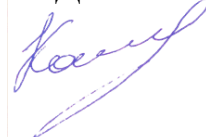


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Омский государственный технический университет»

На правах рукописи

УДК 621.923



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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент
Реченко Денис Сергеевич

Ульяновск – 2022

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ И СПОСОБОВ ИХ ОБРАБОТКИ. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ РАБОТЫ.....	11
1.1 Современные керамические материалы, их свойства, характеристики и применение	11
1.2 Анализ существующих методов и способов обработки КМ с целью определения основных факторов, влияющих на качество обработанной поверхности изделия.....	18
1.3 Влияние термосиловых нагрузок на образование трещин при шлифовании керамических материалов	26
1.4 Задачи исследования.....	30
ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ОБРАБОТКИ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ВЫСОКОСКОРОСТНЫМ СПОСОБОМ ШЛИФОВАНИЯ	30
2.1 Проектирование технологической системы на основе динамических подходов.....	32
2.2 Разработка и силовой расчет конструкции шлифовального круга для высокоскоростного шлифования керамических материалов	45
2.3 Влияние возникающих в технологической системе вибраций на качество обработки при высокоскоростном шлифовании.....	51
Выводы по 2 главе.....	54
3 ГЛАВА. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ШЛИФОВАНИЯ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ	56
3.1 Исследования влияния скорости резания и структуры керамического материала на механизм разрушения при численном моделировании резания единичным алмазным зерном	56
3.2 Выбор программного обеспечения для САЕ расчетов для моделирования процесса обработки КМ при шлифовании.....	64

3.3	Исследование влияние скорости резания на рост трещины методом перидинамики	66
3.4	Исследование влияния скорости резания на изменение механизма разрушения КМ методом дискретных элементов (DEM)	71
3.5	Исследование влияния скорости резания на деформацию КМ методом сглаженных частиц (SPH)	77
	Выводы по 3 главе	89
	ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ШЛИФОВАНИЯ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ	91
4.1	Экспериментальное подтверждение результатов численного моделирования влияния скорости резания на рост трещины	91
4.2	Экспериментальное подтверждение результатов численного моделирования изменения механизма разрушения с транскристаллитного на интеркристаллитный при повышении скорости резания	94
4.3	Экспериментальное подтверждение результатов численного моделирования влияния скорости резания на шероховатость обработанной поверхности	95
4.4	Перспективы применения способа высокоскоростного шлифования ККМ	108
	Выводы по 4 главе	112
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	113
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	115
	Приложение А	127
	Приложение Б	139
	Приложение В	140
	Приложение Г	143

ВВЕДЕНИЕ

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 удастся 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 ВК94-1 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.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ И СПОСОБОВ ИХ ОБРАБОТКИ. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ РАБОТЫ

В данной 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).

1.1 Современные керамические материалы, их свойства, характеристики и применение

Повышение темпов развития авиационно-космической, атомной, нефтедобывающей, химической и других промышленности приводит к ужесточению требований, предъявляемых к используемым материалам. Традиционно используемые виды материалов уже не соответствуют предъявляемым требованиям по пределу прочности, ударной нагрузки, температуре плавления, коррозионной стойкости и т.д. Одним из вариантов решения данной проблемы является применение неметаллических композиционных материалов, в том числе керамики [3, 5].

Керамические материалы – это поликристаллические материалы, изделия из которых получают спеканием с применением минеральных добавок, например, спеканием оксидов и других тугоплавких соединений. В широком определении – это изделия, полученные путем спекания порошков исходных веществ и материалов на их основе при температурах существенно ниже температуры плавления этих веществ или материалов. Исходным сырьем могут служить как вещества природного происхождения (силикаты,

глины, кварц и др.), так и получаемые искусственно (чистые оксиды, карбиды, нитриды и др.).

Основные свойства керамики как композиционного материала могут быть заранее спроектированы за счет применения определенных компонентов под определенные требования. Компоненты, на основе которых может быть изготовлена керамика, представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Основные компоненты промышленной керамики

Соединение	Химическая формула	Температура плавления, °С
Оксиды		
Оксид алюминия	Al ₂ O ₃	2054
Оксид бария	BaO	1917
Оксид железа	Fe ₂ O ₃	1565
Оксид свинца	PbO	886
Оксид магния	MgO	2800
Диоксид кремния	SiO ₂	1726
Диоксид титана	TiO ₂	1800
Диоксид циркония	ZrO ₂	2680
Неоксиды		
Карбид бора	B ₄ C	2450*
Карбид кремния	SiC	2650*
Карбид вольфрама	WC	2600
Нитрид алюминия	AlN	2235*
Нитрид бора	BN	3000*
Нитрид кремния	Si ₃ N ₄	1900*
Дисилицид молибдена	MoSi ₂	2030
*Температура разложения.		

Перспективность использования керамики обусловлена рядом факторов, а именно:

- исключительным многообразием свойств полученных материалов;
- доступностью исходного сырья для ее производства;
- меньшей энергоемкостью производства по сравнению с металлами;
- большей экологичностью применяемых технологий;
- большей биологической совместимостью по сравнению с металлами и

полимерами.

Современную техническую керамику можно разделить по составу, областям применения, функциям и свойствам (таблица 1.2).

Таблица 1.2 – Современная техническая керамика

Состав	Области применения	Функции	Свойства
Al_2O_3 , SiC , ZrO_2 , Si_3O_4 , C , TiB_2 , TiC , TiN , B_4C , WC	Точные приборы, абразивы, детали двигателей, инструменты, твердые смазки лопасти турбин	Механические	Твердость, абразивная устойчивость, скольжение, сопротивление скольжению, механическая прочность
Al_2O_3 , ZrO_2 , MgO , BeO , BaS , CeS , Si_3O_4 , TiB_2 , ZrB_2 , B_4C , TiC , SiC	Термическая изоляция для электроники, материалы для электродов, облицовка печей	Термические	Теплопроводность, теплоемкость, термоизоляция, огнеупорность, сопротивление термическому удару
SiO_2 , MgO , BaS , CaTiO_3 , SrTiO_3 , CeS , TiB_2 , ZnO , SnO_2 , Fe_2O_3 , BaTiO_3 , цеолиты, апатиты	Абсорбенты, электроды реакторов, катализаторы, высокотемпературные реакторы, протезы и импланты, сенсоры газов и жидкостей.	Химико-биологические	Катализ, коррозионная стойкость, абсорбция, биосовместимость
ThO_2 , TiO_2 , SiO_2 , MgO , Al_2O_3 , ZrO_2 , CdS , ZnS , Y_2O_3 ,	Оптическая память, высокотемпературные линзы световолокнистые коммуникации, лампы, светоизлучающие и лазерные диоды.	Оптические	Флуоресценция, оптическая трансляция поляризация, прозрачность.
BaTiO_3 , CaTiO_3 , TiC , SiC , BeO , Al_2O_3 , ZnO , B_{12}C_3 , SrTiO_3 , ферриты	Нагревательные элементы, записывающие головки, магнитная память для компьютеров, полупроводники, высоковольтные конденсаторы, высокочастотные проводники и антенны, осцилляторы, проводники, антенны для радио и видеочастот, магнитные пьезоэлектрические фильтры.	Электромагнитные	Высокопроводимость, полупроводники, электропроводность, диэлектрические и магнитные свойства, пьезоэлектрические свойства, электрические изоляторы.
B_4C , SiC , C , BeO , Al_2O_3 , UC , P_4O_2 , ThC	Ядерное топливо, защита, облицовка,	Ядерные	Защита от радиации, огнеупорность, механическая прочность при высоких температурах,

По причине большого разнообразия КМ, рассмотрим наиболее распространенные виды.

1) Оксид алюминия (Al_2O_3) – бинарное соединение алюминия и кислорода, относящееся к ионным кристаллам. Al_2O_3 характеризуется высокой энергией решетки (~13000 кДж/моль) и прочной химической связью. Оксид алюминия можно назвать типичным представителем керамики, так как он используется чаще, чем любой другой КМ.

Марки технической керамики на основе Al_2O_3 : ВК 100-1, КСП 94, КСП 98, ВК 94, ВК 94-1 (22ХС), ВК-97, КВПТ, С795, С799, АЛ1, АЛ2, АЛ3, АЛ1М, Б5, Б6, БИ9, БИ11 и др.

Марки инструментальной керамики на основе Al_2O_3 : ЦМ-322 (микролит), В-3, ВОК-60, ОНТ-20 (кортинит), ВО-13 и т.д.

Корундовая керамика содержит 95...100% Al_2O_3 и имеет предел прочности на изгиб до 650 МПа и модуль упругости 350...450 ГПа. По твердости корунд уступает только алмазу. Керамика с содержанием Al_2O_3 до 70 % называется муллитом-кремнеземистой, а 70...95 % Al_2O_3 – муллитом-корундовой. Несмотря на то, что муллитовая керамика обладает высокой твердостью и износостойкостью, данный КМ является очень хрупким. Благодаря своим физико-механическим свойствам корундовая керамика используется для изготовления шлифовальных кругов и режущих инструментов, а муллитом-корундовая и кремнеземистая – для изготовления огнеупорных и тепло- и газоизоляционных изделий.

2) Карбид кремния (SiC)

Карбид кремния имеет почти те же свойства, что и алмаз. Это не только самый легкий, но и самый твердый КМ, который обладает отличной теплопроводностью, низким коэффициентом теплового расширения и чрезвычайно высокой устойчивостью к кислотам и щелочам.

Свойства карбидокремниевой керамики не изменяются при нагреве до температур выше 1400°C. Высокий модуль упругости (> 400 ГПа) обеспечивает превосходную стабильность размеров. Эти свойства

обусловлены широким использованием карбида кремния в качестве конструкционного материала. Карбид кремния также устойчив к коррозии, эрозии и истиранию. Керамические компоненты из карбида кремния используются в системах химической обработки, станках, развальцовочных устройствах, машинах для литья под давлением и в производстве форсунок.

«Существующие разновидности карбидокремниевой керамики – SiC (спеченный карбид кремния) и $SiSiC$ (реакционноспеченный карбид кремния) – отлично зарекомендовали себя во многих областях применения. Последний особенно хорошо подходит для производства сложных крупных компонентов.»

Карбид кремния токсикологически безвреден и может применяться в пищевой промышленности. Еще одним типичным применением компонентов из карбида кремния являются технологии динамического уплотнения с подшипниками скольжения и механическими уплотнениями, например, в насосах и приводных системах. По сравнению с металлами карбид кремния является очень экономичным решением, обеспечивающим более длительный срок службы при работе в агрессивных высокотемпературных средах. Кроме того, керамика из карбида кремния идеально подходит для использования в самых требовательных областях баллистики, химии, энергетики, производства бумаги и в качестве компонентов трубопроводных систем.

3) Диоксид кремния (SiO_2)

Диоксид кремния – главный компонент почти всех земных горных пород, в частности, кизельгура. Он обладает низкой теплопроводностью, устойчивостью к кислотам и температурным перепадам и высокой коррозионной стойкостью. Данные физико-механические свойства нашли применение при изготовлении химической и термостойкой посуды. Так как SiO_2 прозрачен в широкой области ультрафиолетового и видимого спектра, он также используется при изготовлении электроизоляторов и, при нагревании до высоких температур, инфракрасных излучателей.

4) Оксид цинка (ZnO)

Оксид цинка используется как полупроводник при изготовлении датчиков, использующих абсорбцию газов, в фотоэлектрических элементах, работающих на основе гетеропереходов, для генерирования электрической энергии с помощью солнечного света. Так как в его кристаллической структуре отсутствует центр симметрии.

5) Диоксид циркония (ZrO_2)

В отличие от других керамических материалов, ZrO_2 представляет собой материал с очень высокой устойчивостью к распространению трещин. Кроме того, керамика из ZrO_2 имеет чрезвычайно высокий коэффициент теплового расширения и поэтому часто используется в качестве связующего материала между керамическими и стальными компонентами.

б) Нитрид кремния (Si_3N_4)

Нитрид кремния обладает лёгким весом, устойчивостью к тепловым ударам и высокой ударной вязкостью, что придает ему высокое сопротивление ударным нагрузкам.

Микроструктура нитрида кремния состоит из вытянутых кристаллов, которые соединяются друг с другом, образуя микростержни. Одним из применений, где эта комбинация свойств оказалась особенно эффективной, является обработка серого чугуна или чугуна с керамическими вставками. В отличие от карбидов или других режущих материалов, использование керамики на основе нитрида кремния позволяет выполнять обработку резанием керамическими пластинами на максимальной скорости без использования смазочно-охлаждающей жидкости. Благодаря сочетанию отличной ударной вязкости и хороших трибологических свойств нитридкремниевая керамика широко применяется в таких областях, как производство шариков и тел качения для легких и чрезвычайно точных подшипников, высокопрочных керамических инструментов для обработки металлов давлением, а также автомобильных компонентов, подверженных высоким нагрузкам.

Основные свойства описанных выше материалов представлены в таблице 1.3. Данные материалы являются наиболее применяемыми в различных отраслях и имеют свойства, актуальные для чистых по составу смесей, однако незначительные примеси (например, MnO, MgO, CaO и т.д.) значительно улучшают некоторые физико-механические свойства, являясь легирующими элементами.

Таблица 1.3 – Основные свойства представленных КМ [74]

Свойства	Материалы					
	Оксид алюминия Al ₂ O ₃	Карбид кремния SiC	Диоксид кремния SiO ₂	Оксид цинка ZnO	Диоксид циркония ZrO ₂	Нитрид кремния Si ₃ N ₄
Плотность, г/см ³	3,70-3,95	3,21	2,17-2,65	5,61	5,6-5,7	3.21
Твердость, ГПа	15-19	3,8-9,5	7	4-5	12-14	15
Модуль Юнга, ГПа	300-400	390-430	73	140	210	310
Прочность, МПа	300-630	320-350	50	240	500-600	800
Теплопроводность, Вт/(м*К)	20-30	3,8-20,7	10.7	15-30	2-2,5	85
Предел прочности на сжатие, МПа	2000-4000	2300	1100-1600	1000-1500	1800-1900	2950

Сплавы на основе Al₂O₃ используют для изготовления изделий работающих при температуре +450...630 °С. Керметы на основе карбида титана используют при температурах не выше +1000 °С. При более высоких температурах используют композиции на основе карбидов бора и кремния.

Большую перспективу имеют материалы систем «керамика – керамика», например ККМ с углеродными волокнами (оксидами, карбидами, силицидами). Это связано с небольшим весом изделий, изготовленных из данного материала, и возможностью их стабильной работы до +2000 °С.

В промышленности нашел применение очень твердый сплав гексанит. Он создан на основе кубического нитрида бора (боразон, эльбор). Данный сплав тверже алмаза, также он способен выдерживать температуру до +1930 °С. Использование данного сплава на производстве повышает производительность труда в 10 раз.

Помимо металлокерамических твердых сплавов применяют минерально-керамические материалы. Они состоят из зерен оксидов металлов или синтетических минералов, связанных синтетическим стеклом. Среди наиболее часто используемых стоит упомянуть Microlite. Для его производства используется корунд (кристаллический оксид алюминия) с добавлением оксида магния.

Существует множество областей применения композиционных материалов. Помимо аэрокосмической, ракетной техники и других специальных технологических отраслей, они востребованы в машиностроении, в автомобилестроении, в горнодобывающей, металлургической промышленности, в строительстве и т.д. Область применения этих материалов постоянно расширяется.

Однако физико-механические, химические, электрические и другие свойства, которыми обладают керамические материалы, актуальны для механизмов и агрегатов, работающих в тяжелых условиях, но негативно влияют на обрабатываемость самих изделий из КМ. При этом происходит постоянное ужесточение требований к изготовлению изделий из этих материалов, что не всегда можно обеспечить современными отработанными технологиями обработки.

1.2 Анализ существующих методов и способов обработки КМ с целью определения основных факторов, влияющих на качество обработанной поверхности изделия

Успешное применение КМ в качестве материала для деталей машин требует решения двух основных задач: во-первых, создать композиционный материал с требуемыми физико-механическими свойствами; во-вторых, найти способ механической обработки, который может обеспечить достижение требуемых параметров качества обработанной поверхности. Следует отметить, что на механическую обработку изделий из керамических

материалов в настоящее время приходится примерно 40% всего времени изготовления изделия.

Гидроабразивная обработка

Гидроабразивная обработка заключается в резании материала тонкой струей смеси воды и абразива, подаваемой с высокой скоростью и под высоким давлением.

Процесс представляет собой эрозионное разрушение под действием рабочей струи, в ходе которого мелкие абразивные частицы снимают с поверхности обрабатываемой детали микростружку, а вода вымывает ее из зоны резания. В качестве абразивов используют обломки минералов с острыми концами зернистостью 0,1-0,3 мм. В зависимости от обрабатываемого материала и его толщины количество используемого абразива составляет от 100 до 600 г/мин. При изготовлении стальных заготовок чаще всего используют гранатовый песок - природный абразивный минерал, обладающий высокой прочностью, твердостью 7,5-8,0 по шкале Мооса и идеальной формой зерна. Для обеспечения качества реза абразив должен быть без крупных зерен и пыли. Обычно используемые размеры частиц от 80 до 120 мкм.

К достоинствам метода также можно отнести отсутствие термического воздействия на материал, малое усилие резания, эрозионно-разрушающий характер, не способствующий развитию внутренних напряжений в зоне резания.

Недостатками данного метода являются эффект конусности, которая возникает в следствии инерционности водной струи, низкая производительность и ограничения в толщине обрабатываемой заготовки

Электроэрозионная обработка

Электроэрозионная размерная обработка основана на удалении материала с помощью импульсных электрических разрядов, возникающих при разрушении диэлектриков или слабопроводящих жидкостей.

Согласно ГОСТ 25331-82 электроэрозионная обработка заключается в изменении формы, размеров, шероховатости и свойств поверхности заготовки под действием электрических разрядов в результате электроэрозии.

Преимуществами данного метода являются универсальность (для металлов), высокое качество резки и простота применения.

Основным недостатком данного метода является невозможность обработки диэлектрических материалов. Электрическая дуга, которая создает высокотемпературную плазму, возникает за счет контакта электрода с металлической поверхности обрабатываемой деталью. Если деталь будет выполнена из диэлектрического материала (дерево, бетон, пластик, керамика), то в этом случае режущая дуга не возникнет и, как следствие, процесс резания не будет произведен. Также, к недостаткам можно отнести высокое энергопотребление, низкую производительность и высокую стоимость оборудования.

Лезвийная обработка

Основным методом получения заготовок из КМ является прессование и последующее спекание. Вследствие высокой твердости после спекания, обработка изделий лезвийным способом невозможна. Простые поверхности изделия обрабатывают алмазными шлифовальными кругами, производят доводку алмазными пастами [46]. Но для получения изделий со сложным профилем данные методы обработки трудозатратны, поэтому некоторые авторы [9, 34] предлагают проводить предварительную лезвийную обработку «сырой» либо слегка «подспечённой» керамики

Основными недостатками данного метода являются малая изученность процесса, необходимость последующей обработки после окончательного спекания, быстрый износ режущих пластин (связан с абразивной природой керамики).

Шлифовальная обработка

На сегодняшний день основным способом получения требуемых параметров качества поверхностей на изделиях из КМ является шлифование с

последующей доводкой и полированием. На данных операциях формируется обработанная поверхность и закладываются остаточные напряжения в поверхностном слое, что определяет работоспособность конечного изделия и узла в целом.

Процесс шлифования предусматривает удаление с поверхности материала верхнего тонкого слоя, в целях получения высокоточных размеров и менее шероховатой поверхности деталей. Данный вид обработки производится при помощи специальных шлифовальных кругов с абразивными частицами. В процессе шлифования, за счет вращательных движений кругов, с поверхности материала срезается тончайшая стружка за очень короткий промежуток времени.

Среди положительных характеристик шлифовальной обработки КМ особенно стоит отметить:

1. Возможность обработки многих видов поверхностей и плоскостей (в т.ч. резьба, зубья зубчатых колес, конические, фасонные, а также внутренние и наружные поверхности цилиндрической формы);
2. Высокая точность обрабатываемой поверхности;
3. Высокая производительность процесса.

Основными недостатками данного метода являются высокие температуры в зоне резания, ударные нагрузки, большой процент брака. Высокие динамические напряжения в зоне резания хрупких материалов может привести к образованию трещин в поверхностном слое материала (рисунок 1.1).

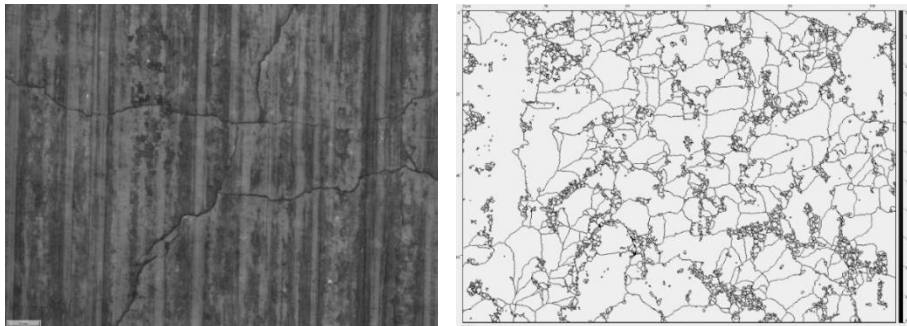


Рисунок 1.1 – Трещины, образованные в процессе классического шлифования

Процессы механической обработки керамики требуют специальных станков для обработки керамики, специальных режущих и измерительных инструментов. В настоящее время отечественная промышленность таких станков не выпускает, и при изготовлении керамики операции механической обработки проводятся на обычных серийных токарных, карусельных, сверлильных, круглошлифовальных и плоскошлифовальных станках.

Процессы обработки керамических материалов в хрупком и вязком состояниях сильно отличаются. Для вязкого состояния характерна пластическая деформация и отделение стружки в процессе резания. В хрупком же состоянии, обработка характеризуется низкой пластичностью, высокой твердостью, жесткостью и относительно высоким пределом прочности на изгиб. По данным свойствам, керамика во многом противопоставлена вязким материалам, поэтому хрупкие материалы при обработке часто крошатся, скалываются и незначительно деформируются пластически.

Несмотря на то, что на отдельных технологических операциях применяют обработку лезвийным инструментом, основным видом механической обработки керамики является шлифование. При данном виде обработки режущими элементами являются зерна абразивного инструмента.

Рассмотренное выше разнообразие конструкционных материалов на основе оксидов алюминия, циркония, бора и др. указывает на необходимость разработки такого же многообразия технологических процессов шлифования хрупких керамических материалов.

Исследованием процессов шлифования керамики занимались такие ученые как *О.В. Душко, С.М. Братан, М.И. Шкарупа, В.В. Кузин, В.В. Гусев, М.Ю. Ерёмин, В.А. Горелов, А.Ю. Попов, В.А. Рогов, Ping Li, Beizhi Li, A. G. Matalis, J. Kundrak, T. Tawakoli* и др.

Работа единичных зерен, в процессах алмазно-абразивной обработки, для хрупких и пластичных материалов происходит по-разному. Степень хрупкости материала в первом приближении можно определить по критерию Дертева:

$$\chi = \frac{\sigma_{\text{сдв}}}{\sigma_p}, \quad (1.1)$$

где $\sigma_{\text{сдв}}$ – сопротивление сдвигу, σ_p – сопротивление на отрыв.

Для материалов, находящихся в хрупком состоянии, $\chi > 1$ [6].

В работе [21] автор рассматривает вопросы оценки хрупкости керамических материалов. Ссылаясь на принятую методологию [20], автор предлагает использовать энергетический критерий поверхностной хрупкости χ для прогнозирования эффективности шлифования КМ. Саму же хрупкость автор определяет как соотношение потенциальной энергии A_y , накопленной в процессе упругопластического деформирования, и работы, необратимо затраченной на пластическое деформирование материала $A_{\text{пл}}$:

$$\chi = A_y \cdot A_{\text{пл}}^{-1} \quad (1.2)$$

Диапазон значений χ составляет от 0 до ∞ . При нулевых значениях хрупкости в материале не накапливается упругая энергия, что характерно для хрупкого разрушения. Когда $\chi \rightarrow \infty$ деформационная энергия накапливается в виде потенциальной энергии и в дальнейшем может расходоваться на образование и развитие трещин при разрушении. При этом каких-либо микронеупругих деформаций практически не наблюдается.

Учитывая то, что деформация для самых хрупких металлов (чугун, высокоуглеродистая сталь и т.д.) составляет миллиметры (или доли миллиметров), а для керамики – микрометры, автор предлагает использовать подход профессора Г.А. Гогоци [13, 14, 15, 16] в виде «меры хрупкости», являющейся отношением потенциальной энергии (Π), которая затрачена на упругое микродеформирование, к общему количеству энергии (W):

$$\chi = \frac{\Pi}{W} = \frac{\int_{\varepsilon_{\text{нр}}}^{\varepsilon_{\text{ост}}} f_p(\varepsilon) d\varepsilon}{\int_0^{\varepsilon_{\text{нр}}} f_{\text{н}}(\varepsilon) d\varepsilon}. \quad (1.3)$$

Также в работе автор приходит к выводу о том, что при изучении КМ, помимо значения модуля упругости и твердости, важно знать и трещиностойкость, в качестве одной из основных характеристик материала.

Сам коэффициент трещиностойкости автор предлагает определять методом, основанном на анализе трещин, возникающих по углам пирамиды Виккерса, а для числового расчета – уравнение Анстиса [48].

В обработке КМ при шлифовании единичным алмазным зерном выделяют три фазы [7, 8]:

1) фаза внедрения зерна, характеризующаяся увеличением силы резания, стремящейся вырвать отдельно взятое зерно из связки материала обрабатываемой заготовки;

2) фаза деформирования связки, которая возникает вследствие того, что прочность зерен материала обрабатываемой заготовки больше прочности связки шлифовального инструмента, но меньше прочности алмазного зерна;

3) фаза увеличения напряжений в материале обрабатываемой заготовки до критической величины и образования микротрещины, которая облегчает последующее скалывание отдельных зерен или их конгломератов. После скалывания усилие резания значительно уменьшается и абразивное зерно, вследствие упругих свойств связки, возвращается в исходное положение.

Приведенные фазы характерны для классических режимов шлифования (скорость резания до 35 м/с, глубина резания $t = 0,03-0,1$ мм), для которых характерно возникновение относительно высоких температур в зоне резания (вплоть до температуры размягчения материала, к примеру, для керамики на основе оксида циркония данное значение должно превышать 1400° С). Так же установлено, что при повышенном нагреве обработанной поверхности возникают остаточные напряжения в шлифуемом материале, что, согласно одной из теорий, является причиной образования микротрещин в поверхностном слое керамических изделий. При этом трещины могут появиться как в процессе шлифования, так и после него, время их образования в отдельных случаях может достигать несколько суток. Возникшие микротрещины уменьшают срок службы изделий и в результате приводят к их разрушению.

В процессе шлифования на поверхности изделий образуются микротрещины, размер которых возрастает с ужесточением условий обработки. Происходит своеобразное «взрыхление» обрабатываемой поверхности. Таким образом, одной из основных причин образования микротрещин является механическое повреждение кристаллов материала обрабатываемой заготовки алмазными зернами. Микротрещины, распространяясь в глубь материала, являются основным местом скола частиц при последующем прохождении алмазных зерен. По краям царапин от алмазного зерна вырываются отдельные кристаллы КМ.

Образование трещин и разрушение при механической обработке происходят в основном по стекловидной фазе - наиболее слабому звену макрогетерогенной системы, к которой относится керамика.

Качество поверхности в значительной степени зависит от размера зерен кристаллофазы. Вырывание крупных кристаллов керамики под воздействием алмазных зерен шлифовального круга снижает качество обработки, так как от кристаллов больших размеров на поверхности материала остаются глубокие лунки.

По одной из теорий, улучшить качественные параметры обработанной поверхности можно путем повышения скорости резания. Анализ существующей литературы и результатов работ других авторов показал, что процессы обработки со скоростями резания до 100 м/с уже достаточно хорошо исследованы, существует оборудование и решено большинство проблем, однако данные способы имеют ограничения в достижении технологических параметров, таких как шероховатость обработанной поверхности, глубина и интенсивность остаточных напряжений в поверхностном слое, размерная точность и точность формы и т.д. Поэтому наибольший интерес представляет обработка со скоростями резания свыше 100 м/с, что относится к области высокоскоростного шлифования. Исследованием скоростного шлифования занимались такие авторы как: *Филимонов Л.Н., Резников А.Н., Носенко В.А., Аверков К.В., Попов А.Ю., Титов Ю.В., Пилинский В.И., Арндт К., Братья Ву,*

Пинг Ли и другие. В этих работах рассматриваются процессы, происходящие в зоне резания при обработке, и особенности обработки конструкционных сталей и инструментальных материалов, таких как твердые сплавы и быстрорежущие стали. Отмечается качественный переход и изменение процессов обработки при скорости резания свыше 100-120 м/с, однако главной проблемой является создание технологической системы (оборудование, приспособления, инструмент), позволяющей производить операцию высокоскоростного шлифования с заданными технологическими требованиями. В связи с этим одной из задач является разработка установки для высокоскоростного шлифования КМ со скоростями свыше 100 м/с. Для реализации способа высокоскоростного шлифования сформулированы цели и задачи данного исследования.

Анализ существующих способов обработки КМ и практического опыта показал, что наиболее перспективным способом является шлифование, но с повышением скорости резания, так как все существующие способы не обеспечивают требуемой шероховатости, приводя к введению в технологические процесс дополнительных операций и закладывая ещё большие остаточные напряжения в поверхностный слой изделия, что в свою очередь может привести к трещинообразованию в поверхностном слое. Поэтому эти способы для обработки таких специфических хрупких материалов не подходят. В связи с чем именно способ высокоскоростного шлифования является объектом исследования в диссертации.

1.3 Влияние термосиловых нагрузок на образование трещин при шлифовании керамических материалов

Шлифование является ответственной операцией технологического процесса изготовления деталей из КМ, который сопровождается большими температурными нагрузками, что приводит к образованию микротрещин на обработанной поверхности. Трещины могут возникать как в процессе

шлифования, так и через некоторое время после обработки. Исходя из этого следует, что данный процесс является мало прогнозируемым, частично на него можно воздействовать за счет изменения глубины, подачи и скорости резания при обработке, подбором шлифовальных кругов и т. д. Режимы резания определяют получаемую шероховатость обработанной поверхности и наличие дефектов поверхностного слоя. При этом именно на данных операциях, составляющих порядка 70-80% от общей трудоемкости, формируются дефекты, приводящие к браку, который может достигать 50% от общей массы изготавливаемых деталей.

Исследователи [40] считают, что основной причиной образования трещин на обработанной поверхности являются повышенные температуры, которые приводят к возникновению остаточных напряжений на в поверхностном слое обрабатываемого изделия из КМ.

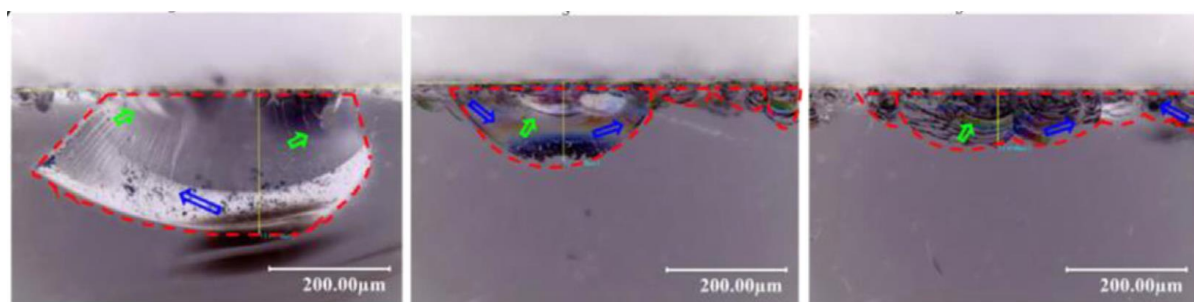
На сегодняшний день не существует общепринятых методик, позволяющих прогнозировать появление трещин при механической обработке КМ. По одной из теорий [26, 57] существует температурная граница, называемая температурой Дебая, при преодолении которой средняя энергия атомов в твердом теле растет и начинается интенсивное изменение кристаллической решетки. Данные температуры называют «последебаевскими». В данной работе этот порог принимается за начало размягчения керамики и появления трещин при нагреве обрабатываемой поверхности изделия из КМ. Анализируя свойства муллитокорундовой керамики с содержанием 50...95 % Al_2O_3 и справочную литературу [23] и технологию получения первичного и вторичного муллита [27], становится понятно, что интервал температур размягчения керамики составляет 1500...1800 °С. Поэтому можно принять температуру 1400 °С и считать ее температурой начала размягчения керамики («температура появления трещин»).

В работах [1, 39, 42] исследован вопрос изменения контактной температуры при высокоскоростном шлифовании различных материалов.

Установлено, что с повышением скорости резания до определенных значений контактная температура в зоне шлифования монотонно возрастает, а при дальнейшем повышении скорости резания стабилизируется, находясь в диапазоне от 200 до 800 °С, а после начинает снижаться. Данных температур недостаточно для размягчения керамики и появления термических трещин. Предварительно проведенные эксперименты также подтвердили данные результаты.

Второй причиной трещинообразования являются силовые воздействия алмазного зерна на поверхность обрабатываемого изделия из КМ, что вызывает нормальные напряжения в поверхностных слоях керамики. Для исследования данной проблемы необходимо провести моделирование формирования трещин в КМ при шлифовальной обработке. Именно поэтому в данной работе рассматриваются силовые и не учитываются температурные факторы. Этим же обусловлена обработка без применения СОЖ.

В работе [69] автор исследует вопрос трещинообразования при шлифовании КМ на скоростях резания до 150 м/с. В работе отмечается связь между возникновением трещин и лункообразованием. С повышением скорости наблюдается как уменьшение микролуннок (рисунок 1.2), так и снижение глубины залегания микротрещин (SSD) (рисунок 1.3).



а) $V = 30$ м/с; б) $V = 100$ м/с; в) $V = 150$ м/с

Рисунок 1.2 – Снимки микролуннок при различных скоростях резания [69]

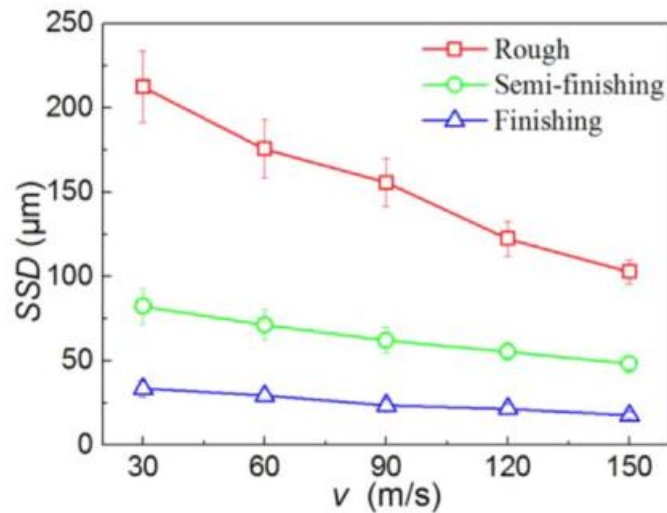


Рисунок 1.3 – График зависимости глубины залегания микротрещин (*SSD*) от скорости резания (*V*) [69]

Несмотря на уменьшение количества микротрещин с повышением скорости резания при шлифовании до 100 м/с, они продолжают присутствовать на обработанной поверхности КМ, что требует дополнительной обработки (доводки) КМ. Если характер (механизм) разрушения зависит от скорости резания, то можно предположить, что дальнейшее повышение скорости резания изменит механизм разрушения КМ, что уменьшит или полностью устранил появление микролунок и микротрещин. 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 то же время данные о влиянии высокоскоростного шлифования на качество обработанной поверхности КМ в литературе практически отсутствуют. 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.

1.4 Задачи исследования

На основе проведенного анализа существующих методов и способов обработки КМ и определения основных факторов, влияющих на качество обработанной поверхности изделия, определены основные направления исследований и технологической разработки.

Анализ существующей литературы и результатов работ других авторов показал, что наиболее перспективным является направление скоростного шлифования. В работах отмечается качественный переход и изменение процессов обработки при скорости резания свыше 100-120 м/с, однако главной проблемой является создание технологической системы, позволяющей производить операцию высокоскоростного шлифования с заданными технологическими требованиями, исходя из этого, **первой задачей** является:

- Разработка технологического оборудования, позволяющего производить обработку КМ способом высокоскоростного шлифования, обеспечивающего требуемые параметры качества обработанной поверхности; которые состоят в отсутствии микролунок и микротрещин на обработанной поверхности и шероховатость Ra не более 0,1 мкм.

На сегодняшний день при моделировании шлифования хрупких гетерогенных материалов заготовку в основном представляют как сплошной материал, без различных включений и неоднородностей. Однако в действительности материал КМ состоит из прочных зерен, скрепленных менее прочной связкой. Моделирование подобной неоднородной структуры методами МКЭ приводит к огромным вычислительным затратам, что является нецелесообразным. Исходя из этого, **второй задачей** является:

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

Алмазное шлифование КМ является сложным процессом, на который оказывают влияние множество факторов. На параметры качества обработанной поверхности влияют такие факторы, как скорость резания, глубина резания и подача, а также размер алмазного зерна и марка связки шлифовального инструмента. С целью определения рациональных режимов обработки и характеристик шлифовального инструмента, позволяющих достигать требуемые параметры качества, в работе поставлена **третья задача**:

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

ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ОБРАБОТКИ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ВЫСОКОСКОРОСТНЫМ СПОСОБОМ ШЛИФОВАНИЯ

В данной главе представлено технологическое оборудование, позволяющее производить обработку КМ высокоскоростным способом шлифования при скоростях резания до 300 м/с, который реализован за счет модернизированной установки и разработанных шлифовальных кругов, с возможностью применения различных характеристик шлифовальных головок.

2.1 Проектирование технологической системы на основе динамических подходов

Одной из основных проблем при проектировании технологической системы является то, что существующие скоростные шпиндели, способные развивать частоту вращения до 100 тыс. об/мин не позволяют производить обработку инструментом с диаметром ~250...300 мм. Поэтому в работе разработана конструкция шпиндельного узла и шлифовальных кругов с точки зрения повышения скорости резания, приводящей к значительному повышению, амплитуда-частотных характеристик, что в свою очередь является критичным при обработке деталей из КМ.

