шероховатости обработанной поверхности проводили шлифование пары трения из КМ марки *ВК94-1* на производственном комплексе «Салют» АО «ОДК». Использовали шлифовальные головки с зернистостью 40/28 и 20/14 на бакелитовой связке, скорость шлифования изменялась в диапазоне $V = 30 \dots 300$ м/с, продольная подача и глубина резания, соответственно, $S = 0,15 \dots 0,75$ м/мин, $t = 0,001 \dots 0,006$ мм.

По результатам полного факторного эксперимента получена регрессионная зависимость шероховатости обработанной поверхности Ra от режимов резания и размеров абразивного зерна и построены поверхности отклика (Рисунки 8 и 9):

$$Ra = 0,64 \cdot \frac{t^{0,07} \cdot S^{0,13} \cdot a^{0,32}}{V^{0,40}},$$

где t – глубина шлифования, мм; S – продольная подача, м/мин; V – скорость резания при шлифовании, м/с; a – размер абразивного зерна, мкм.

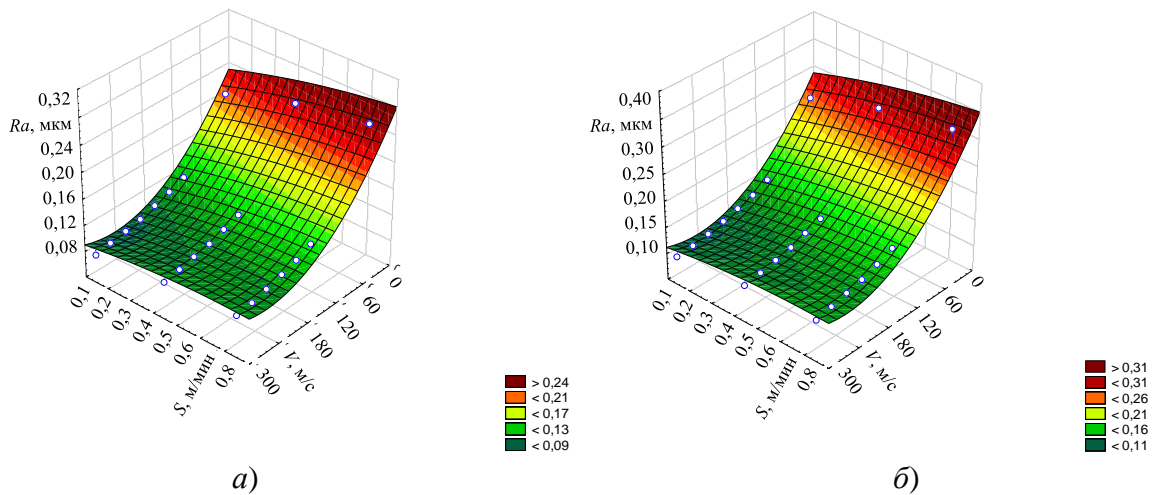


Рисунок 8 – Зависимость шероховатости поверхности (Ra) от подачи (S) и скорости резания (V), при глубине резания $t = 0,001$ мм, с использованием головок: а) AW ACH 20/14; б) AW ACH 40/28

