

На правах рукописи

Алехин Сергей Сергеевич

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА
И ОГРАНИЧЕНИЕ ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ ПРИ АБРАЗИВНОЙ
ОБРАБОТКЕ АЛМАЗНЫМИ ПАСТАМИ ТОНКИХ ПЛАСТИН
ИЗ КАРБИДА КРЕМНИЯ**

Специальность 2.5.6. – Технология машиностроения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Брянск 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Брянский государственный технический университет».

Научный руководитель: **Бишутин Сергей Геннадьевич**,
доктор технических наук, профессор, профессор
кафедры «Автомобильный транспорт» ФГБОУ ВО
«Брянский государственный технический
университет»

Официальные
оппоненты: **Теплова Татьяна Борисовна**,
доктор технических наук, профессор, научный
консультант компании ООО «Фрезарт» (г. Москва)

Асаев Александр Семёнович,
кандидат технических наук, начальник управления
научной и инновационной деятельности ФГБОУ
ВО «Рязанский государственный университет
имени С.А. Есенина»

Ведущая организация ФГБОУ ВО "Рыбинский государственный
авиационный технический университет имени
П.А. Соловьева" (г. Рыбинск Ярославской области)

Защита состоится «27» июня 2023 г. в 14.00 часов на заседании
диссертационного совета 24.2.277.01, по адресу: 241035, г. Брянск, ул. Харьковская,
д. 10-Б, учебный корп. № 4, ауд. Б101.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Брянский
государственный технический университет» и по адресу в сети интернет:
<http://www.tu-bryansk.ru/mainpage/dissertatsii/alekhin-sergey-sergeevich>

Отзывы на автореферат высылать по адресу: 241035, г. Брянск, бульвар 50 лет
Октября, д. 7, ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет».

Автореферат разослан « » 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.277.01
доктор технических наук, доцент

Нагоркин Максим Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Керамические изделия на основе карбида кремния широко используются в сфере автомобилестроения, авиакосмической отрасли, точного машиностроения и атомной энергетики. Для изготовления наиболее ответственных изделий из карбида кремния требуются монокристаллические пластины определенного политаipa диаметрами 76-300 мм и небольшой толщины (0,27-0,75 мм), выполняющие, как правило, роль несущей основы (подложки). Наиболее широкое применение в промышленности нашли две модификации (два политаipa) карбида кремния: 4H-SiC и 6H-SiC. Пластины из этих керамических материалов используются для изготовления биполярных и полевых транзисторов, быстровосстанавливающихся диодов и диодов Шоттки, микросхем и другой продукции для различных отраслей машиностроения. К таким керамическим изделиям предъявляются весьма высокие требования к геометрическим и электрофизическим параметрам, а также к качеству их поверхностей, что существенно осложняет процесс изготовления данной продукции, значительная часть которой (десятки процентов) бракуется из-за невыполнения этих требований.

Одним из ответственных этапов изготовления керамических подложек является обработка обратной стороны пластины для получения требуемой толщины (утонение пластины). На таких этапах зачастую применяют абразивную обработку алмазными пастами с микропорошком различной зернистости. Однако при ошибочном выборе технологических режимов такой обработки дорогостоящее керамическое изделие (себестоимость может достигать сотен тысяч рублей) растрескивается, существенно деформируется или образуются поверхностные микротрещины, приводящие в дальнейшем к разрушению пластин из-за нагрузок, возникающих на последующих технологических операциях изготовления продукции. Уровень современных достижений в данной области исследований не позволяет предотвратить формирование таких дефектов карбидокремниевых пластин при указанной абразивной обработке. Поэтому изучение влияния технологических режимов обработки алмазными пастами на параметры качества и размер поверхностных микротрещин карбидокремниевых пластин позволит существенно снизить уровень брака при производстве продукции из керамики. В этой связи данное исследование является актуальным и необходимо для устойчивого развития машиностроения и электронной промышленности страны.

Объектами исследования являются технологические операции абразивной обработки алмазными пастами карбидокремниевых пластин (технологические операции алмазно-абразивной обработки обратной стороны подложек).

Предмет исследования – взаимосвязи технологических режимов абразивной обработки алмазными пастами со скоростью съема керамического материала, параметрами качества и размерами поверхностных микротрещин карбидокремниевых пластин.

Целью исследования является снижение брака при производстве изделий из карбидной керамики за счет научно обоснованного назначения режимов абразивной обработки алмазными пастами обратной стороны карбидокремниевых пластин, ограничивающих трещинообразование и обеспечивающих требуемое качество обработанной поверхности.

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

1. Проанализировать требования к качеству обработки обратной стороны карбидокремниевых пластин и технологические трудности, возникающие при абразивной обработке алмазными пастами керамических подложек.
2. Обосновать возможность выбора режимов абразивной обработки карбидокремниевых пластин различных политипов, при которых формируемые микротрещины не способны привести к разрушению изделия на последующих технологических этапах изготовления продукции из карбидной керамики.
3. Выполнить теоретические и экспериментальные исследования для выявления взаимосвязей режимов абразивной обработки алмазными пастами со скоростью съема керамического материала, параметрами качества и размерами поверхностных микротрещин карбидокремниевых пластин.
4. Установить возможности абразивной обработки алмазными пастами по изменению скорости съема карбида кремния и размеров поверхностных микротрещин тонких керамических пластин.
5. Разработать методику назначения режимов абразивной обработки алмазными пастами карбидокремниевых пластин, ограничивающих трещинообразование и обеспечивающих требуемое качество обработанной поверхности.
6. Оценить экономическую эффективность результатов исследований при их использовании в производстве продукции АО «Группа Кремний Эл» (г. Брянск).

Методы исследования.

