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

На правах рукописи

Алехин Сергей Сергеевич

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

2.5.6. – Технология машиностроения

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук

> Научный руководитель: Бишутин Сергей Геннадьевич доктор технических наук, профессор

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ5
І. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ОБЕСПЕЧЕНИЯ
КАЧЕСТВА КАРБИДОКРЕМНИЕВЫХ ПЛАСТИН НА СТАДИИ
АЛМАЗНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ10
1.1. Область применения, технология и особенности абразивной
обработки пластин из карбида кремния10
1.2. Требуемое качество пластин из карбида кремния после
алмазно-абразивной обработки20
1.3. Технологические трудности, возникающие при алмазно-абразивной
обработке карбидокремниевых пластин23
1.4. Трещинообразование в поверхностных слоях карбидокремниевых
пластин при алмазно-абразивной обработке
Выводы по главе 1 и постановка задач исследований35
II. МАТЕРИАЛЫ, ПРИБОРЫ, ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКИ
ИССЛЕДОВАНИЙ
2.1. Общая методика и этапы проведения исследований
2.2. Размеры и основные характеристики обрабатываемых пластин из
карбида кремния42
2.3. Установка для алмазно-абразивной обработки пластин из
сверхтвердых материалов и вспомогательное технологическое
оснащение
2.4. Оборудование для контроля качества карбидокремниевых
пластин
2.5. Особенности проведения абразивной обработки
карбидокремниевых пластин алмазными пастами
III. ВЗАИМОСВЯЗЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ
АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ АЛМАЗНЫМИ ПАСТАМИ С
ПАРАМЕТРАМИ КАЧЕСТВА КАРБИДОКРЕМНИЕВЫХ
ПЛАСТИН

3.1. Исследование процесса формирования поверхностных слоев
карбидокремниевых пластин при абразивной обработке алмазными
пастами60
3.2. Скорость съема керамического материала при абразивной
обработке алмазными пастами и ее влияние на формирование
микротрещин в карбидокремниевых пластинах
3.3. Взаимосвязь скорости съема материала с технологическими
режимами алмазно-абразивной обработки и размерами микротрещин,
формируемых в карбидокремниевых пластинах
3.4. Влияние условий и технологических режимов алмазно-абразивной
обработки на параметры шероховатости обратной стороны
карбидокремниевых пластин77
3.5. Исследование деформации карбидокремниевых пластин после
абразивной обработки алмазными пастами
Выводы по главе 395
IV.ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ НА ПРАКТИКЕ И ОЦЕНКА
ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ
ИССЛЕДОВАНИЙ97
4.1. Методика назначения режимов абразивной обработки алмазными
пастами карбидокремниевых пластин, ограничивающих
трещинообразование и обеспечивающих требуемое качество
обработанной поверхности97
4.2. Разработка инновационного способа абразивной обработки
карбидокремниевых пластин для повышения их качества
4.3. Оценка экономической эффективности результатов
исследований104
Выводы по главе 4110
Основные выводы и результаты111
Список использованной литературы113
Приложения126

Приложение А. Акт внедрения результатов научно-исследовательской
работы
Приложение Б. Патент РФ на изобретение № 2 790 244 «Способ
односторонней шлифовки пластин из карбида кремния свободным
абразивом»128
Приложение В. Статистическая обработка результатов исследований
по выявлению зависимости между длиной поверхностных
микротрещин и скоростью съема материала для пластин из карбида
кремния политипа 4-Н137
Приложение Г. Статистическая обработка результатов исследований
по выявлению зависимости между длиной поверхностных
микротрещин и скоростью съема материала для пластин из карбида
кремния политипа 6-Н142

ВВЕДЕНИЕ

Керамические карбида кремния широко изделия на основе используются в сфере автомобилестроения, авиакосмической отрасли, точного машиностроения и атомной энергетики. Для изготовления наиболее ответственных изделий из карбида кремния требуются монокристаллические пластины определенного политипа 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 политипа) карбида кремния: 4H-SiC и 6H-SiC. Пластины из этих керамических материалов используются для изготовления биполярных и транзисторов, быстровосстанавливающихся диодов и диодов полевых микросхем и другой продукции для Шоттки, 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 размер И 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.

Степень разработанности темы исследования. В работах Беляева А.Е., Гусева В.В., Душко О.В., Тепловой Т.Б., Зинкина С.В., Филатова Ю.Д, Калафатовой Л.Б., Муратова К.Р., Шумячера В.М., Радьковой Н.О., Асаева А.С., S.Agarwal, R.Venkateswara, M.Golabczak, Т.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.

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.

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 сьема 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 (C₃H₈O₃, ГОСТ 6259-75) от шлама и остатков алмазной пасты с поверхностно-активными веществами (п. 6 и 7 паспорта научной специальности 2.5.6.).