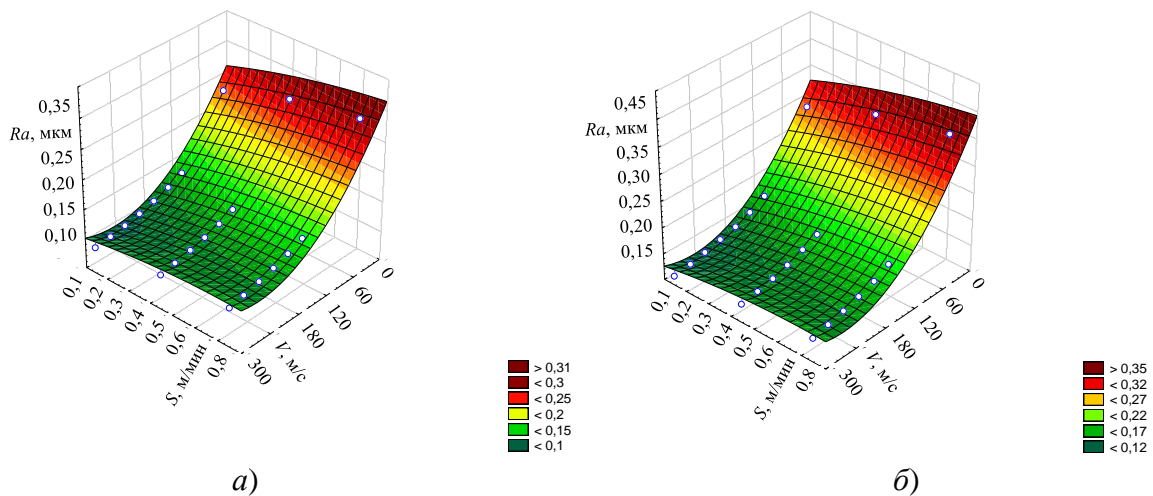
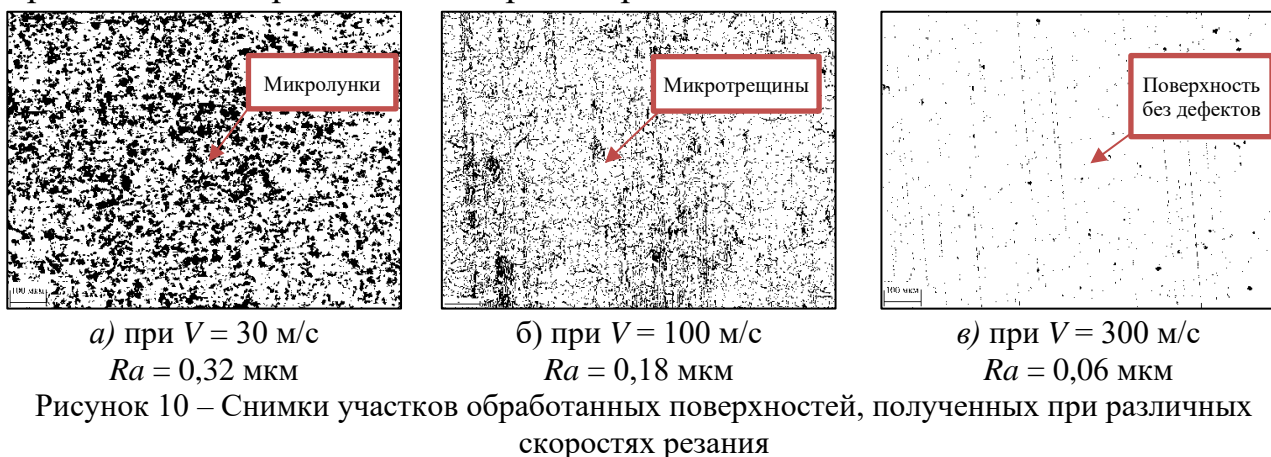


Рисунок 9 – Зависимость шероховатости поверхности (Ra) от подачи (S) и скорости резания (V), при глубине резания $t = 0,006$ мм, с использованием головок: а) AW ACH 20/14; б) AW ACH 40/28

На рисунке 10 представлены снимки участков поверхностей КМ, обработанных на различных скоростях резания.