Повышение требований, предъявляемых к изделиям, появление новых материалов и развитие станкостроительной отрасли привело к возрастанию важности динамических процессов в станках.

Все это приводит к росту задач, связанных с динамическими явлениями при обработке. Прежде всего необходимо обеспечить стабильное движение инструмента и заготовки путем минимизации вибраций и резких движений узлов станка.

Основная задача – создать условия для изготовления детали с минимальными погрешностями формы и размеров, что достигается

отсутствием отклонений от заданных перемещений инструмента и заготовки, возникающих в следствии внешних воздействий на динамическую систему станка. Также одной из важных задач является обеспечение достаточной долговечности работы станка при различных внешних воздействиях.

Следует отметить отличия предъявляемых в отношении динамических процессов требований, а также выраженные особенности различных станков с точки зрения динамических явлений. Потребность в оценке, сопоставлении станков обусловила необходимость в том, чтобы сформировать комплекс используемых для подобного сопоставления показателей. Динамическим качеством станков предлагается именовать систему присущих станков динамических показателей, от которых зависит степень выполнения указанных требований, связанных с малыми потерями энергии, стабильностью, ресурсом, точностью и др.

В существующих публикациях анализируются отдельные относящиеся к динамическому качеству станков характеристики. При этом отсутствуют обобщающие исследования, позволяющие определять целесообразность мероприятий, являющихся технологическими либо конструктивными, исходя из всей совокупности относящихся к динамическому качеству станка характеристик. Единая система подобных характеристик также не сформирована. Следствием является отсутствие единообразия в используемом категориальном аппарате.

При обобщении представленных в существующих публикациях сведений нецелесообразно лишь собирать отдельные теоретические разработки и имеющиеся результаты. Необходимо сформировать новое представление о присущей станку динамической системе. К примеру, представление о замкнутости данной системы, обусловленной взаимодействием относящимися к УС - упругой системе составляющими и рабочими процессами, которые протекают в подвижных соединениях данных составляющих.

Представленные положения определяют первую присущую динамике станков черту в виде комплексности, обусловленной тем, что динамика станков использует данные, относящиеся к многообразным научным дисциплинам. В этой связи в рамках исследования существенное положение занимает анализ представлений в отношении всех составляющих динамической системы станка, представлений, связанных со смещениями, деформациями упругой системы, а также протекающими в работающем станке указанными процессам.

Вопрос о том, как связаны, взаимодействуют относящиеся к динамической системе составляющие, имеет определяющее значение.

Положение динамики станков среди научных дисциплин, являющихся смежными, определяется присущим динамике станков комплексным характером. Основу данной составляющей станковедения – науки о станках, составляют базовые принципиальные положения, относящиеся к теории машин и механизмов и теоретической механике.

Существует прямая связь динамики станков и технологии холодной обработки металлов. Успешность выполняемых с использованием станков технологических операций определяется наиболее значимыми динамическими (и иными известными) показателями.

Следующая присущая динамике станков характерная черта определяется тем, что диапазон, в котором меняются присущие динамической системе станка характеристики, является предельно широким. Конструктивные компоновки станков многообразны. Диапазон изменения скорости резания – десятичные порядки величин. Следует также отметить широкие диапазоны требований к точности деталей, их размеров, конфигурации, веса. Движение узлов может измеряться и долями микрона, и тысячами метров в минуту.

Данная характерная черта обуславливает необходимость не только использовать существующие на данный момент узкие рекомендации, но и создавать общие методы динамического анализа. Она также обуславливает

особенности построения работы на основе анализа общих положений с демонстрацией практических примеров.

Присущие возникающим в станках динамическим явлениям особенности весьма многообразны. В рамках данного раздела исследования определяющее значение имеет изучение систем, являющихся линеаризованными. При линейном приближении обеспечивается возможность изучения существенной части явлений, обладающих значимостью для практики. Подобное приближение позволяет переходить и изучению систем, являющихся более сложными.

Лишь в случае наличия подобной необходимости обеспечивается учет нелинейных свойств. Применительно к постановке исследований, методике их проведения анализируются задачи, связанные со статистическим анализом динамических процессов в случае случайного воздействия, систем, характеристики которых соответствуют вероятностным законам, а также связанные с изучением систем, являющихся нестационарными (с характеристиками, меняющимися во времени).

Сегодня отмечается активное развитие указанных направлений в теории автоматического регулирования и др. Подобное развитие должно быть обеспечено и применительно к динамике станков.

Следует отметить наличие вспомогательных движений узлов станка при формообразующих движениях, которыми характеризуются при обработке инструмент и заготовка. Указанные движения представлены в виде установочного движения на определенную координату стойки станка, в виде разгона шпинделя, его останова, и др. Выполнение подобных движений возможно на холостом ходу либо одновременно с обработкой.

Данные движения, сопутствующие им динамические процессы существенным образом сказываются на потерях энергии, сроке службы станка и производительности обработки. Указанные движения и процессы сказываются в некоторых случаях непосредственным образом на точности детали.

Также изучается динамика выполняемых при холостом ходе движений вспомогательного характера. Следует учитывать, что динамическая система в данном случае представляет собой составляющую динамической системы в случае резания. Далее будет продемонстрировано, что изучение процессов при обработке деталей должно проводиться после изучения динамической системы при холостом ходе.

Данное положение обуславливает еще одну присущую динамике станков особенность в виде единства относящихся к холостому и рабочему режимам станка задач.

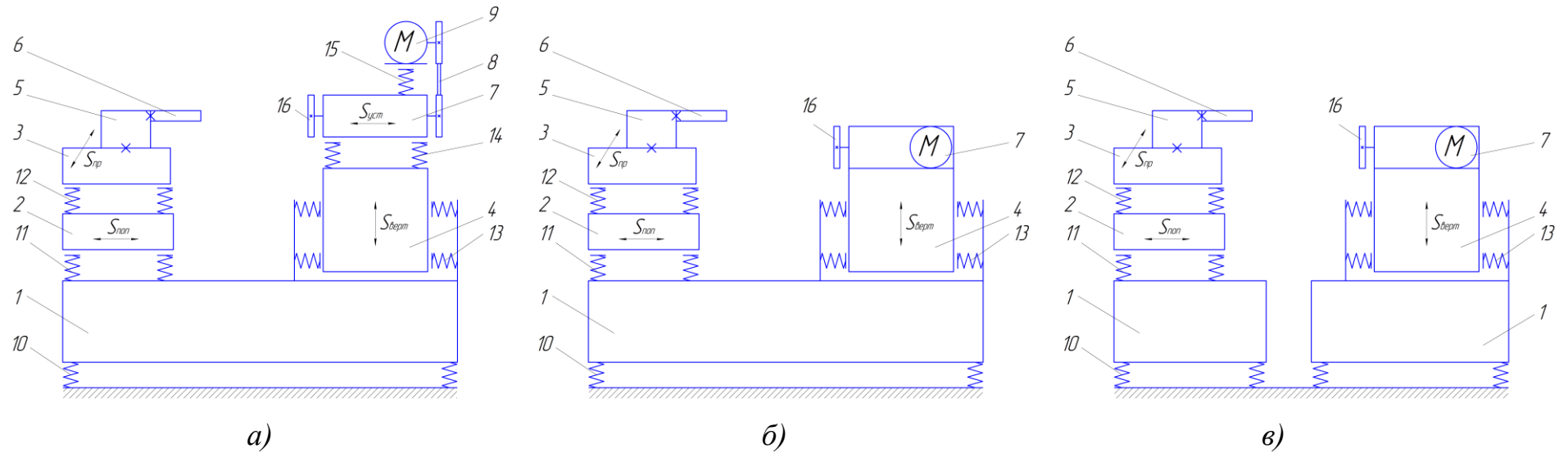
Динамическая система в виде упругой системы и происходящих в ее подвижных соединениях рабочих процессов в случае всех разновидностей машин в исходном положении является замкнутой.

На рисунке 2.1 приведены основные варианты технологической системы для исследований и отработки высокоскоростного шлифования.

Классическая компоновка установки представлена на рисунке 2.1,а, которая включает клиноременную передачу и установочные движения, вносящие погрешность и снижающие динамическую устойчивость.

На рисунке 2.1,б представлена компоновка включающая мотор-шпиндель и не применяющая элементы, вносящие дополнительную погрешность и снижающие динамическую устойчивость.

Компоновка на рисунке 2.1,в представляет собой разнесенную конструкцию, то есть система перемещения детали имеет отдельную станину, а система перемещения мотор-шпинделя, свою. Такая компоновка позволяет ограничить динамическое воздействие на деталь со стороны шлифовального круга, но является наиболее сложной по конструкции и с точки зрения синхронизации систем. Поэтому в работе выбрана компоновка, представленная на рисунке 2.1,б.



1 – станина; 2 – поперечный стол; 3 – продольный стол; 4 – вертикальная консоль; 5 – приспособление; 6 – деталь;
 7 – шпиндель; 8 – клиноременная передача; 9 – мотор; 10 – виброопоры; 11 – поперечные направляющие;
 12 – продольные направляющие; 13 – вертикальные направляющие; 14 – пиноль; 15 – опора мотора;
 16 – шлифовальный круг

Рисунок 2.1 – Основные варианты технологической системы для исследования и отработки технологии высокоскоростного шлифования: $S_{верт}$ – перемещения по вертикали; $S_{поп}$ – перемещения поперечные; $S_{пр}$ – перемещения продольные;
 $S_{уст}$ – перемещения установочные

Наряду с общими представлениями в отношении составляющих динамической системы и данной системой в целом, имеются и разработки, связанные с вынужденными колебаниями устойчивых систем, демпфированием, фрикционными автоколебаниями; устойчивостью движения рабочих органов; динамическими характеристиками резания и трения и собственной устойчивостью, и др.

Назначение станка, связанное с высокопроизводительной обработкой деталей с определенными качественными характеристиками и точностью, обуславливает относящиеся к общим показателям динамические показатели качества.

Воздействия на систему извне оказывают влияние на особенности процесса обработки и на подготовку станка.

Создание в системе процессов, являющихся стационарными и переходными, при которых одновременно меняются давление в гидроцилиндре, напряжения, сила тока в якоре двигателя, деформации, температуры, контактные давления на сопрягающих поверхностях, скорость относительного движения узлов и др., обуславливаются тепловыми воздействиями от двигателей и зоны резания, весовой нагрузкой от движущихся узлов и заготовки, изменением сечения слоя среза (в т.ч. врезанием, выходом инструментов), силой зажима, силой инерции и др.

Необходимо, чтобы соответствующие изменения происходили в рамках определенных границ, которые зависят от работоспособности составляющих системы либо системы в целом. Для того чтобы это установить, в общем случае следовало бы проанализировать изменение каждой из указанных величин или, иначе, каждого из параметров системы.

Однако практически ограничиваются анализом изменения лишь некоторых величин, а иногда и одной, если из опыта заведомо известно, что остальные величины в рассматриваемом процессе не выходят за пределы допускаемых значений. Отсюда появилось независимое раздельное рассмотрение динамических процессов в станках с точки зрения точности обработки, долговечности и т. п. Вследствие воздействия извне все указанные

ранее величины меняются одновременно. Данные изменения выступают в виде происходящего в системе единого динамического процесса. Данный процесс определяется присущими системе характеристиками и воздействиями извне. Он исследуется с использованием единых методов, что обеспечивает возможность формирование общего представления в отношении имеющихся у станка динамических качеств.

Особенности реагирования системы на воздействия извне, устойчивость системы определяют присущее станку динамическое качество. Оценка данного качества применительно к станку возможна лишь в виде динамического качества системы в виде ряда составляющих – детали, станка, инструмента, приспособления при взаимодействии данных составляющих с рабочими процессами.

Требуется четко дифференцировать понятия таких процессов, как рабочие и динамические. Первые представлены происходящими в определенном подвижном соединении явлениями физико-химического характера, вторые – изменением присущих системе параметров (в т.ч. связанных с рабочими процессами) при внешних воздействиях.

Динамическое качество характеризуется характеристиками в виде отклонения параметров системы в случае внешних воздействий, быстродействия, степени и запаса устойчивости.

Возможность изменения в отсутствие потери устойчивости системы того или иного параметра определяется запасом устойчивости. Если устойчивость утрачивается, узлы заклинивают, движутся толчкообразно, неравномерно, происходит «подрывание» инструмента либо вибрация.

Рисунок 2.2 демонстрирует диапазон, в рамках которого обеспечивается устойчивость движения рабочего органа по направляющим скольжения в отсутствие ограничения жесткости привода, скорости движения. При движении узла с приводной жесткостью C запас устойчивости в случае скорости V является тем же, что и в случае, когда скорость движения составляет V / V_{np} ; по жесткости – C / C_{np} .

Соответствующими пределу устойчивости предельными значениями являются $V_{пр}$ и $C_{пр}$. Выражением запаса устойчивости является превышающее единицу число. Запас устойчивости оценивается на основе отношения заданного параметра к предельному или предельного к заданному исходя из того, как располагается область устойчивости.

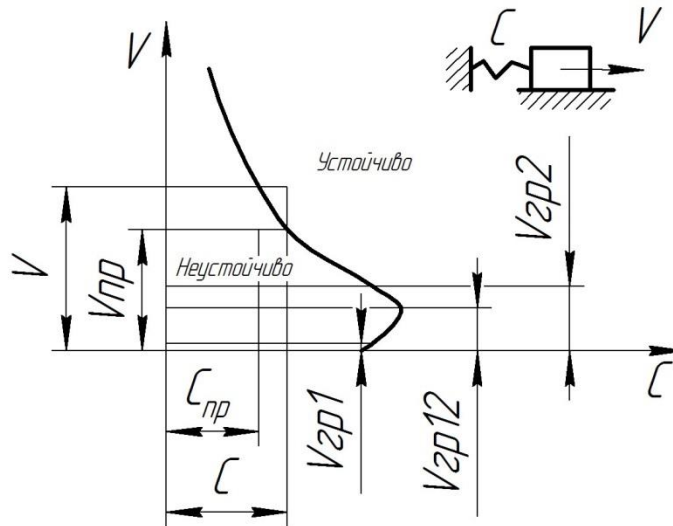


Рисунок 2.2 – Область устойчивости перемещения рабочего органа станка в параметрах «скорость - жесткость»

Посредством запаса устойчивости по фазе либо амплитуде частотной характеристики системы выражается запас устойчивости в отношении к соответствующей характеристике системы.

Способность к рассеиванию вносимой в силу воздействий извне энергии определяется степенью устойчивости. Сокращение отклонений в стационарных динамических процессах и рост скорости затухания переходного процесса соответствуют более высокой степени устойчивости для данной частотной составляющей. Этот показатель дополняет недостаточно полную для практических целей оценку границы устойчивости, показывая насколько велика устойчивость системы при данных значениях ее параметров, лежащих в области устойчивости.

Можно оценивать степень устойчивости по быстроте затухания отклонений в переходных процессах (рисунок 2.3).

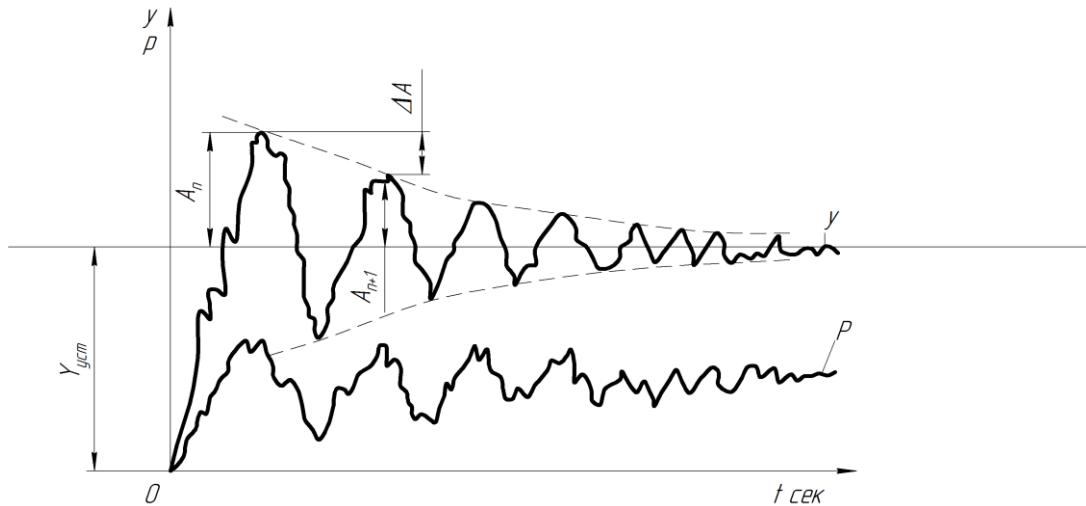


Рисунок 2.3 – Затухание в переходных процессах

В теории колебаний логарифмический декремент применяется для оценки демпфирующей способности упругих конструкций [30] (в литературе [18, 30] можно встретить схематическое описание устойчивых и неустойчивых систем, как систем с положительным и отрицательным декрементом). Однако за формальным сходством скрыто принципиальное различие систем, в которых происходит рассеяние энергии внешних возмущений.

Степень устойчивости можно также оценить при установившихся вынужденных колебаниях по коэффициенту устойчивости на собственной частоте системы.

Отражающие точность показатели, которые используются, когда система станка оценивается на предмет такого параметра, как точность обработки отклонения характеризующих систему параметров в случае внешних воздействий, представлены в виде следующих погрешностей обработки:

случайной динамической. Возникает в связи с тем, что на систему влияют случайные внешние факторы;

статической. Определяется, когда при обработке заготовки вся совокупность внешних воздействий и припуск постоянны;

переходной динамической. Возникает при отклонениях при процессах переходного характера (когда происходит врезание, выход инструмента, используемого для шлифования);

стационарной динамической (в т.ч. огранки поверхности при наличии вынужденных колебаний, волнистости). Данная погрешность представлена волнами. Количество оборотов инструмента в процессе шлифования определяет частоту указанных волн. В качестве формы выражения оказываемых на динамическую систему внешних воздействий выступают характеристики точности станка в кинематическом и геометрическом отношении. Данные характеристики являются определяющими с точки зрения геометрии, закона изменения расположения сопрягаемых деталей относительно друг друга. Аналогично тому, как переменный припуск заготовки и кинематика ее движения определяют внешнее воздействие на процесс резания, так геометрия и кинематика сопрягаемых деталей определяют внешнее воздействие на процесс их относительного движения — процесс трения и т. п.

Ключевым элементом установки является высокоскоростной электрошпиндель, обеспечивающий необходимые скорости вращения и скорость шлифования до 300 м/с. Электрошпиндель изготавливается со встроенным асинхронным электродвигателем, питаемым током повышенной частоты. Вал шпинделя вращается на прецизионных, радиально-упорных подшипниках, предварительный натяг создается пакетом тарированных пружин. Смазка подшипников осуществляется масляным туманом. В корпусе шпинделя выполнены специальные каналы, для жидкостного охлаждения, что способствует отводу тепла от электромагнитной системы и снижению тепловой деформации. В электрошпиндель встроен термодатчик (ТР) (терморезистор), который контролирует температуру в обмотках электродвигателя шпинделя;

На рисунке 2.4 приведена общая схема подключения шпинделя.

При эксплуатации шпинделя применяется комплекс периферийных устройств: преобразователь частоты, система охлаждения, система смазки и система подготовки сжатого воздуха.

Основные технические данные и характеристики электрошпинделя приведены в таблице 2.1. Схема и конструкция показаны на рисунке 2.5.

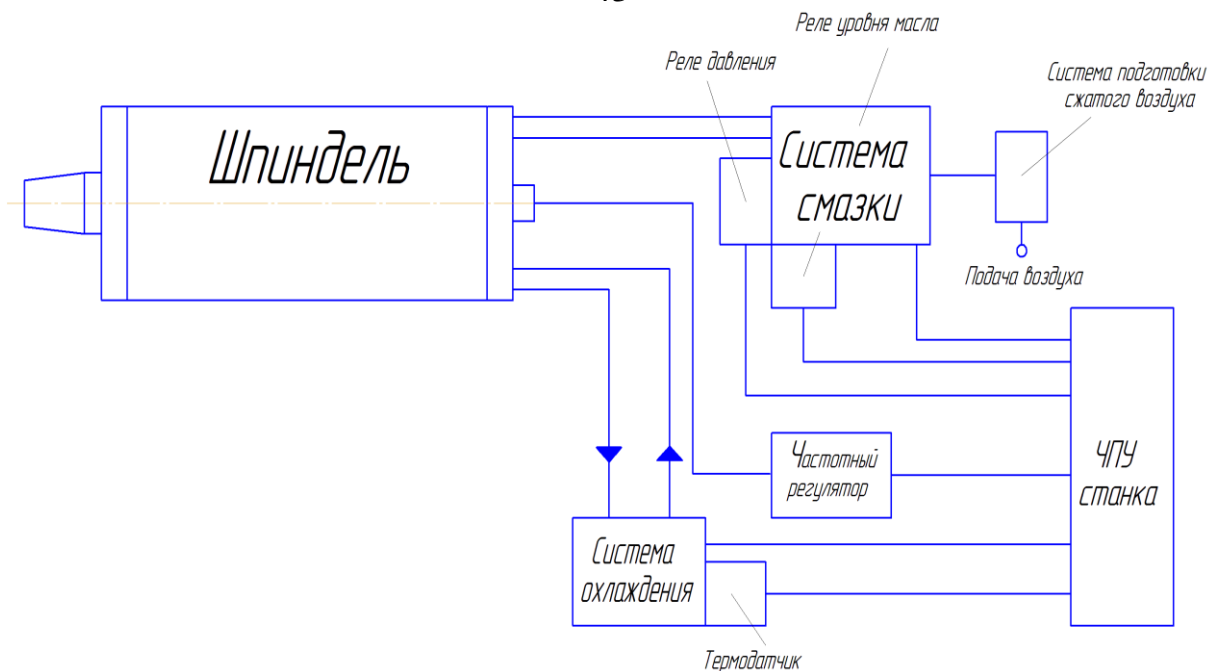


Рисунок 2.4 – Общая схема подключения шпинделя

Таблица 2.1 – Технические характеристики электрошпинделя в конструкции установки для высокоскоростного шлифования.

Наименование параметра	Значение
Изготовитель	ООО «ЮМОК»
Модель	<u>St-140-40/7.5c</u>
Ном. частота вращения (синхронная), об/мин	40000
Регулирование скорости вращения, об/мин	3000-540000
Ном. мощность S1 100%, кВт	7,5
Ном. напряжение питания, В	3x380
Ном. частота питания, Гц	667
Номинальный ток, S1 100%	16
Направление вращения вала шпинделя	правое
Предельно допустимая вибрация шпинделя с установленным инструментом, мм/с	1,35
Радиальное биение конуса шпинделя, мм, не более	0,001
Смазка подшипников	масляный туман
Габаритные, установочные и присоединительные размеры, мм	см. рис. 2.5
Масса, кг, не более	30

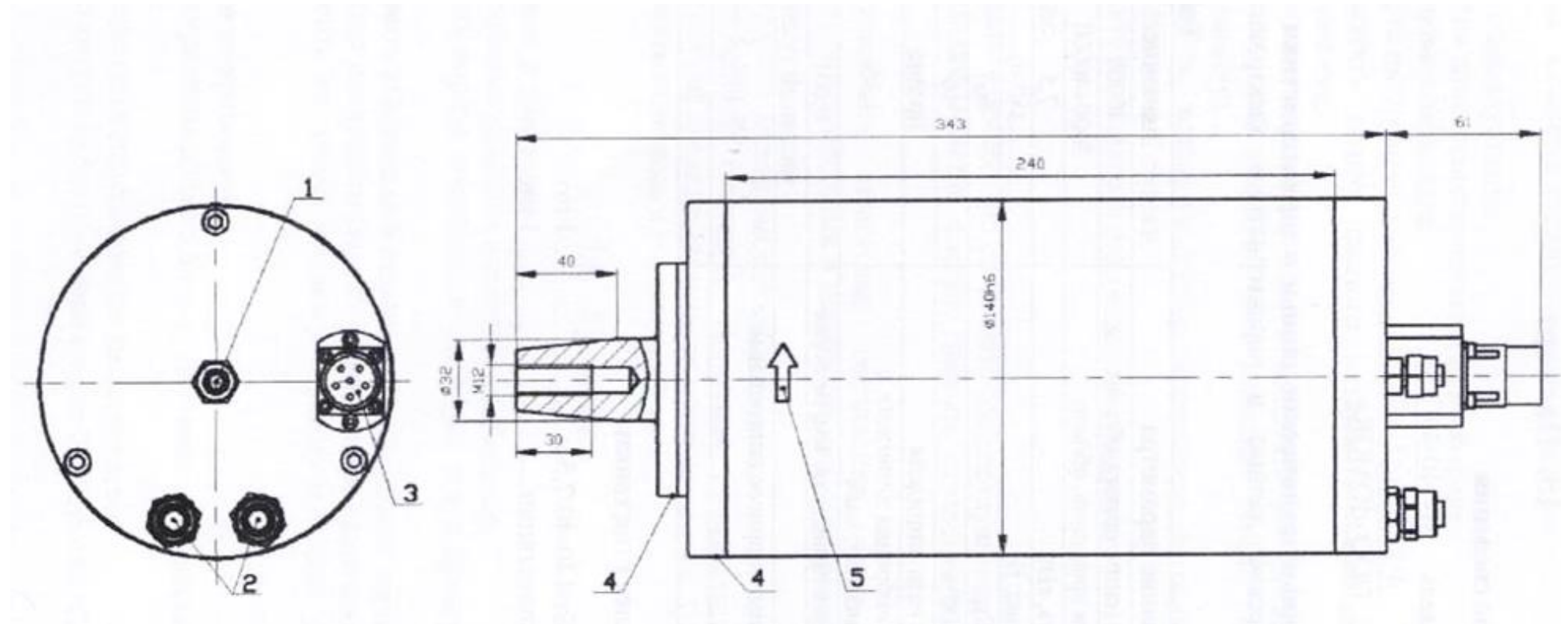


Рисунок 2.5 – Общий вид электрошпинделя: 1 - подвод масляного тумана; 2 - вход и выход охлаждения;
3 - электровилка для силового подвода; 4 - отверстия выхода масла; 5 - направление вращения.

2.2 Разработка и силовой расчет конструкции шлифовального круга для высокоскоростного шлифования керамических материалов

Наряду с конструкцией установки не менее важным вопросом является разработка работоспособной конструкции шлифовального круга, который бы мог выдерживать скорости резания до 300 м/с. На сегодняшний день известны конструкции шлифовальных кругов которые могут обеспечивать обработку на скоростях до 150 м/с [99].

Шлифовальный круг представляет собой металлический диск, на торце которого выполнены технологические отверстия для закрепления шлифовальных головок типа *AW* диаметром $D = 10$ мм (рисунок 2.6).

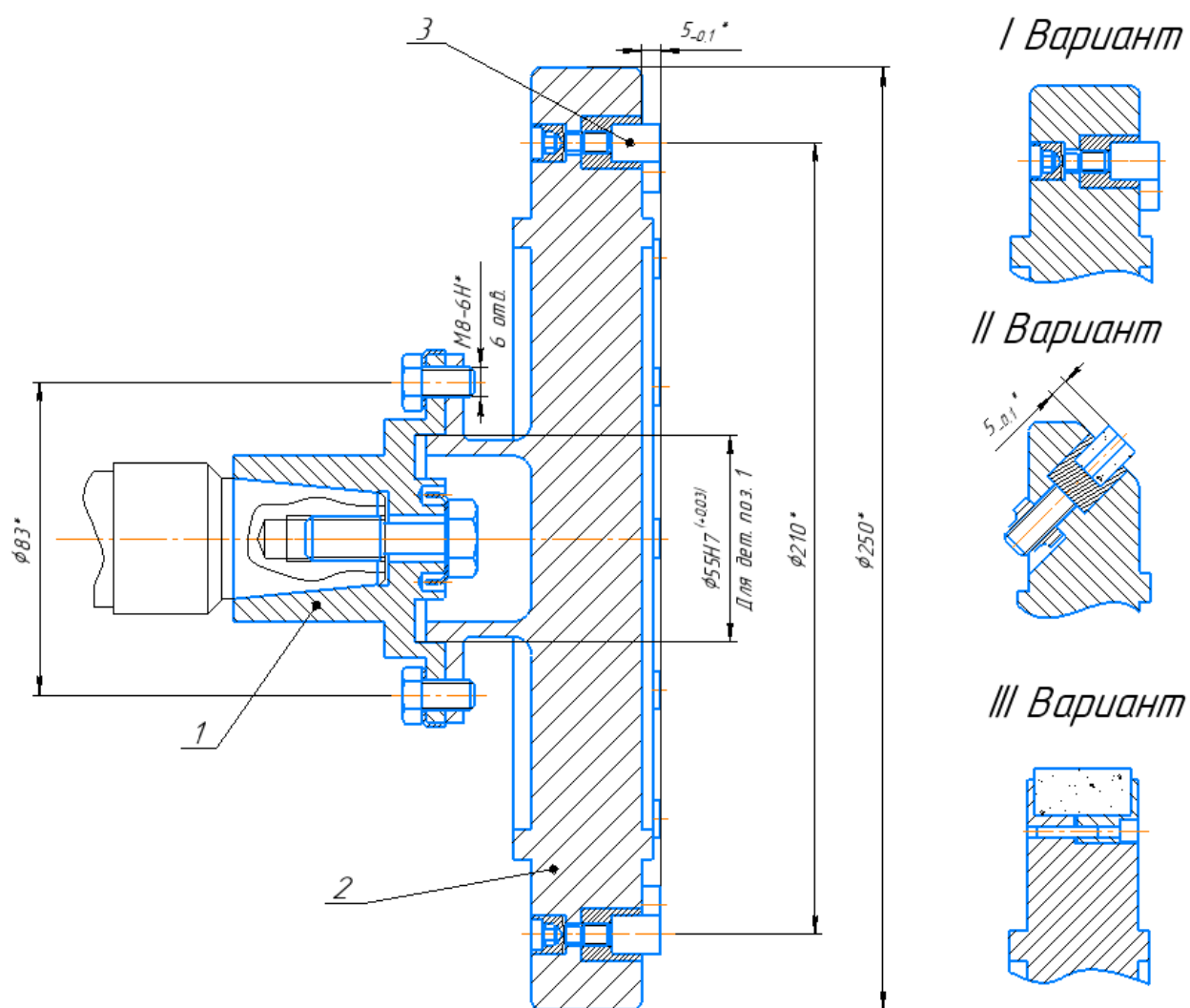


Рисунок 2.6 – Спроектированные шлифовальные круги

Шлифовальный круг, установленный на шпиндель станка, всегда имеет биение. При малых припусках на шлифование ($t=0,005-0,01$ мм), например, при чистовом шлифовании неизбежно возникает прерывистое резание, т. е. контакт шлифовального круга с заготовкой будет пульсирующий. И, как показывает практика, избавиться от биения его периферийной и торцовой части невозможно даже с применением правки. Методы правки шлифовальных кругов обеспечивают биение 0,005-0,03 мм. Одним из методов уменьшения биения шлифовального круга на станках, широко используемых при затачивании режущего инструмента, является применение более качественных подшлипников (биение до 0,1 мкм) на шпинделе. Однако это дает лишь незначительный эффект, т. к. в процессе работы шлифовальный круг приобретает неравномерный износ рабочей поверхности, который объясняется наличием в алмазоносном слое зон различной твердости, а также наличием алмазных зерен, размеры которых, значительно превышают размеры основной фракции, что в свою очередь, приводит к прерывистому резанию. Поэтому в работе не рассматривается вопрос влияния прерывистого характера рабочей поверхности круга на процессы, протекающие в контактной зоне круга и изделия.

Конструкции шлифовальных кругов проектировались, рассчитывались, а также испытывались в разрывной камере при частоте вращения до 65 тыс. об/мин. В результате расчетов и испытаний на разрыв корпуса шлифовального круга материалом корпуса выбран материал 30XГCH2A. Построена 3D-модель корпуса шлифовального круга. В качестве расчетной модели был принят сектор (1/6 круга). Закрепление производилось вдоль оси вращения и в окружном направлении.

Генерация расчетной сетки производилась в форме тетраэдра на 1796237 конечных элементов с содержанием 316998 узлов. Расчет напряженно-деформированного состояния колеса производился под действием центробежных сил, возникающих в корпусе, и от центробежных сил

шлифовальных головок $C = 30156 \text{ Н}$ (3074 кгс). Рабочая частота вращения $n = 34725 \text{ мин}^{-1}$ ($\omega = 3636 \text{ рад/с}$).

На рисунках 2.7-2.9 представлены результаты напряженно-деформированного состояния корпуса в рабочих условиях.

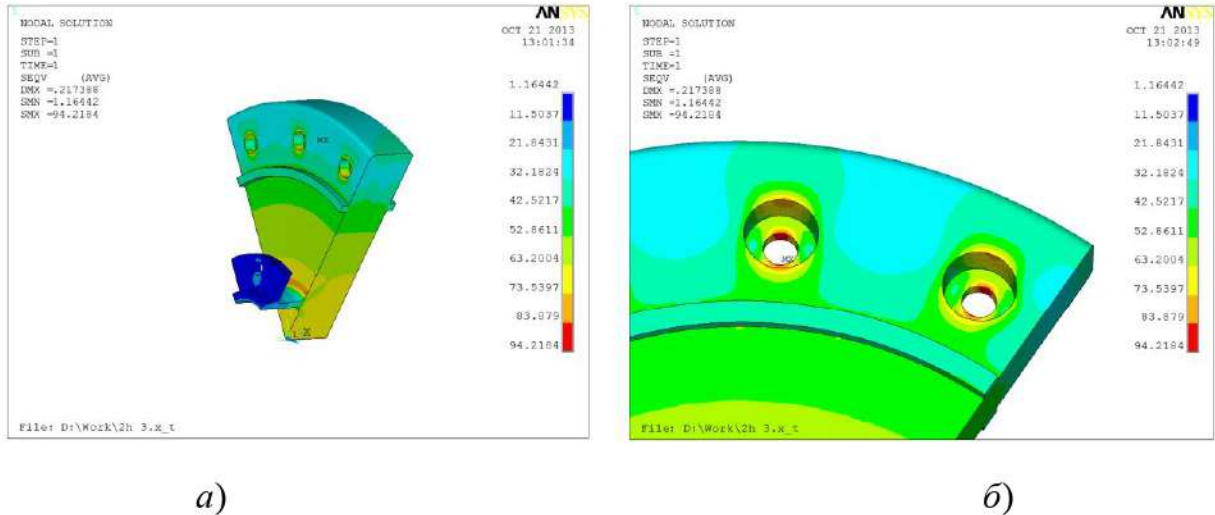
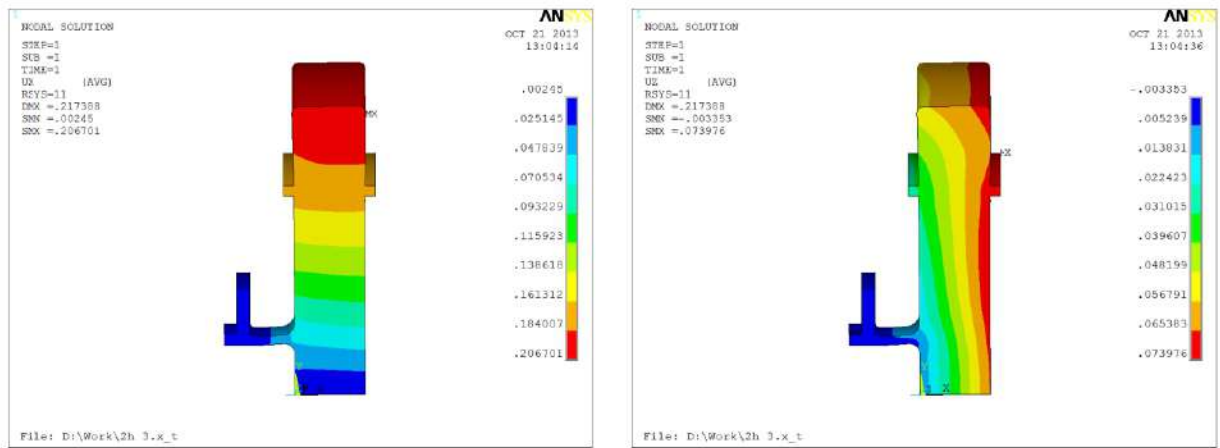


Рисунок 2.7 – Эквивалентные напряжения в секторе (а) и в отверстиях под шлифовальную головку (б)

Наибольшие напряжения получены в отверстиях под шлифовальные головки и имеют местный характер. Эквивалентные напряжения в них $\sigma_{экв}^{max} = 942 \text{ МПа}$. Эквивалентная пластическая деформация в отверстиях составила $\varepsilon_p = 0,035\%$. Напряжения в галтели шейка-полотно 875 МПа, в ступице – 803 МПа.

Радиальные перемещения в отверстии фланца составили $U_R = 0,0163 \text{ мм}$. В отверстиях под шлифовальные головки – $U_R = 0,184 \text{ мм}$.

Осевые перемещения отверстий под шлифовальные головки со стороны абразива составили $U_Z = 0,065 \text{ мм}$. Корпус равномерно вытягивается в радиальном направлении и сужается в осевом направлении.



a)

б)

Рисунок 2.8 – Радиальные перемещения (а) и осевые (б)

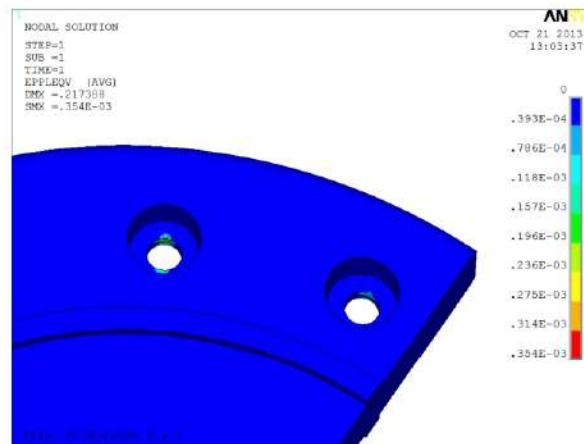


Рисунок 2.9 – Эквивалентная пластическая деформация

При расчете по двумерной схеме напряженного состояния с усреднением напряжений по толщине диска запас прочности составил $K_m = 1,651$ в центре диска. Запас по разрушающей частоте вращения составляет $K_v = 1,425$. Запасы прочности достаточны.