Исследования базировались на основных положениях технологии машиностроения, теоретической механики, теории вероятностей и математической статистики. Экспериментальные исследования проводились в лабораторных и производственных условиях с использованием технологической установки по обработке сверхтвердых материалов и применением современной контрольно-измерительной аппаратуры. Результаты экспериментов обрабатывались методами математической статистики с применением ЭВМ.

Научная новизна работы:

1. Выявлена взаимосвязь скорости съема керамического материала карбидокремниевой пластины с длиной поверхностных микротрещин, формируемых при абразивной обработке алмазными пастами, причем при изменении скорости съема карбида кремния с 22 до 4 мкм/ч за счет варьирования технологических режимов обработки длина микротрещин уменьшается в 5-10 раз (п. 2 и 7 паспорта научной специальности 2.5.6.).
2. Получены зависимости скорости съема карбида кремния политипов 4Н и 6Н при утонении керамических пластин от основных технологических режимов абразивной обработки алмазными пастами (зернистости алмазного микропорошка, частоты вращения притира, усилия прижатия карбидокремниевых пластин к притиру), причем скорость съема керамики прямо пропорциональна усилию прижатия пластин к притиру, а влияние частоты вращения притира на производительность обработки носит нелинейный характер (п. 2 и 7 паспорта научной специальности 2.5.6.).
3. Установлено, что уменьшить на 10-15% деформацию (прогиб) тонких карбидокремниевых пластин, являющуюся следствием разных маршрутов обработки противоположных поверхностей, возможно путем дополнительной очистки обратной стороны подложки глицерином ($C_3H_8O_3$, ГОСТ 6259-75) от шлама

и остатков алмазной пасты с поверхностно-активными веществами (п. 6 и 7 паспорта научной специальности 2.5.6.).

Теоретическая значимость работы.

Обоснована возможность выбора технологических режимов абразивной обработки алмазными пастами карбидокремниевых пластин различных политипов, при которых формируемые микротрещины не способны привести к разрушению изделия на последующих технологических этапах изготовления продукции из карбидной керамики.

Практическая значимость результатов исследования обусловлена:

1. Методикой назначения технологических режимов абразивной обработки алмазными пастами карбидокремниевых пластин, ограничивающих трещинообразование и обеспечивающих требуемое качество обработанной поверхности.
2. Установленными диапазонами изменения размеров поверхностных микротрещин и скорости съема материала при варьировании технологических режимов абразивной обработки алмазными пастами карбидокремниевых пластин.
3. Новым способом односторонней абразивной обработки пластин из карбида кремния, позволяющим повысить качество и снизить уровень брака при изготовлении продукции из карбидной керамики (патент № 2 790 244).

На защиту выносятся:

1. Структура, этапы проведения и реализации комплекса теоретико-экспериментальных исследований для выявления взаимосвязей режимов абразивной обработки алмазными пастами со скоростью съема керамического материала, размерами поверхностных микротрещин и параметрами качества обратной стороны карбидокремниевых пластин.
2. Научное обоснование возможности выбора режимов абразивной обработки алмазными пастами карбидокремниевых пластин различных политипов, при которых формируемые микротрещины не способны привести к разрушению изделия на последующих технологических этапах изготовления продукции из карбидной керамики.
3. Результаты теоретических и экспериментальных исследований по изучению процессов съема керамического материала, формирования параметров качества и поверхностных микротрещин карбидокремниевых пластин при абразивной обработке алмазными пастами.
4. Методика назначения технологических режимов абразивной обработки алмазными пастами карбидокремниевых пластин, ограничивающих трещинообразование и обеспечивающих требуемое качество обработанной поверхности.
5. Новый способ односторонней абразивной обработки пластин из карбида кремния, позволяющий повысить качество и снизить уровень брака при изготовлении продукции из карбидной керамики.

Достоверность результатов и выводов подтверждается результатами экспериментов, проведенных в лабораторных и производственных условиях; использованием апробированных методик при проведении исследований; внедрением полученных результатов в производство.

Личный вклад автора состоит в выполнении обзора состояния исследуемого

вопроса, в определении цели и задач работы, в проведении экспериментальных исследований и обобщении их результатов; в формулировании выводов, в подготовке совместно с научным руководителем статей и тезисов докладов, участии в разработке нового способа абразивной обработки карбидокремниевых пластин.

Реализация результатов работы. Результаты работы внедрены на предприятии АО «Группа Кремний ЭЛ» (Брянская область, г. Брянск), что позволило снизить уровень брака при изготовлении продукции на основе карбидокремниевых пластин на 15-20 % за счет ограничения трещинообразования при абразивной обработке обратных сторон подложек.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы были представлены, обсуждены и получили положительную оценку на следующих научных конференциях: Международная научно-техническая конференция «Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации» (Курск, 2018); Международная научно-техническая конференция «Техника и технологии: пути инновационного развития» (Курск, 2018); Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Прогрессивные технологии и процессы» (Курск, 2019); Международная научно-практическая конференция «Автоматизированное проектирование в машиностроении» (Новокузнецк, 2019); Международная научно-техническая конференция «Обеспечение и повышение качества изделий машиностроения и авиакосмической техники» (Брянск, 2020); Международная научная конференция «Проблемы прикладной механики» (Брянск, 2021).

Результаты диссертационной работы опубликованы в 17 печатных работах, в том числе 5 - из Перечня ВАК, 2 - в изданиях, индексируемых в международной базе Scopus, 1 – патент РФ на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, 4 приложений, списка литературы из 123 наименований. Работа изложена на 144 страницах машинописного текста, включая 60 рисунков и 31 таблицу.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отражена актуальность темы исследований, произведена оценка степени разработанности темы исследования, поставлена цель проводимых исследований, сформулированы научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, перечислены основные положения, выносимые на защиту, дана оценка степени достоверности проведенных исследований, представлена апробация полученных результатов.

В первой главе выполнен анализ результатов исследований российских и зарубежных ученых в области абразивной обработки керамических материалов, технологий изготовления карбидокремниевых пластин и изделий на их основе.