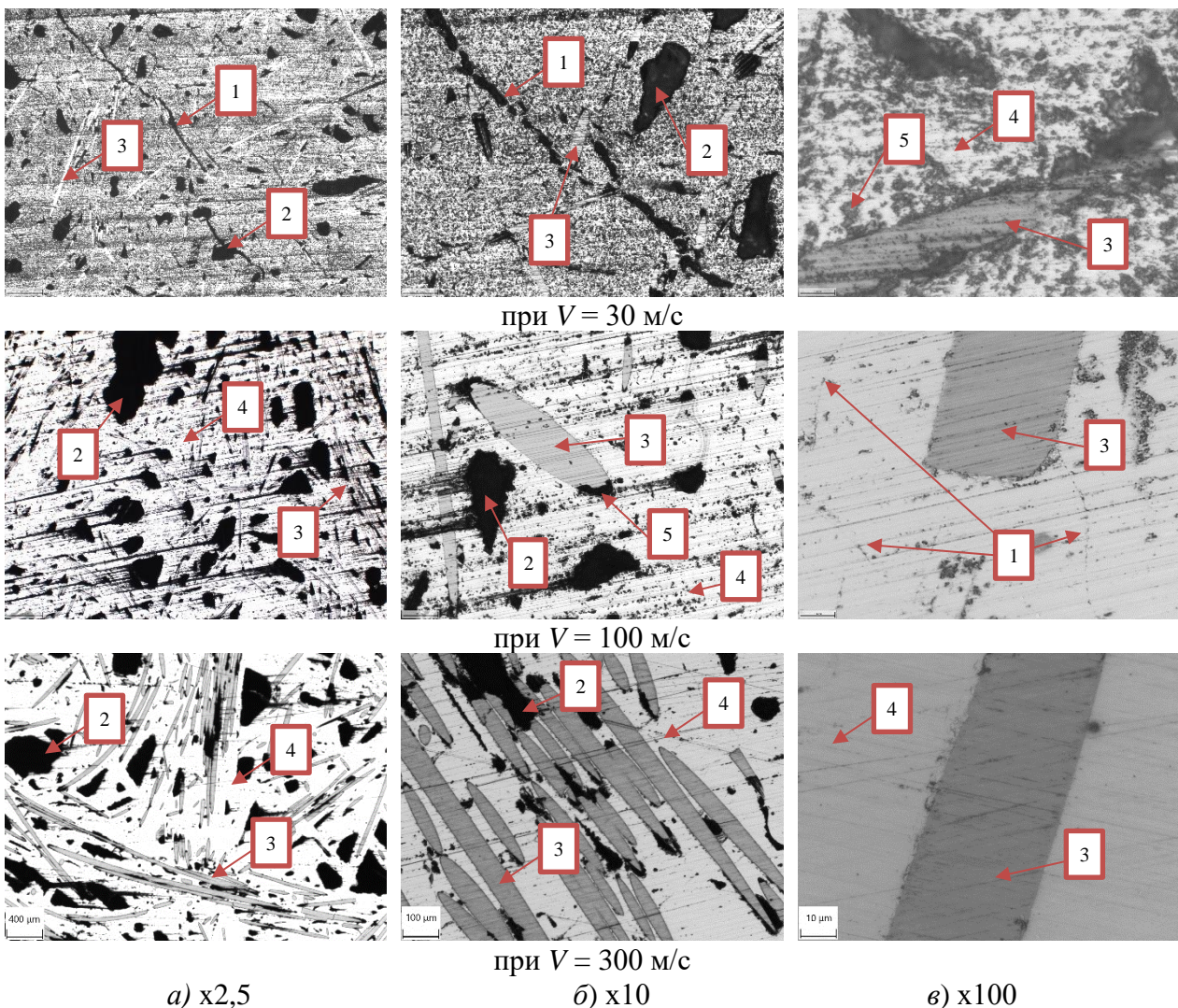


Как видно из рисунка 10, при шлифовании на скорости резания 30 м/с на обработанной поверхности формируется множество микролунок. При повышении скорости шлифования до 100 м/с микролунок не наблюдается, однако

обработанная поверхность покрыта микротрещинами. При шлифовании на скорости резания 300 м/с на обработанной поверхности дефекты не наблюдаются. Кроме того, повышение скорости резания с 30 до 300 м/с снижает шероховатость поверхности с $Ra = 0,32$ мкм до $Ra = 0,06$ мкм. Полученные экспериментальные данные хорошо согласуются с результатами моделирования шероховатости обработанной поверхности КМ.

Проведенными экспериментальными исследованиями установлено, что для обеспечения требуемых параметров качества обработанной поверхности (шероховатость обработанной поверхности $Ra < 0,1$ мкм и отсутствие микролунок и микротрещин) процесс шлифования необходимо проводить на следующих режимах: скорость резания $V = 300$ м/с, глубина резания $t = 0,003$ мм и подача $S = 0,65$ м/мин. Обработка на данных режимах позволяет исключить доводочные операции из технологического процесса изготовления изделия.

Предложенные режимы резания апробированы при обработке изделий из современных перспективных КМ при проведении опытно-промышленных испытаний в компании АО «ОДК-АВИАДВИГАТЕЛЬ» по обработке изделий из композитов с керамической матрицей, армированной нитевидными кристаллами (ККМ $SiC-SiC$) (Рисунок 11).