Расчет оправки и шпинделя

Для оценки нераскрытия стыка между шпинделем и оправкой были произведены расчеты напряженно-деформированного состояния данных элементов от действия центробежных сил. На рисунках 2.10 и 2.11 показаны эквивалентные напряжения и радиальные перемещения

Радиальные перемещения отверстий фланца (на диаметре 83 мм) $U_R = 0,017$ мм. Практически совпадают с перемещениями фланца корпуса.

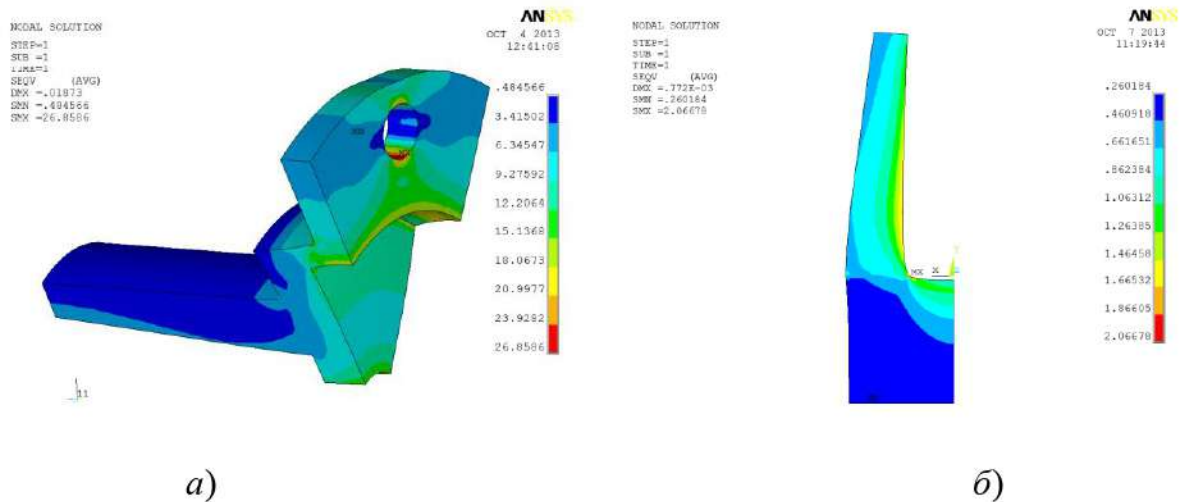


Рисунок 2.10 – Эквивалентные напряжения в оправке (а) и в шпинделе (б)

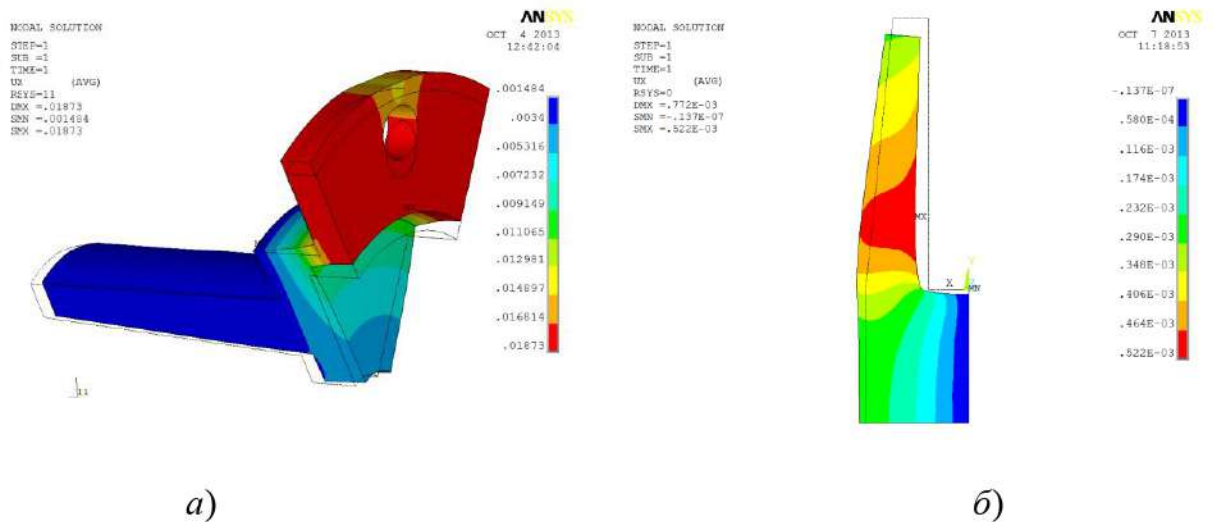


Рисунок 2.11 – Радиальные перемещения в оправке (а) и в шпинделе (б)

Исследование влияния характеристик шлифовального инструмента на параметры качества обработанной поверхности

Изделия из КМ в основном обрабатываются с помощью алмазного шлифовального инструмента. При алмазном шлифовании в детали из керамики – в ее поверхностном слое – формируются напряжения, которые выше, чем напряжения разрушения материала детали. Создаваемые напряжения обеспечивают удаление материала. Абразивная обработка сопровождается образованием определенной геометрии поверхности, а также

микротрещин. Факторы, обуславливающие влияние микротрещин на срок службы изделий КМ, следующие: их близость к зонам, в которых при эксплуатации концентрируются контактные напряжения; энергия, необходимая для того, чтобы увеличивались поверхностные микротрещины, существенно меньше в сопоставлении с энергией, требующейся для того, чтобы увеличивались внутренние микротрещины.

Условия шлифования влияют на качество изделий, которое в основном характеризуется шероховатостью обрабатываемой поверхности. Микронеровности обработанной поверхности изделия являются концентраторами напряжений, создаваемыми в процессе эксплуатации, что также приводит к сокращению срока службы изделий КМ.

Известно, что наибольшее влияние на рост микротрещин в изделиях КМ при шлифовании оказывает скорость резания, но в то же время увеличение скорости резания улучшает качество обрабатываемой поверхности. В дополнение к скорости резания, на качество поверхности изделий из КМ существенное влияние оказывает связующий материал круга.

С целью повышения качества изделий КМ ряд зарубежных авторов рекомендуют отказаться от применения шлифовальных инструментов на металлических и керамических связках из-за их высокой жесткости, а всю обработку проводить шлифовальными инструментами на бакелитовой связке. Предварительно проведенные эксперименты подтвердили данные рекомендации. При обработке шлифовальным инструментом на металлических и керамических связках на поверхности изделий из КМ образовывалась сетка микротрещин.

На основе рекомендаций выбрано 4 вида шлифовальных головок на бакелитовой связке с марками абразивного порошка *АСН*, *АСМ*, *АС4* и *АС6*. Предварительные эксперименты показали, что обработка шлифовальными головками с маркой абразивного порошка *АСН* показывает наилучшие результаты по возможной шероховатости поверхности. Сравнительный анализ показан в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Результаты шероховатости при обработке шлифовальными головками с различными марками абразивного порошка

Шлифовальная головка AW 20/14	АСН	АСМ	АС4	АС6
Ra, мкм	0,05...0,09	0,10...0,15	0,08...0,13	0,07...0,12

2.3 Влияние возникающих в технологической системе вибраций на качество обработки при высокоскоростном шлифовании

Развитие станкостроительной отрасли сделало возможным достижение сверхвысоких скоростей вращения и обеспечения шлифования со скоростями до 400 м/с, в сравнении со значениями характерными для традиционного (до 60 м/с) и скоростного шлифования (до 160 м/с). Однако обработка на сверхвысоких скоростях резания требует решения ряда вопросов, например, таких, как влияние жесткости технологической системы на качество обработанной поверхности. Недостаточная жесткость технологической системы может быть причиной появления вибрации при резании и, как следствие, снижения качества обработанной поверхности.

Повышение скорости обработки приводит и к повышению вибрационной составляющей, поэтому еще одним из главных вопросов является балансировка шлифовального круга, которая проводилась в два этапа – статическая и динамическая. Статическая балансировка на высокоточной оправке, а далее динамическая балансировка с применением вибродиагностического прибора *Диана-2М*. Класс точности балансировки шлифовальных кругов достигался G6,3 по ГОСТ ИСО 1940-1-2007. Допустимый дисбаланс шлифовального круга составляет 5 г. Устранение неуравновешенности шлифовального круга производится съёмом металла с балансировочных буртов шлифовального круга.

Важности роли динамической составляющей при работе станка посвящено множество работ отечественных и зарубежных ученых. Отдельным задачам динамики станков посвящено довольно большое

количество работ [4, 12, 24, 32, 35, 45]. Наиболее изученной является область деформаций в станках в следствии воздействия постоянных внешних сил и влияния этих деформаций на точность обработки, устойчивость перемещений узлов станка в процессе резания. Однако разобщенность существующих работ, различия в постановке и методах решения задач и противоречивые результаты приводят к большим трудностям при их практическом использовании. Так рекомендации, вытекающие из требований к точности, могут оказаться неприемлемыми для требований к устойчивости движения.

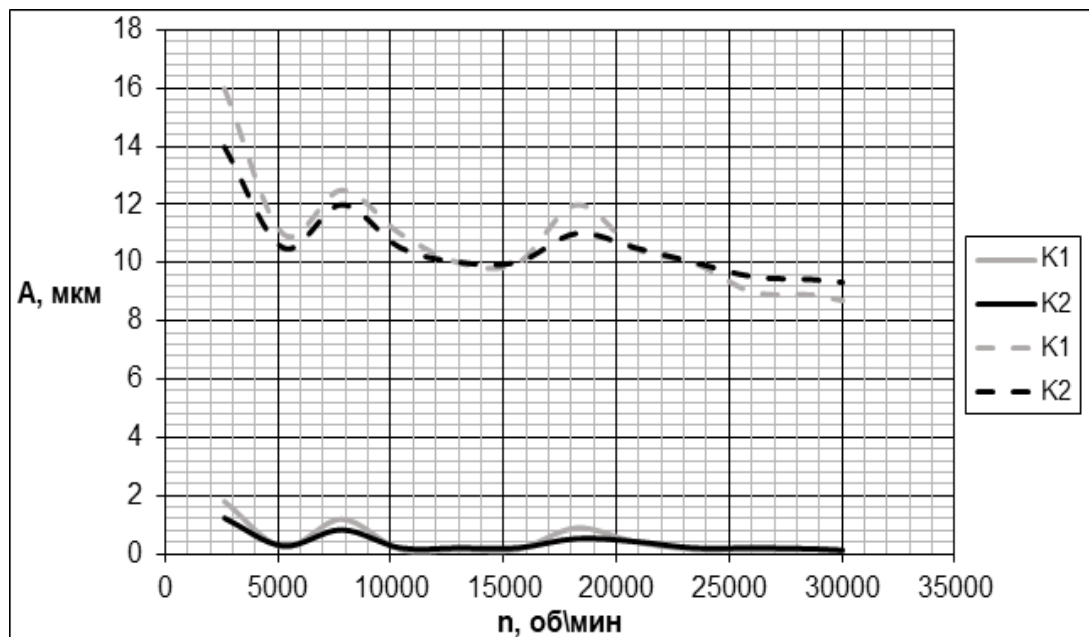
В настоящее время выявлено большое количество физических явлений, приводящих к созданию механизма возбуждения колебаний в технологической системе и вызывающих появление собственных колебаний. Все известные физические явления, способные произвести первичное возмущение автоколебательного процесса, можно разделить на три группы, а именно: явления, вызванные 1) самим процессом резания; 2) специфические свойства упругой системы; 3) взаимодействие факторов, определяющих процесс резания и упругие свойства системы.

Любой станок можно представить как сложную колебательную систему с набором собственных частот. Совпадение частоты вращения шпинделя с любой из собственных частот агрегата вызывает резонанс системы, который характеризуется резким скачком амплитуды вибрации. Для определения собственных частот агрегата проводят измерения вибрации в неустановившихся режимах его работы – режимах «Разгона» и «Выбега». Метод «разгона-выбега» заключается в определении амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) станка.

Для определения АЧХ исследуемого станка, шпиндельный узел разгоняли до определенных частот вращения и после производили выбег – свободный останов шпинделя, фиксируя амплитуду вибраций. После производили балансировку и повторяли процесс разгон-выбег. На рисунке 2.12 представлен график разгона-выбега высокоскоростного шпинделя шлифовально-заточного станка ВЗ-326Ф4 до (пунктирная линия) и после

динамической балансировки (сплошная линия). Динамическая балансировка производилась с помощью прибора Диана-2М. На оси ординат представлены зафиксированные значения амплитуды вибрации, а на оси абсцисс – частота вращения высокоскоростного шпинделя.

Из данного рисунка видно, что при повышении частоты вращения высокоскоростного шпинделя амплитуда колебаний уменьшается. Однако на определённых участках обнаружено увеличение амплитуды колебаний, что может говорить о наличии резонанса, который приводит к повышенной вибрации в упругой системе. Для выяснения влияния данных вибраций на качество обрабатываемой поверхности материала при скоростном шлифовании был проведен эксперимент с обработкой детали из вакуум-плотной керамики марки ВК 94-1. Данный материал был выбран специально, поскольку он относится к числу труднообрабатываемых хрупких материалов. Результаты приведены на рисунке 2.13.



$K1$ и $K2$ – передняя и задняя опоры соответственно

(- - - - до балансировки; --- – после балансировки)

Рисунок 2.12 – Результаты разгона-выбега высокоскоростного шпинделя

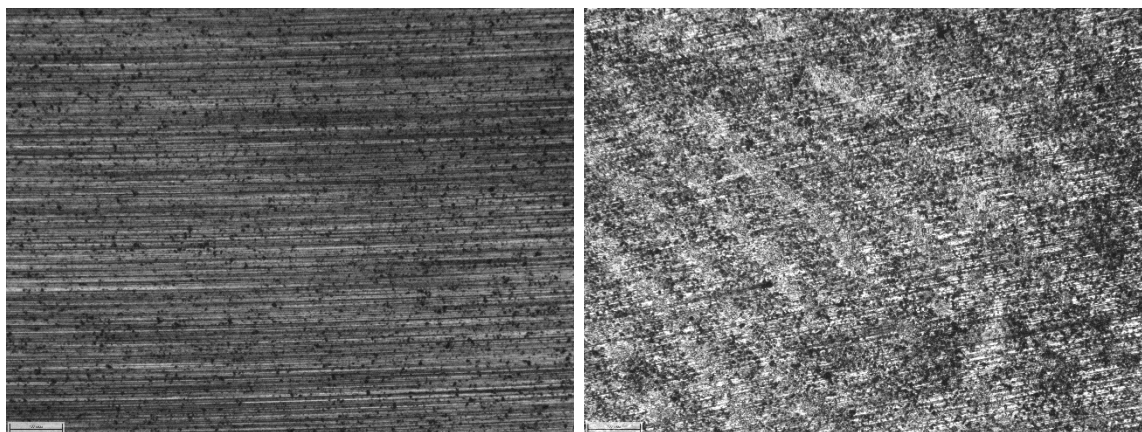
*a)**б)*

Рисунок 2.13 – Снимок обработанной поверхности при нормальной работе (*a*) и при вибрациях (*б*) $\times 2,5$

Из рисунка 2.13 видно, что при повышенных вибрациях, на обработанной поверхности керамики появляются волнообразные впадины, которые в свою очередь и снижают качество обработанной поверхности.

Данный эксперимент позволил определить наиболее благоприятные зоны частот вращения высокоскоростного шпинделя. Для достижения минимальной шероховатости рекомендуется осуществлять обработку при частоте вращения порядка 18200 об/мин. Дальнейшее повышение частоты вращения незначительно уменьшает шероховатость и поэтому является нецелесообразным.

Выводы по 2 главе

1. Разработана схема технологической системы для отработки технологии и исследования процесса высокоскоростного шлифования КМ на базе шлифовально-заточного станка с применением электрошпинделя, позволяющая производить обработку со скоростью резания до 300 м/с.

2. Разработаны конструкции шлифовальных кругов для высокоскоростной обработки позволяющие производить обработку

поверхностей изделий из КМ с возможностью применения головок цилиндрического типа различных характеристик абразивного материала.

3. На основе метода «разгона-выбега» определены АЧХ и установлены резонансные зоны технологической системы, включающей в себя высокоскоростной шпиндель, а применение динамической балансировки позволило снизить амплитуду колебаний разработанной конструкции шлифовального круга в 12-15 раз до значений менее 1 мкм.

3 ГЛАВА. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ШЛИФОВАНИЯ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

В данной 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.

3.1 Исследования влияния скорости резания и структуры керамического материала на механизм разрушения при численном моделировании резания единичным алмазным зерном

Описание динамики процесса разрушения изделий из керамических материалов представляет собой довольно сложную задачу, решение которой вызывает ряд вопросов, а именно:

- 1) При каких условиях нагружения начинается зарождение и катастрофическое распространение трещины в материале?
- 2) При каких условиях разгрузки распространяющаяся трещина остановится, то есть прекратит свой рост?
- 3) Какие параметры нагрузки и материала определяют распространение трещины?
- 4) При каких условиях распространяющаяся трещина разветвится, и какой механизм лежит в основе этого явления?

Эти вопросы называют задачами старта, остановки, распространения и ветвления трещины [31]. Их решение и составляет предмет динамической механики разрушения. При этом наибольший интерес в данной работе представляют вопросы зарождения и распространения трещины.

Если рассматривать разрушение с точки зрения возрастания внутренних напряжений до критического значения, то энергия, необходимая для зарождения трещины и начала разрушения материала, может быть выражена как энергия деформации при ударе алмазного абразивного зерна, поглощенная на единицу площади до критического напряжения.

В работе [89] авторы установили, что при шлифовании керамики фаза удара создает начальный разрыв (микротрещины), за которым следует фаза удаления материала. Для данной фазы энергия определяется работой, которая необходима для распространения трещины и удаления материала, который разрушился хрупким, пластичным или и тем и другим способами. При шлифовании распространению начального ударного разрушения способствуют экстремальные силы, которые продолжают воздействовать на него при движении абразивного зерна. При пластическом разрушении работа по расширению трещины будет больше, а скорость распространения будет меньше. Величина, продолжительность и распределение устанавливаемых сил будут определяться тем, как абразивные зерна и материал обрабатываемой заготовки реагируют друг на друга. Процесс образования трещин в обрабатываемой поверхности изделий из КМ, который тесно связано с его механическими свойствами, будет определять вид нагрузки, передаваемой абразивному зерну. Таким образом, основными интересующими областями являются распределение сил на поверхности удара, как функция времени, и то, как нагрузка распределяется внутри керамики и абразивного зерна.

Отдельный интерес вызывает задача распространения трещины. Одна из основных подзадач, решаемых при разработке сложной комплексной модели распространения трещины, состоит в построении критерия для нахождения величины приращения фронта трещины на каждом шаге ее распространения и

выбора направления распространения, учитывающего коэффициенты интенсивности напряжений (КИН).

Прикладная значимость решения проблемы построения модели зарождения и распространения трещины в первую очередь обусловлена усовершенствованием и созданием новых технологий обработки керамических материалов, одной из таких технологий является высокоскоростное шлифование.

Ввиду отсутствия аналитического решения, численные методы решения уравнений динамики сплошных сред являются единственным способом исследования процессов, происходящих в неоднородных (гетерогенных) средах при ударно-волновом нагружении.

В структуре материала возникает волновой обмен, компоненты материала вступают в сложное силовое взаимодействие при воздействии на материал, являющийся гетерогенным.

Для того, чтобы адекватно интерпретировать результаты экспериментов подобного рода, требуется моделировать относящиеся к мезоструктуре соответствующей среды процессы.

Возможно использование и иных подходов вместо мезомеханического. При первом – указанная среда соотносится со средой, являющейся гомогенной [2, 41]. Применительно к последней производится введение эффективных упругих параметров, обеспечивающих посредством матрицы жесткости связь между компонентами деформаций и напряжений.

Схема армирования, объемный коэффициент и присущие относящимся к гетерогенной среде материалам технические константы (коэффициенты Пуассона, силы сдвига, модули упругости) – параметры, исходя из которых производится определение относящихся к матрице жесткости составляющих. После того, как определяются эффективные упругие свойства, применительно к анизотропной однородной среде производится определение напряженно-деформированного состояния данной среды.

Связанная с определением эффективных характеристик (т.е. осреднением) проблема – ведущая проблема, возникающая при применении указанного подхода. Для того, чтобы решить данную проблему, используются согласованный и дифференциальный методы [55], симметрия трансляционного элемента [17], метод интегральных сечений [19]. Условие использования данного подхода – применимость односкоростного приближения, низкие значения ударной нагрузки.

Если имеются существенные отличия по скорости составляющих, относящихся к гетерогенной среде, то обосновано применение многоскоростного приближения. В подобных ситуациях указанную среду следует рассматривать в виде ряда сплошных сред, являющихся взаимопроникающими. В их отношении могут применяться уравнения, относящиеся к механике сплошных сред.

При построении условий обмена возникают затруднения, при этом привлекательность соответствующего подхода к моделированию сред, являющихся гетерогенными, не вызывает сомнений. В то же время примеров расчетов, значимых в практическом отношении, в научных публикациях не имеется. В основном подобные примеры имеются лишь применительно к наименее сложным случаям взаимодействия между составляющими среды.

Явное определение имеющейся у материала структуры составляет основу мезомеханического подхода к построению модели присущего гетерогенной среде напряженно-деформированного состояния. При этом обеспечивается возможность применения уравнений механики сплошной среды для исследования связанных с межфазными взаимодействиями и структурой фаз мелкомасштабных эффектов, для определения в рамках вычислительного эксперимента взаимодействия сил между относящимися к фазам элемента составляющими [52].

Предполагается, что разрыв связей в материале происходит независимо друг от друга при выполнении определенного критерия. Один из распространенных подходов основан на задании критериального условия в

виде критического растяжения связи [51, 60, 73], являющегося перидинамическим аналогом критерия Гриффитса.

Анализ литературы показал, что оценка параметров различных видов разрушения материалов осуществляется силовым, деформационным и энергетическим подходами. Согласно этим подходам разрушение происходит при достижении предельных значений прочностных характеристик разрушаемого материала. Однако только структурно-временной подход позволяет учитывать время отклика материала до разрушения, называемое инкубационным временем. Инкубационное время составляет основу структурно-временного критерия [33, 78, 81]. В виде разрушения в данном исследовании принят указанный критерий. Макроскопическое разрушение происходит в силу того, что развиваются дефекты, поры, микротрещины. Подобное утверждение является ключевым положением структурно-временного подхода [33, 78, 79, 81]. Развитие соответствующих процессов определяют нормальные напряжения на протяжении т.н. инкубационного времени (периода, который характерен для конкретного материала). Таким образом, согласно данному подходу, разрушение не происходит мгновенно. При этом скорости зарождения и роста трещин имеют предельные значения для каждого материала, следовательно, при превышении скорости приложения нагрузки выше этих значений, может быть реализовано большее значение критического напряжения в единице объема обрабатываемого изделия из КМ. Поэтому чем больше величина критического напряжения в материале, тем более мелкие и более многочисленные центры разрушения активизируются и дают вклад в увеличение скорости процесса разрушения, что характеризует переход от транскристаллитного к интеркристаллитному виду разрушения. С увеличением скорости нагружения соответствующее время до разрушения материала уменьшается, а критическое значение напряжений заметно возрастает.

Структурно-временной подход представляется условием [78, 80]:

$$\int_{t-\tau}^t \sigma(x, t') dt' \leq \sigma_c \tau, \quad (3.1)$$

где $\sigma(x, t')$ – напряжение в данной точке среды, МПа; σ_c – статическая прочность материала, МПа; τ – инкубационное время разрушения, с.

Разрушение материала в точке среды происходит при накоплении значения импульса не менее $\sigma_c \tau$ в течение инкубационного периода. Параметры σ_c и τ являются постоянными материала и τ не зависит от скорости и продолжительности нагрузки. Константы σ_c и τ образуют систему определяющих параметров процесса разрушения на заданном масштабе.

В работе [11] авторы предлагают следующее выражение для критического напряжения.

$$\sigma^* = \sigma(t^*) = \begin{cases} \sigma_c + 0.5E\tau\dot{\epsilon}, & t^* \geq \tau \\ \sqrt{2\sigma_c E\tau\dot{\epsilon}}, & t^* < \tau \end{cases} \quad (3.2)$$

где σ^* – критическое напряжение разрушения, МПа; σ_c – статическая прочность материала, МПа; E – модуль Юнга, МПа; $\dot{\epsilon}$ – скорости роста деформации, с⁻¹.

Данный подход основан на разработанной методике, заключающейся в определении критического напряжения для зерна (или волокон) и связующего элемента (наполнителя) КМ с учетом их инкубационного времени разрушения; определении требуемой минимальной скорости резания при шлифовании, обеспечивающей изменение механизма разрушения с транскристаллитного на интеркристаллитный для всех материалов, содержащихся в КМ; назначении скорости резания при шлифовании с учетом резонансных явлений технологической системы.

Проведен расчет зависимости критического напряжения разрушения зерна и связки материала ВК 94-1 от скорости роста деформации. Параметры материала и связки представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Параметры связки и зерна КМ ВК 94-1 для расчетов

Свойство	Связка (MnSiO ₃)	Зерно (Al ₂ O ₃)
Модуль Юнга, E, МПа	1350	3000
Прочность на сжатие, σ_c , МПа	73000	390000
Инкубационное время, с, τ	0,00002	0,000001

Результаты расчетов для ВК94-1 приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Результаты расчета

Скорость роста деформации, с ⁻¹	σ^* связки, МПа	σ^* зерна, МПа
10 ⁻⁴	1350	3000
10 ⁻³	1350,001	3000
10 ⁻²	1350,007	3000,002
10 ⁻¹	1350,073	3000,02
1	1350,73	3000,195
10	1357,3	3001,95
10 ²	1423	3019,5
10 ³	2080	3195
10 ⁴	6278,535	4837,355
10 ⁵	19854,47	15297,06

На основе результатов расчета построена скоростная зависимость критического напряжения при сжатии для связки и зерна, представленная на рисунке 3.1.

Как видно из данной зависимости, после достижения определенной скорости роста деформации КМ обрабатываемого изделия можно рассматривать как сплошную среду. Это связано с тем, что напряжения в зоне резания настолько высоки, что зерно и связка начинают разрушаться по одному механизму.

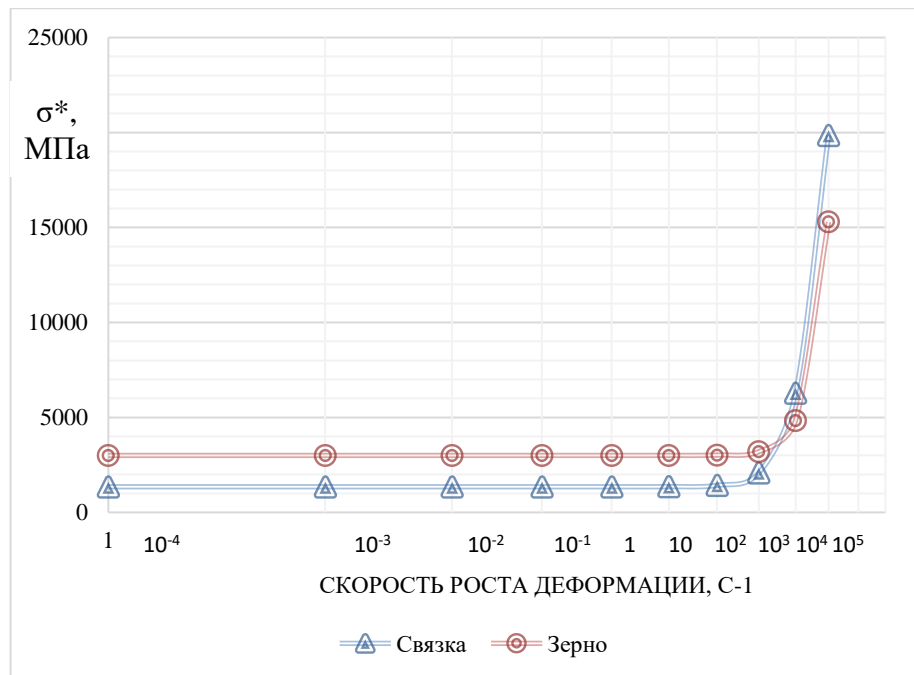


Рисунок 3.1 – Скоростная зависимость критического напряжения (σ^*) при сжатии КМ ВК94-1

На основе вышесказанного выдвинута рабочая гипотеза об изменении механизма разрушения КМ с транскристаллитного на интеркристаллитный с повышением скорости резания и переходом 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.

Прежде чем перейти к моделированию необходимо выбрать программное обеспечение для САЕ расчетов процесса обработки КМ при высокоскоростном шлифовании.

3.2 Выбор программного обеспечения для CAE расчетов для моделирования процесса обработки КМ при шлифовании

Широкое распространение программного обеспечения для математического моделирования, в том числе академических версий для университетов, значительно расширило область исследований процесса резания. В настоящее время авторы научных исследований и публикаций используют для моделирования такие программы как ANSYS/LS-DYNA, ABAQUS, DEFORM, DYTRAN, COMSOL, MSC/Marc, AdvantEdge (TWA), ADINA, NASTRAN и многие другие. Наиболее популярным выбором, благодаря удобному интерфейсу для пользователей и широким функциональным возможностям, являются ANSYS/LS-DYNA, ABAQUS, DEFORM. В таблице 3.3 представлено сравнение функциональных возможностей современного ПО для анализа CAE.

Исходя из того, что алмазное шлифование КМ является процессом динамического удаления материала ударным способом, наиболее подходящим ПО является ANSYS/LS-DYNA.

Таблица 3.3 – Сравнение функциональных возможностей современного ПО для анализа CAE

Критерий	Программное обеспечение		
	ANSYS/LS-DYNA	ABAQUS	DEFORM
Сильные стороны	удар, столкновение	проверка на прочность сложных конструкций	обработка металлов давлением
База данных материалов	да, с возможностью расширения	нет	да, с возможностью расширения
Способ интегрирования по времени	явный/ неявный	явный/ неявный	неявный
Тип элементов	все типы	все типы	тетраэдры, треугольники
Параллельные вычисления	допустимы	допустимы	допустимы

LS-DYNA – это программа конечных элементов явного нелинейного динамического анализа общего назначения, а также хорошо известное программное обеспечение для расчета проблем соударений и столкновений. LS-DYNA был первоначально разработан JOHallquist в Ливерморской национальной лаборатории им. Лоуренса в Соединенных Штатах в 1976 году. Программа предназначалась для моделирования воздействия ударной волны ядерной бомбы изменяемой мощности, сбрасываемой с малой высоты, разработкой которой занималась в то время лаборатория.

LS-DYNA позволяет производить вычисления такими численными методами как:

- Метод конечных элементов в лагранжевой постановке (Lagrange);
- Метод конечных элементов в эйлеровой постановке (Euler);
- Метод конечных элементов в произвольной лагранж-эйлеровой постановке (Arbitrary Lagrange Euler, ALE);
- Расширенный метод конечных элементов (Extended FEM, X-FEM);
- Метод граничных элементов (Boundary Element Method, BEM);
- Метод сглаженных частиц (Smooth Particle Hydrodynamics, SPH);
- Метод дискретных элементов (Discrete Element Method, DEM);
- Бессеточный метод Галеркина (Element Free Galerkin, EFG);
- Перидинамика (Peridynamics);
- Метод сглаженных частиц Галеркина (Smoothed Particle Galerkin, SPG).

Процесс шлифовальной обработки характеризуется высокими динамическими нагрузками. Процесс резания при данном виде обработки можно представить как множественные удары алмазных зерен об обрабатываемую заготовку из КМ. По результатам анализа функциональных возможностей современного ПО для анализа САЕ и специфики шлифовальной обработки была выбрана программа LS-DYNA, позволяющая моделировать быстротекающие процессы соударений и столкновений.

3.3 Исследование влияние скорости резания на рост трещины методом перидинамики

Основная проблема задач моделирования алмазного шлифования КМ заключается в сложности подхода, который включает три фундаментальных раздела механики сплошной среды: механика трещин, теория упругости, механика разрушения. Этот класс задач, как правило, решается численными методами: МКЭ (метод конечных элементов), МКР (метод конечных разностей), МКО (метод конечных объемов), мезомеханика и т.д. Предполагается, что материал КМ является сплошным, без различных включений и неоднородностей. Однако в действительности материал КМ состоит из прочных зерен скрепленных менее прочной связкой. Моделирование подобной неоднородной структуры методами МКЭ приводит к огромным вычислительным трудозатратам, что является нецелесообразным.

МКЭ является наиболее популярным и мощным методом моделирования инженерных и физических задач с мультифизическими полями и сложными граничными условиями нагрузки. Однако из-за того, что связанные управляющие уравнения основаны на механике сплошной среды, МКЭ сложно описать процесс превращения сплошного тела в прерывистое при обработке хрупких материалов [98]. Для МКЭ трудно учесть влияние микроструктуры материала (например, размер частиц, микротрещины, неоднородность материала), однако эти микроскопические свойства, напрямую влияют на макроскопическое разрушение хрупких материалов.

Применение перидинамического бессеточного подхода обеспечивает возможность решения соответствующего вопроса. Численное решение задач сплошной среды, предполагающее представление твердого тела в виде материальных частиц, которые взаимодействуют друг с другом нелокальным образом, именуется перидинамикой [90, 91]. Взаимодействие каждой частицы x и расположенных в имеющей радиус δ сферической окрестности N_x соседних частиц x' определяет поведение каждой частицы x , относящейся к

перидинамическому телу. Выбор радиуса, соответствующего трем расстояниям частиц между собой в отсчетной конфигурации, обеспечивает численную стабильность [60]. Соответственно, взаимодействие между частицами является нелокальным. Концепция перидинамики представляет собой одну из теорий, относящихся к категории нелокальных. Разработку соответствующих концепций в прошлом столетии проводили [25, 56, 68, 88]. Впервые концепция перидинамики была представлена в виде [90] нелокальной концепции, позволяющей расширить традиционный континуальный подход в механике сплошных сред. Присущая соответствующему подходу ключевая черта состоит в интегральной математической постановке. Таким образом, исключается потребность в том, чтобы подбирать определенные граничные условия. За счет интегралов взаимодействия обеспечивается возможность определения парных взаимодействий относящихся к твердому телу точек друг с другом. Указанный подход позволяет формировать модели как с масштабами, сопоставимыми с величиной земного шара, так и с мезомасштабами. При этом перидинамический горизонт (рисунок 3.2), радиус влияния оказывает определяющее влияние на степень точности приближения. Исходя из данного радиуса возможно моделирование и композитов, являющихся слоистыми, и неоднородных материалов, характеризующихся повышенной сложностью.

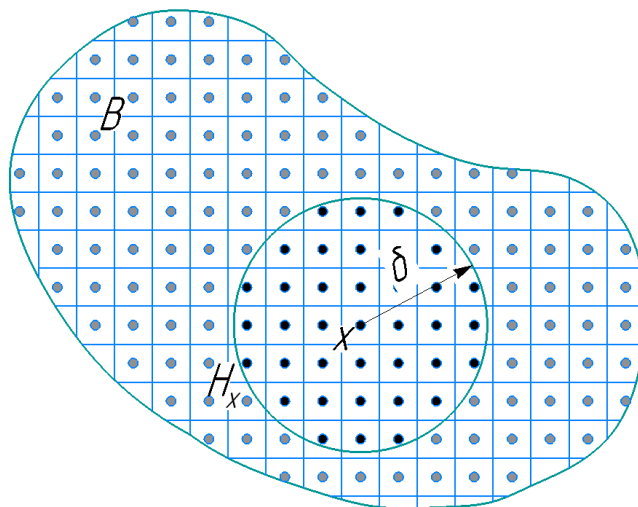


Рисунок 3.2 – Концепция перидинамического горизонта

Классическая перидинамическая формулировка законов движения впервые была предложена в [90]:

$$\rho(x)\ddot{u}(x,t) = \int_{Hx} f(x',x,t)dVx' + b(x,t), \quad (3.3)$$

где $f(x',x,t)$ — функция попарного взаимодействия частиц (плотность силы связи, размерность которой сила/объем²), определяющая реологию моделируемого материала; $\rho(x)$, $\ddot{u}(x,t)$, $b(x,t)$ — поля плотности, ускорений и объемных сил соответственно.

При решении задач механики разрушения (и задач с сингулярными полями в целом) может успешно применяться перидинамический подход. Подобная эффективность обеспечивается в силу следующего обстоятельства. Операторы дифференцирования по координате присутствуют в классических уравнениях равновесия механики сплошной среды. В уравнении (1) указанные операторы отсутствуют.

В работе также выдвинута гипотеза об изменении угла распространения напряжений с повышением скорости резания, которая может объяснить уменьшение количества микротрещин, микролунок и снижение шероховатости обработанной поверхности.

Для подтверждения данной гипотезы произведено моделирование процесса алмазного шлифования единичным зерном КМ марки ВК 94-1, схема которого представлена на рисунке 3.3. Заготовка представляет собой блок $10 \times 5 \times 1$ мкм³, разделенный на 3200 элементов. Элементы на нижней поверхности заготовки были зафиксированы, чтобы заготовка оставалась неподвижной. Алмазное зерно моделировалось в виде конуса с углом при вершине 60° , плотностью 3560 кг/м³, коэффициентом Пуассона 0,2 и модулем Юнга 1000 ГПа [53]. Для моделирования алмазного шлифования единичным зерном методом перидинамики использовался материал *MAT_ELASTIC_PERI, карта которого представлена на рисунке 3.4.

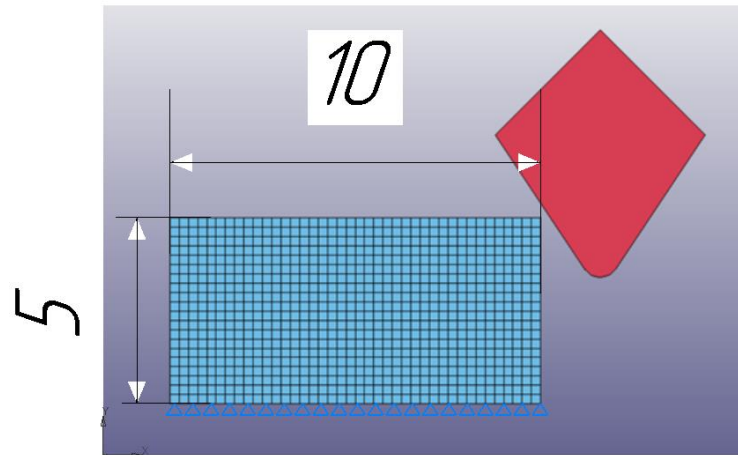


Рисунок 3.3 – Схема модели шлифования единичным зерном

Моделирование процесса резания производилось для глубины резания 3 мкм и скоростей резания 30, 100 и 300 м/с. Результаты моделирования представлены на рисунке 3.5.