В работах Беляева А.Е., Гусева В.В., Душко О.В., Зинкина С.В., Асаева А.С., Филатова Ю.Д., Калафатовой Л.Б., Муратова К.Р., Шумячера В.М., Тепловой Т.Б., Радьковой Н.О., S.Agarwal, R.Venkateswara, M.Golabczak, T.Kato и др. представлены результаты исследований различных процессов абразивной обработки керамических материалов с целью повышения качества изделий. Однако вопросы

назначения технологических режимов абразивной обработки, при которых формируемые поверхностные микротрещины не способны привести к разрушению изделия на последующих технологических этапах изготовления продукции из карбидной керамики, практически не затрагиваются.

Установлено, что абразивная обработка карбидокремниевых пластин сопряжена со следующими технологическими трудностями: формирование дефектного (нарушенного) слоя значительной толщины с поверхностными микротрещинами; скалывание и разрушение керамики; существенная деформация керамических пластин в процессе обработки («эффект Тваймана»); низкая производительность обработки вследствие необходимости обеспечения высоких требований к качеству изделия и хрупкости керамических материалов.

В главе рассмотрены основные требования, предъявляемые к карбидокремниевым пластинам (рис. 1), а также требования к параметрам качества обратной стороны подложки после абразивной обработки. Так, в частности, необходимо обеспечить параметр шероховатости поверхности R_a около 1 мкм (для надежного формирования покрытий и крепления изделия в корпусе), деформация (прогиб) пластины не должен превышать 50 мкм, толщина дефектного (нарушенного) слоя и размер поверхностных микротрещин допускаются не более 20-40 мкм во избежание разрушения изделия.

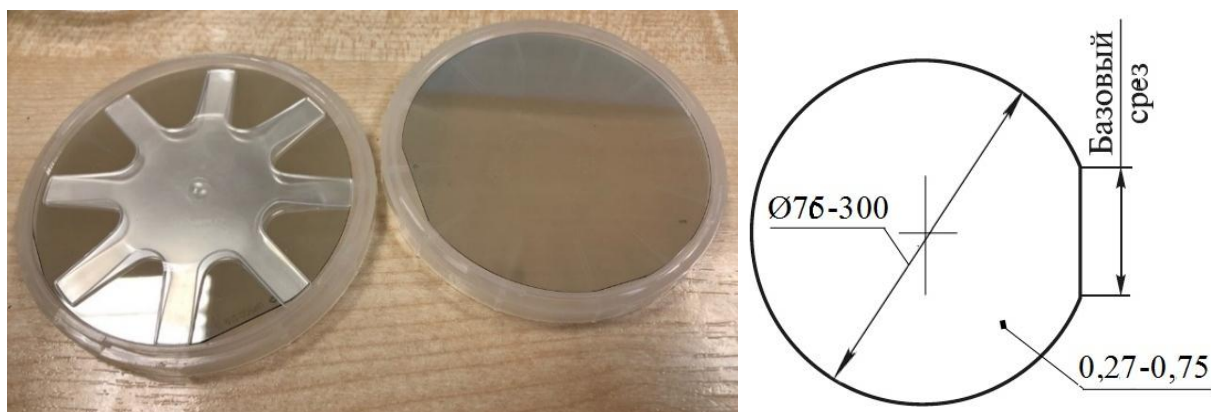


Рисунок 1. Внешний вид (слева) и эскиз (справа) карбидокремниевых пластин

Проведенный анализ результатов исследований в рассматриваемой области показал, что отсутствует научно обоснованный подход к назначению режимов абразивной обработки алмазными пастами обратной стороны подложки, ограничивающих трещинообразование и обеспечивающих требуемое качество обработанной поверхности. Это и определило цель и задачи данной работы, представленные на страницах 3 и 4 автореферата.

Во второй главе представлена общая стратегия научных исследований, методика экспериментальных исследований и обработки полученных статистических данных (рис.2), дано описание оборудования, приборов и обрабатываемых карбидокремниевых пластин.

В качестве образцов использовались пластины из карбида кремния 4Н и 6Н политипов диаметром 76-100 мм и толщиной 0,37-0,52 мм.