1 – трещина; 2 – поры; 3 – армированные волокна; 4 – наполнитель; 5 - микролунок
Рисунок 11 – Снимки участков обработанных поверхностей керамокомпозита $SiC-SiC$

Проведенные опытно-промышленные испытания подтвердили результаты численного моделирования и экспериментальных исследований процесса высокоскоростного шлифования КМ. Как видно из рисунка 11, при шлифовании заготовок из ККМ $SiC-SiC$ на скорости резания 300 м/с, глубине $t = 0,003$ мм и подаче $S = 0,65$ м/мин алмазными шлифовальными головками $AW ACH 20/14$ на бакелитовой связке $B1-1$ на обработанной поверхности отсутствуют дефекты в виде микротрещин и микролунок. При этом шероховатость обработанной поверхности заготовок из ККМ $SiC-SiC$ составила $Ra = 0,03...0,06$ мкм.

Расчет экономической эффективности показал, что применение высокоскоростного шлифования, исключая доводочные операции, позволяет сократить расходы на производство изделий из КМ. Применение способа высокоскоростного шлифования с использованием одного типа головок зернистостью 20/14 позволяет уменьшить затраты на механическую обработку на 45,6 % по сравнению с классическим шлифованием и на 9,0 % по сравнению с классическим шлифованием с последующим полированием.

Применение способа высокоскоростного шлифования в два этапа (головками 40/28 и 20/14 соответственно) позволяет уменьшить затраты на механическую обработку на 38,6 % по сравнению с классическим шлифованием и на -2,7 % по сравнению с классическим шлифованием с последующим полированием.

Учитывая стоимость шлифовального инструмента, время на предварительную настройку и смену инструмента высокоскоростной способ шлифования изделий из КМ с использованием одного типа головок $AW ACH$ зернистостью 20/14 может быть рекомендован для единичного или мелкосерийного производства. В случае среднесерийного или крупносерийного производства наиболее выгодным является высокоскоростной способ шлифования в два этапа (предварительный и финишный) головками $AW ACH$ зернистостью 40/28 и 20/14 соответственно.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Установлено, что применение способа высокоскоростного шлифования обеспечивает достижение требуемых параметров качества обработанной поверхности (шероховатость $Ra < 0,1$ мкм, отсутствие микротрещин и микролунок), что позволяет исключить доводочные операции из технологического процесса изготовления изделий из КМ.

2. Проведено численное моделирование роста трещин и глубины залегания напряжений, механизма разрушения КМ и шероховатости обработанной поверхности при шлифовании единичным алмазным зерном в программном комплексе $LS-DYNA$, результаты которого подтвердили рабочую гипотезу о повышении качества обработанной поверхности за счет изменения механизма разрушения КМ с повышением скорости шлифования.

3. На основе результатов численного моделирования установлена связь скорости шлифования с механизмом разрушения КМ и качеством обработанной поверхности. Показано, что увеличение скорости шлифования с 30 м/с до 300 м/с

снижает угол направления микротрещин и глубину залегания напряжений, что свидетельствует об уменьшении размеров микролунок и шероховатости обработанной поверхности. Выявлено, что рост скорости шлифования до 300 м/с вызывает переход транскристаллитного механизма разрушения КМ в интеркристаллитный, способствующий уменьшению шероховатости обработанной поверхности и устранению микротрещин и микролунок.

4. Результаты численного моделирования роста трещин и глубины залегания напряжений, механизма разрушения КМ и шероховатости обработанной поверхности подтверждены экспериментальными исследованиями.

5. Получена эмпирическая зависимость шероховатости обработанной поверхности от режимов обработки и зернистости шлифовального круга при высокоскоростном шлифовании. Установлено, что требуемая величина шероховатости обработанной поверхности $Ra < 0,1$ мкм с минимальными дефектами (микролунки и микротрещины) достигается при скорости резания $V = 300$ м/с, глубине резания $t = 0,003$ мм и продольной подаче $S = 0,65$ м/мин.

6. Эффективность применения высокоскоростного шлифования для обработки изделий из композитов с керамической матрицей, армированных нитевидными кристаллами (керамокомпозит $SiC-SiC$) подтверждена опытно-промышленными испытаниями на предприятии АО «ОДК-АВИАДВИГАТЕЛЬ». Показано, что при обработке шлифовальными головками $AW ACM 20/14$ на бакелитовой связке $B1-1$ при скорости резания $V=300$ м/с, глубине резания $t = 0,003$ мм и подаче $S = 0,65$ м/мин шероховатость обработанной поверхности составляет $Ra = 0,03...0,06$ мкм, при этом на обработанной поверхности отсутствуют микротрещины и микролунки как наполнителя, так и армирующих волокон. Применение способа высокоскоростного шлифования позволяет производить обработку, исключая из технологического процесса доводочные и полировальные операции, сокращая трудозатраты на 35-40 %.