Keyword Input Form

NewID MatDB RefBy Pick Add Accept Delete Default Done

Use *Parameter Comment (Subsys: 130.k) Setting

*MAT_ELASTIC_PERI_(TITLE) (000) (1)

TITLE

blank

1	MID	RO	E	Gt	Gs
	1	3.700e-06	90.160000	0.0010000	1.000e+20

COMMENT:

MID:=Material identification. A unique number or label not exceeding 8 characters must be specified.

1 blank

Рисунок 3.4 – Карта материала *MAT_ELASTIC_PERI

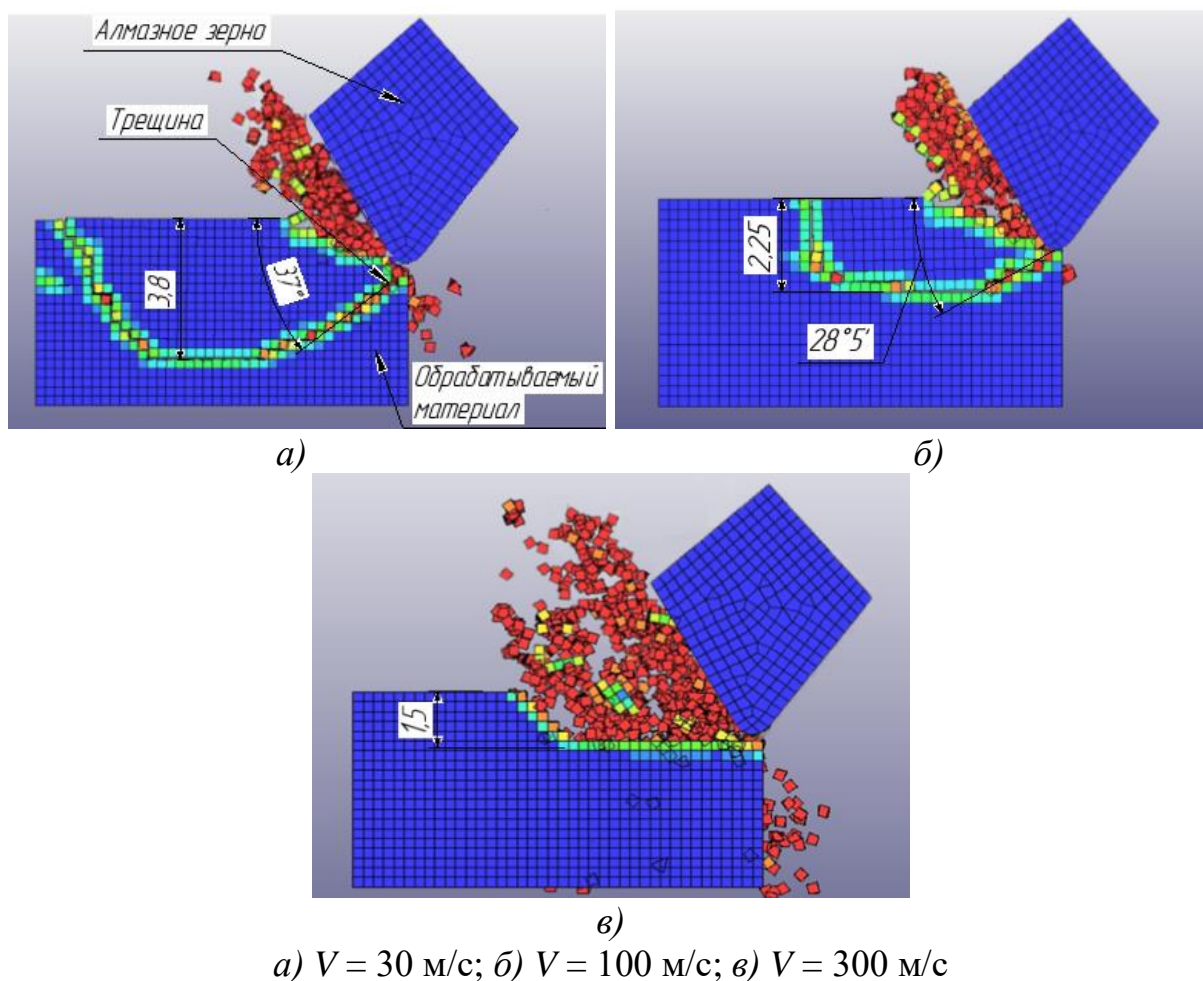


Рисунок 3.5 – Влияние скорости шлифования на угол направления трещин и глубину залегания напряжений при резании КМ единственным алмазным зерном

Результаты моделирования (рисунок 3.5) показали, 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.

По результатам моделирования в работе выдвинута гипотеза об изменении угла распространения трещин с повышением скорости резания,

которая может объяснить уменьшение количества микротрещин, микролунок и снижение шероховатости обработанной поверхности.

Исследование влияния скорости резания на рост трещины методом перидинамики показало, что для получения обработанной поверхности требуемого качества (с отсутствием микролунок и микротрещин) необходимо проводить обработку методом высокоскоростного шлифования на скорости резания 300 м/с.

3.4 Исследование влияния скорости резания на изменение механизма разрушения КМ методом дискретных элементов (DEM)

Исследование механизма разрушения КМ проводили методом моделирования дискретных элементов (*Discrete element method – DEM*), который позволяет представить обрабатываемое изделие из КМ как связанные между собой частицы.

Метод дискретных элементов (*DEM*) возник из метода молекулярной динамики (*MD*) и представляет собой численный метод, специально разработанный для решения проблемы сплошных или дискретных сред. *DEM* рассматривает материал как набор дискретных частиц, которые связаны между собой связями, а повреждение связи используется для описания образования микротрещин в материале, именно поэтому он может эффективно изучать повреждения и трещины в материале в процессе обработки хрупких материалов. Благодаря преимуществам *DEM* он широко используется в области механики разрушения горных пород [49, 54, 82, 83], механики грунтов [50, 62, 93], обработки хрупких материалов [66, 70, 77] и др. В процессе моделирования можно учитывать температуру, создаваемую трением, деформацией зерен или разрушением материала, что позволяет *DEM* учитывать процесс высокотемпературного повреждения и разрушения хрупких материалов [61]. Между тем, поскольку хрупкие материалы обычно содержат множество микротрещин разного размера, формы и ориентации, эти

внутренние дефекты будут влиять на механические свойства [75, 94, 97] и качество обработки [76] хрупких материалов. Удаляя частицы для создания случайных дефектов внутри модели DEM, исследователи могут моделировать физическую структуру реального материала и исследовать распространение трещин и механические свойства хрупкого материала, содержащего дефект, под действием внешней нагрузки [63, 64]. Если рассматривать КМ как совокупность связанных между собой частиц (зерна связанные связкой) (рисунок 3.6), то образование и распространение микротрещин в материале можно представить как повреждение связей, а разрушение зерна – как повреждение частицы. Таким образом, можно эффективно отразить повреждения и трещины, возникшие в хрупком материале в процессе механической обработки [63, 65].

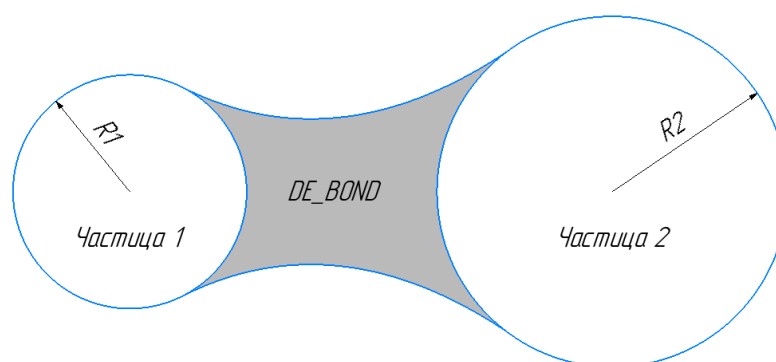


Рисунок 3.6 – Схематическое изображение взаимодействия связанных частиц

Заготовка представляет собой пластину $100 \times 20 \times 3$ мкм³, разделенную на 20962 частицы со следующим соотношением:

- 1) Частицы размером 1 мкм – 10%;
- 2) Частицы размером 1,4-1,8 мкм – 30 %;
- 3) Частицы размером 3-3,2 мкм – 60 %.

Элементы на нижней поверхности заготовки были зафиксированы, чтобы заготовка оставалась неподвижной. Алмазное зерно моделировалось так же, как и в предыдущих моделях (перидинамика и SPH). Для

моделирования алмазного шлифования единичным зерном методом DEM использовался материал *MAT_JOHNSON_COOK, карта которого представлена на рисунке 3.7. Для связывания частиц и моделирования связки использовалась карта *DEFINE_DE_BOND, представленная на рисунке 3.8.

Keyword Input Form

NewID MatDB RefBy Pick Add Accept Delete Default Done 4 JC

Use *Parameter Comment (Subsys: 1 11.k) Setting

*MAT_JOHNSON_COOK_(TITLE) (015) (1)

TITLE
JC

1	MID	RO	G	E	PR	DTE	VP	RATEOP
	4	3.70e-06	90.160000	300.00000	0.3000000	0.0	0.0	0.0
2	A	B	N	C	M	TM	TR	EPSQ
	0.8490000	1.3400000	0.7700000	0.0030000	0.3500000	1800.0000	20.000000	0.0010000
3	CP	PC	SPALL	IT	D1	D2	D3	D4
	450.00000	0.0	2.0	0.0	0.0200000	1.5000000	0.2000000	0.0020000
4	D5	C2/P	EROD	EFMIN	NUMINT			
	0.0	0.0	0	1.000e-06	0.0			

MID:=Material identification. A unique number has to be used.

Рисунок 3.7 – Карта материала *MAT_JOHNSON_COOK [47]

Keyword Input Form

NewID Pick Add Accept Delete Default Done 2

Use *Parameter Comment (Subsys: 1 11.k) Setting

*DEFINE_DE_BOND (1)

1	SID	STYPE	BDFORM					
	1	0	1					
2	PBN	PBS	PBN_S	PBS_S	SFA	ALPHA	-	MAXGAP
	9.500e+04	0.4000000	150.00000	60.000000	1.0000000	0.1000000	0.0	1.000e-04

COMMENT:

Total Card: 1 Smallest ID: 2 Largest ID: 2 Total deleted card: 0

Рисунок 3.8 – Карта *DEFINE_DE_BOND

Моделирование процесса резания осуществляли при глубине резания 3 мкм и скоростях резания 30, 100 и 300 м/с. Результаты моделирования представлены на рисунках 3.9-3.11.

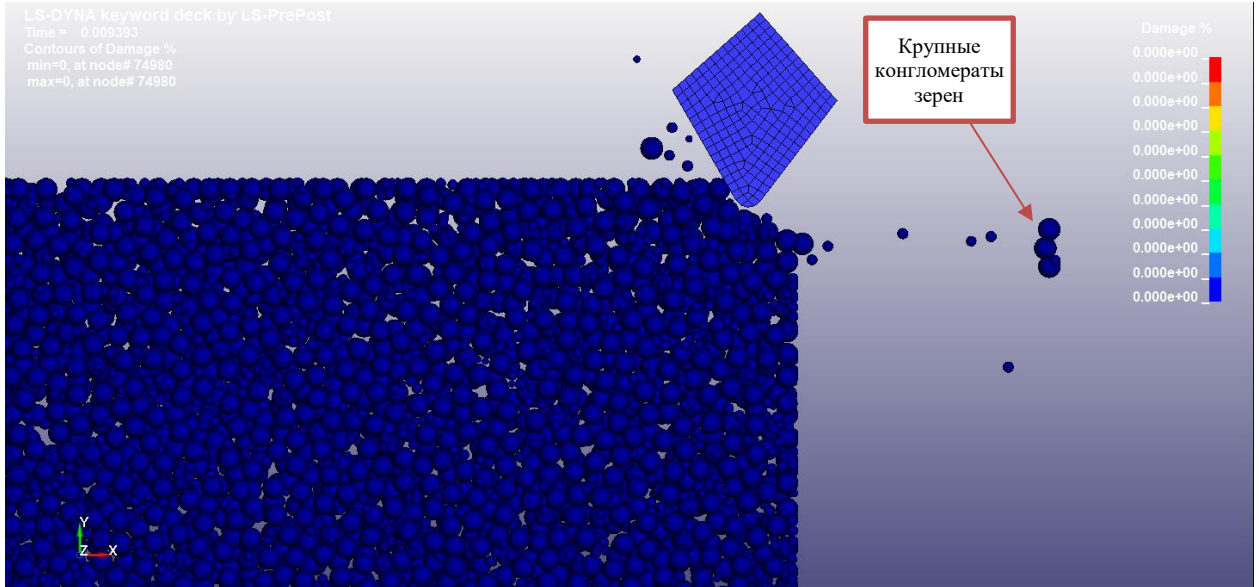


Рисунок 3.9 – Влияние скорости шлифования на механизм разрушения КМ при скорости резания 30 м/с

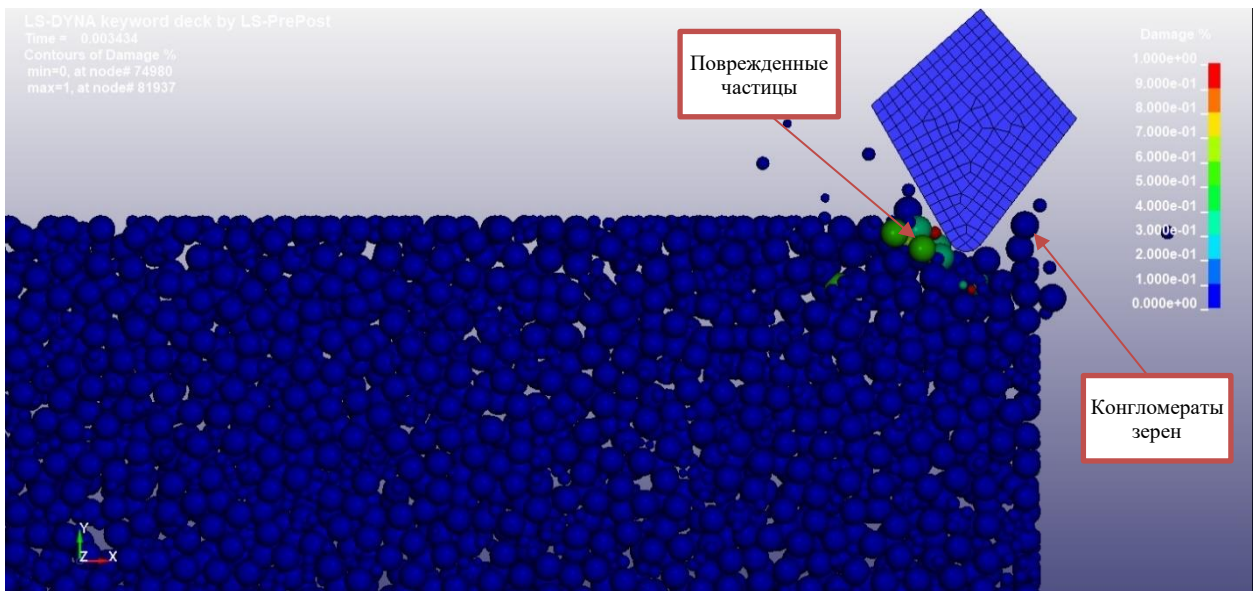


Рисунок 3.10 – Влияние скорости шлифования на механизм разрушения КМ при скорости резания 100 м/с

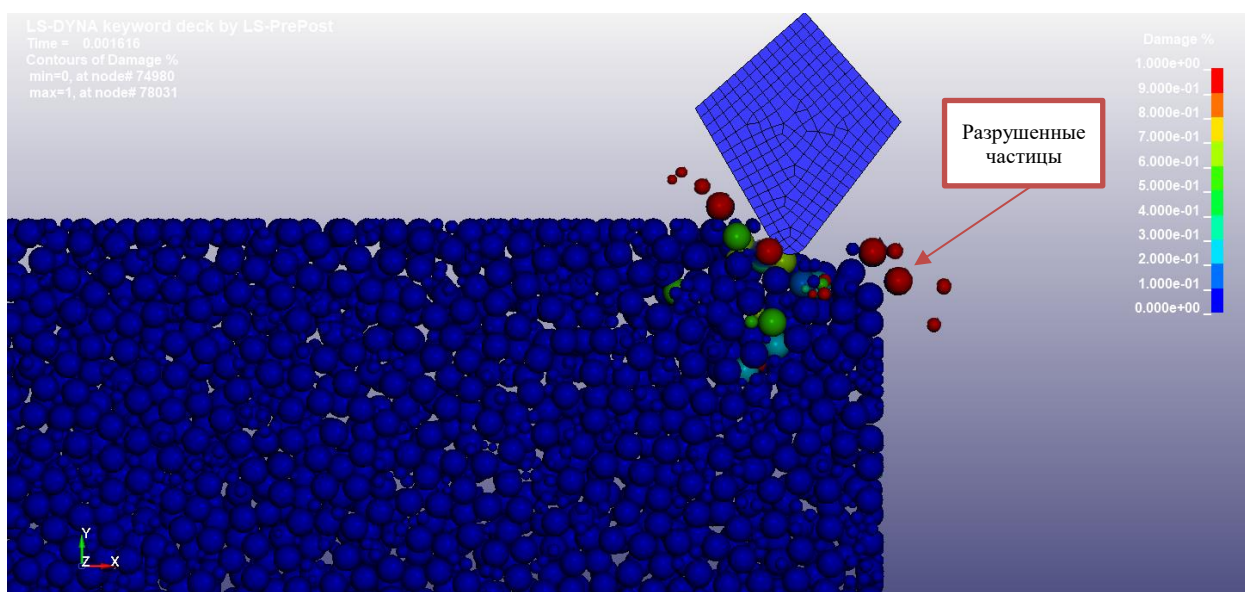
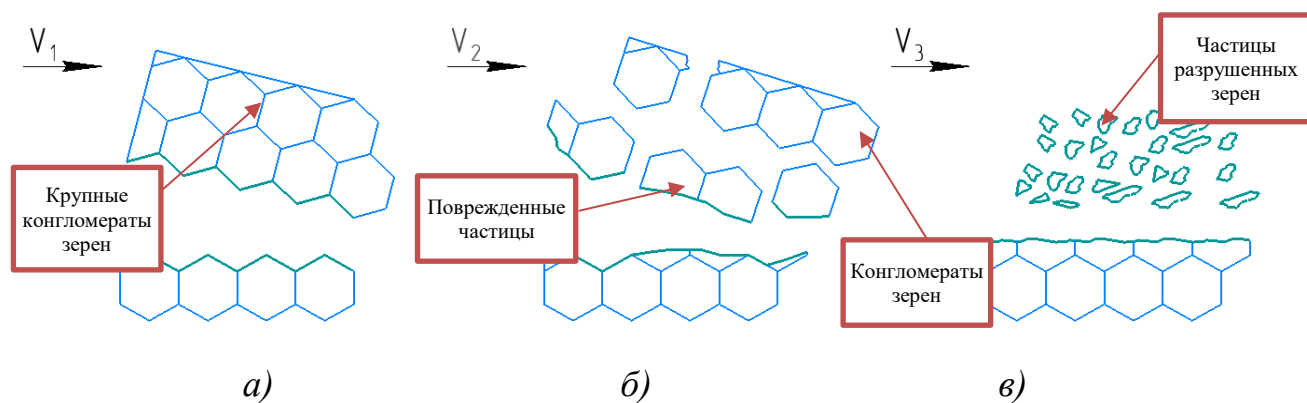


Рисунок 3.11 – Влияние скорости шлифования на механизм разрушения КМ при скорости резания 300 м/с

На основе результатов моделирования (рисунок 3.11) установлено, что при скорости резания 30 м/с (рисунок 3.9) происходит откол конгломератов частиц без их разрушения (цвет частиц остается синим, что говорит об отсутствии повреждений). При скорости резания 100 м/с (рисунок 3.10) 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 3.11) все частицы, контактирующие с алмазным зерном, становятся красными, что свидетельствует об их разрушении.

Анализ полученных результатов моделирования показал, что при скорости резания 30 м/с процесс разрушения происходит путем отделения крупных конгломератов от обрабатываемой заготовки (рисунок 3.12, 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 3.12, 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 3.12, в).



а) транскристаллитное ($V_1 = 30$ м/с); б) смешанное ($V_2 = 100$ м/с);

в) интеркристаллитное ($V_3 = 300$ м/с)

Рисунок 3.12 – Влияние скорости шлифования на механизм разрушения КМ

Таким образом, результаты моделирования хорошо коррелируются с выдвинутой гипотезой об изменении механизма разрушения с транскристаллитного на интеркристаллитный.

Исследование влияния скорости резания на изменение механизма разрушения КМ методом дискретных элементов показало, что для реализации интеркристаллитного вида разрушения необходимо проводить обработку на скорости резания 300 м/с. Это, в теории, должно привести к повышению качества обработанной поверхности – снижению шероховатости, уменьшению количества и размеров микролунок и микротрещин или их устранению

3.5 Исследование влияния скорости резания на деформацию КМ методом сглаженных частиц (SPH)

Для определения влияния скорости резания на шероховатость обработанной поверхности проводили моделирование методом сглаженных частиц (*Smooth Particle Hydrodynamics – SPH*). Метод *SPH* является свободно-лагранжевым численным методом для решения уравнений механики сплошной среды. SPH был предложен *Gingold* [59] и *Lucy* [71] в 1977 г. В области обработки хрупких материалов SPH часто используется для изучения механизма образования трещин и процесса удаления материала в процессе обработки [70, 72, 76]. Данный метод является бессеточным, это означает, что разностная сетка в методе SPH отсутствует, сплошная среда заменяется дискретной системой расположенных в пространстве сглаженных частиц, допускающих произвольную связность друг с другом. Переход от континуума к дискретному представлению среды в виде сглаженных частиц предполагает, что вместо непрерывной функции $f(\vec{r})$, характеризующей какую-либо полевую величину (давление, плотность, энергию, скорость), вводится в рассмотрение её дискретный аналог, то есть дискретная функция f_i . Кусочно-постоянная величина f_i определяется для каждой частицы i через сумму N величин f_j из частиц окружения j , лежащих вокруг частицы i в соответствии с дистанцией сглаживания h , по уравнению:

$$f_i = \sum_{j=1}^N m_j \frac{f_j}{\rho_i} W_{ij}, \quad (3.4)$$

где $W_{ij} = W(|\vec{r}_i - \vec{r}_j|, h)$ - весовая (сглаживающая) функция, или ядро;

m_j - масса частицы j ;

ρ_i - плотность вещества в частице j .

Алгоритм вычисления методом SPH за один шаг интегрирования представлен на рисунке 3.13.

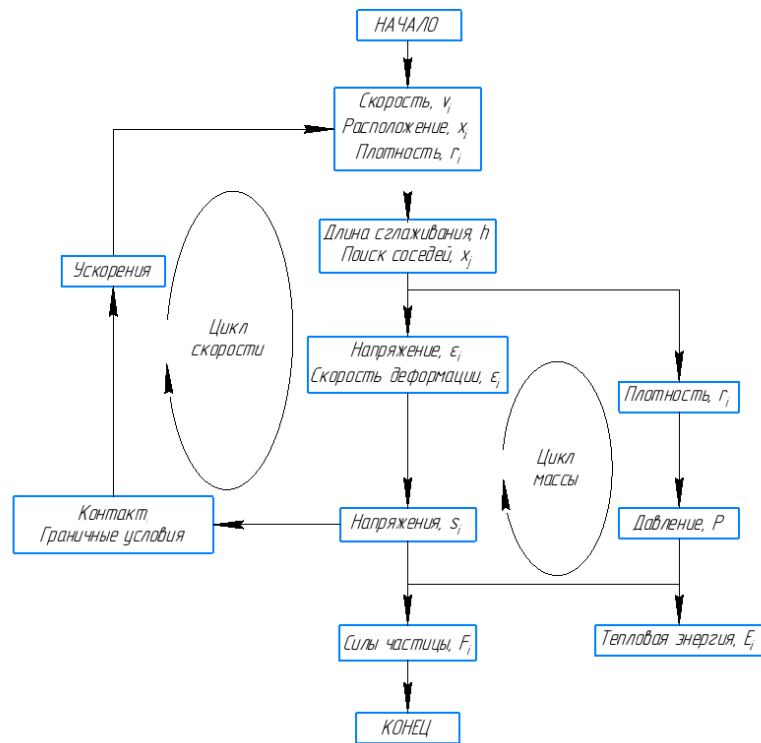


Рисунок 3.13 – Блок-схема алгоритма вычислений методом SPH за один шаг интегрирования

Для моделирования алмазного шлифования единичным зерном методом SPH использовался материал *MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CERAMICS, карта которого представлена на рисунке 3.14.

Keyword Input Form

MatDB RefBy Pick Add Accept Delete Default Done

Use *Parameter Comment (Subsys: 1 30.k) Setting

*MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CERAMICS(TITLE) (110) (1)

TITLE
Ceramics

1	MID	RO	G	A	B	C	M	N
	5	3.700e-06	90.160004	0.9300000	0.3100000	0.0	0.6000000	0.6000000

2	EPSJ	I	SFMAX	HEL	PHEL	BETA
	1.0000000	0.2000000	0.0	2.7900000	1.4600000	1.0000000

3	D1	D2	K1	K2	K3	FS
	0.0050000	1.0000000	130.95000	0.0	0.0	0.0

COMMENT:
K1:=First pressure coefficient (equivalent to the bulk modulus).

Рисунок 3.14 – Карта материала

*MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CERAMICS [47]

Схема моделирования процесса шлифования единичным зерном представлена на рисунке 3.15.

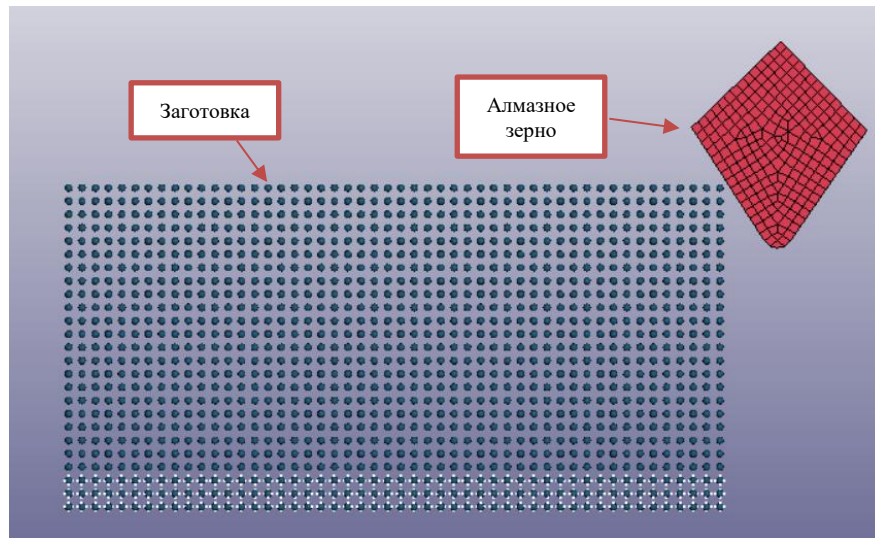


Рисунок 3.15 – Схема моделирования

Результаты моделирования представлены на рисунках 3.16-3.18

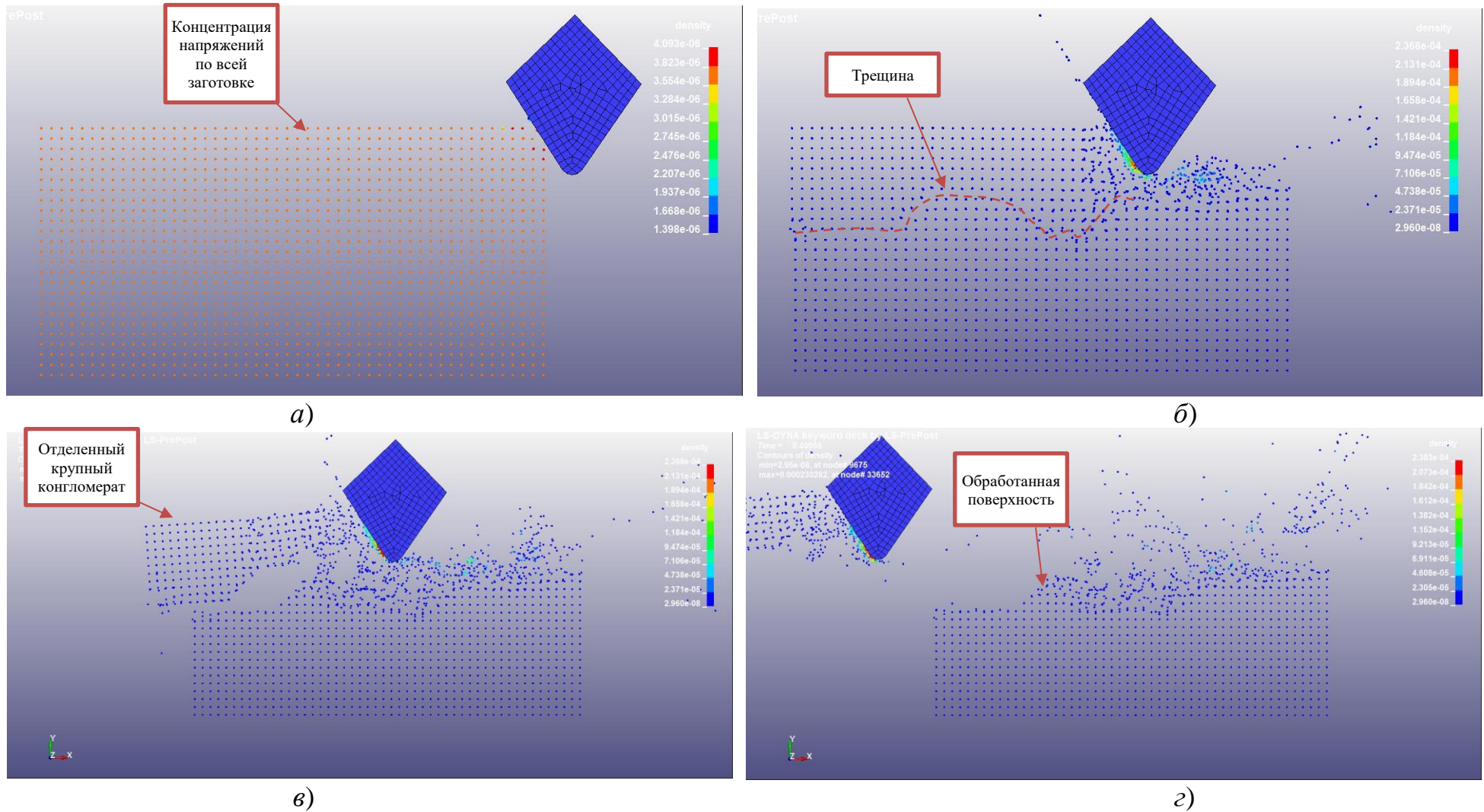


Рисунок 3.16 – Моделирование методом SPH процесса алмазного шлифования единичным зерном со скоростью 30 м/с

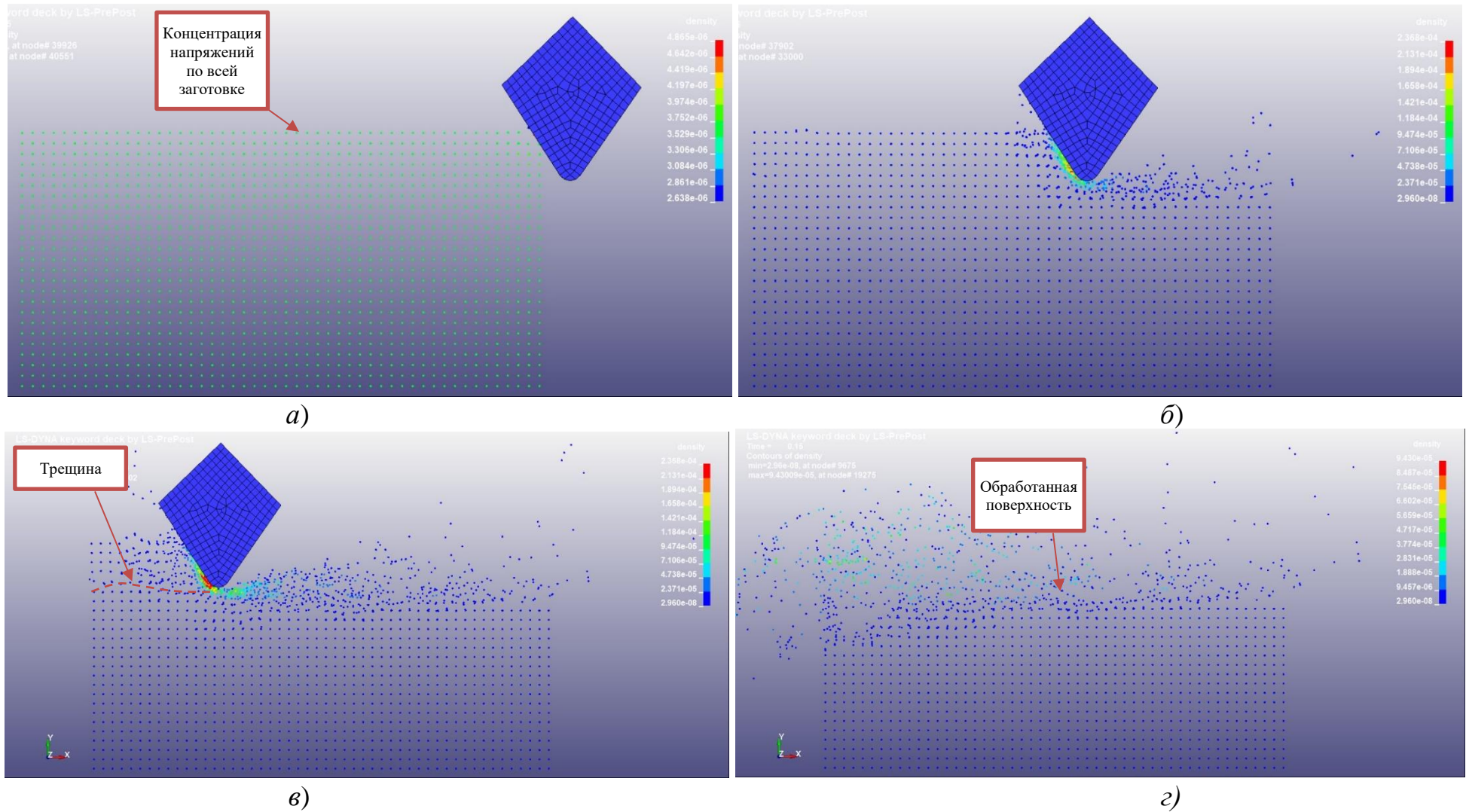
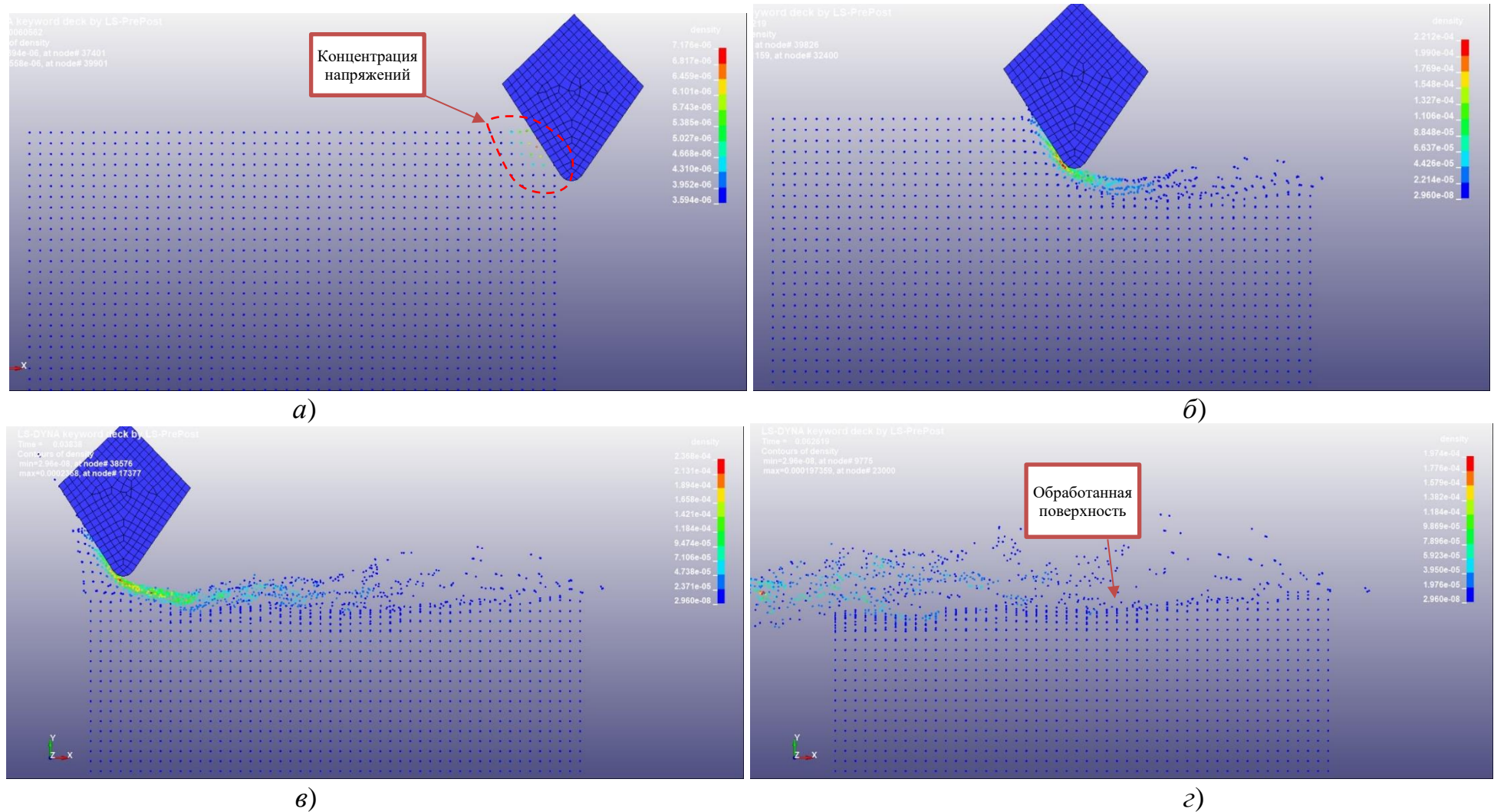


Рисунок 3.17 – Моделирование методом SPH процесса алмазного шлифования единичным зерном со скоростью 100 м/с



а) в момент удара; б) деформация материала; в) формирование магистральной трещины; г) конечная поверхность
 Рисунок 3.18 – Моделирование методом SPH процесса алмазного шлифования единичным зерном со скоростью 300 м/с

Из результатов численного моделирования, представленных на рисунке 3.16, можно увидеть, что в начальный момент контакта алмазного зерна с обрабатываемым изделием из КМ нагрузка распределяется по всей заготовке. На графике изменения внутренней энергии, представленном на рисунке 3.19, данный момент соответствует началу роста графика. После контакта наблюдается рост напряжений вплоть до начала формирования магистральной трещины, причем как видно из графика трещина формировалась в 2 этапа.