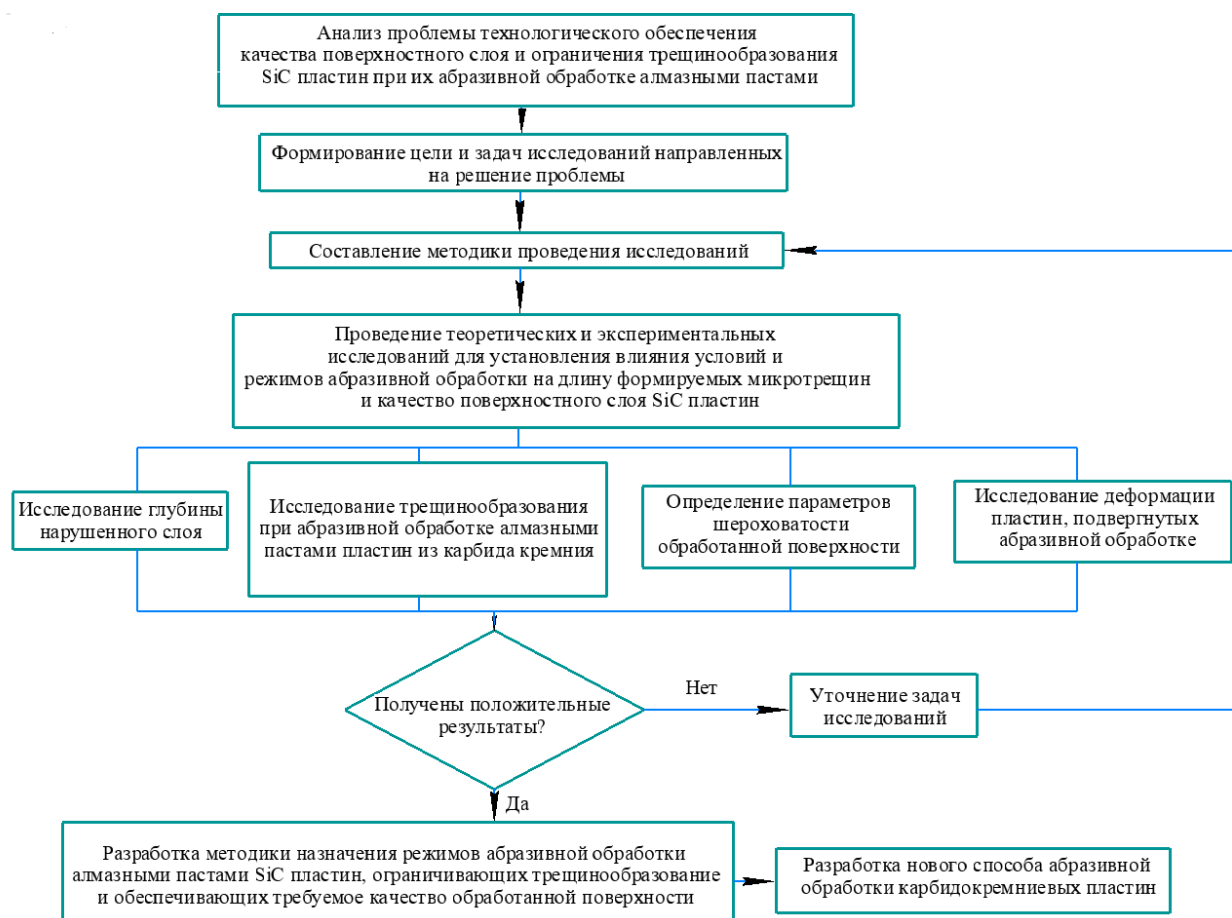


Рисунок 2. Блок-схема общей стратегии научных исследований

Экспериментальные исследования были проведены на технологической установке ЮФ 113203 по обработке сверхтвердых материалов производства АО «Группа Кремний Эл» (рис.3).

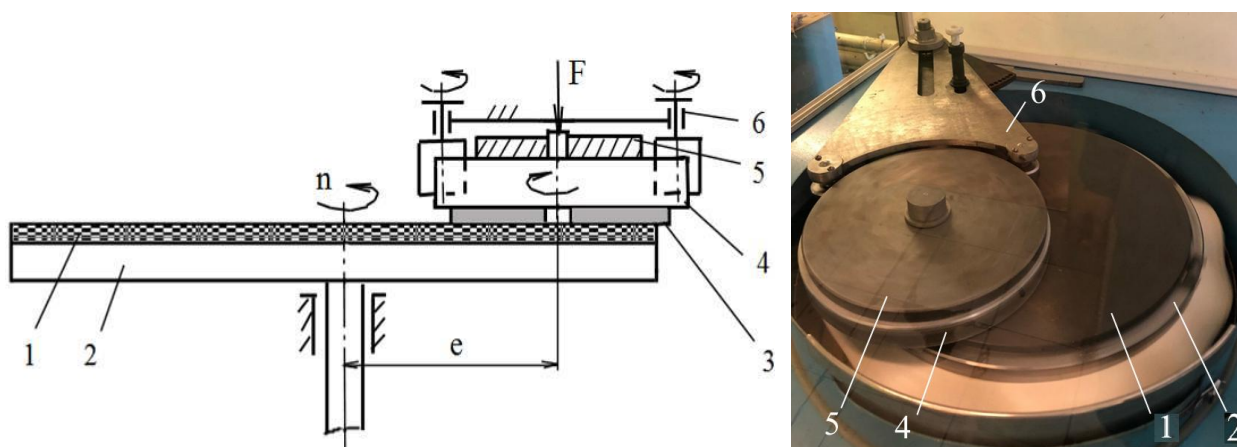


Рисунок 3. Схема обработки (слева) и рабочая зона (справа) технологической установки:
1 – притир с алмазной пастой (инструмент); 2 – стол установки; 3 – обрабатываемая пластина; 4 – планшайба; 5 – подкладной груз; 6 – держатель с роликами

Исследование дефектного слоя и поверхностных микротрещин пластин проводилось на основе изучения микрофотографий, полученных электронографическим и оптическим способами с использованием растрового электронного микроскопа Jeol 6610 JSM, цифрового 3-D микроскопа VHX-1000E и исследовательского микроскопа Olympus MX51.

Для измерений шероховатости и построения профилограмм обработанной поверхности использовался профилограф-профилометр Mahr MarSurf PS10. Величина деформации (прогиба) карбидокремниевых пластин после абразивной обработки оценивалась с помощью микроинтерферометра МИИ-4 и специальной индикаторной головки.

Скорость съема керамического материала определялась на основе периодического измерения толщины карбидокремниевых пластин и фиксации времени их обработки. Измерение толщины карбидокремниевых пластин после каждого этапа обработки производилось на поверочной плите с использованием стойки, оснащенной индикаторной головкой часового типа 1МИГ ГОСТ 9696-82.

В конце главы описаны технологические операции по подготовке притира к работе, закреплению (приклеиванию) пластин на планшайбе и снятию их после обработки, этапы абразивной обработки обратной стороны пластин и их контроля.

Третья глава посвящена установлению взаимосвязей режимов абразивной обработки алмазными пастами со скоростью съема керамического материала, размерами поверхностных микротрещин и параметрами качества обработанных поверхностей карбидокремниевых пластин.