7. Техничко-экономическими расчетами показано, что применение высокоскоростного шлифования с использованием головок зернистостью 20/14 позволяет уменьшить затраты на механическую обработку на 45,6 % по сравнению с классическим шлифованием и на 9,0 % по сравнению с классическим шлифованием с последующим полированием. Данные показатели справедливы для единичного и мелкосерийного производства, для среднесерийного и крупносерийного производства рекомендуется высокоскоростной способ шлифования в два этапа (предварительный и финишный) головками $AW ACH$ зернистостью 40/28 и 20/14 соответственно.

Список основных работ, опубликованных автором по теме диссертации:

Статьи, опубликованные в журналах, рекомендованных ВАК РФ

1. Каменов, Р. У. Моделирование роста трещины при сверхскоростном шлифовании керамических материалов методом перидинамики / Р. У. Каменов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2022. – № 7. – С. 29–34.

2. Каменов, Р. У., Реченко Д. С. Влияние возникающих в технологической системе вибраций на качество обработки при высокоскоростном шлифовании / Р.

У. Каменов, Д. С. Реченко // Вестник МГТУ Станкин. – 2020. – № 4 (55). – С. 118–121.

3. Реченко, Д. С. Влияние остроты режущего инструмента на обработку стали 07X16H4Б / Д. С. Реченко, Р. У. Каменов, Д. Г. Балова, А. К. Аубакирова, И. К. Черных // Омский научный вестник. – 2019. – №6 (168). – С. 10–14.

4. Титов, Ю.В. Влияние технологических режимов получения поверхностей, близких к ювенильным, и ультрадисперсных порошков высокоскоростной обработкой в криогенной среде / Ю.В. Титов, Р.У. Каменов, Д.Ю. Белан, А.И. Зинкин // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2018. – Т. 20, № 3. – С. 58–71. – doi: 10.17212/1994-6309-2018-20.3-58-71.

5. Титов, Ю.В. Классификация абразивного инструмента для получения ультрадисперсного порошка высокоскоростным методом / Ю. В. Титов, Д. С. Реченко, К. К. Госина, Р. У. Каменов, А. Ю. Попов // Омский научный вестник. Серия: Приборы, машины и технологии. – 2015. – №1 (137). – С. 89–92.

Патенты на изобретения, патенты (свидетельства) на полезную модель

6. Попов, А. Ю. Патент № RU 193951 U1 Российская Федерация, МПК В24D 5/06 (2006.01) В24В 5/16 (2006.01) В24В 5/36 (2006.01). Шлифовальный круг для высокоскоростной обработки : № 2019126903 : заявл. 27.08.2019 : опубл. 21.11.2019 / А. Ю. Попов, Д. С. Реченко, Ю. В. Титов, Р. У. Каменов, Д. Г. Балова. – 8 с. : ил.

Статьи и доклады, опубликованные в изданиях, входящих в системы цитирования Scopus и Web of Science

7. Rechenko D. S., Kamenov R. U. Study of the machining quality of CMC ceramic composite during high-speed grinding // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2021. – Т. 1901. – №. 1. – С. 012095.

8. Rechenko D. S., Kamenov R. U. Development and Power Calculation of a Grinding Wheel Design for Ultra-High-Speed Grinding // EPJ Web of Conferences. – EDP Sciences, 2021. – Т. 248. – С. 04008.

9. Y.V. Titov Studying the structural-phase substance of solid and powder brass samples by X-ray diffractometry / Titov Y.V., Rechenko D.S., Kamenov R.U., Vyborov S.S., Belan Yu.D. // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2019. – Т. 1260. – №. 1. – С. 062024.

10. Y.V. Titov The Influence of Technological Modes of Forming the Surface, Close to Juvenile and Ultrafine Powders with a High-Speed Method in a Cryogenic Environment / Y.V. Titov, R.U. Kamenov, D.Y. Belan, A.I. Zinkin // Metal Working & Material Science. – 2018. – Vol. 20. – № 3. – pp. 58 – 71.

Публикации в других научных изданиях

11. Каменов, Р. У. Влияние скорости шлифования на качество обработки высокотвердой керамики / Р. У. Каменов // Молодежь, наука, творчество – 2020. Материалы XVIII Всерос. н.-п. конференции студентов и аспирантов. – Омск, 2020. – С. 520-524.