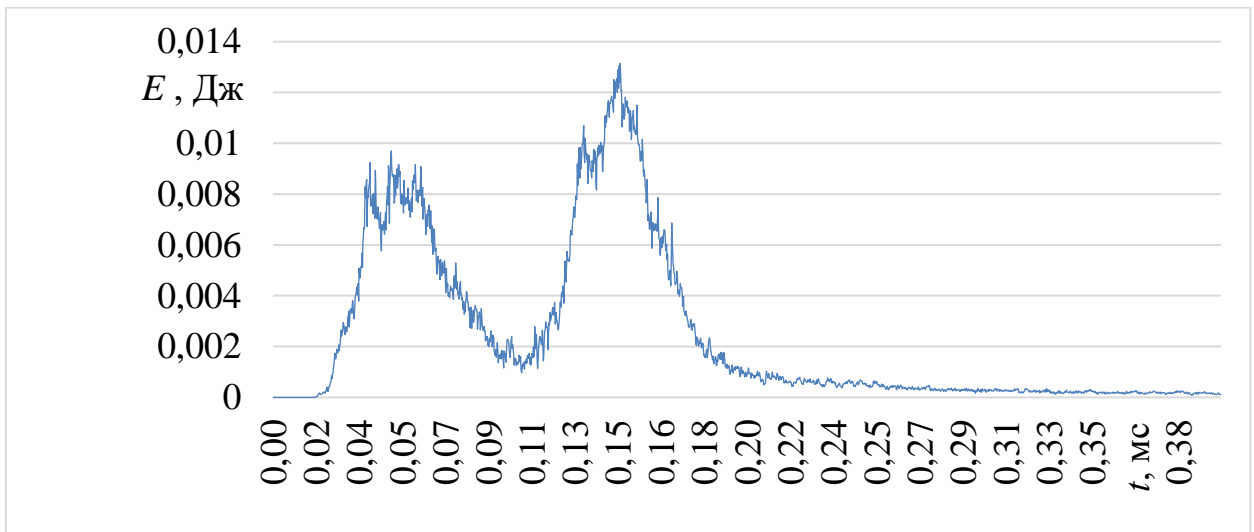


Рисунок 3.19 – График изменения внутренней энергии (E) при скорости резания 30 м/с

При обработке на скорости резания 100 м/с (рисунок 3.17) в начальный момент удара нагрузка так же распределяется по всей заготовке. Однако изменение цвета говорит о том, что напряжения имеют другое значение по сравнению с обработкой на 30 м/с. Из результатов моделирования также видно, что формирование магистральной трещины происходит ближе к концу заготовки и вырванный конгломерат становится меньше. График изменения внутренней энергии, представленный на рисунке 3.20, имеет один пик, что говорит о более стабильном процессе разрушения.

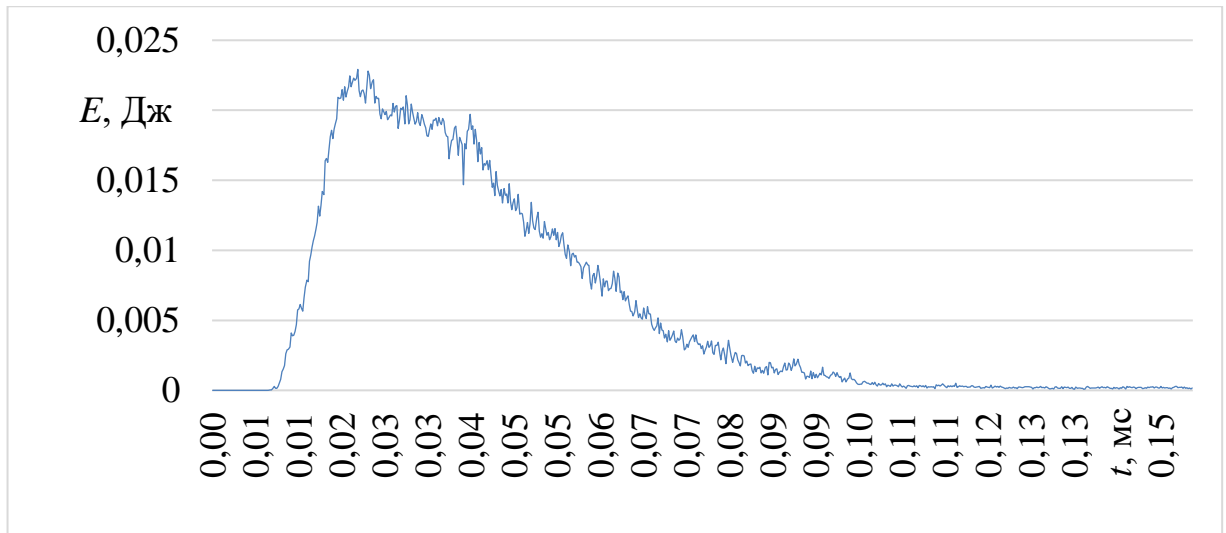


Рисунок 3.20 – График изменения внутренней энергии (E) при скорости резания 100 м/с

При обработке на скорости резания 300 м/с (рисунок 3.18) в начальный момент удара можно заметить, что напряжения не распространяются по обрабатываемой заготовке из КМ, а концентрируются в более малом объеме материала. Разрушение происходит без формирования магистральной трещины. На графике изменения внутренней энергии (рисунок 3.21) не наблюдаются резкие скачки.

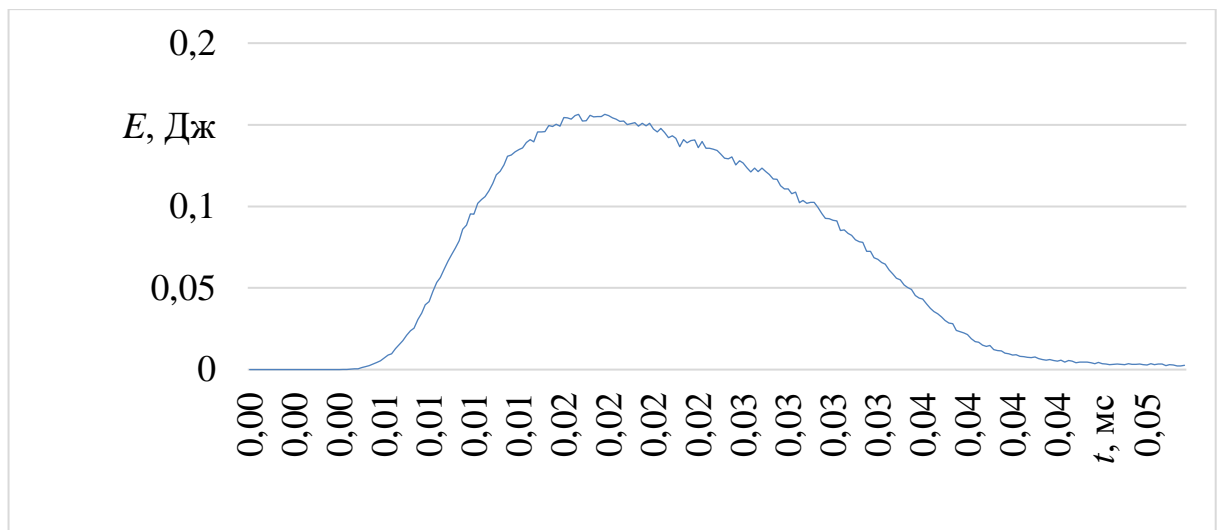


Рисунок 3.21 – График изменения внутренней энергии (E) при скорости резания 300 м/с

Интересная картина также наблюдается при сравнении изменений внутренней энергии на различных скоростях резания (рисунок 3.22).

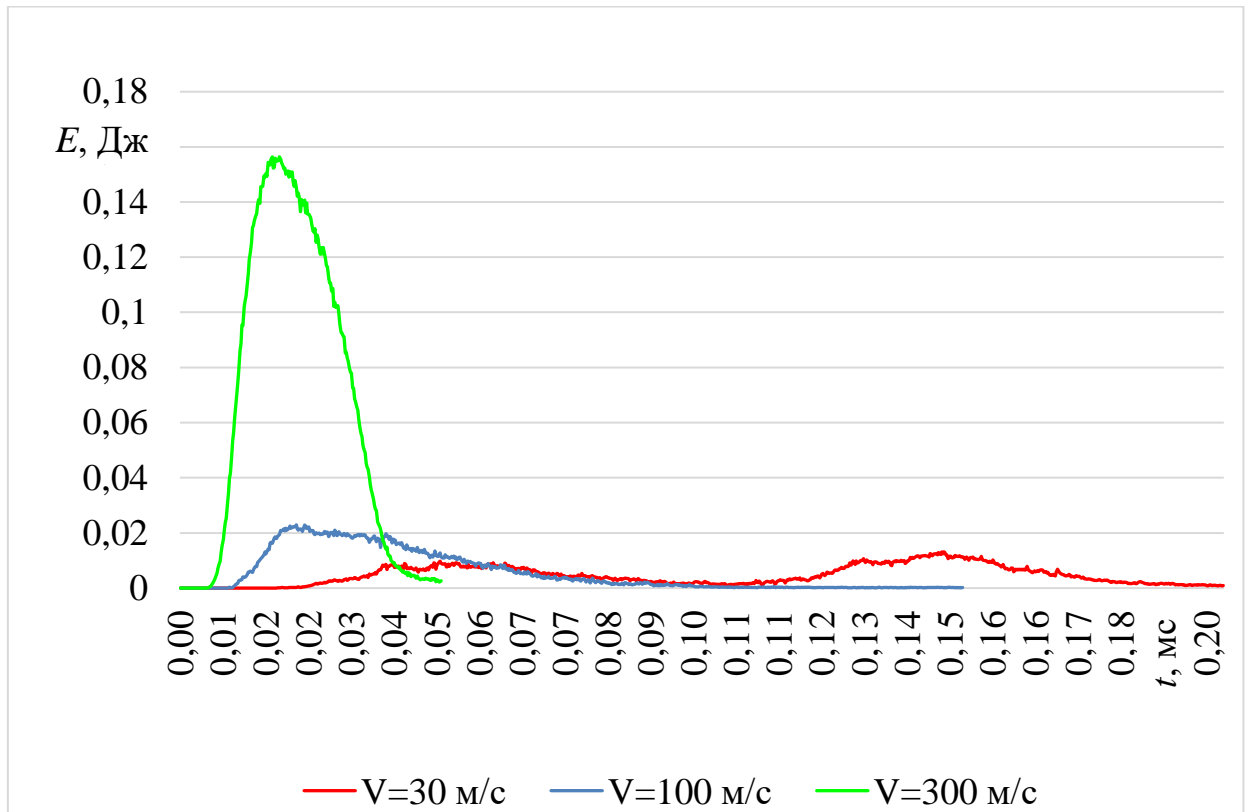


Рисунок 3.22 – График изменения внутренней энергии (E) при различных скоростях резания

Из графика можно заметить, что при повышении скорости резания материал способен выдержать более высокие нагрузки, что позволяет реализовывать большее количество напряжений в меньшем объеме обрабатываемой заготовки из КМ за меньшее время. Данные результаты подтверждают ранее проведенные расчеты с использованием критерия инкубационного времени.

Анализ результатов численного моделирования позволил условно разделить зоны резания на зону деформации, которая происходит от непосредственного контакта с алмазным зерном, и зону растрескиваний и лунок, вызванных возникшими в материале напряжениями и дислокациями (рисунок 3.23).

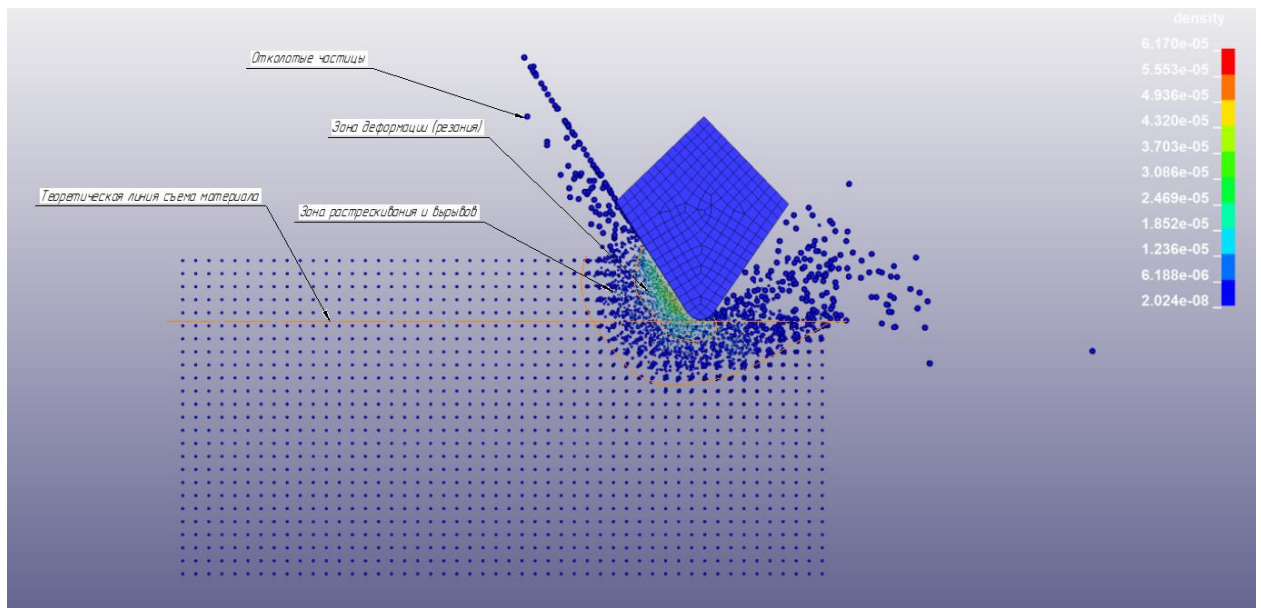
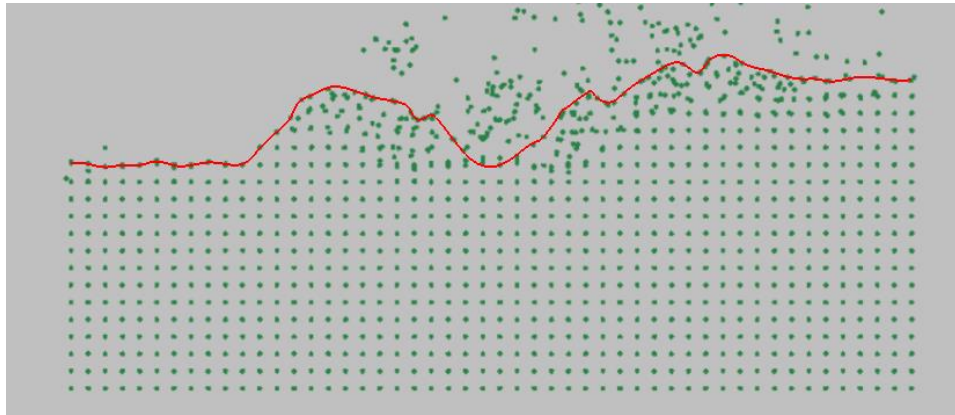


Рисунок 3.23 – Разделение зоны резания

Для оценки влияния скорости резания на параметры качества обработанной поверхности КМ при численном моделировании алмазного шлифования единичным зерном проведены расчеты по определению шероховатости обработанной поверхности. Для этого смоделированные обработанные поверхности были представлены в виде профиля, основой которого послужили координаты кривой, нанесенной на обработанную поверхность модели (рисунки 3.24-3.26).

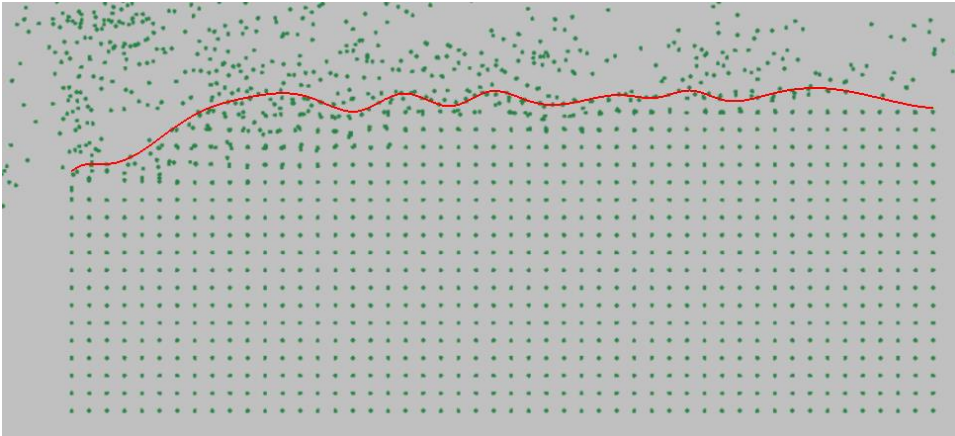


а)



б)

Рисунок 3.24 – Профиль смоделированной обработанной поверхности (а) и график шероховатости (б) при скорости резания 30 м/с (Результат – $Ra = 0,30$ мкм)



а)



б)

Рисунок 3.25 – Профиль смоделированной обработанной поверхности (а) и график шероховатости (б) при скорости резания 100 м/с (Результат – $Ra = 0,21$ мкм)

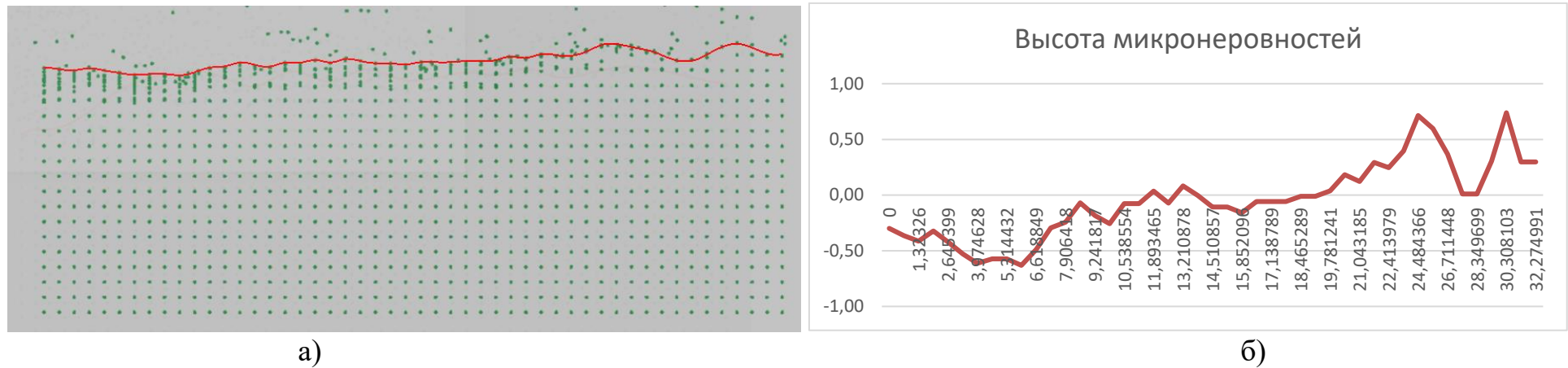


Рисунок 3.26 – Профиль смоделированной обработанной поверхности (а) и график шероховатости (б) при скорости резания 300 м/с
(Результат – $Ra = 0,07$ мкм)

Для расчета шероховатости смоделированной поверхности специально написана программа для ЭВМ на языке программирования Python, представленная в приложении Г. Данная программа работает по следующему алгоритму:

- 1) Чтение данных в формате .xls или .xlsx;
- 2) Определение средней линии неровности поверхности;
- 3) Расчет значения шероховатости по Ra ;
- 4) Построение графика шероховатости поверхности.

На основе расчета построена зависимость шероховатости обработанной поверхности от скорости резания, представленная на рисунке 3.27.

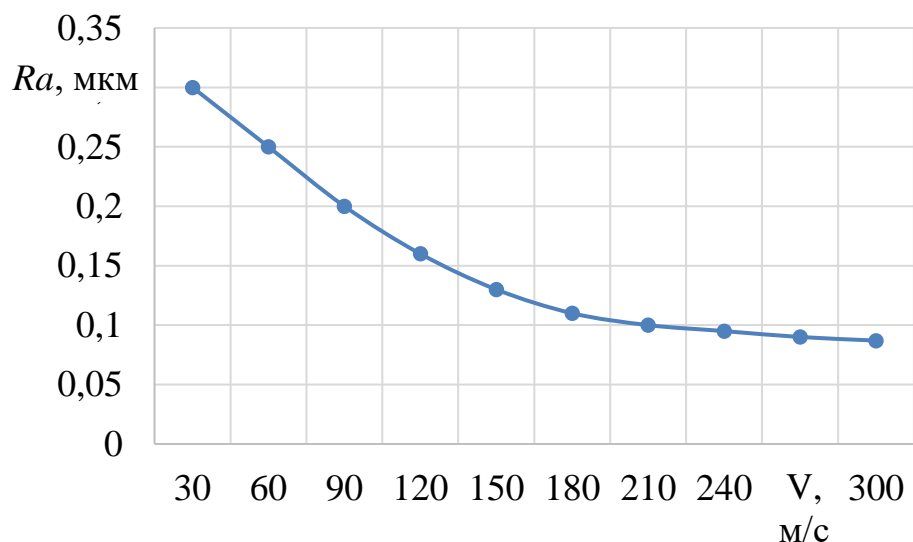


Рисунок 3.27 – Зависимость расчетной шероховатости (Ra) от скорости резания (V)

Из данной зависимости видно, что при увеличении скорости резания уменьшается расчетная шероховатость обработанной поверхности.

Исследование влияния скорости резания на деформацию КМ методом сглаженных частиц показало, что для достижения требуемой шероховатости обработанной поверхности $Ra < 0,1$ мкм необходимо проводить обработку на скорости резания 300 м/с.

Выводы по 3 главе

1. Моделирование процесса шлифования КМ методом перидинамики показало, что с увеличением скорости резания уменьшается угол направления

трещины, что в свою очередь приводит к уменьшению размера микролунок на обрабатываемой поверхности КМ.

2. Моделирование процесса шлифования КМ методом сглаженных частиц (SPH) показало, что увеличение скорости резания уменьшает количество микролунок на обрабатываемой поверхности КМ, что приводит к снижению шероховатости обработанной поверхности.

3. Разработана программа на языке программирования *Python*, позволяющая рассчитать значение шероховатости обработанной поверхности Ra по результатам моделирования процесса шлифования КМ на различных скоростях методом SPH. Расчет показал, что шероховатость обработанной поверхности Ra уменьшается в 4,2 раза с 0,3 до 0,07 мкм.

4. Моделирование процесса шлифования КМ методом дискретных элементов (*DEM*) показало, что увеличение скорости резания изменяет механизм разрушения КМ с транскристаллитного на интеркристаллитный. Это может говорить о достижении скорости роста деформации материала обрабатываемой заготовки до значений, при которых можно рассматривать его как сплошную среду. То есть напряжения в зоне резания настолько высоки, что зерно и связка КМ начинают разрушаться по одному механизму, что позволяет определить минимальную скорость резания, необходимую для реализации стабильного транскристаллитного разрушения, путем определения критического напряжения для зерна и связующего элемента КМ. Для материала *BK94-1* переходной зоной является скорость резания ~ 100 м/с, а процесс стабильного интеркристаллитного разрушения реализуется на скоростях ~ 300 м/с.

5. Численное моделирование методами перидинамики, дискретных элементов и сглаженных частиц позволило установить, что для достижения требуемых параметров качества обработанной поверхности необходимо повысить скорость резания до 300 м/с, однако для подтверждения результатов моделирования необходимо провести натурные эксперименты.

ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ШЛИФОВАНИЯ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

В данной 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.

4.1 Экспериментальное подтверждение результатов численного моделирования влияния скорости резания на рост трещины

Для подтверждения результатов моделирования влияния скорости резания на изменение угла направления трещины и глубины залегания напряжений, проведены экспериментальные исследования по обработке оптического материала (рисунок 4.1), 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. Путем анализа полученной картины имеется возможность определить параметры возникающих напряжений. Моделирование, представленное на рисунке 4.2, позволило получить картину напряжений, возникающих в зоне обработки (рисунок 4.3).

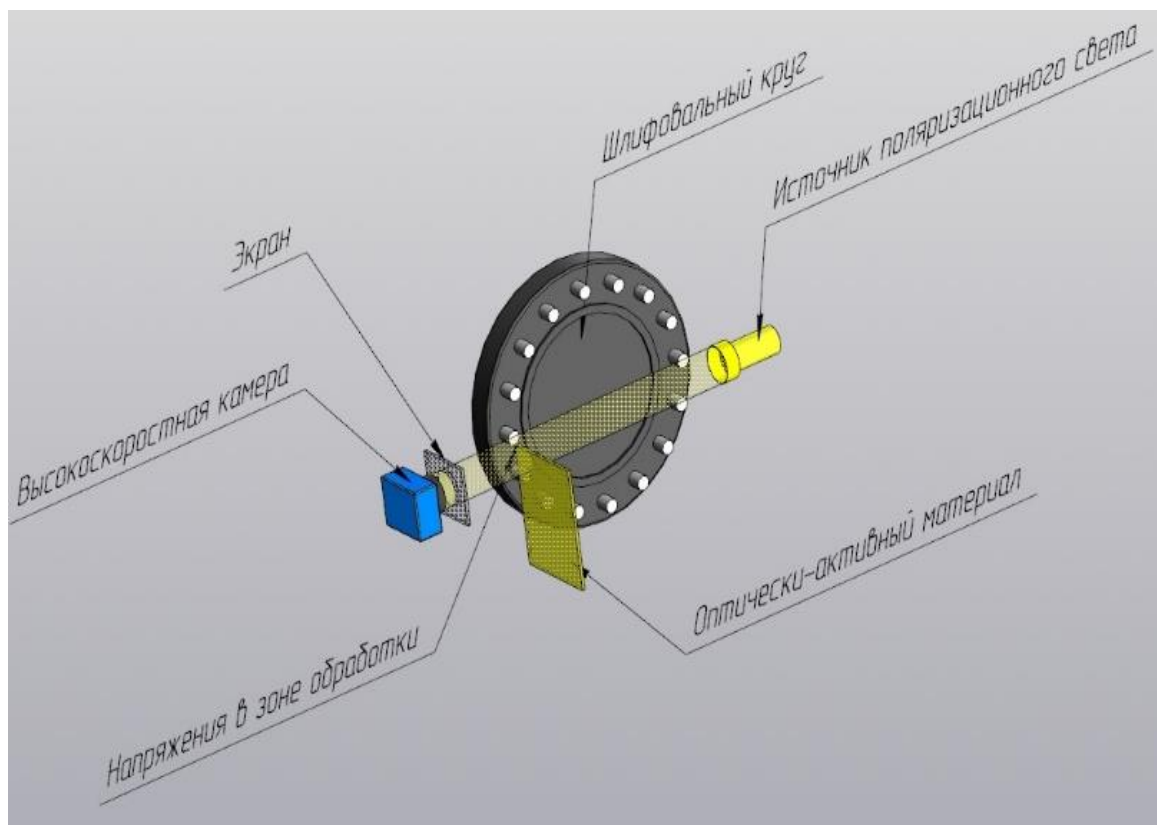


Рисунок 4.1 – Схема эксперимента

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 4.4), что согласуется с результатами моделирования.

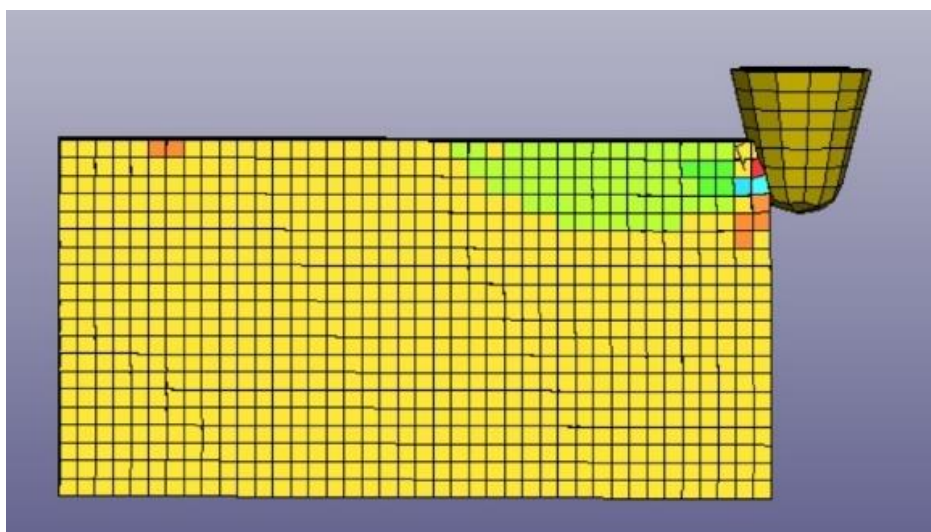


Рисунок 4.2 – Моделирование распространения напряжений в обрабатываемой заготовке из КМ

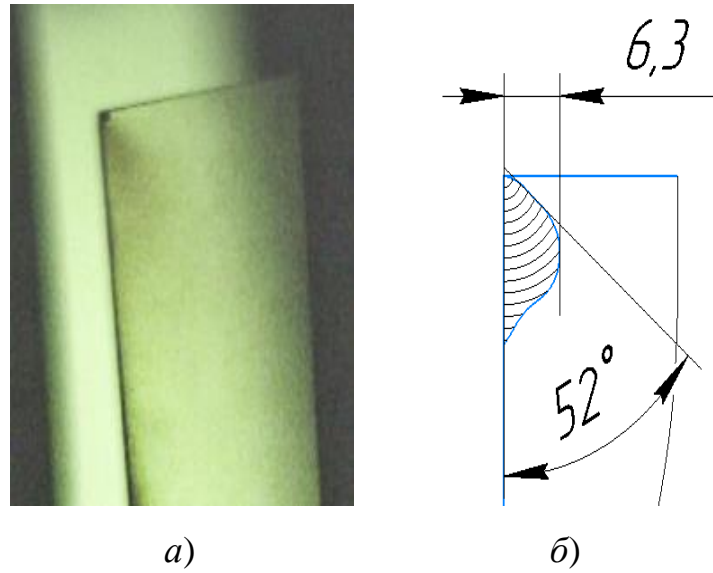


Рисунок 4.3 – Снимок (а) и графическое представление (б) распространения напряжений

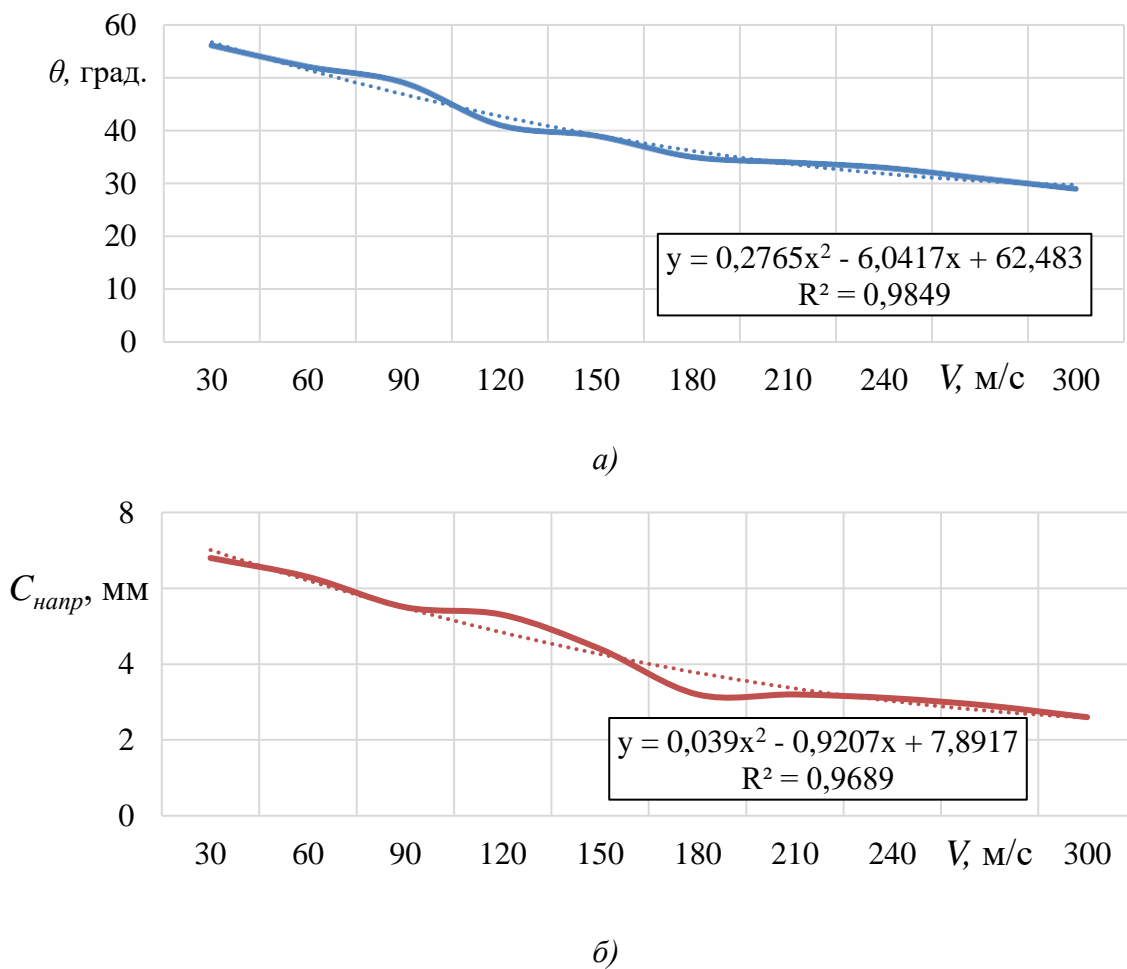


Рисунок 4.4 – Зависимость угла распространения трещин (θ) и глубины залегания напряжений ($C_{напр}$) от скорости резания (V) при обработке оптически-активного материала

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.

4.2 Экспериментальное подтверждение результатов численного моделирования изменения механизма разрушения с транскристаллитного на интеркристаллитный при повышении скорости резания

Для подтверждения результатов моделирования изменения 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 *BK94-1*). Отколотые в процессе шлифования частицы исследовали на растровом электронном микроскопе *Jeol JCM-5700*. Зависимость среднего размера частиц от скорости шлифования представлена на рисунке 4.5.