Анализ исследуемого процесса абразивной обработки показал, что на толщину дефектного слоя, размер поверхностных микротрещин и шероховатость поверхности карбидокремниевых пластин основное влияние должна оказывать скорость съема материала, зависящая от технологических режимов абразивной обработки (рис.4). Для подтверждения этого дальнейшие исследования были проведены в несколько этапов.



Рисунок 4. Взаимосвязи скорости съема материала с технологическими режимами обработки и параметрами качества поверхности карбидокремниевой пластины

На первом этапе была проведена серия экспериментов по алмазно-абразивной обработке пластин с последующим изучением дефектных слоев и поверхностных микротрещин. В ходе экспериментов варьировалась зернистость алмазного микропорошка, усилие прижатия пластин к инструменту (притиру), частота вращения инструмента. Технологические режимы абразивной обработки и результаты исследований представлены в таблице.

Таблица – Размеры поверхностных микротрещин карбидокремниевых пластин и скорость съема материала при варьировании режимов абразивной обработки

Пластины из карбида кремния 4-Н политипа					Пластины из карбида кремния 6-Н политипа			
Абразивный материал	F, Н	n, мин ⁻¹	q, мкм/ч	L, мкм	F, Н	n, мин ⁻¹	q, мкм/ч	L, мкм
АСМ 60/40	87	50	20,0	75-90	87	50	22,0	90-105
		35	19,2			35	20,3	
		24	11,7	65-75		24	13,7	80-90
АСМ 40/28	87	42	14,0	50-60	87	42	15,2	50-70
		35	12,0	40-50		35	12,5	40-60
		24	7,8	35-45		24	8,5	35-55
АСМ 28/20	87	35	8,7	20-30	87	35	9,2	20-40
	40	35	5,0	10-20	40	35	5,5	10-30
	40	24	4,0	10-20	40	24	5,0	10-30

Примечания. F – усилие прижатия пластин к притиру (при F=87Н давление на пластины составляло 7...9 кПа, а при F=40Н – 3...4 кПа); n – частота вращения инструмента; q – скорость съема карбида кремния; L – наибольшие размеры поверхностных микротрещин; использовалась алмазная паста АСМ ПОМ (ГОСТ 25593-84); материал притира – стекло листовое бесцветное (ГОСТ 111-2014)

Анализ полученных результатов показал, что обработка свободным абразивом АСМ 60/40 при усилии прижатия пластин к притиру F=87 Н характеризуется максимальной скоростью съема керамического материала (до 20-22 мкм/ч). Однако на данных режимах абразивной обработки было зафиксировано образование поверхностных микротрещин максимальных размеров L=75-105 мкм. Применение алмазного микропорошка АСМ 40/28 привело к снижению скорости съема материала до 8-15 мкм/ч и уменьшению (до 2-х раз) размеров микротрещин пластин из карбида кремния обоих политипов (см. таблицу). Заключительная обработка пластин алмазным микропорошком АСМ 28/20 без использования подкладного груза (при F=40 Н) позволила уменьшить размер поверхностных микротрещин до 10-30 мкм, но при этом скорость съема материала снизилась до q=4-5 мкм/ч.

Результаты экспериментов показывают, что размеры поверхностных микротрещин после механической обработки свободным абразивом пластин из карбида кремния политипа 6Н превышают размеры трещин пластин из керамики политипа 4Н при одинаковых режимах обработки на 15-20% из-за различия кристаллических структур материалов (см. таблицу).

Следует отметить, что глубина дефектного слоя при обработке исследуемой керамики была сопоставима с максимальными размерами поверхностных микротрещин. Так, например, наибольшая толщина дефектного слоя (90-110 мкм) формировалась при одностадийной обработке карбидокремниевых образцов с

применением алмазной пасты АСМ 60/40 ПОМ и нагрузкой на пластины $F=87$ Н (рис 5 а). Наименьшая толщина дефектного слоя (10-20 мкм) наблюдалась при абразивной обработке пластин в три этапа с последовательным уменьшением зернистости алмазного микропорошка (рис 5 б), причем на заключительном этапе обработки пастой АСМ 28/20 ПОМ подкладной груз не использовался, и нагрузка на пластины составляла $F=40$ Н.

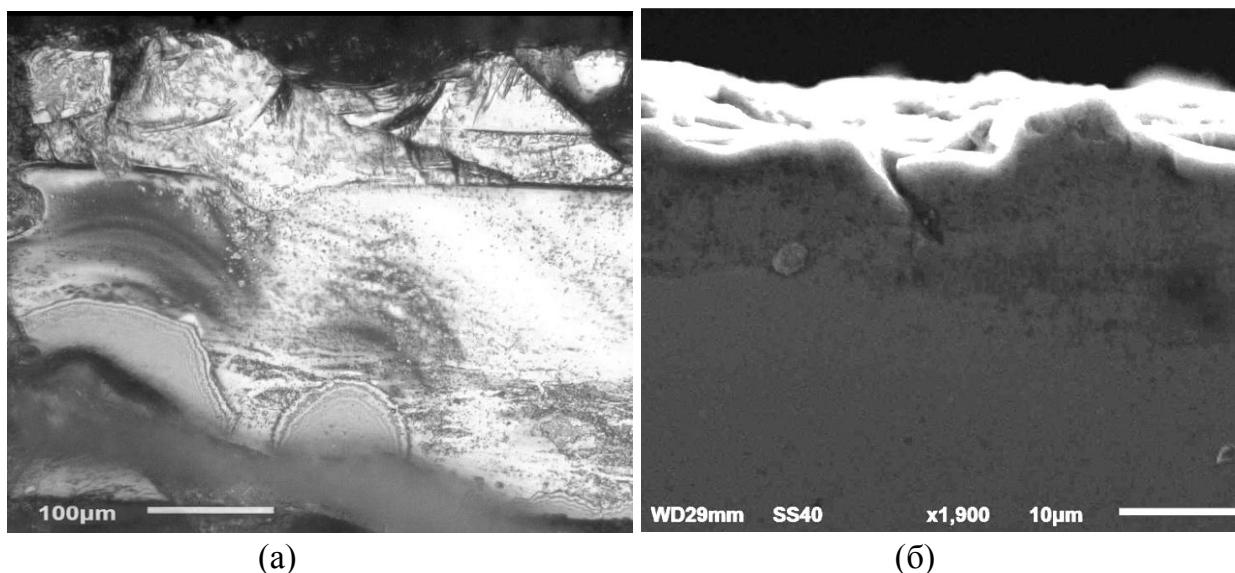


Рисунок 5. Дефектные слои пластин после абразивной обработки алмазными пастами

Статистический анализ результатов экспериментальных исследований позволил выявить следующие корреляционные зависимости длины микротрещин L от скорости съема карбида кремния q :