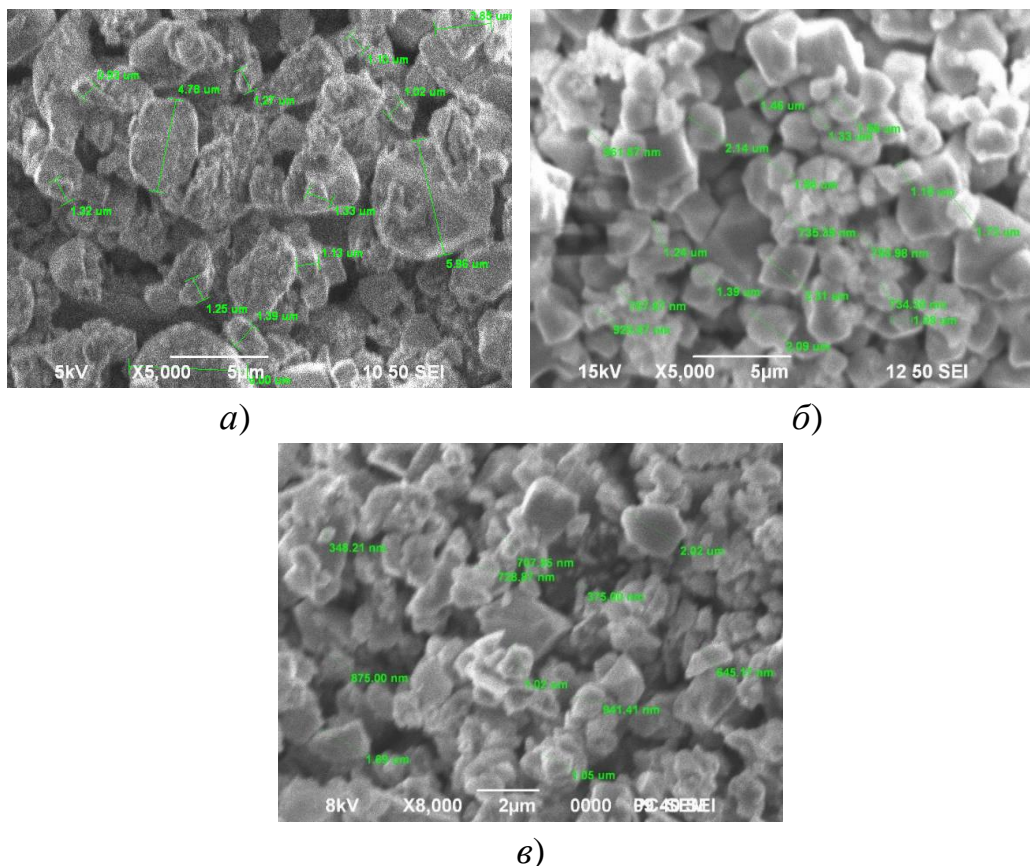
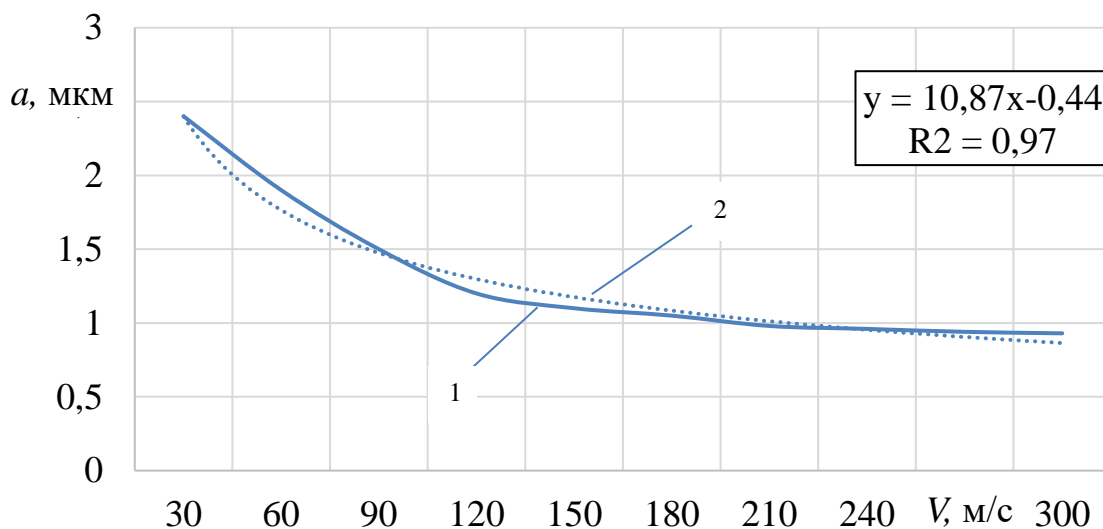


Рисунок 4.5 – Снимки отколотых в процессе обработки частиц при скоростях резания: а) 30 м/с; б) 100 м/с; в) 300 м/с

График зависимости среднего размера частиц от скорости резания при обработке КМ марки ВК94-1 представлен на рисунке 4.6.



1 – экспериментальные данные; 2 – линия тренда

Рисунок 4.6 – Зависимость среднего размера частиц (a) от скорости резания (V)

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.

4.3 Экспериментальное подтверждение результатов численного моделирования влияния скорости резания на шероховатость обработанной поверхности

Для подтверждения результатов моделирования шероховатости обработанной поверхности проводили шлифование пары трения из КМ марки ВК94-1 на производственном комплексе «Салют» АО «ОДК». Чертеж детали представлен на рисунке 4.7.

Особенностью данной детали является то, что основная часть размеров и допусков достигается непосредственно после спекания, однако шероховатости Ra не более 0,1 мкм поверхностей B и Γ удастся достичь только при применении дополнительной механической обработки.

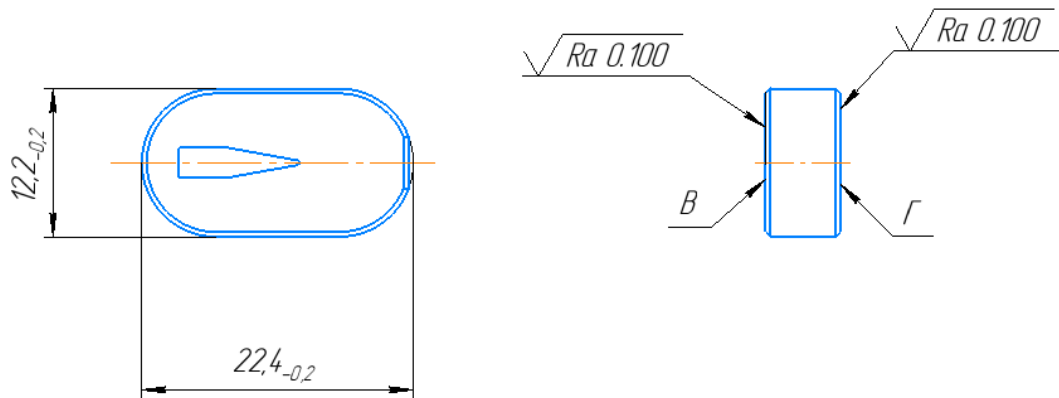
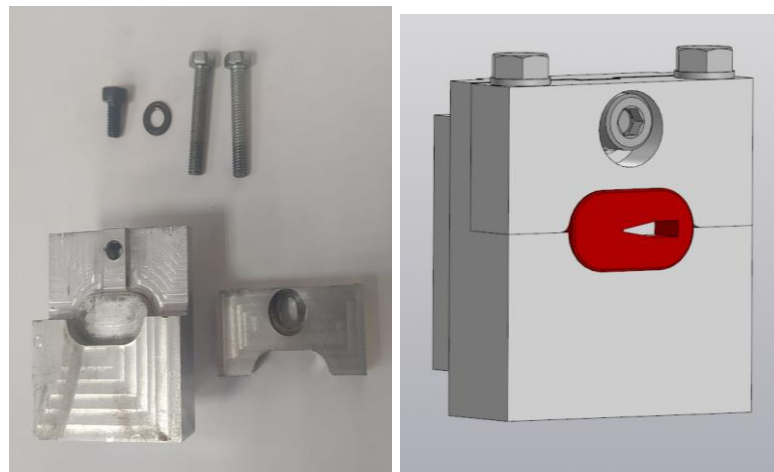


Рисунок 4.7 – Чертеж детали «Задвижка»

С целью обработки данных деталей было сконструировано и изготовлено специальное приспособление, представленное на рисунке 4.8.



а)

б)

а – детализовка; б – 3d модель

Рисунок 4.8 – Разработанное приспособление

С целью определения рациональных режимов обработки КМ выбран диапазон режимов резания (от скорости резания V (м/с), продольной подачи S

(м/мин), глубины шлифования t (мм)) и характеристик абразивного инструмента (зернистости абразивного материала a (мкм)), представляющий наибольший интерес с точки зрения получения наилучших результатов качества обработки и производительности при высокоскоростном шлифовании изделий из КМ. Экономические обоснования применения способа высокоскоростного шлифования с учетом качества обработанной поверхности представлены в Приложении А.

Режимы шлифования выбирались в соответствии с рекомендациями и производственным опытом, позволяющими получать требуемое качество обработанных поверхностей. Скорость шлифования изменялась в диапазоне $V = 30 \dots 300$ м/с исходя из интереса к исследованию процесса высокоскоростного шлифования. Продольная подача и глубина резания назначались исходя из производственных рекомендаций и составляли соответственно $S = 0,15 \dots 0,75$ м/мин, $t = 0,001 \dots 0,006$ мм, при этом при значениях продольной подачи и глубины резания вне данного диапазона происходит значительный нагрев изделия, повышается шероховатость обработанной поверхности и формируется сетка трещин, а также повышается расход шлифовального материала.

Для определения рациональных режимов обработки и характеристик шлифовального инструмента проведен ряд экспериментов в диапазоне представленных режимов обработки и с применением зернистости шлифовальных головок 40/28 и 20/14 на бакелитовой связке, которые были подобраны исходя из производительности процесса шлифования и требуемых параметров качества.

Работу по планированию эксперимента необходимо начать со сбора априорной информации. Анализ этой информации позволяет получить представление об основных параметрах, влияющих на показатели качества при высокоскоростном шлифовании изделий из КМ. Данная информация собирается путем анализа литературных источников, опроса специалистов и проведения однофакторных экспериментов. Анализ полученной информации показал, что на показатель качества обработанной поверхности влияет множество факторов, указанных на рисунке 4.9.

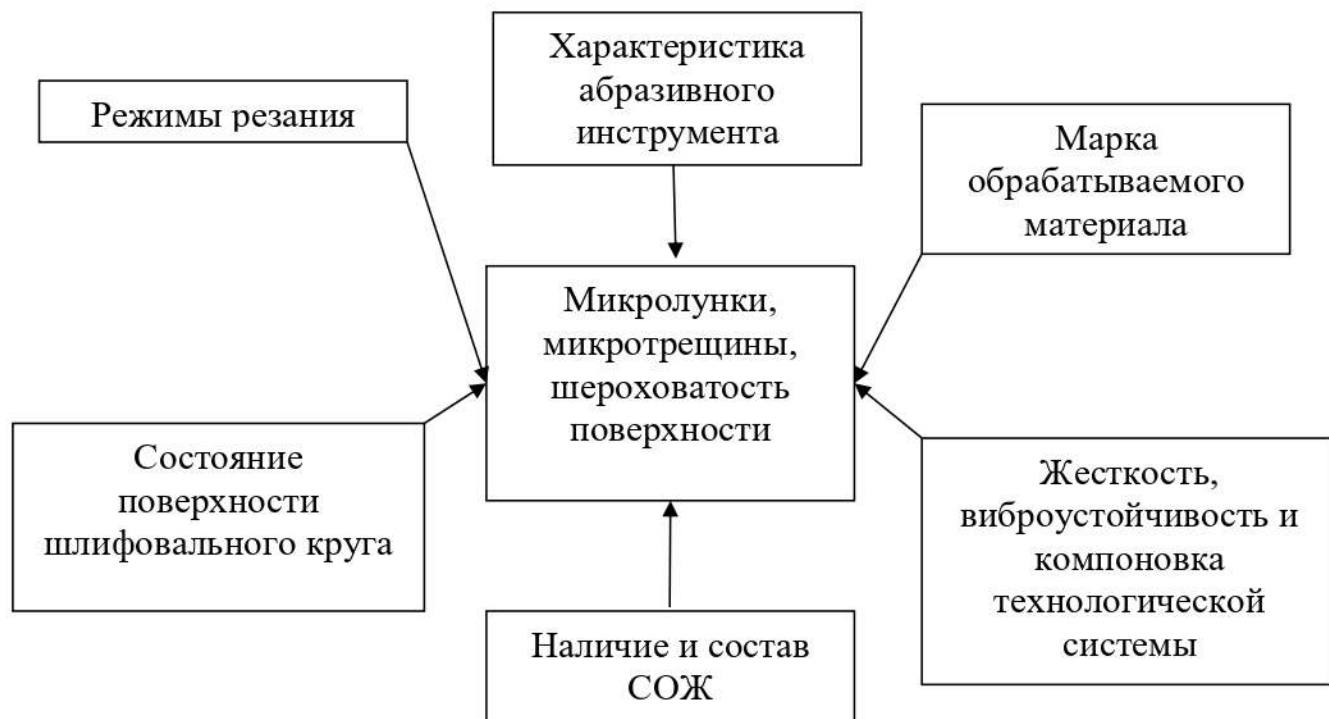


Рисунок 4.9 – Схема влияния факторов на показатели качества изделий из КМ

Несмотря на многообразие факторов, влияющих на качество поверхности при шлифовании изделий из КМ, основными являются режимы резания (скорость резания, подача, глубина резания) и характеристики абразивного инструмента (зернистость, связка, рецептура и т.д.). При известном числе факторов, можно найти число опытов, необходимое для реализации всех возможных сочетаний уровней факторов. Формула для расчета числа опытов выглядит следующим образом:

$$N = p^k \quad (4.1)$$

где N – число опытов; p – число уровней; k – число факторов.

Наибольшее распространение получили эксперименты, в которых факторы варьируют на двух уровнях, в этом случае необходимо поставить опытов 2^k , где k – количество факторов [28]. В данной работе проводились исследования изменения условий и параметров высокоскоростного шлифования КМ от скорости резания V (м/с), продольной подачи S_{np} (м/мин), глубины шлифования t (мм) и зернистости абразивного материала a (мкм). Таким образом, количество факторов $k = 4$, количество опытов – 16.

Эксперимент, в котором реализуются все возможные сочетания уровней факторов, называется полным факторным экспериментом (ПФЭ). Условия эксперимента заносятся в таблицу, которая называется матрицей планирования эксперимента. Матрица планирования эксперимента зависимости шероховатости поверхности от 4-х факторов представлена в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Матрица планирования четырехфакторного эксперимента

№ опыта	Порядок варьирования факторов				Шероховатость поверхности R_a , мкм
	X1	X2	X3	X4	
1	-	-	-	-	R_{a1}
2	+	-	-	-	R_{a2}
3	-	+	-	-	R_{a3}
4	+	+	-	-	R_{a4}
5	-	-	+	-	R_{a5}
6	+	-	+	-	R_{a6}
7	-	+	+	-	R_{a7}
8	+	+	+	-	R_{a8}
9	-	-	-	+	R_{a9}
10	+	-	-	+	R_{a10}
11	-	+	-	+	R_{a11}
12	+	+	-	+	R_{a12}
13	-	-	+	+	R_{a13}
14	+	-	+	+	R_{a14}
15	-	+	+	+	R_{a15}
16	+	+	+	+	R_{a16}

Для каждой строки матрицы по результатам параллельных опытов определялось среднее значение функции отклика:

$$\bar{y}_j = \frac{1}{n} \sum_{p=1}^n y_{jp}, \quad (4.2)$$

где p – номер параллельного опыта; y_{jp} – значение функции отклика в p -том параллельном опыте j -той строки матрицы; n – число параллельных опытов.

Оценка отклонений функции отклика от его среднего значения для каждой строки матрицы планирования производилась вычислением дисперсии S_j^2 опыта по данным n параллельных опытов:

$$S_j^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{p=1}^n (y_{jp} - \bar{y}_j)^2. \quad (4.3)$$

Однородность ряда дисперсий проверялась с помощью G -критерия Кохрена, представляющего собой отношение максимальной дисперсии к сумме всех дисперсий:

$$G_p = \frac{S_{\max}^2}{\sum_{j=1}^N S_j^2} \leq G_T, \quad (4.4)$$

где G_T – табличное значение G -критерия; для данного случая $G_T = 0,8709$ [22].

При однородности дисперсий S_j^2 определялась дисперсия S_y^2 воспроизводимости эксперимента:

$$S_y^2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N S_j^2, \quad (4.5)$$

где N – число опытов.

По результатам эксперимента вычислялись коэффициенты модели. Свободный член b_o определялся по формуле [22]:

$$b_o = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \bar{y}_j. \quad (4.6)$$

Коэффициенты регрессии, характеризующие линейные эффекты определялись по выражению:

$$b_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{ij} \cdot \bar{y}_j. \quad (4.7)$$

Коэффициенты регрессии, характеризующие эффекты взаимодействия определялись по формуле:

$$b_{ir} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{ij} \cdot x_{rj} \cdot \bar{y}_j, \quad (4.8)$$

где i, r – номера факторов; x_{ij}, x_{rj} – кодированные значения факторов i и r в j -том опыте.

Проверка значимости коэффициентов регрессии определялась с помощью t -критерия Стьюдента [22]:

$$T_p = \frac{|b_i|}{S\{b_i\}} \geq T_T, \quad (4.9)$$

где T_p – расчетное значение критерия Стьюдента; T_T – табличное значение критерия Стьюдента при принятом уровне значимости и числе степеней свободы. Принимая уровень значимости 5% при числе степеней свободы 16, получим: $T_T = 2,13$; $S\{b_i\}$ – ошибка в определении i -того коэффициента регрессии.

Дисперсия i -того коэффициента регрессии определялась по формуле:

$$S^2\{b_i\} = \frac{1}{n \cdot N} S_y^2. \quad (4.10)$$

После расчета коэффициентов модели и проверки их значимости определялась дисперсия адекватности:

$$S_a^2 = \frac{n \cdot \sum_{j=1}^N (\bar{y}_j - y_j)^2}{N - (k + 1)}. \quad (4.11)$$

В заключении проводится проверка гипотезы адекватности найденной модели по F -критерию Фишера:

$$F_p = \frac{S_a^2}{S_y^2} \leq F_T, \quad (4.12)$$

где F_T – табличное значение критерия Фишера при принятом уровне значимости и числе степеней свободы. Принимая уровень значимости 5% при числе степеней свободы 16, получим: $F_T = 2,85$.

С целью выявления рациональных режимов обработки был выбран диапазон режимов резания и характеристик абразивного инструмента, представляющий наибольший интерес с точки зрения получения наилучших результатов качества обработки и производительности при высокоскоростном шлифовании изделий из КМ. Выбраны те режимы шлифования, которые позволяют получать высокое качество обработанных поверхностей. Скорость резания выбрана в диапазоне $V = 30 \dots 300$ м/с, продольная подача $S_{np} = 0,15 \dots 0,75$ м/мин, глубина шлифования $t = 0,001 \dots 0,006$ мм и размер абразивных зерен $a = 20 \dots 40$ мкм. Таким образом, для опытов в данном исследовании принимаются значения, представленные в таблице 4.2. Согласно планированию, эксперимент имеет равномерное дублирование опытов, а число повторений каждого опыта равно трем.

В данном случае использовалось планирование эксперимента первого порядка, которое позволяет получить зависимость вида [28]:

$$y = b_0 + \sum b_i \cdot x_i + \sum b_{ij} \cdot x_i \cdot x_j . \quad (4.13)$$

Таблица 4.2 – Кодирование факторов

Интервал варьирования и уровень факторов	Глубина шлифования t , мм	Продольная подача S_{np} , м/мин	Зернистость абразивного материала a , мкм	Скорость резания V , м/с
Кодовое обозначение	X4	X3	X2	X1
Верхний уровень $x_i=+1$	0,006	0,75	40	300
Нижний уровень $x_i=-1$	0,001	0,15	20	30

Шероховатость поверхности при шлифовании определяется доминирующим фактором. При высокоскоростном шлифовании это режимы обработки и размер абразивного зерна. Ниже представлены матрица эксперимента для определения зависимости шероховатости обработанной поверхности Ra (таблица 4.3) и результаты измерений шероховатости, полученных при шлифовании КМ марки ВК94-1, на различных режимах резания и разным размером абразивного зерна (рисунок 4.10–4.13).

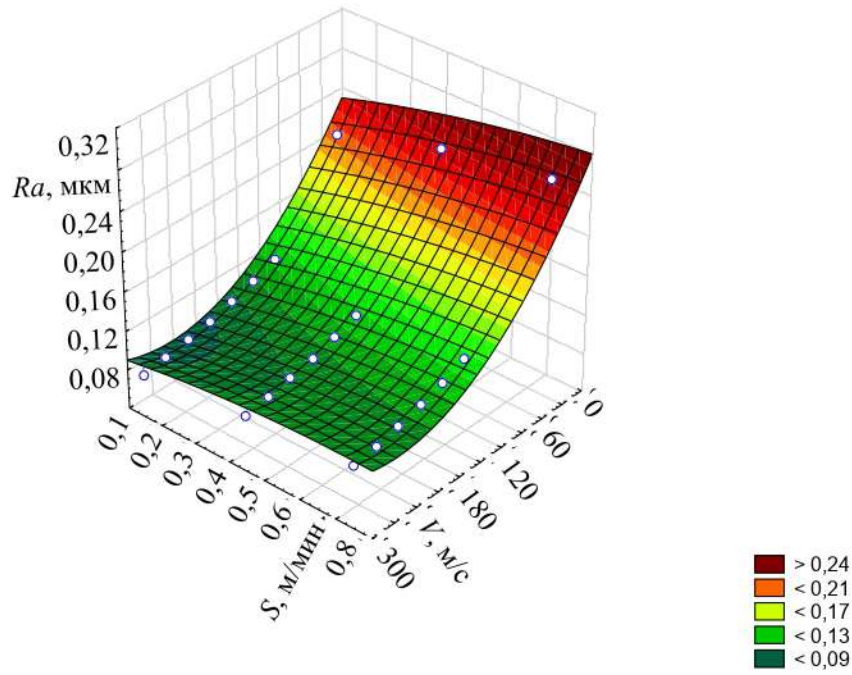


Рисунок 4.10 – Зависимость шероховатости обработанной поверхности (Ra) от подачи (S) и скорости резания (V), при $t = 0,001$ мм, с использованием головок AW ACH 20/14

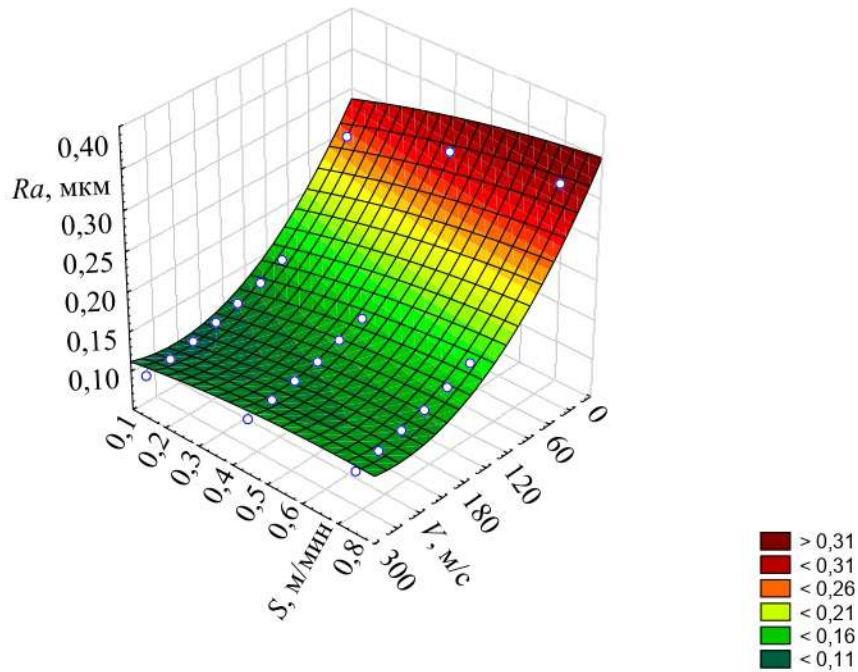


Рисунок 4.11 – Зависимость шероховатости обработанной поверхности (Ra) от подачи (S) и скорости резания (V), при $t = 0,001$ мм, с использованием головок AW ACH 40/28

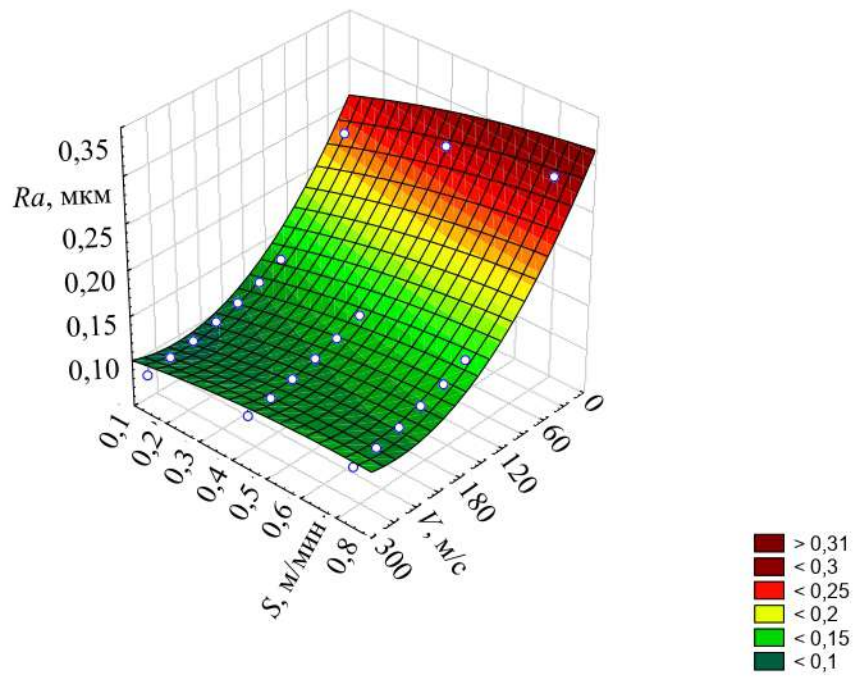


Рисунок 4.12 – Зависимость шероховатости обработанной поверхности (Ra) от подачи (S) и скорости резания (V), при $t = 0,006$ мм, с использованием головок AW ACH 20/14

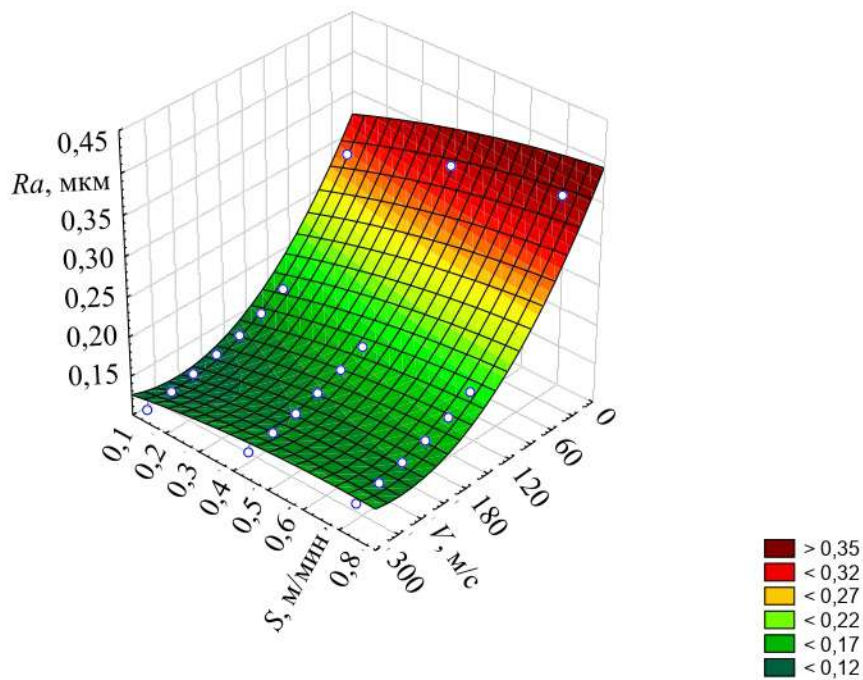
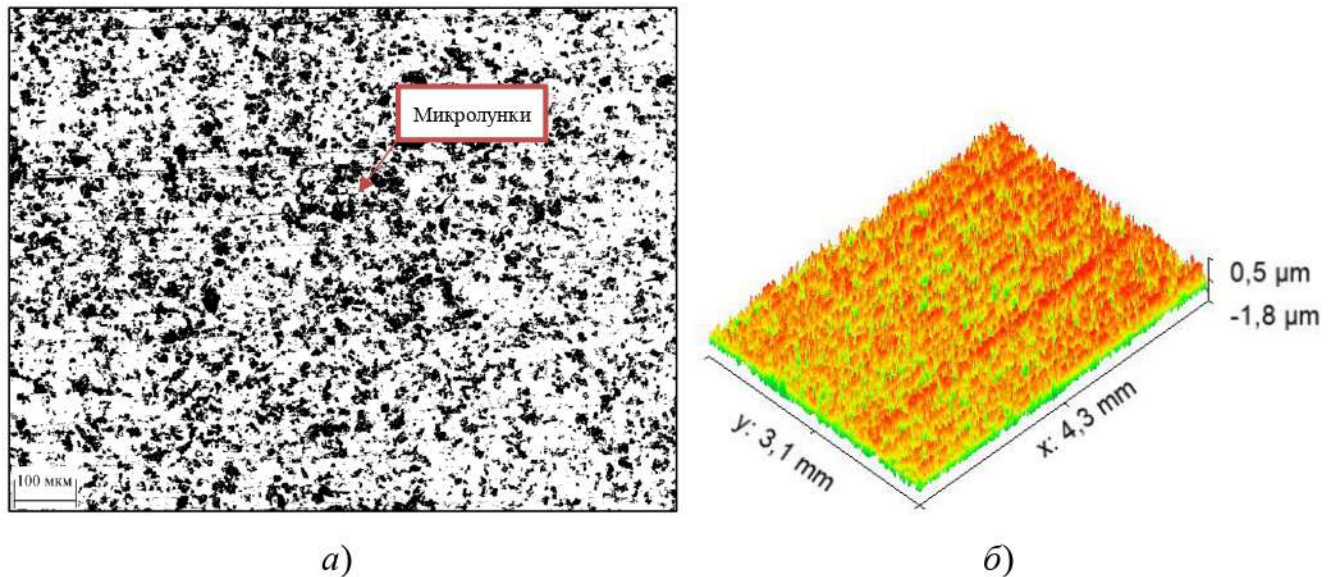


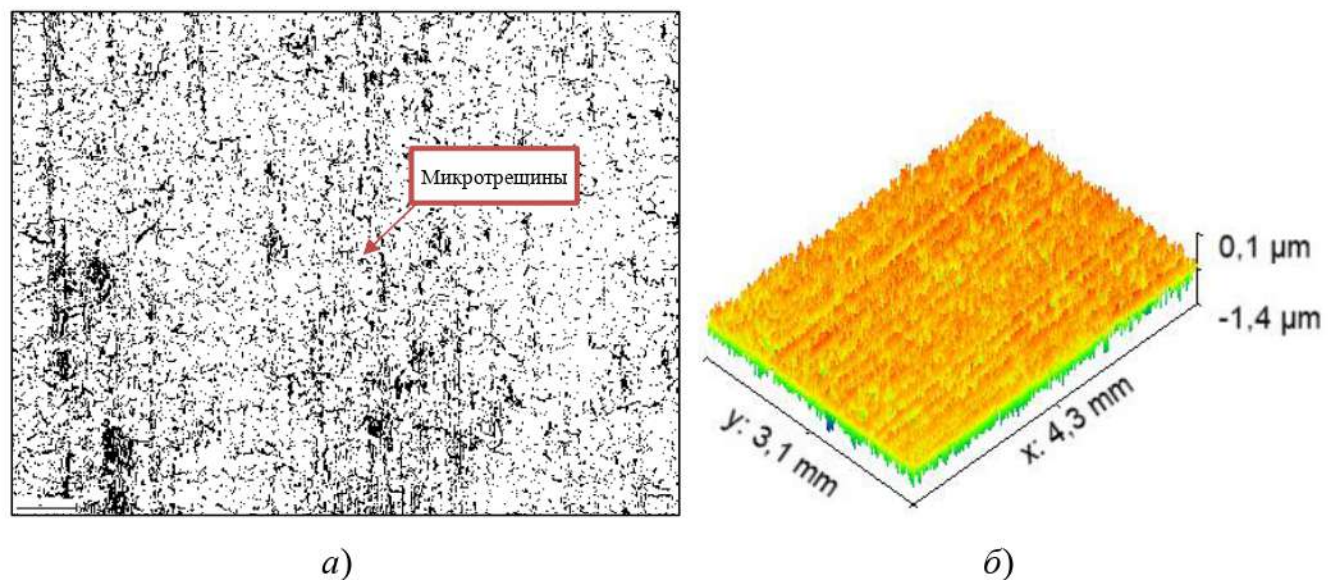
Рисунок 4.13 – Зависимость шероховатости обработанной поверхности (Ra) от подачи (S) и скорости резания (V), при $t = 0,006$ мм, с использованием головок AW ACH 40/28

В результате проведения экспериментов получены поверхности, представленные на рисунке 4.14–4.16, и зависимость шероховатости обработанной поверхности Ra при шлифовании КМ для марки ВК94-1 от режимов резания и размеров абразивного зерна, а также построены поверхности отклика.



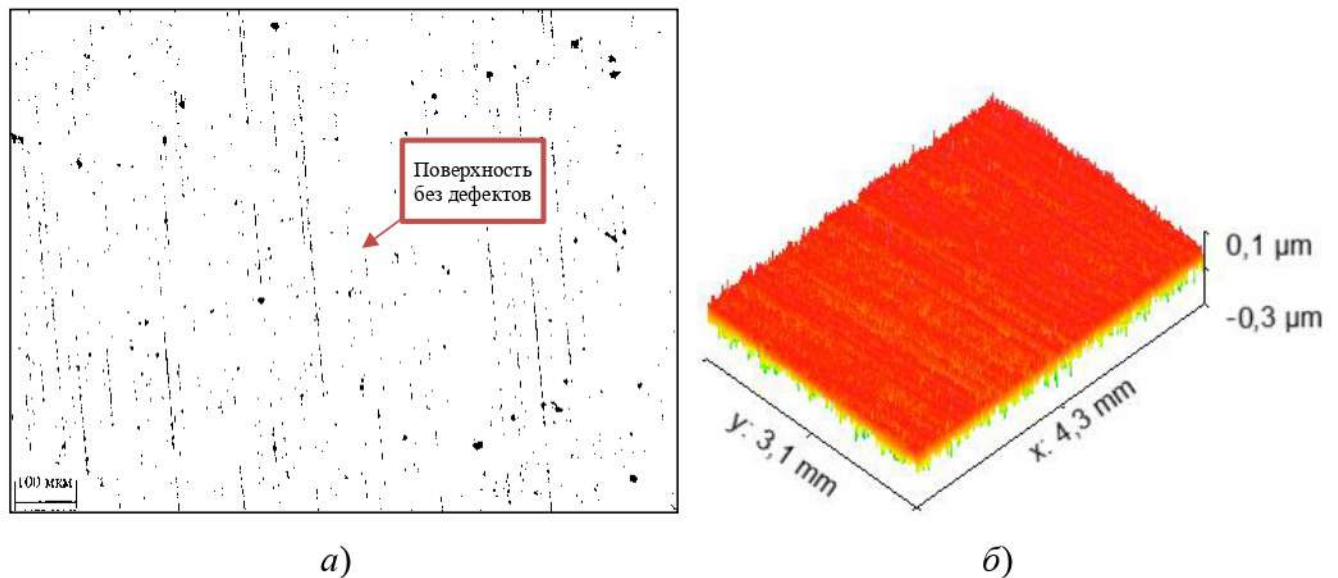
a – участок поверхности; *б* – топографическое изображение участка поверхности

Рисунок 4.14 – Участок поверхности КМ марки ВК94-1, полученный при $V = 30$ м/с



a – участок поверхности; *б* – топографическое изображение участка поверхности

Рисунок 4.15 – Участок поверхности КМ марки ВК94-1, полученный при $V = 100$ м/с



a – участок поверхности; *б* – топографическое изображение участка поверхности
 Рисунок 4.16 – Участок поверхности КМ марки ВК94-1, полученный при $V = 300$ м/с

Для получения достоверных результатов каждый опыт повторялся 3 раза, после чего определялось среднеквадратичное значение и заносилось в таблицу 4.3.

Таблица 4.3 – Матрица эксперимента

№ опыта	t , мм	$S_{\text{прод}}$, м/мин	a , мкм	V , м/с	Ra , мкм
1	0,006	0,75	20	30	0,179
2	0,001	0,75	20	30	0,213
3	0,006	0,15	20	30	0,237
4	0,001	0,15	20	30	0,268
5	0,006	0,75	20	300	0,070
6	0,001	0,75	20	300	0,079
7	0,006	0,15	20	300	0,099
8	0,001	0,15	20	300	0,119
9	0,006	0,75	40	30	0,225
10	0,001	0,75	40	30	0,263
11	0,006	0,15	40	30	0,278
12	0,001	0,15	40	30	0,321
13	0,006	0,75	40	300	0,095
14	0,001	0,75	40	300	0,115
15	0,006	0,15	40	300	0,124
16	0,001	0,15	40	300	0,135

По результатам экспериментальных исследований получена регрессионная зависимость шероховатости обработанной поверхности Ra от режимов резания и размеров абразивного зерна:

$$Ra = 0,64 \cdot \frac{t^{0,07} \cdot S_{\text{прод}}^{0,13} \cdot a^{0,32}}{V^{0,40}}, \quad (4.14)$$

где t – глубина шлифования, мм; $S_{\text{прод}}$ – продольная подача, м/мин; V – скорость резания при шлифовании, м/с; a – размер абразивного зерна, мкм.

Измерения высоты микронеровностей обработанных поверхностей производились на профилометре *MarSurf PS1* (прибор для прецизионного и нормированного измерения шероховатости и регистрации результатов контактным методом, со встроенным калибровочным эталоном). С повышением скорости резания обработанной поверхности КМ происходит снижение шероховатости. При исключении режимов обработки в зонах резонансных явлений можно увидеть тенденцию снижения значений высоты микронеровностей с повышением скорости резания. Сравнительные параметры обработанной поверхности КМ *BK94-1* при различных скоростях резания представлены в таблице 4.4 и на рисунках 4.17 и 4.18.

Таблица 4.4 – Сравнительные параметры качества поверхности КМ, обработанном при различных скоростях резания

Скорость резания V , м/с	Шероховатость Ra , мкм	Дефекты
30	0,32	Микролунки
100	0,18	Микротрещины
300	0,06	-

Анализ результатов исследований позволил сделать вывод: повышение скорости резания и уменьшение размера абразивного зерна при шлифовании изделий из КМ повышает качество поверхности, обеспечивая: снижение шероховатости обработанной поверхности и исключение дефектов, связанных с

микролунками и микротрещинами. При повышении скорости резания свыше 300 м/с могут возникнуть проблемы, связанные с недостаточной сбалансированностью шлифовального круга, результатом чего являются повышенные вибрации, что требует дополнительного тонкого балансирования. При обеспечении дисбаланса вращающихся узлов по классу $G6,3$ по *ГОСТ ИСО 1940-1-2007* достижение 400 м/с становится не проблематичным, и работа на таких скоростях в рабочем режиме позволяет проводить исследование процесса высокоскоростного шлифования. Допустимый дисбаланс шлифовального круга составляет 5 г·мм.

С повышением скорости резания КМ марки *BK94-1* происходит снижение шероховатости, а при увеличении глубины резания и подачи – повышение. Установлено, что требуемый диапазон шероховатости обработанной поверхности Ra менее 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. Полученные результаты подтверждают результаты моделирования.