$$\text{ - для материала 4Н-SiC } L=3,5q; \quad (1)$$

$$\text{ - для материала 6Н-SiC } L=4,0q. \quad (2)$$

Для научно обоснованного выбора режимов абразивной обработки алмазными пастами карбидокремниевых пластин необходимо выявить условие, при выполнении которого не будет происходить разрушение подложки в процессе изготовления изделия. Такое условие было получено на основе силового критерия разрушения Дж.Р. Ирвина:

$$L_T = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_C}{k_b \sigma_n} \right)^2 > L(q), \quad (3)$$

где L_T – критическая длина микротрещины, приводящей к разрушению пластины (изменяется в пределах от 0,04 до 0,15 мм); k_b – безразмерная поправочная функция, учитывающая отношение длины трещины к ширине пластины и условия нагружения; σ_n – растягивающие напряжения, действующие на пластину в процессе изготовления изделия; K_C – критический коэффициент интенсивности напряжений в вершинах трещин; $L(q)$ – длина поверхностной микротрещины, формируемой при абразивной обработке пластины при скорости съема q карбида кремния (см. формулы (1) и (2)).

Для использования неравенства (3) на практике необходимо установить зависимости скорости съема карбида кремния при утонении керамических пластин

от основных технологических режимов абразивной обработки алмазными пастами, что и было сделано на втором этапе исследований. Искомая зависимость была установлена на основании гипотезы Ф. Престона о скорости диспергирования материала в процессе трения и имеет следующий вид:

$$q = \frac{k n^m F}{\Delta R f}, \quad (4)$$

где k , m – экспериментальные коэффициенты, зависящие от зернистости алмазного микропорошка и политапа карбида кремния ($m=0,5-0,7$; $k=1,0-1,5$); F – усилие прижатия заготовки к инструменту (притиру с алмазной пастой); n – частота вращения инструмента; ΔR – диаметр пластины или размер заготовки в рассматриваемом направлении при обработке частей пластины; f – коэффициент, характеризующий форму и расположение пластин на планшайбе.

В работе также представлены в табличной форме зависимости скорости съема материала от технологических режимов абразивной обработки, полученные на основе обобщения результатов экспериментальных исследований.

Из формулы (4) следует, что скорость съема керамики прямо пропорциональна усилию прижатия пластин к притиру, а влияние частоты вращения притира на производительность обработки носит нелинейный характер. Было также установлено, что скорость съема материала с карбидокремниевых пластин возрастает с 4 до 22 мкм/ч при увеличении зернистости алмазного микропорошка (от АСМ 28/20 до АСМ 60/40), частоты вращения притира (от 24 до 50 мин⁻¹) и усилия прижатия пластин к притиру (от 40 до 87 Н).

На третьем этапе исследований изучалось влияние технологических режимов алмазно-абразивной обработки на высотные параметры шероховатости карбидокремниевых пластин. Условия проведения экспериментов и значения технологических режимов обработки представлены в таблице. Было установлено, что скорость съема материала существенно влияет на шероховатость обработанной поверхности: при скорости съема материала 20...22 мкм/ч шероховатость поверхности составляет $Ra = 1,3-1,6$ мкм; снижение скорости съема материала до 4...5 мкм/ч приводит к уменьшению параметра шероховатости Ra до 0,5-0,6 мкм.

На основе статистической обработки экспериментальных данных была получена следующая зависимость параметра Ra (мкм) шероховатости обработанной поверхности керамической пластины от величины скорости съема материала q :

$$Ra = 0,33 + 0,06q, \quad 4 \leq q \leq 20 \text{ мкм/ч}. \quad (5)$$

Уравнение (5) в дальнейшем использовалось как ограничение при выборе технологических режимов абразивной обработки алмазными пастами.

Следует отметить, что общее изменение толщины (разнотолщинность) керамических пластин в ходе экспериментов не превышало 3-5 мкм, что существенно меньше предельно допустимого значения.

В завершении главы были представлены результаты исследований по изучению деформации (прогиба) цельных и четвертей карбидокремниевых пластин различных политипов при абразивной обработке алмазными пастами. Было установлено, что технологические режимы абразивной обработки не оказывают

существенного влияния на прогиб пластин. Деформация обрабатываемых пластин увеличивалась при уменьшении их толщины и увеличении диаметра. Прогиб пластин из 4H-SiC диаметром 100 мм после абразивной обработки составлял 115-150 мкм, пластин из 6H-SiC диаметром 76 мм – 70-90 мкм. Деформация четвертей пластин различных политипов, подвергнутых абразивной обработке алмазными пастами, не превышала 40 мкм. Таким образом, переход на обработку частей (в частности четвертей) карбидокремниевых пластин будет оправдан при невозможности обеспечения требуемого прогиба керамических подложек в рассматриваемых производственных условиях.

Результаты исследований П.А. Ребиндера и его учеников показали, что молекулы поверхностно-активных веществ адсорбируются на поверхностях, проникают в микротрещины, оказывая расклинивающее действие и вызывая деформации твердого тела. В составе алмазных паст, применяемых для обработки карбидокремниевых пластин, имеются поверхностно-активные вещества. Поэтому после удаления с обработанной поверхности остатков алмазной пасты следует ожидать уменьшение прогиба карбидокремниевой пластины. В этой связи пластины после абразивной обработки подвергались очистке в различных средах (ацетон технический (ГОСТ 2768-84), керосин технический (ГОСТ 18499-73), глицерин чистый (ГОСТ 6259-75)). Очистка пластин глицерином позволила уменьшить их прогиб на 10-15%, а промывка керамических подложек в других средах не принесла положительных результатов.

Четвертая глава посвящена разработке методики назначения режимов абразивной обработки алмазными пастами карбидокремниевых пластин, разработке нового инновационного способа односторонней обработки керамических подложек и оценке экономической эффективности результатов исследований.

Методика назначения технологических режимов абразивной обработки алмазными пастами карбидокремниевых пластин включает следующие основные этапы:

1. Выбор по таблице технологических режимов предварительной абразивной обработки обратной стороны пластины, обеспечивающих требуемую скорость съема материала и заданный размер поверхностных микротрещин (размер микротрещин, формируемых на данном этапе обработки, не должен превышать суммарной величины припуска, удаляемого с пластины).

2. Определение на основе результатов исследований Мужиченко О.Г., Меженного М.В., Плипенко В.А. и др. растягивающих напряжений σ_n , действующих на карбидокремниевую пластину в ходе технологического процесса изготовления изделия.

3. Расчет критической длины L_T микротрещины, приводящей к разрушению карбидокремниевой пластины, используя силовой критерий разрушения Дж.Р. Ирвина (см. неравенство (3)).

4. Определение с помощью зависимостей (1), (2) и (4) или по таблице скорости съема материала и технологических режимов окончательной абразивной обработки пластин, обеспечивающих получение поверхностных микротрещин длиной менее L_T .

5. Корректировка выбранных технологических режимов с использованием уравнения (5), исходя из обеспечения требуемого значения параметра R_a шероховатости поверхности пластины.

6. Оценка прогиба (BOW) пластин при обработке и, при необходимости (при $BOW > 40-50$ мкм), применение дополнительной очистки обработанной поверхности глицерином или переход на обработку частей (например, четвертей) пластин.

Далее в главе представлено описание инновационного способа абразивной обработки карбидокремниевых пластин, защищенного патентом РФ на изобретение № 2 790 244, который позволяет снизить трещинообразование при абразивной обработке керамических подложек за счет уменьшения динамических нагрузок путем одновременного съема материала с карбидокремниевых и кремниевых пластин заданной толщины, размещенных на планшайбе по определенной схеме.

Также в данной главе применительно к условиям АО «Группа Кремний Эл» (г. Брянск) выполнен расчёт ожидаемого годового экономического эффекта от уменьшения брака из-за дефектов пластин, сформированных при абразивной обработке, который составил более одного миллиона рублей в ценах 2022 года.

В приложении представлен акт о внедрении результатов работы на АО «Группа Кремний Эл» (г. Брянск), копия полученного патента на изобретение, а также результаты статистической обработки экспериментальных данных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе решена актуальная научная задача выбора технологических режимов абразивной обработки алмазными пастами карбидокремниевых пластин различных политипов, ограничивающих трещинообразование и обеспечивающих требуемое качество обработанной поверхности, имеющая существенное значение для развития алмазно-абразивной обработки керамических материалов, а также для машиностроения страны. Это подтверждается следующими **основными выводами, научными и практическими результатами**:

1. Установлена взаимосвязь скорости съема карбида кремния с длиной поверхностных микротрещин, формируемых в пластинах при абразивной обработке алмазными пастами: при скорости съема материала 20...22 мкм/ч длина микротрещин составляет 75-105 мкм; при снижении скорости съема карбида кремния до 4...5 мкм/ч размер микротрещин уменьшается до 10-30 мкм.

2. Размеры поверхностных микротрещин после абразивной обработки алмазными пастами пластин из карбида кремния политипа 6Н превышают размеры трещин пластин из керамики политипа 4Н при одинаковых режимах обработки на 15-20% из-за различия структур керамических материалов.

3. Скорость съема материала с карбидокремниевых пластин и параметр R_a шероховатости поверхности возрастают с 4-5 до 20-22 мкм/ч и с 0,5-0,6 до 1,3-1,6 мкм соответственно при увеличении зернистости алмазного микропорошка пасты (от АСМ 28/20 до АСМ 60/40), скорости вращения притира (от 24 до 50 мин⁻¹) и усилия прижатия пластин к притиру (от 40 до 87 Н).

4. Заключительные этапы абразивной обработки алмазными пастами обратной стороны пластин рекомендуется выполнять с использованием паст с

алмазным микропорошком АСМ 28/20 при нагрузке на пластины не более 40Н (3...4 кПа) и частотой вращения инструмента (притира) менее 30 мин⁻¹. В результате чего длина микротрещин будет меньше критической (10-30 мкм), что в последующем обеспечит повышение выхода годных изделий (снижение брака).

5. Уменьшить на 10-15% деформацию (прогиб) тонких карбидокремниевых пластин после абразивной обработки алмазными пастами возможно путем дополнительной очистки обработанной поверхности глицерином (C₃H₈O₃, ГОСТ 6259-75) от шлама и остатков пасты с поверхностно-активными веществами.

6. Разработана методика назначения режимов абразивной обработки алмазными пастами карбидокремниевых пластин, ограничивающих трещинообразование и обеспечивающих требуемое качество обработанной поверхности.

7. Предложен новый способ односторонней абразивной обработки пластин из карбида кремния, позволяющий повысить качество и снизить уровень брака при изготовлении продукции из карбидной керамики.