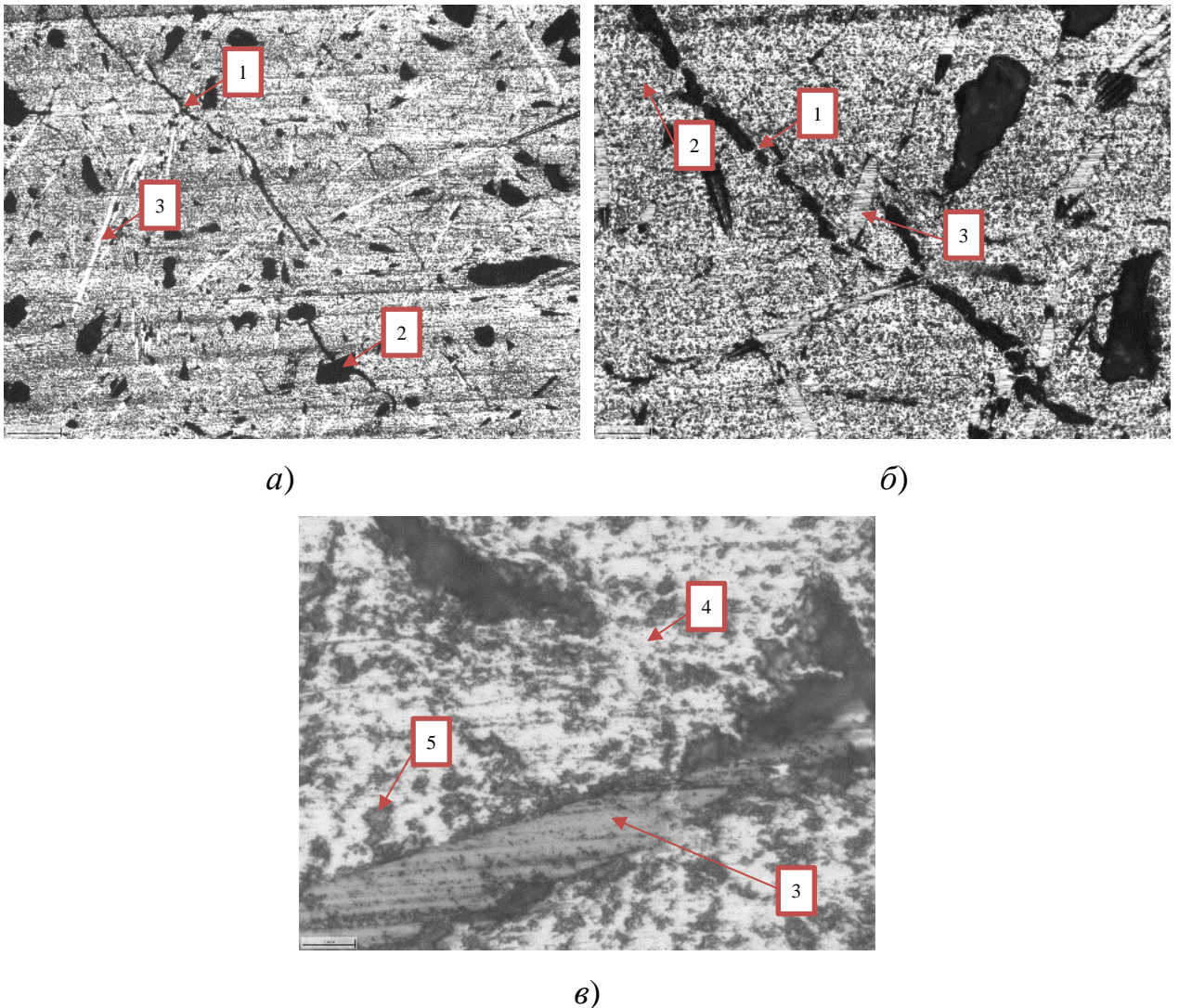
На основании проведенных исследований определена зависимость механизма разрушения обрабатываемого изделия из КМ от скорости воздействия, а также получены зависимости влияния режимов обработки и характеристик шлифовального инструмента на шероховатость обработанной поверхности.

4.4 Перспективы применения способа высокоскоростного шлифования ККМ

Предложенные режимы резания апробированы при обработке современных перспективных КМ при проведении опытно-промышленных испытаний в компании АО «ОДК-АВИАДВИГАТЕЛЬ» по обработке деталей из композитов с керамической матрицей, армированной нитевидными кристаллами (ККМ SiC-SiC). Данный материал может выдерживать неблагоприятные условия работы в течение длительного времени при температурах до 1400° С. Основным требованием при обработке данного ККМ является отсутствие микролунок и микротрещин на обработанной поверхности.

На рисунках 4.17–4.19 представлены снимки участков обработанных поверхностей при скоростях резания $V = 30$ м/с, $V = 100$ м/с и $V = 300$ м/с. Глубина резания $t = 0,003$ мм и подача $S = 0,65$ м/мин оставались постоянными. Использовались алмазные шлифовальные головки AW ACH 20/14 на бакелитовой связке B1-1.

Из рисунка 4.17 видно, что при обработке на скорости резания $V = 30$ м/с на обработанной поверхности образца формируются трещины и микролунки.

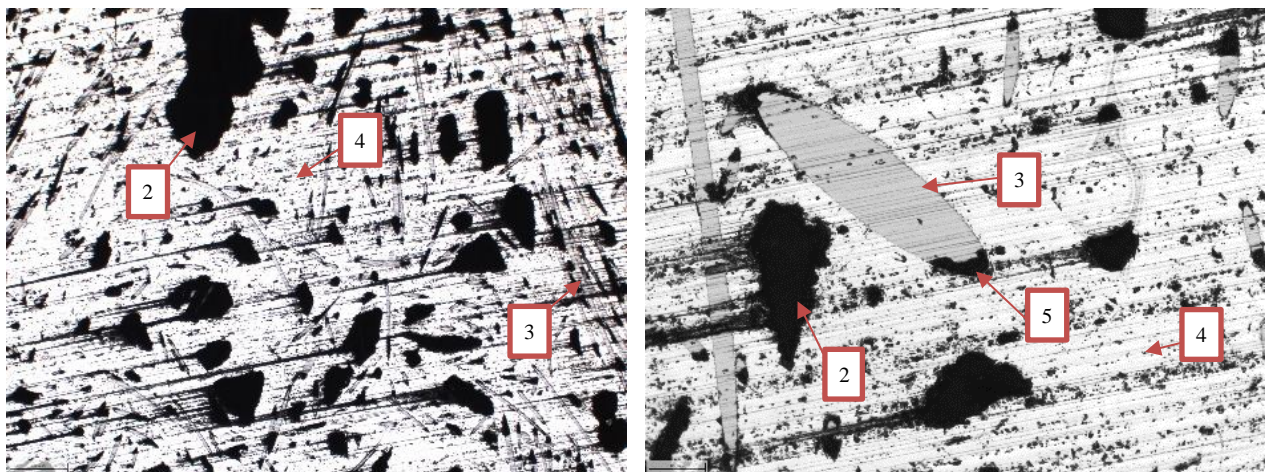


a) $\times 2,5$; *б)* $\times 10$; *в)* $\times 100$

1 – трещина; 2 – поры; 3 – армированные волокна; 4 – наполнитель;

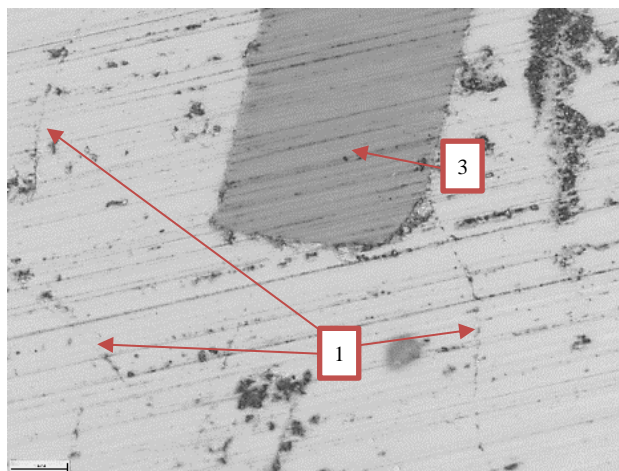
5 - микролунки

Рисунок 4.17 – Поверхности образца из керамокомпозита $SiC-SiC$ при $V = 30$ м/с



a)

б)



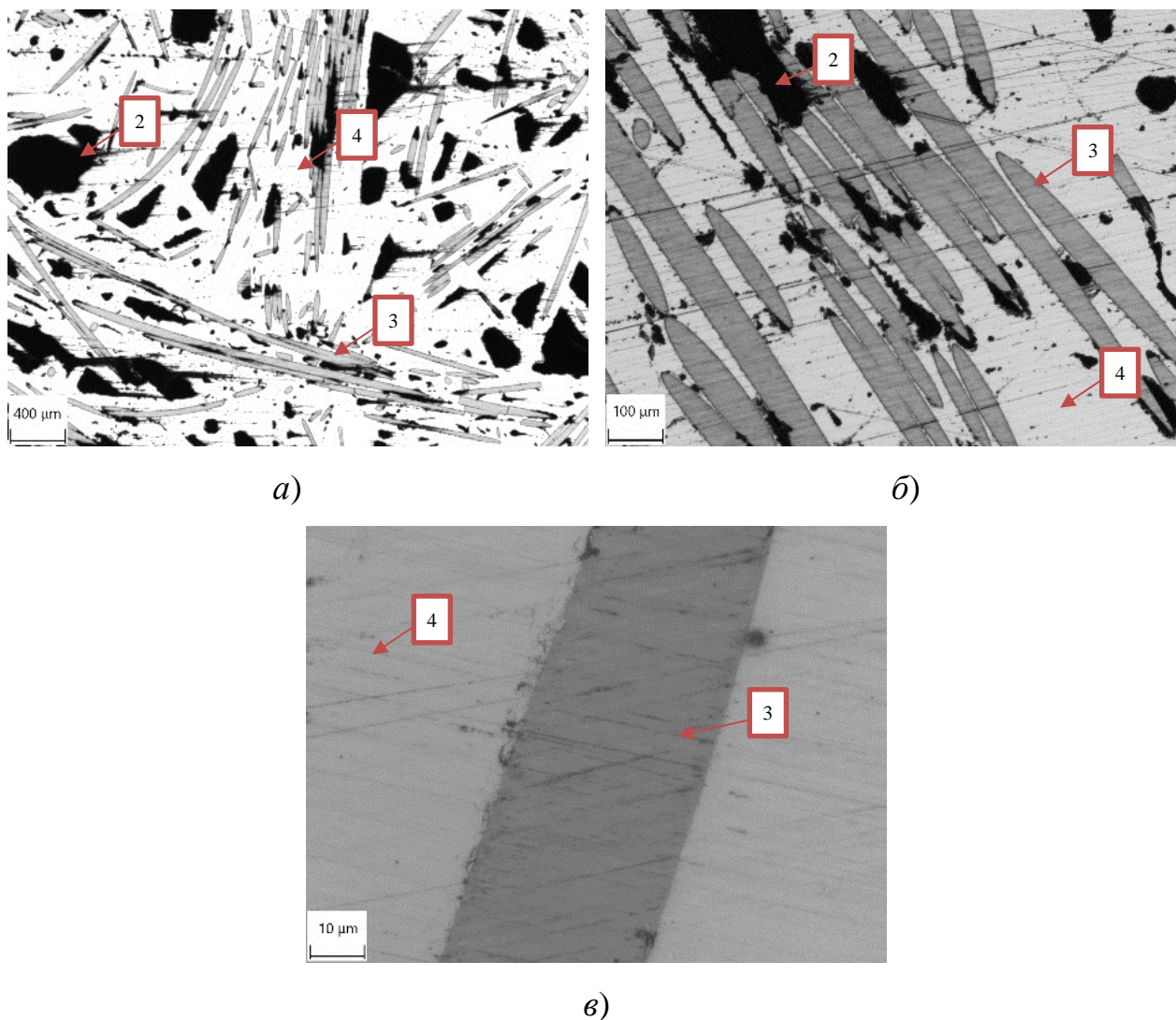
в)

а) x2,5; б) x10; в) x100

1 – трещина; 2 – поры; 3 – армированные волокна; 4 – наполнитель;
5 - микролунки

Рисунок 4.18 – Поверхности образца из керамокомпозита *SiC-SiC* при $V = 100$ м/с

Из рисунка 4.18 видно, что при обработке на скорости резания $V = 100$ м/с на обработанной поверхности образца формируются трещины и микролунки. Однако их гораздо меньше по сравнению с обработкой на скорости резания $V = 30$ м/с.



a) x2,5; б) x10; в) x100

1 – трещина; 2 – поры; 3 – армированные волокна; 4 – наполнитель;
5 - микролунки

Рисунок 4.19 – Поверхности образца из керамокомпозита *SiC-SiC* при $V = 300$ м/с

Проведенные опытно-промышленные испытания подтвердили результаты численного моделирования и экспериментальных исследований процесса высокоскоростного шлифования КМ. Как видно из рисунка 4.19, при шлифовании заготовок из КМ *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 КМ *SiC-SiC* составила $Ra = 0,03...0,06$ мкм.

Выводы по 4 главе

1. Установлено, что повышение скорости резания и уменьшение размера абразивного зерна при шлифовании изделий из КМ повышает качество поверхности, обеспечивая: снижение шероховатости обработанной поверхности и дефектов, связанных с микролунками и микротрещинами.

2. Эксперимент по обработке оптического материала показал, что повышение скорости резания в 10 раз с 30 до 300 м/с уменьшает угол распространения напряжений в 1,9 раза с 56° до 29° и глубину залегания напряжений в 2,6 раза с 6,8 до 2,6 мм.

3. Исследование формируемых при шлифовании частиц КМ (шлам) позволило установить, что при увеличении скорости резания с 30 до 300 м/с размер частиц уменьшается в 2,5-2,6 раза с 2,40 до 0,93 мкм, причем полученные на скоростях резания ~ 300 м/с частицы имеют размер меньше, чем размер частиц, используемых при изготовлении КМ, что подтверждает гипотезу об изменении механизма разрушения с транскристаллитного на интеркристаллитный.

4. Установлено, что требуемый диапазон шероховатости обработанной поверхности Ra менее 0,1 мкм с минимальными дефектами для материала ВК94-1 достигается при скорости резания $V = 300$ м/с, глубине резания $t = 0,003$ мм и продольной подаче $S = 0,65$ м/мин.

5. Даны практические рекомендации по обработке КМ с керамической матрицей, армированной нитевидными кристаллами (ККМ $SiC-SiC$). Требуемые параметры качества (шероховатость обработанной поверхности Ra менее 0,1 мкм, отсутствие микролунок и микротрещин) достигаются при скорости резания $V = 100$ м/с, глубине резания $t = 0,003$ мм и подаче $S = 0,6$ м/мин с использованием алмазных шлифовальных головок типа $AWACH 20/14$ на бакелитовой связке $B1-1$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аверков, К.В. Тепловые процессы при высокоскоростном шлифовании / К.В. Аверков, Д.С. Реченко, А.М. Ласица // Омский научный вестник. – 2011. – № 3 (103) – С. 83–87.
2. Алфутов, Н.А. Расчёт многослойных пластин и оболочек из композиционных материалов / Н.А. Алфутов, П.А. Зиновьев, В.Г. Попов. – М.: Машиностроение, 1984. – 263 с.
3. Андриевский, Р.А. Прочность тугоплавких соединений и материалов на их основе / Р.А. Андриевский, И.И. Спивак. – Челябинск: Metallургия, 1989. – 367 с.
4. Бабаков, А.А. Теория автоматического управления: учебник для вузов. В 2-х ч. Ч.1. Теория линейных систем автоматического управления [Текст] / А.А. Бабаков, А.А. Воронов, А.А. Воронова; под ред. А.А. Воронов. – М.: Высшая школа, 1986. – 367 с.
5. Балкевич, В.Л. Техническая керамика / В.Л. Балкевич. – М.: Стройиздат, 1984. – 256 с.
6. Балыков, А.В. Влияние рельефа рабочей поверхности алмазных кругов на их работоспособность и шероховатость обработанных поверхностей / А.В. Балыков // Технология металлов. – 2008. – № 11 – С. 44–52.
7. Балыков, А.В. Эффективная обработка хрупких неметаллических материалов / А.В. Балыков // Вестник МГТУ «Станкин». – 2008. – № 2 – С. 14–19.
8. Балыков, А.В. Моделирование работы единичного алмазного зерна / А.В. Балыков // Вестник МГТУ «Станкин». – 2009. – Т. 5 – № 1 – С. 30–34.
9. Буслаева, В.В. Особенности обработки керамических материалов на станке с ЧПУ / В.В. Буслаева, Н.В. Герасимов, П.В. Демешко, Р.С. Проскурин // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2017. – Т. 4 – № 1 – С. 25–29.
10. Ваксер, Д.В. Алмазная обработка технической керамики [Текст] / Д.В. Ваксер. – Ленинград: Машиностроение, Ленингр. отд., 1976. – 160 с.

11. Валерьевич, С.И. Анализ динамической прочности битумных вяжущих для асфальтобетона в терминах критерия инкубационного времени разрушения [Электронный ресурс] / С.И. Валерьевич, П.Ю. Викторovich. – Физическая мезомеханика, 2020. – doi:10.24411/1683-805X-2020-12003.
12. Воронов, А.А. Теория автоматического управления: учебник для вузов. В 2-х ч. Ч. II. Теория нелинейных специальных систем автоматического управления [Текст] / А.А. Воронов, Д.П. Ким, В.М. Лохин; под ред. А.А. Воронов. – М.: Высшая школа, 1986. – 504 с.
13. Гогоци, Г.А. Прочность и трещиностойкость керамики [Текст] Сообщ. 3 : Карбидокремниевая керамика / Г.А. Гогоци, Г.Г. Гнесин, Я.Л. Грушевский // Пробл. прочности. – 1987. – № 5 – С. 77–80.
14. Гогоци, Г.А. Изучение трещиностойкости керамики на образцах с V-образным надрезом [Текст] / Г.А. Гогоци // Пробл. прочности. – 2000. – № 1 – С. 120–127.
15. Гогоци, Г.А. Испытания керамики на трещиностойкость: EF метод [Текст] / Г.А. Гогоци // Неорган. материалы. Серия: Неорган. материалы. – 2006. – № 5 – С. 628–633.
16. Гогоци, Г.А. Трещиностойкость современной керамики и керамических композитов: EF-метод [Текст] / Г.А. Гогоци // Порошковая металлургия. – 2016. – № 7/8 – С. 39–49.
17. Григолюк, Э.И. Периодические кусочно-однородные упругие структуры / Э.И. Григолюк, Л.А. Фильштинский. – М.: Наука, 1992. – 287 с.
18. Ден-Гартог, Д.П. Механические колебания / Д.П. Ден-Гартог. – М.: Физматгиз, 1960. – 574 с.
19. Дульнев, Г.Н. Процессы переноса в неоднородных средах / Г.Н. Дульнев, В.В. Новиков. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 248 с.
20. Душко, О.В. Определение поверхностной хрупкости керамических материалов по диаграмме вдавливания индентора / О.В. Душко, Д.О. Пушкарев, Е.В. Славина // сб. ст. междунар. науч.-техн. конф.: Процессы абразивной

обработки, абразивные инструменты и материалы: Шлифабразив-2005. – Волгоград: ВИСТех, 2005. – С. 41–46.

21. Душко, О.В. Обеспечение эффективности алмазно-абразивной обработки изделий из высокотвердой керамики: автореф. дис. ... доктор наук [Электронный ресурс] / О.В. Душко. – ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», 2019. – С. 253 – URL: <https://dissercat.com/content/obespechenie-effektivnosti-almazno-abrazivnoi-obrabotki-izdelii-iz-vysokotverdoi-keramiki> (дата обращения: 21.05.2022).

22. Кобзарь, А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников / А.И. Кобзарь. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 816 с.

23. Коленко, Е.А. Технология лабораторного эксперимента / Е.А. Коленко. – Санкт-Петербург: Политехника, 1994. – 750 с.

24. Кудинов, В.А. Поузловой анализ динамических характеристик упругой системы станка / В.А. Кудинов, В.М. Чуприна // Станки и инструмент. – 1989. – № 11 – С. 8–11.

25. Кунин, И.А. Теория упругих тел с микроструктурой. Нелокальная теория упругости / И.А. Кунин. – М.: Наука, 1975. – 415 с.

26. Ландау, Л.Д. Статистическая физика. Ч. 1. / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – 3-е изд. – М.: Наука, 1976. – Т. V – 584 с.

27. Матренин, С.В. Техническая керамика / С.В. Матренин, А.И. Слосман. – Томск: Изд-во ТПУ, 2004. – 75 с.

28. Моргунов, А.П. Планирование и обработка результатов эксперимента : учеб. пособие: [для вузов по направлению подгот. дипломир. специалистов «Конструкт.-технол. обеспечение машиностроит. пр-ва», «Автоматизир. технологии и пр-ва»] / А.П. Моргунов, И.В. Ревина. – Омск: Издательство ОмГТУ, 2005. – 300 с.

29. Наерман, М.С. Прецизионная обработка деталей алмазными и абразивными брусками [Текст] / М.С. Наерман, С.А. Попов. – М.: Машиностроение, 1971. – 223 с.

30. Пановко, Я.Г. Об учете гистерезисных потерь в задачах прикладной теории упругих колебаний / Я.Г. Пановко // Журнал технической физики. – 1953. – Т. 23 – № 3 – С. 486–497.
31. Партон, В.З. Динамика хрупкого разрушения / В.З. Партон, В.Г. Борисковский. – М.: Машиностроение, 1988. – 240 с.
32. Петров, Б.Н. Система управления объектами с переменными параметрами: инженерные методы анализа и синтеза [Текст] / Б.Н. Петров, Н.И. Соколов, А.В. Липатов. – М.: Машиностроение, 1986. – 256 с.
33. Петров, Ю.В. О «квантовой» природе динамического разрушения хрупких сред / Ю.В. Петров // ДАН СССР. – 1991. – Т. 321 – № 1 – С. 66–68.
34. Поболь, И.Л. Лезвийная обработка керамических материалов / И.Л. Поболь, Г.П. Куликов // Актуальные проблемы прочности: Материалы XLIII Международной конференции. – Витебск. – С. 311–317.
35. Полетаев, В.А. Глубинное шлифование лопаток турбин: библиотека технолога / В.А. Полетаев, Д.И. Волков. – М.: Машиностроение, 2009. – 272 с.
36. 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, Р.У. Каменов, Ю.В. Титов, Д.Г. Балова. – 8 с. : ил. / А.Ю. Попов, Д.С. Реченко, Р.У. Каменов, Ю.В. Титов, Д.Г. Балова.
37. Приданцев, С.В. Свойства и применение жаропрочных сплавов / С.В. Приданцев. – М.: Наука – 1966. – 300 с.
38. Резников, А.Н. Абразивная и алмазная обработка материалов [Текст] : справ. / А.Н. Резников. – Москва: Машиностроение, 1977. – 391 с.
39. Реченко, Д.С. Повышение качества высокоскоростного затачивания твердосплавных инструментов алмазными кругами с прерывистой поверхностью: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01: защищена 23.12.09 / Д.С. Реченко. – Томск, 2009. – 162 с.
40. Сотова, Е.С. Градиентная керамика с нанодисперсным покрытием для широкой области применения / Е.С. Сотова, А.С. Верещака // Материалы

международной научно-технической конференции ААИ «Авто- мобиле- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров», посвященной 145-летию МГТУ «МАМИ». – 2010. – С. 108–120.

41. Тарнопольский, Ю.М. Пространственно армированные композиционные материалы / Ю.М. Тарнопольский, И.Г. Жигун, В.А. Поляков. – М.: Машиностроение, 1987. – 2232 с.

42. Титов, Ю.В. Разработка способа и оборудования высокоскоростного диспергирования в условиях низкотемпературного охлаждения для получения ультрадисперсных порошков: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.07: защищена 24.09.21 / Ю.В. Титов. – Томск, 2021. – 171 с.

43. Титов, Ю.В. Устройство для получения металлических порошков / Ю.В. Титов, Д.С. Реченко, А.Ю. Попов, К.К. Госина, Р.У. Каменов; Патент на полезную модель 146455 РФ, МПК В22F 31/00/ № 2014119229/02; заявлено 13.05.2014; опубл. 10.10.14. Бюл. №28. – 3с. / Ю.В. Титов, Д.С. Реченко, А.Ю. Попов, К.К. Госина, Р.У. Каменов.

44. Толубинский, Е.В. Теория процессов переноса / Е.В. Толубинский. – К.: Наук. думка, 1969. – 259 с.

45. Хазов, Б.Ф. Справочник по расчету надежности машин на стадии проектирования [Текст] / Б.Ф. Хазов, Б.А. Дидусев. – М.: Машиностроение, 1986. – 224 с.

46. Хрульков, В.А. Механическая обработка деталей из керамики и ситаллов / В.А. Хрульков. – Саратов: Саратов. ун-та, 1975. – 352 с.

47. Anderson, C.E. Ballistic performance of confined 99.5%-Al₂O₃ ceramic tiles [Электронный ресурс] / C.E. Anderson, S.A. Royal-Timmons // International Journal of Impact Engineering. – 1997. – Vol. 19 – № 8 – P. 703–713 – doi:10.1016/S0734-743X(97)00006-7.

48. Anstis, G.R. A Critical Evaluation of Indentation Techniques for Measuring Fracture Toughness: I, Direct Crack Measurements [Электронный ресурс] / G.R. Anstis, P. Chantikul, B.R. Lawn, D.B. Marshall // Journal of the American Ceramic Society. – 1981. – Vol. 64 – № 9 – P. 533–538 – doi:10.1111/j.1151-2916.1981.tb10320.x.

49. Balevičius, R. Analysis and DEM simulation of granular material flow patterns in hopper models of different shapes [Электронный ресурс] / R. Balevičius, R. Kačianauskas, Z. Mróz, I. Sielamowicz // *Advanced Powder Technology*. – 2011. – Vol. 22 – № 2 – P. 226–235 – doi:10.1016/j.apr.2010.12.005.
50. Bayesteh, H. Role of the location and size of soluble particles in the mechanical behavior of collapsible granular soil: a DEM simulation [Электронный ресурс] / H. Bayesteh, T. Ghasempour // *Computational Particle Mechanics*. – 2019. – Vol. 6 – № 3 – P. 327–341 – doi:10.1007/s40571-018-00216-x.
51. Bobaru, F. Handbook of peridynamic modeling: Advances in applied mathematics / F. Bobaru; под ред. J.T. Foster, P.H. Geubelle, S.A. Silling. – Boca Raton London New York: CRC Press Taylor & Francis Group, 2017. – 548 с.
52. Brockenbrough, J.R. Deformation of Metal-Matrix Composites with Continuons Fibers: Geometrical Effects of Fiber Distribution and Shape / J.R. Brockenbrough, S. Suresh, H.A. Wienecke // *Acta Met.* – 1991. – Т. 39 – № 5 – С. 735–752.
53. Cao, J.G. Simulation Investigation Ultrasonically Assisted Grinding of SiC Ceramics with Single Diamond Abrasive Grain [Электронный ресурс] / J.G. Cao, Y.B. Wu, H.R. Guo, Y.G. Li, M. Fujimoto, A. Ohmura // *Key Engineering Materials*. – 2012. – Т. 523–524 – С. 178–183 – doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.523-524.178.
54. Cho, N. A clumped particle model for rock [Электронный ресурс] / N. Cho, C.D. Martin, D.C. Sego // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. – 2007. – Vol. 44 – № 7 – P. 997–1010 – doi:10.1016/j.ijrmms.2007.02.002.
55. Christensen, R.M. A critical evaluation for a class of micro-mechanics models [Электронный ресурс] / R.M. Christensen // *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. – 1990. – Vol. 38 – № 3 – P. 379–404 – doi:10.1016/0022-5096(90)90005-O.
56. Eringen, A.C. Nonlocal continuum field theories / A.C. Eringen. – New York: Springer-Verlag, 2004.
57. Evans, A. Fracture Toughness: The Role of Indentation Techniques [Электронный ресурс] / A. Evans // *Fracture Mechanics Applied to Brittle Materials /*

ed. by S. Freiman. – 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959: ASTM International, 1979. – P. 112-112–24 – doi:10.1520/STP36630S.

58. Galvanetto, U. An effective way to couple FEM meshes and Peridynamics grids for the solution of static equilibrium problems [Электронный ресурс] / U. Galvanetto, T. Mudric, A. Shojaei, M. Zaccariotto // *Mechanics Research Communications*. – 2016. – Vol. 76 – P. 41–47 – doi:10.1016/j.mechrescom.2016.06.006.

59. Gingold, R.A. Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars [Электронный ресурс] / R.A. Gingold, J.J. Monaghan // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 1977. – Vol. 181 – № 3 – P. 375–389 – doi:10.1093/mnras/181.3.375.

60. Ha, Y.D. Studies of dynamic crack propagation and crack branching with peridynamics [Электронный ресурс] / Y.D. Ha, F. Bobaru // *International Journal of Fracture*. – 2010. – Vol. 162 – № 1–2 – P. 229–244 – doi:10.1007/s10704-010-9442-4.

61. Huang, H. Discrete element method for simulation of early-life thermal fracturing behavior in ceramic nuclear fuel pellets [Электронный ресурс] / H. Huang, B. Spencer, J. Hales // *Nuclear Engineering and Design*. – 2014. – Vol. 278 – P. 515–528 – doi:10.1016/j.nucengdes.2014.05.049.

62. Jiang, M. DEM simulation of soil-tool interaction under extraterrestrial environmental effects [Электронный ресурс] / M. Jiang, B. Xi, M. Arroyo, A. Rodriguez-Dono // *Journal of Terramechanics*. – 2017. – Vol. 71 – P. 1–13 – doi:10.1016/j.jterra.2017.01.002.

63. Jiang, S. Discrete element simulation of SiC ceramic with pre-existing random flaws under uniaxial compression [Электронный ресурс] / S. Jiang, X. Li, Y. Tan, H. Liu, Z. Xu, R. Chen // *Ceramics International*. – 2017. – Vol. 43 – № 16 – P. 13717–13728 – doi:10.1016/j.ceramint.2017.07.084.

64. Jiang, S. Discrete element simulation of SiC ceramic containing a single pre-existing flaw under uniaxial compression [Электронный ресурс] / S. Jiang, X. Li, L. Zhang, Y. Tan, R. Peng, R. Chen // *Ceramics International*. – 2018. – Vol. 44 – № 3 – P. 3261–3276 – doi:10.1016/j.ceramint.2017.11.099.

65. Jiang, S. Discrete element modeling of the machining processes of brittle materials: recent development and future prospective [Электронный ресурс] / S. Jiang, C. Tang, X. Li, Y. Tan, R. Peng, D. Yang, S. Liu // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2020. – Vol. 109 – № 9–12 – P. 2795–2829 – doi:10.1007/s00170-020-05792-y.
66. Jordam Caserta, A. Damping coefficient and contact duration relations for continuous nonlinear spring-dashpot contact model in DEM [Электронный ресурс] / A. Jordam Caserta, H.A. Navarro, L. Cabezas-Gómez // *Powder Technology*. – 2016. – Vol. 302 – P. 462–479 – doi:10.1016/j.powtec.2016.07.032.
67. Kamenov, R.U. Influence of vibrations arising in the technological system on the quality of processing during ultra-high-speed grinding [Электронный ресурс] / R.U. Kamenov, D.S. Rechenko // *Вестник МГТУ Станкин*. – 2020. – № 4 – С. 118–121 – doi:10.47617/2072-3172_2020_4_118.
68. Kröner, E. Elasticity theory of materials with long range cohesive forces [Электронный ресурс] / E. Kröner // *International Journal of Solids and Structures*. – 1967. – Vol. 3 – № 5 – P. 731–742 – doi:10.1016/0020-7683(67)90049-2.
69. Li, P. Effects of local strain rate and temperature on the workpiece subsurface damage in grinding of optical glass [Электронный ресурс] / P. Li, S. Chen, H. Xiao, Z. Chen, M. Qu, H. Dai, T. Jin // *International Journal of Mechanical Sciences*. – 2020. – Vol. 182 – P. 105737 – doi:10.1016/j.ijmecsci.2020.105737.
70. Liu, Y. Smoothed particle hydrodynamics simulation and experimental analysis of SiC ceramic grinding mechanism [Электронный ресурс] / Y. Liu, B. Li, C. Wu, L. Kong, Y. Zheng // *Ceramics International*. – 2018. – Vol. 44 – № 11 – P. 12194–12203 – doi:10.1016/j.ceramint.2018.03.278.
71. Lucy, L.B. A numerical approach to the testing of the fission hypothesis [Электронный ресурс] / L.B. Lucy // *The Astronomical Journal*. – 1977. – Т. 82 – С. 1013 – doi:10.1086/112164.
72. Lv, D. Numerical simulation of chipping formation process with smooth particle hydrodynamic (SPH) method for diamond drilling AlN ceramics [Электронный ресурс] / D. Lv, Y. Zhang // *The International Journal of Advanced Manufacturing*

Technology. – 2018. – Vol. 96 – № 5–8 – P. 2257–2269 – doi:10.1007/s00170-018-1724-4.

73. Madenci, E. Peridynamic Theory and Its Applications [Электронный ресурс] / E. Madenci, E. Oterkus. – New York, NY: Springer New York, 2014. – doi:10.1007/978-1-4614-8465-3.

74. Martienssen, W. Springer handbook of condensed matter and materials data / W. Martienssen, H. Warlimont. – Heidelberg New York: Springer, 2005. – 1120 p.

75. Martin, E. Understanding the tensile strength of ceramics in the presence of small critical flaws [Электронный ресурс] / E. Martin, D. Leguillon, O. Sevecek, R. Bermejo // Engineering Fracture Mechanics. – 2018. – Vol. 201 – P. 167–175 – doi:10.1016/j.engfracmech.2018.06.021.

76. Mir, A. Smooth particle hydrodynamics study of surface defect machining for diamond turning of silicon [Электронный ресурс] / A. Mir, X. Luo, A. Siddiq // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2017. – Vol. 88 – № 9–12 – P. 2461–2476 – doi:10.1007/s00170-016-8940-6.

77. Peixoto, R.G. A boundary element method formulation for quasi-brittle material fracture analysis using the continuum strong discontinuity approach [Электронный ресурс] / R.G. Peixoto, G.O. Ribeiro, R.L.S. Pitangueira // Engineering Fracture Mechanics. – 2018. – Vol. 202 – P. 47–74 – doi:10.1016/j.engfracmech.2018.09.012.

78. Petrov, Yu.V. Dependence of the dynamic strength on loading rate [Электронный ресурс] / Yu.V. Petrov, A.A. Utkin // Soviet Materials Science. – 1989. – Vol. 25 – № 2 – P. 153–156 – doi:10.1007/BF00780499.

79. Petrov, Y.V. On the Modeling of Fracture of Brittle Solids [Электронный ресурс] / Y.V. Petrov, N.F. Morozov // Journal of Applied Mechanics. – 1994. – Vol. 61 – № 3 – P. 710–712 – doi:10.1115/1.2901518.

80. Petrov, Y.V. Structural macromechanics approach in dynamics of fracture [Электронный ресурс] / Y.V. Petrov, N.F. Morozov, V.I. Smirnov // Fatigue Fracture of Engineering Materials and Structures. – 2003. – Vol. 26 – № 4 – P. 363–372 – doi:10.1046/j.1460-2695.2003.00602.x.

81. Petrov, Yu.V. Dynamic cracking resistance of structural materials predicted from impact fracture of an aircraft alloy [Электронный ресурс] / Yu.V. Petrov, E.V. Sitnikova // *Technical Physics*. – 2004. – Vol. 49 – № 1 – P. 57–60 – doi:10.1134/1.1642679.
82. Potyondy, D.O. A bonded-particle model for rock [Электронный ресурс] / D.O. Potyondy, P.A. Cundall // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. – 2004. – Vol. 41 – № 8 – P. 1329–1364 – doi:10.1016/j.ijrmmms.2004.09.011.
83. Procházka, P.P. Application of discrete element methods to fracture mechanics of rock bursts [Электронный ресурс] / P.P. Procházka // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2004. – Vol. 71 – № 4–6 – P. 601–618 – doi:10.1016/S0013-7944(03)00029-8.
84. Qiu, Y. Machining mechanism research of glass by discrete element method [Электронный ресурс] / Y. Qiu, M. Gu, Z. Wei // *Journal of Mechanical Science and Technology*. – 2015. – Vol. 29 – № 3 – P. 1283–1288 – doi:10.1007/s12206-015-0243-6.
85. Rechenko, D.S. The influence of sharpness of cutting tool on processing of steel 07X16H4B [Электронный ресурс] / D.S. Rechenko, R.U. Kamenov, D.G. Balova, A.K. Aubakirova, I.K. Chernykh // *Omsk Scientific Bulletin*. – 2019. – № 168 – С. 10–14 – doi:10.25206/1813-8225-2019-168-10-14.
86. Rechenko, D. Development and Power Calculation of a Grinding Wheel Design for Ultra-High-Speed Grinding [Электронный ресурс] / D. Rechenko, R. Kamenov // *EPJ Web of Conferences* / под ред. A. Nadykto, N. Aleksic, P. Lima, P. Pivkin, L. Uvarova, X. Jiang, A. Zelensky. – 2021. – Т. 248 – С. 04008 – doi:10.1051/epjconf/202124804008.
87. Rechenko, D.S. Study of the machining quality of CMC ceramic composite during high-speed grinding [Электронный ресурс] / D.S. Rechenko, R.U. Kamenov // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2021. – Т. 1901 – № 1 – С. 012095 – doi:10.1088/1742-6596/1901/1/012095.
88. Rogula, D. Introduction to Nonlocal Theory of Material Media [Электронный ресурс] / D. Rogula // *Nonlocal Theory of Material Media* / под ред. D.

Rogula. – Vienna: Springer Vienna, 1982. – С. 123–222 – doi:10.1007/978-3-7091-2890-9_3.

89. Schneider, S.J. The Science of Ceramic Machining and Surface Finishing: Proceedings of a Symposium, November 2-4, 1970, Held at NBS, Gaithersburg, Maryland / S.J. Schneider, R.W. Rice. – U.S. Government Printing Office, 1972. – 450 с.

90. Silling, S.A. Reformulation of elasticity theory for discontinuities and long-range forces [Электронный ресурс] / S.A. Silling // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. – 2000. – Vol. 48 – № 1 – P. 175–209 – doi:10.1016/S0022-5096(99)00029-0.

91. Silling, S.A. Peridynamic States and Constitutive Modeling [Электронный ресурс] / S.A. Silling, M. Epton, O. Weckner, J. Xu, E. Askari // Journal of Elasticity. – 2007. – Vol. 88 – № 2 – P. 151–184 – doi:10.1007/s10659-007-9125-1.