8. Ожидаемый годовой экономический эффект от снижения брака (до 20%) при изготовлении продукции на основе карбидокремниевых пластин на АО «Группа Кремний Эл» (г. Брянск) за счет применения результатов исследований составит более одного миллиона рублей в ценах 2022 года.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в журналах из перечня ВАК РФ

1. Бишутин С.Г. Совершенствование технологии финишной абразивной обработки пластин из карбида кремния [Текст] / С.Г. Бишутин, **С.С. Алехин** // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2018. – №5(66). – С. 9-13.

2. Бишутин С.Г. Производительность и качество алмазно-абразивной обработки пластин из карбида кремния [Текст] / С.Г. Бишутин, **С.С. Алехин** // Вестник воронежского государственного технического университета. – 2019. – №2 (15). – С. 144-148.

3. Бишутин С.Г. Выбор технологических режимов алмазно-абразивной обработки пластин из карбида кремния [Текст] / С.Г. Бишутин, **С.С. Алехин** // Научные технологии в машиностроении. – 2020. – №12(114). – С. 3-6.

4. Бишутин С.Г. Технологическое обеспечение трещиностойкости пластин из карбида кремния при алмазно-абразивной обработке [Текст] / С.Г. Бишутин, **С.С. Алехин** // Вестник машиностроения. – 2021. – №4. – С. 46-48.

5. Бишутин С.Г. Влияние абразивной обработки на трещиностойкость пластин из карбида кремния различных политипов [Текст] / С.Г. Бишутин, **С.С. Алехин** // Транспортное машиностроение. – 2022. – №4. – С. 17-22.

Публикации в изданиях, индексируемых в базе данных Scopus

1. Bishutin S.G. Tribological aspects of diamond-abrasive machining of silicon carbide plates [Text] / S.G. Bishutin, **S.S. Alekhin** // AIP Conference Proceedings. – 2021. – Vol. 2340. – pp 60001-60005.

2. Bishutin S.G. Crack Resistance of Silicon-Carbide Plates in Diamond Grinding [Text] / S.G. Bishutin, **S.S. Alekhin** // Russian Engineering Research. – 2021. – Vol. 41(7). – pp 604-606.

Публикации в других изданиях

1. **Алехин С.С.** Формирование микротрещин в поверхностных слоях карбидокремниевых пластин при финишной абразивной обработке [Текст] / С.С. Алехин // Сб. ст. «LVIII Международные научные чтения (Памяти Б.Г. Галеркина)». – Москва: ЕФИР, 2019. – С. 16-19.
2. **Алехин С.С.** Шероховатость карбидокремниевых пластин после алмазно-абразивной обработки [Текст] / С.С. Алехин // Автоматизированное проектирование в машиностроении. Материалы VII Междунар. науч. конф.. – Новокузнецк: НИЦ МС, 2019. – С. 137-140.
3. **Алехин С.С.** Повышение качества финишной абразивной обработки пластин из карбида кремния [Текст] / С.С. Алехин // Обеспечение и повышение качества изделий машиностроения и авиакосмической техники. Материалы Междунар. науч.- конф.. – Брянск: БГТУ, 2020. – С. 203-208.
4. Бишутин С.Г. Повышение производительности финишной абразивной обработки пластин из карбида кремния [Текст] / С.Г. Бишутин, **С.С. Алехин** // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации. Материалы XIII Междунар. науч. конф.. – Курск: ЗАО «Университетская книга», 2018. – С. 29-32.
5. Бишутин С.Г. Особенности финишной абразивной обработки пластин из карбида кремния [Текст] / С.Г. Бишутин, **С.С. Алехин** // Техника и технологии: пути инновационного развития. Материалы 7-й Междунар. науч. конф.. – Курск: ЗАО «Университетская книга», 2017. – С. 30-33.
6. Бишутин С.Г. Прогнозирование параметров качества поверхностей деталей машин, формируемых при шлифовании [Текст] / С.Г. Бишутин, **С.С. Алехин** // Прогрессивные технологии и процессы. Материалы 5-й Всероссийской науч. конф.. – Курск: ЗАО «Университетская книга», 2018. – С. 44-48.
7. Бишутин С.Г. Шероховатость поверхностей пластин из карбида кремния после алмазно-абразивной обработки [Текст] / С.Г. Бишутин, **С.С. Алехин** // Сб. тр. «Современные материалы, техника и технологии». – Курск: ЗАО «Университетская книга», 2019. – С. 9-15.
8. Бишутин С.Г. Технологическое обеспечение процесса финишной абразивной обработки пластин из карбида кремния [Текст] / С.Г. Бишутин, **С.С. Алехин** // Сб. тр. «Управление качеством на этапах жизненного цикла технических и технологических систем». – Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2019. – С. 144-148.
9. Бишутин С.Г. Качество поверхностных слоев шлифованных карбидокремниевых пластин [Текст] / С.Г. Бишутин, **С.С. Алехин** // Прогрессивные технологии и процессы. Материалы 6-й Всероссийской науч. конф.. – Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2019. – С. 34-37.
10. Бишутин С.Г. Трибологические аспекты алмазно-абразивной обработки пластин из карбида кремния [Текст] / С.Г. Бишутин, **С.С. Алехин** // Проблемы прикладной механики. Материалы Междунар. науч. конф.. – Брянск: БГТУ, 2021. – С. 184-188.

Патенты на изобретения РФ

1. Патент № 2 790 244 Российская Федерация, Способ односторонней шлифовки пластин из карбида кремния свободным абразивом / **С.С. Алехин**, С.Г. Бишутин, А.А. Пронин.

Подписано в печать 26.04.2023. Формат 60х84 1/16. Бумага офсетная. Офсетная печать.
Печ. л. 1. Тираж 100 экз. Заказ № 15. Бесплатно

Брянский государственный технический университет
241035, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7
Лаборатория оперативной печати БГТУ, ул. Институтская, 16