92. Tan, Y. Discrete element method (DEM) modeling of fracture and damage in the machining process of polycrystalline SiC [Электронный ресурс] / Y. Tan, D. Yang, Y. Sheng // Journal of the European Ceramic Society. – 2009. – Vol. 29 – № 6 – P. 1029–1037 – doi:10.1016/j.jeurceramsoc.2008.07.060.

93. Tao, H. Impact of Gradation Change on Mechanical Behavior of Soil: DEM and Community Detection [Электронный ресурс] / H. Tao, J. Tao // Proceedings of GeoShanghai 2018 International Conference: Fundamentals of Soil Behaviours / ed. by A. Zhou, J. Tao, X. Gu, L. Hu. – Singapore: Springer Singapore, 2018. – P. 959–966 – doi:10.1007/978-981-13-0125-4_106.

94. Teles, V.C. Abrasive wear of multilayered/gradient CrAlSiN PVD coatings: Effect of interface roughness and of superficial flaws [Электронный ресурс] / V.C. Teles, J.D.B. de Mello, W.M. da Silva // Wear. – 2017. – Vol. 376–377 – P. 1691–1701 – doi:10.1016/j.wear.2017.01.116.

95. Titov, Y. The Influence of Technological Modes of Forming the Surface, Close to Juvenile and Ultrafine Powders with a High-Speed Method in a Cryogenic Environment [Электронный ресурс] / Y. Titov, R. Kamenov, D. Belan, A. Zinkin // Metal Working and Material Science. – 2018. – Т. 20 – № 3 – С. 58–71 – doi:10.17212/1994-6309-2018-20.3-58-71.

96. Titov, Y.V. Studying the structural-phase substance of solid and powder brass samples by X-ray diffractometry [Электронный ресурс] / Y.V. Titov, D.S. Rechenko, R.U. Kamenov, S.S. Vyborov, D. Yu Belan // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Т. 1260 – № 6 – С. 062024 – doi:10.1088/1742-6596/1260/6/062024.
97. Wang, A. Effect of collinear flaws on flexural strength and fracture behavior of ZrB₂-SiC ceramic [Электронный ресурс] / A. Wang, P. Hu, B. Du, X. Zhang, J. Han, X. Luo // Ceramics International. – 2017. – Vol. 43 – № 16 – P. 14488–14492 – doi:10.1016/j.ceramint.2017.07.038.
98. Wang, X. A comparative study of numerical modelling techniques for the fracture of brittle materials with specific reference to glass [Электронный ресурс] / X. Wang, J. Yang, Q. Liu, Y. Zhang, C. Zhao // Engineering Structures. – 2017. – Vol. 152 – P. 493–505 – doi:10.1016/j.engstruct.2017.08.050.
99. Wu, Y. An experimental investigation on surface layer damage in high-efficiency and low-damage grinding of rail by slotted CBN grinding wheel [Электронный ресурс] / Y. Wu, M. Shen, M. Qu, G. Xie, Z. Shang, T. Jin // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2019. – Vol. 105 – № 7–8 – P. 2833–2841 – doi:10.1007/s00170-019-04528-x.

Приложение А

Разработка методики сравнительного анализа способов механической обработки изделий из КМ по технико-экономическим и качественным параметрам

Влияние способов шлифования на расход алмазного шлифовального инструмента

В процессе шлифования алмазный шлифовальный инструмент засаливается продуктами изнашивания и частицами снятого материала, что негативно влияет на режущую способность шлифовального инструмента и как следствие на производительность процесса и качество обработки. Для восстановления режущей способности шлифовального инструмента применяют его правку, которая с одной стороны, позволяет вести обработку обновленными алмазными зернами, что повышает производительность, но с другой стороны, увеличивается расход алмазного материала, что повышает себестоимость обработки. В связи с этим, одним из важных показателей процесса обработки является износ (расход) шлифовального инструмента.

Исследования влияния способов шлифования на расход алмазного круга проводились при обработке КМ марок *BK94-1*, *ЦМ-322*, *CC650 (CA)* и *SiC/SiC*. При шлифовании использовались идентичные режимы шлифования (обоснованные режимы обработки, которые были выбраны ранее), и алмазные круги одной марки. При традиционном шлифовании круги активно засаливаются. Для того, чтобы алмазный инструмент находился в работоспособном состоянии, осуществлялась правка на основе многопроходного метода посредством бруска (материал – карбид кремния). Для замеров расхода алмазного шлифовального инструмента применялось особое приспособление, использовался линейный метод. Далее определялись объемы материала, подвергающегося обработке, и алмазного материала.

Коэффициент шлифования определялся соотношением объемов алмазного и обрабатываемого материалов по формуле [44]:

$$K = \frac{V_{обр}}{V_{матер}}, \quad (\text{П. 1})$$

где $V_{абр}$ – объём изношенной части абразивного слоя, мм³; $V_{матер}$ – объём снятого материала, мм³.

- для сплошного шлифовального круга:

$$V_{абр} = \frac{\pi \cdot a \cdot H^2}{4}, \quad (\text{П.2})$$

где a – износ алмазосносного слоя, мм; H – ширина алмазосносного слоя, мм.

- для сегментного шлифовального круга с цилиндрическими головками:

$$V_{абр} = \frac{n \cdot \pi \cdot a \cdot d^2}{4}, \quad (\text{П.3})$$

где a – глубина износа алмазосносного слоя, мм; d – диаметр цилиндрической головки, мм; n – количество шлифовальных головок в круге.

Объём снятого КМ $V_{матер}$ рассчитывался для каждого образца. Глубина износа алмазосносного слоя a определялась с помощью специального приспособления. Замеры производились в 4-х диаметрально противоположных точках, индикатором часового типа, с ценой деления 0,001 мм. Конечное значение принималось как среднеарифметическое значение.

Результаты исследований представлены в виде диаграмм по каждому материалу обрабатываемых изделий (рисунок П.1).

Анализ результатов исследований позволил определить минимальный коэффициент шлифования при высокоскоростном шлифовании. В процессе традиционного шлифования происходит засаливание алмазосносного слоя шлифовального круга, что значительно повышает расход, снижает производительность и качество обработки. При этом в процессе работы шлифовального круга происходит неравномерный износ алмазосносного слоя, что приводит к пульсирующему контакту шлифовального круга и обрабатываемой заготовки.

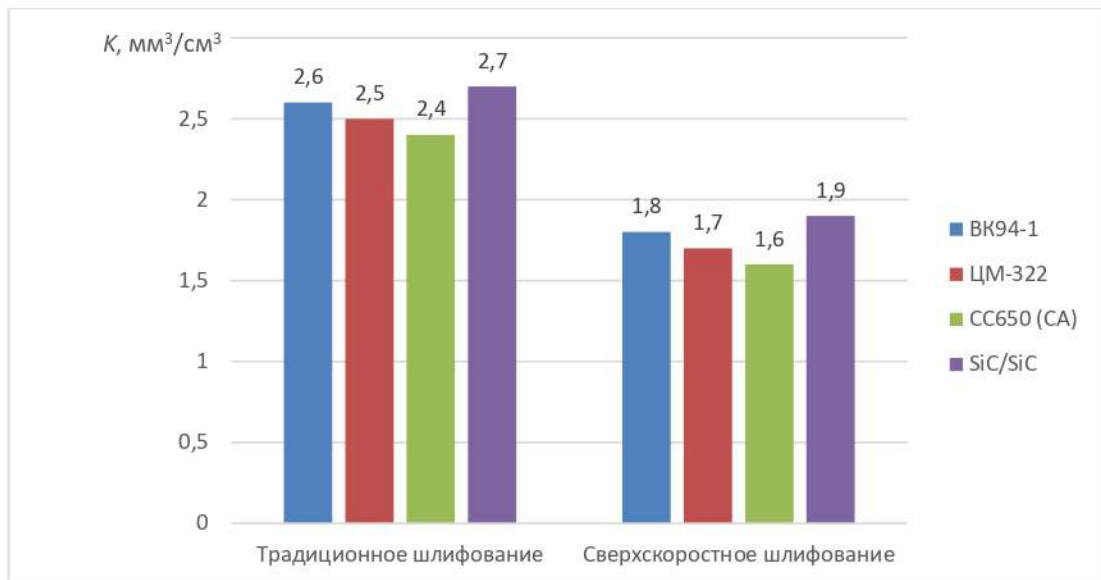


Рисунок П.1 – Коэффициент шлифования (K) при обработке КМ марок *BK94-1*, *ЦМ-322*, *CC650 (CA)* и *SiC/SiC* различными способами шлифования

В процессе высокоскоростного шлифования происходит самозатачивание алмазных зерен за счет изменения механизма их микроразрушения. Преобладающий механизм истирания и выкрашивания переходит в микроскалывание, что значительно повышает остроту алмазных зерен и позволяет долгое время находиться алмазным зернам в работоспособном состоянии. При обработке КМ высокоскоростным шлифованием расход алмазного круга в среднем на 30-35 % ниже, чем при обработке традиционным шлифованием, в следствие интенсивного засаливания и необходимостью периодической правки, что и увеличивает расход алмаза.

Влияние способов шлифования на мощность резания при шлифовании

При механической обработке КМ различными способами шлифования формируются различные силы резания, вследствие разной режущей способности шлифовального круга, что определяет мощность резания и расход электроэнергии. Одним из важных технико-экономических показателей, определяющим эффективность способа шлифования КМ, является полная мощность N , суммирующаяся узлами шлифовального оборудования (приводы шпиндельного узла, подач, подвода СОТС и т.д.). Исследования проводились с изменением полной мощности при шлифовании. КМ марок *BK94-1*, *ЦМ-322*, *CC650 (CA)* и

SiC/SiC шлифовались алмазными абразивными головками марки AW ACH 20/14 В2-01 100%. Измерение мощности в процессе осуществлялось за счет частотного регулятора, позволяющего фиксировать требуемые параметры технологической системы. Результаты исследований представлены в виде диаграмм по каждому инструментальному материалу (рисунок П.2).

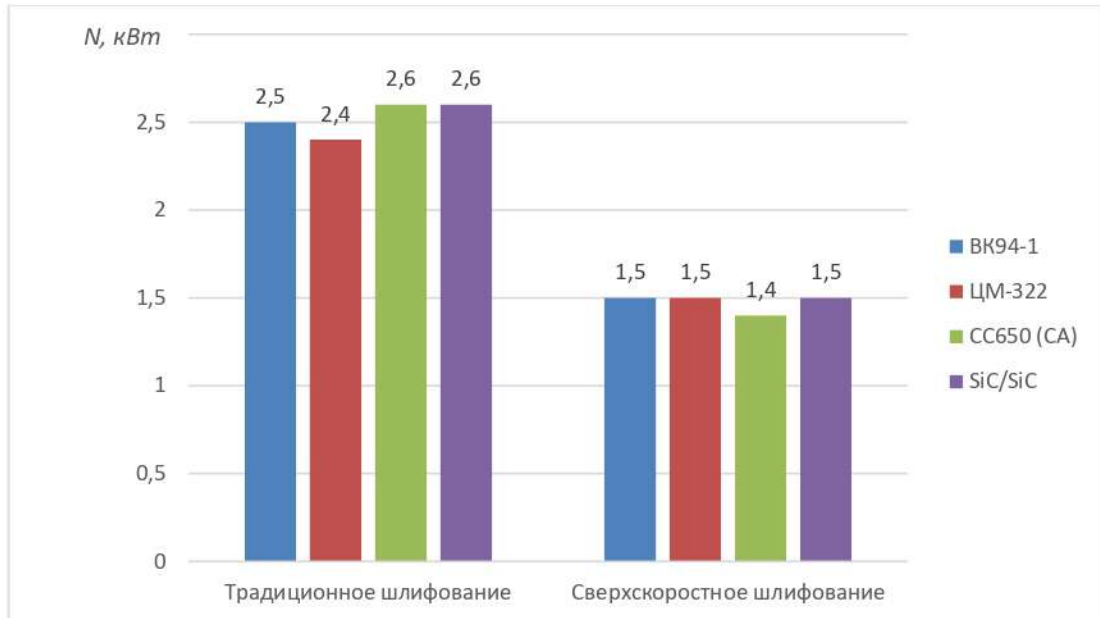


Рисунок П.2 – Полная мощность при обработке (N) КМ марок *BK94-1*, *ЦМ-322*, *CC650 (CA)* и *SiC/SiC* различными способами шлифования

Анализ результатов показал, что максимальное потребление электроэнергии (мощность резания) наблюдается при традиционном алмазном шлифовании, что объясняется невысокой режущей способностью алмазного круга в процессе резания, вследствие интенсивного засаливания шлифовального инструмента, что повышает силы резания, и как следствие мощность резания.

Обработка высокоскоростным способом в среднем на 42 % ниже по мощности, по сравнению с традиционным шлифованием. Повышение скорости резания выше 120 м/с повышает режущую способность алмазного круга, за счет изменения вида изнашивания алмазных зерен шлифовального круга. Преобладающим становится механизм микровыкрашивания и как следствие происходит самозатачивание зерен.

Влияние способов шлифования на шероховатость обработанной поверхности

Шероховатость поверхности, характеризуемая высотой микронеровностей профиля, является качественной характеристикой и оказывает влияние на интенсивность ее изнашивания в процессе эксплуатации [37].

Исследования влияния способов шлифования на шероховатость обработанной поверхности КМ марок *BK94-1*, *ЦМ-322*, *CC650 (CA)* и *SiC/SiC* проводились с использованием мобильного профилометра *MarSurf PS1* (прибор для прецизионного и нормированного измерения шероховатости и регистрации результатов контактным методом, со встроенным калибровочным эталоном). Результаты исследований представлены в виде диаграмм по каждому инструментальному материалу (рисунок П.3).

Анализ результатов показал, что наибольшая шероховатость обработанных поверхностей КМ наблюдается при традиционном алмазном шлифовании, так как обработка ведется засаленными алмазными зёрнами. Алмазные зёрна постепенно скрываются продуктами засаливания, при этом наблюдается значительное затупление зёрен, образованием площадок износа.

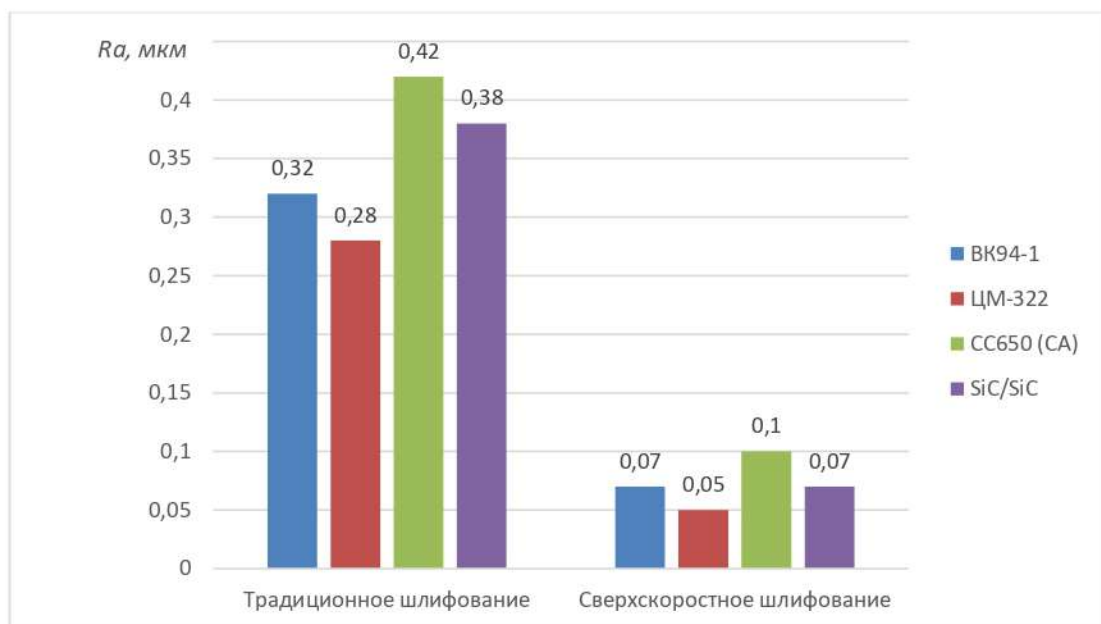


Рисунок П.3 – Шероховатость поверхности (R_a) после обработки различными способами шлифования

За счет высокоскоростного шлифования КМ обеспечено получение шероховатости, на восемьдесят процентов меньшей в сопоставлении с шероховатостью, достигаемой в случае традиционного алмазного шлифования. В случае высокоскоростного шлифования происходит процесс микровыкрашивания (вместо изнашивания зерен). В результате режущая способность зерен сохраняется на высоком уровне в течение продолжительного периода. Отмечается сохранение остроты, т.к. режущие поверхности зерен обновляются в непрерывном режиме.

На основе изучения данных, полученных в рамках экспериментов, выявлено, что результаты по каждому из способов шлифования являются однозначными. При этом существует потребность в том, чтобы использовать оценочную характеристику, которая будет отражать всю совокупность результатов, а также шероховатость поверхности. При наличии подобной характеристики будет обеспечиваться возможность обоснованно выбирать способ шлифования КМ. В этой связи в рамках данного исследования представлена методика, обеспечивающая возможность принимать во внимание параметры в виде стоимости шлифования и его качества. Допущения, принятые при проводившихся расчетах, представлены в виде идентичности квалификации работников, осуществляющих с помощью различных способов операции шлифования; идентичности формы, размеров изделий. Еще одно допущение - исходное качество заготовок также одинаковое и оцениваемый параметр – величина затрат на изменение исходного качества способом шлифования:

$$Z_{\text{кач}} = \frac{Z_{\text{шлиф}}}{K_{\text{кач}}}, \quad (\text{П.4})$$

где $Z_{\text{кач}}$ – затраты на изменение исходного качества (затраты на шлифование), руб.; $Z_{\text{шлиф}}$ – затраты на шлифование, руб.; $K_{\text{кач}}$ – коэффициент, учитывающий качественные параметры обработки.

Затраты на шлифование складываются исходя из стоимости станкочаса на деталь и определяются:

$$C_{\text{шлиф}} = C_{\text{ст/п}} + C_{\text{оснаст/п}} + C_{\text{ш.и./п}} + C_{\text{з.ш.и./п}} + C_{\text{пред.н./п}}, \quad (\text{П.5})$$

где $C_{ст/n}$ – стоимость станка на деталь, руб.; $C_{оснаст/n}$ – стоимость оснастки на деталь, руб.; $C_{ш.ш./n}$ – стоимость шлифовального инструмента на деталь, руб.; $C_{з.ш.ш./n}$ – стоимость замены шлифовального инструмента на деталь, руб.; $C_{пред.н./n}$ – стоимость предварительной настройки на деталь, руб.

Стоимость затрат станка на проведение данной шлифовальной операции на одной заготовке:

$$C_{ст/n} = \frac{(\sum T_{маш} + \sum T_{см.ш.}) \cdot C_{ст.ч.}}{60 \cdot N_{присп} \cdot K_{ст}}, \quad (П.6)$$

где $\sum T_{маш}$ – сумма всего времени, затраченного на шлифование на всех операциях в технологии, мин; $\sum T_{см.ш.}$ – сумма всего времени, затрачиваемого на отвод/подвод, смену шлифовального инструмента, мин; $C_{ст.ч.}$ – стоимость станкочаса, руб.; $N_{присп}$ – количество заготовок в приспособлении; $K_{ст}$ – коэффициент использования станка, для универсальных станков равен 0,2 – 0,3, для станков с ЧПУ 0,3 – 0,4, принято $K_{ст} = 0,35$.

Стоимость станкочаса:

$$C_{ст.ч} = \frac{C_{амор} + C_{кредит} + C_{аренда} + C_{эл.эн} + C_{з/n} + C_{соц.}}{T_{раб}}, \quad (П.7)$$

где $C_{амор}$ – амортизационные отчисления на шлифовальный станок, руб.; $C_{кредит}$ – кредитные отчисления, если станок приобретен в кредит, руб.; $C_{аренда}$ – арендная плата, зависящая от площади, занимаемой станком, руб.; $C_{эл.э}$ – затраты на электроэнергию, руб.; $C_{з/n}$ – заработная плата рабочих, руб.; $C_{соц}$ – социальные отчисления, руб.; $T_{раб}$ – время работы станка за год, часов.

Время работы станка за год:

$$T_{раб} = K_{ч} \cdot K_{д} \cdot K_{см} \cdot K_{исп},$$

где $K_{\text{ч}}$ – количество рабочих часов в смену, часов; $K_{\text{ч}} = 8$ часов; $K_{\text{д}}$ – количество рабочих дней в году, $K_{\text{д}} = 250$ дней; $K_{\text{см}}$ – количество рабочих смен; $K_{\text{см}} = 3$ смены; $K_{\text{исп}}$ – коэффициент использования станка, $K_{\text{исп}} = 0,5 - 0,9$, принят $K_{\text{исп}} = 0,7$.

Амортизационные отчисления:

$$C_{\text{амор}} = \frac{C_{\text{ст}} + C_{\text{оснаст}}}{N_{\text{амор}}},$$

где $C_{\text{ст}}$ – стоимость шлифовального станка, руб.; $C_{\text{оснаст}}$ – стоимость всей оснастки, руб.; $N_{\text{амор}}$ – количество лет амортизационных отчислений, для оборудования $N_{\text{амор}} = 5$ лет.

Кредитные отчисления:

$$C_{\text{кредит}} = \frac{(C_{\text{ст}} + C_{\text{инстр/д}}) \cdot \%_{\text{кредит}}}{100},$$

где $C_{\text{ст}}$ – стоимость шлифовального станка, руб.; $C_{\text{оснаст}}$ – стоимость всей оснастки, руб.; $\%_{\text{кредит}}$ – процент кредитных отчислений, %.

Арендная плата:

$$C_{\text{аренда}} = C_{\text{площ}} \cdot S_{\text{площ}} \cdot 12,$$

где $C_{\text{площ}}$ – стоимость за м^2 , принято $C_{\text{площ}} = 200$ руб.; $S_{\text{площ}}$ – площадь под шлифовальный станок, принято $S_{\text{площ}} = 15 \text{ м}^2$.

Затраты на электроэнергию:

$$C_{\text{эл.э}} = C_{\text{кВт}} \cdot N_{\text{ст}} \cdot T_{\text{раб}},$$

где $C_{\text{кВт}}$ – стоимость за 1 кВт электроэнергии, принято $C_{\text{кВт}} = 3,64$ руб.; $N_{\text{ст}}$ – мощность станка, кВт; $T_{\text{раб}}$ – время работы станка за год, часов.

Заработная плата рабочих:

$$C_{\text{з/п}} = C_{\text{тар}} \cdot T_{\text{раб}} \cdot K_{\text{см}},$$

где $C_{тар}$ – стоимость 1 часа по тарифной сетке, в зависимости от квалификации, принято $C_{тар} = 125$ руб.; $T_{раб}$ – время работы станка за год, часов; $K_{см}$ – количество рабочих смен.

Социальные отчисления:

$$C_{соц} = \frac{C_{з/н} \cdot \%_{соц}}{100},$$

где $C_{з/н}$ – заработная плата рабочих, руб.; $\%_{соц}$ – процент социальных отчислений, %.

Стоимость на оснастку складывается из стоимости приспособления, которое ложится на себестоимость изготовления 1 детали для шлифовальной операции:

$$C_{оснаст/н} = \frac{C_{оснаст}}{N_{смен}},$$

где $C_{оснаст/м.п.}$ – стоимость всей оснастки, руб.; $N_{смен}$ – ресурс оснастки (число смен обрабатываемых заготовок).

Стоимость шлифовального инструмента на деталь, где учитывается начальная стоимость шлифовального инструмента, стоимость его восстановления, количество допустимых восстановлений и стойкость после восстановления:

$$C_{ш.и./н} = \frac{C_{н.и.} + (C_{восс} \cdot N_{восс})}{(T_{н.и.} + (T_n \cdot N_{восс}))},$$

где $C_{ш.и./н}$ – стоимость шлифовального инструмента на 1 деталь, руб.; $C_{н.и.}$ – стоимость нового шлифовального инструмента, руб.; $C_{восс}$ – стоимость восстановления шлифовального инструмента, руб.; $T_{н.и.}$ – стойкость нового шлифовального инструмента, мин; T_n – стойкость после восстановления, мин; $N_{восс}$ – количество возможных восстановлений.

Стоимость шлифовального инструмента на деталь берется как сумма всех входящих в нее стоимостей инструментов. Стоимость восстановления шлифовального инструмента на деталь – это соотношение времени на восстановление шлифовального инструмента на деталь и стоимости станкочаса:

$$C_{\text{восст.ш.и./п}} = \frac{T_{\text{восст.ш.и.}} \cdot C_{\text{ст.ч.}}}{60 \cdot N_{\text{шт/пов}}},$$

где $T_{\text{восст.ш.и.}}$ – время на восстановление шлифовального инструмента, мин; $C_{\text{ст.ч.}}$ – стоимость станкочаса, руб.; $N_{\text{шт/пов}}$ – количество заготовок, которое можно обработать восстановленной поверхностью.

Время от операции до операции – это стоимость замены шлифовального инструмента, входящая в технологический процесс на деталь:

$$C_{\text{з.ш.и./п}} = \frac{N_{\text{замен}} \cdot T_{\text{смены}} \cdot C_{\text{ст.ч.}}}{3600 \cdot N_{\text{п.пр.}}},$$

где $N_{\text{замен}}$ – количество замен шлифовального инструмента ($N_{\text{опер}} - 1$), т.е. количество операций в технологическом процессе. Если в технологическом процессе 1 операция, то $N_{\text{замен}} = 0$ и значение $N_{\text{замен}}$ вводится равным 0. Соответственно расчет $C_{\text{з.ш.и./п}}$ будет равным 0. $T_{\text{смены}}$ – время смены шлифовального инструмента, мин; $C_{\text{ст.ч.}}$ – стоимость станкочаса, руб.; $N_{\text{п.пр.}}$ – количество заготовок в приспособлении.

Расчет стоимости предварительной настройки шлифовального инструмента:

$$C_{\text{пред.н./п}} = \frac{(C_{\text{пред.н.}}/60) \cdot T_{\text{пред.н.}}}{N_{\text{шт}}},$$

где $C_{\text{пред.н.}}$ – стоимость предварительной настройки в час, руб.; $T_{\text{пред.н.}}$ – время предварительной настройки, мин; $N_{\text{шт}}$ – стойкость (количество заготовок).

Коэффициент, учитывающий качественные параметры обработки определяется по формуле:

$$K_{\text{кач}} = \frac{Ra_{\text{исх}}}{Ra_{\text{обр}}},$$

где $Ra_{\text{исх}}$ – исходная шероховатость поверхности, мкм; $Ra_{\text{обр}}$ – шероховатость, полученная в результате обработки, мкм.

Формулы учитывают не только стоимостные, но и качественные параметры способов шлифования КМ и позволяют определить предпочтительный способ шлифования в условиях принятых допущений. При необходимости данная

методика может быть адаптирована под любые другие сравниваемые способы шлифования.

Исходные данные: коэффициент использования станка, $K_{см} = 0,35$; количество рабочих часов в смену, $K_ч = 8$ часов; количество рабочих дней в году, $K_д = 250$ дней; количество рабочих смен, $K_{см} = 3$ смены; коэффициент использования станка, $K_{исп} = 0,7$; количество лет амортизационных отчислений, для оборудования, $N_{амор} = 5$ лет; процент кредитных отчислений, $\% = 20$; стоимость аренды за m^2 , $C_{площ} = 200$ руб.; площадь под шлифовальный станок, $S_{площ} = 15 m^2$; стоимость за 1 кВт электроэнергии, $C_{квт} = 3,64$ руб.; стоимость 1 часа по тарифной сетке, в зависимости от квалификации, $C_{тар} = 125$ руб.; процент социальных отчислений, $\% = 38,2$; ресурс оснастки (число смен обрабатываемых заготовок), $N_{смен} = 10000$; стойкость нового шлифовального инструмента и стойкость после восстановления, $T_{н.и.} = T_n = 480$ мин; количество возможных восстановлений, $N_{восс} = 10$; время на восстановление шлифовального инструмента, $T_{восс.и.и.} = 15$ мин; количество заготовок в приспособлении, $N_{н.пр.} = 1$; время предварительной настройки, $T_{пред.н.} = 1$ мин; исходная шероховатость поверхности, $Ra_{исх} = 0,63$ мкм. Результаты сравнительного анализа способов шлифования КМ по показателю затрат на качество приведены в таблице П.1.

Анализ полученных результатов 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% – классическом шлифовании 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% – классическом шлифовании с последующим полированием.

Таблица П.1 – Результаты сравнительного анализа способов обработки КМ

Марка твердого сплава	Стоимость оборудования, тыс. руб.	Стоимость оснастки, тыс. руб.	Сумма всего времени, затраченного на шлифование, мин	Сумма всего времени, затрачиваемого на отвод/подвод, смену шлифовального инструмента, мин	Шероховатость, полученная в результате обработки, мкм	Стоимость станка на деталь, руб.	Стоимость оснастки на деталь, руб.	Стоимость шлифовального инструмента на деталь, руб.	Стоимость замены шлифовального инструмента на деталь, руб.	Стоимость предварительной настройки на деталь, руб.	Стоимость СОЖ на деталь, руб.	Полная стоимость шлифования, руб.
Классическое шлифование (со скоростью резания 30-50 м/с)												
<i>BK94-1</i>	2000	200	1	1	0,32	56,06	1,02	0,14	0	0,005	0,3	57,6
<i>ЦМ-322</i>					0,28	49,05	0,89	0,13	0	0,005	0,3	50,4
<i>CC650 (CA)</i>					0,42	73,57	1,33	0,19	0	0,007	0,4	75,6
<i>SiC/SiC</i>					0,38	66,57	1,21	0,17	0	0,006	0,4	68,4
Классическое шлифование + полирование												
<i>BK94-1</i>	3000	300	2	4	0,06	36,32	0,29	0,04	0,18	0,001	0,2	37,0
<i>ЦМ-322</i>					0,04	24,21	0,19	0,02	0,12	0,001	0,1	24,7
<i>CC650 (CA)</i>					0,09	54,48	0,43	0,05	0,26	0,001	0,3	55,5
<i>SiC/SiC</i>					0,06	36,32	0,29	0,04	0,18	0,001	0,2	37,0
Высокоскоростное шлифование (головками 20/14)												
<i>BK94-1</i>	4500	450	1	3	0,07	32,86	0,50	0,11	0	0,001	0	33,5
<i>ЦМ-322</i>					0,05	23,47	0,36	0,08	0	0,001	0	23,9
<i>CC650 (CA)</i>					0,1	46,94	0,71	0,15	0	0,001	0	47,8
<i>SiC/SiC</i>					0,07	32,86	0,50	0,11	0	0,001	0	33,5
Высокоскоростное шлифование в два этапа (головками 40/28 и 20/14)												
<i>BK94-1</i>	4500	450	1,5	3	0,07	36,93	0,50	0,08	0,24	0,002	0	37,8
<i>ЦМ-322</i>					0,05	26,38	0,36	0,06	0,17	0,001	0	27,0
<i>CC650 (CA)</i>					0,1	52,76	0,71	0,12	0,34	0,002	0	53,9
<i>SiC/SiC</i>					0,07	36,93	0,50	0,08	0,24	0,002	0	37,8

Учитывая стоимость шлифовального инструмента, предварительной настройки на деталь и времени на смену инструмента, высокоскоростной способ шлифования 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.

Патент

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 193951

Шлифовальный круг для высокоскоростной обработки

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Омский государственный технический университет" (ОмГТУ) (RU)*

Авторы: *Попов Андрей Юрьевич (RU), Реченко Денис Сергеевич (RU), Титов Юрий Владимирович (RU), Каменов Ренат Уахитович (RU), Балова Дарья Георгиевна (RU)*

Заявка № 2019126903

Приоритет полезной модели 27 августа 2019 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 21 ноября 2019 г.

Срок действия исключительного права на полезную модель истекает 27 августа 2029 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ивлиев


Акты испытаний и внедрения

УТВЕРЖДАЮ

Директор ОЗ

АО «ОДК-Авиадвигатель»



И.Г.Нутфуллин

2021 г.

А К Т

испытаний сверхскоростного шлифования по результатам диссертационной работы Каменова Рената Уахитовича, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.07 – «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки»

Настоящим актом удостоверяется, что результаты диссертационной работы Каменова Рената Уахитовича на тему «ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СВЕРХСКОРОСТНОЙ ШЛИФОВАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ВЫСОКОТВЕРДОЙ КЕРАМИКИ» актуальны для АО «ОДК-АВИАДВИГАТЕЛЬ» и подтверждают техническую возможность качественной механической обработки изделий из керамокомпозита.

Результаты исследований сверхскоростного шлифования композитов с керамической матрицей, армированной нитевидными кристаллами (керамокомпозит SiC-SiC) позволяют производить обработку, исключая доводочные и полировальные операции, обеспечивая шероховатость обработанной поверхности до $Ra = 0,06$ мкм, сокращая время и затраты на операцию на 35-40%.

Наилучшие результаты сверхскоростного шлифования.

Эксперименты проводились с использованием шлифовальных головок на бакелитовой связке. Результаты обработки при скорости резания $V = 300$ м/с, глубине резания $t = 3$ мкм/дв. ход и подаче $S = 600$ мм/мин с использованием шлифовальных головок AW ACM 40/28 и 20/14 на бакелитовой связке В1-1 приведены на рисунке 1 и 2 соответственно.

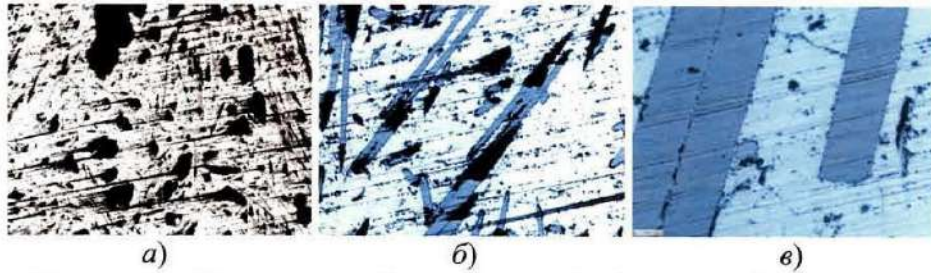


Рисунок 1 – Поверхность образца после обработки шлифовальными головками AW ACM 40/28, при а) $\times 2,5$; б) $\times 10$; в) $\times 50$

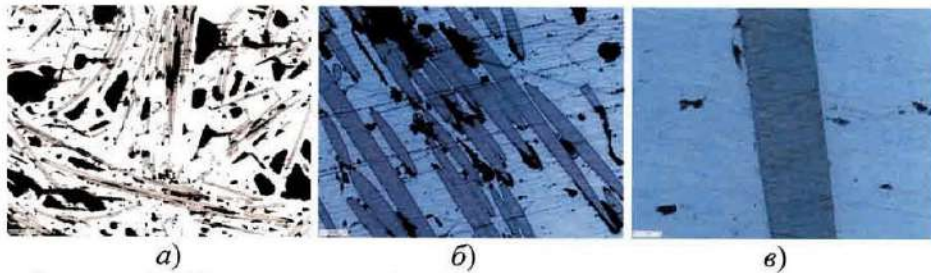


Рисунок 2 – Поверхность образца после обработки шлифовальными головками AW ACM 20/14, при а) $\times 2,5$; б) $\times 10$; в) $\times 50$

После обработки шлифовальными головками AW ACM 40/28 шероховатость обработанной поверхности составила $R_a = 0,12 \dots 0,20$ мкм, а при обработке шлифовальными головками AW ACM 20/14 шероховатость обработанной поверхности составила $R_a = 0,03 \dots 0,06$ мкм, при этом отсутствуют трещины и вырывы как основы (керамики), так и армирующих волокон, что может говорить о снижении сил резания и контактных температурах.

Из данных снимков можно сделать вывод о том, что уменьшение зернистости абразивного материала положительно сказывается на качестве обработанной поверхности.


 Главный инженер  Н.Н. Черкашневa
 Главный технолог  Д. В. Кайсин



АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«ОБЪЕДИНЕННАЯ ДВИГАТЕЛЕСТРОИТЕЛЬНАЯ
КОРПОРАЦИЯ» (АО «ОДК»)

«УТВЕРЖДАЮ»
Главный инженер
производственного комплекса
«Салют» АО «ОДК»



Ю.Р. Нуртдинов

2021 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы Каменова Рената Уахитовича, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.07 - «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки»

Настоящим актом удостоверяется, что результаты диссертационной работы Каменова Рената Уахитовича на тему «ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СВЕРХСКОРОСТНОЙ ШЛИФОВАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ВЫСОКОТВЕРДОЙ КЕРАМИКИ» внедрены в производственную деятельность производственного комплекса «Салют» АО «ОДК».

Использование результатов исследования автора в области сверхскоростного шлифования высокотвердой керамики позволяют сократить технологический процесс, исключая доводочные и полировальные операции, обеспечивая шероховатость обработанной поверхности $Ra = 0,03...0,06$ мкм, сокращая время и затраты на операцию на 10-15%.

Начальник управления
инструментального производства
производственного комплекса
«Салют» АО «ОДК»

А.В. Буянов

Исходный код программы для расчета шероховатости Ra , написанный на языке программирования Python

```
import numpy as np
import pandas as pd
from sympy import *
from scipy.optimize import fsolve
import matplotlib.pyplot as plt
table = pd.read_excel('XXX.xlsx') #Название файла с данными
t = 0
i = 0
j = 1
sv1=0.0
exit = True
x=Symbol('x')
while exit:
    koorY=table.values[i,1]+table.values[j,1]
    koorX=table.values[j,0]-table.values[i,0]
    sv1+=(koorY-2*x)/2*(koorX)
    i = i+1
    j = j+1
    if len(table)==j:
        exit = False
koofY=solve(sv1)
print(koofY)
tn = 0
i = 0
j = 1
exit = True
```

```
while exit:
    tn += abs(((table.values[i,1]-koofY)+(table.values[j,1]-koofY))/2*(table.values[j,0]-
table.values[i,0]))
    i = i+1
    j = j+1
    if len(table)==j:
        exit = False
print("Шероховатость", (tn/(len(table)-1)))
x = table.values[:, 0]
y = table.values[:, 1]-koofY
plt.figure(figsize=(15, 5))
plt.plot(x, y)
plt.show()
```