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 теоретикоэкспериментальных 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 научнопрактическая 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[3-5,12-23,103-104], в том числе 5 - из Перечня ВАК, 2 - в изданиях, индексируемых в международной базе Scopus, 1 – патент РФ на изобретение.

І.СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА КАРБИДОКРЕМНИЕВЫХ ПЛАСТИН НА СТАДИИ АЛМАЗНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ

1.1. Область применения, технология и особенности абразивной обработки пластин из карбида кремния

В настоящее время для создания электронных компонентов машин и приборов все более актуальным становится освоение новых полупроводниковых материалов с большей шириной запрещенной зоны и улучшенными техническими характеристиками.

С начала XXI века происходит все более широкое внедрение в мировое машиностроение новых материалов таких как карбид кремния (SiC). Данный материал обладает уникальными физическими и электронными свойствами, которые определяют его исключительную перспективность при создании электронной компонентной базы [1,7,55].

Область применения карбидокремниевой продукции довольно широкая:

- шнеки, детали насосов, сопла для пескоструйной очистки и газовые сопла;

- специальные зеркала для оптической промышленности;

- тормозные диски для автомобилей и др.

Однако наибольшее применение на мировом рынке карбидокремниевая продукция нашла в микроэлектронике за счет уникальных электрических и физических свойств полупроводникового материала [29,30].

Основные преимущества SiC перед широко известными полупроводниковыми материалами такими как кремний и арсенид галлия следующие:

- большая напряженность электрического поля пробоя, что приводит к значительному снижению сопротивления в открытом состоянии;

- высокая теплопроводность SiC, снижающая тепловое сопротивление кристалла (по сравнению с Si-диодами почти в два раза);

- электронные свойства приборов на основе SiC стабильны и слабо зависят от температуры, что обеспечивает высокую надежность изделий;

- карбид кремния устойчив к радиоактивному излучению, воздействие которого не приводит к деградации электронных свойств кристалла;

- высокая рабочая температура кристалла (более 400°С), позволяющая создавать высоконадежные приборы для жестких условий эксплуатации и специальной аппаратуры [66].

Как известно, эффективность радиоэлектронных устройств, особенно работающих в экстремальных условиях (высокие температуры, агрессивные среды, радиация), существенно зависит от повышения быстродействия, энергосбережения и надежности твердотельной элементной базы. [115,116,117]. Электронные приборы, соответствующие столь жестким требованиям и условиям эксплуатации, возможно выпускать на основе карбидокремниевых компонентов [119,120].

Наряду с высокой термостойкостью, как сам материал SiC, так и приборные структуры на его основе характеризуются повышенной радиационной стойкостью. Именно эта особенность SiC расширяет границы использования материала в аппаратуре для космической электроники, мониторинга радиационно-опасных зон, ядерно-энергетических установок и других устройств специального назначения [65,77,78].

В зависимости от структуры кристаллической решетки известно множество различных политипов карбидокремниевых структур, однако основными политипами, которые нашли наиболее широкое применение являются 4-H-SiC и 6-H-SiC политипы.

На основе карбидокремниевых подложек политипа 4-Н изготавливаются силовые и высокочастотные дискретные приборы (транзисторы биполярные и полевые, быстровостанавливающиеся диоды и диоды Шоттки) с прямым током до 40 А и максимальным обратным напряжением до 1200 В, а также

силовые модули, рассчитанные на ток 120-450 А и пробивное напряжение 1200-1700 В [1, 105-116].

Одним из основных представителей дискретных приборов на основе карбидокремниевых кристаллов являются диоды Шоттки.

Кристаллы Диодов Шоттки на основе SiC активно применяются в блоках питания компьютеров и импульсных стабилизаторах напряжения, а также там, где требуется минимальное прямое падение напряжения, в том числе в цепях высокой частоты. Тонкая керамическая пластина является исходным элементом при получении конечного кристалла. Укрупненно технологический процесс изготовления кристаллов диодов Шоттки может быть представлен в виде следующей блок-схемы, рисунок 1.1.

Основными этапами изготовления кристаллов диодов Шоттки являются:

- выращивание монокристалла определенного диаметра;

– резка слитка на пластины требуемой толщины;

-нанесение поликремния на эпитаксиальную структуры карбидокремниевой пластины;

– фотолитография защитных колец и барьера Шоттки;

– абразивная обработка обратной стороны пластины;

- контроль качества поверхностного слоя пластины;

 формирование омического контакта путем напыления никеля на обратную сторону пластины;

– напыление тонких слоев (2-4 мкм) титана и алюминия на лицевую сторону пластины для формирования барьера Шоттки;

 последовательное напыление слоев металлов: титан-никель-сереброолово-серебро на обратную сторону для формирования коллектора;

 окончательная проверка основных электропараметров кристаллов на многозондовой установке;

– резка пластины на кристаллы для последующего их монтажа в корпус.



Рисунок. 1.1 – Основные этапы изготовления кристаллов диодов Шоттки на основе SiC

После проверки основных электропараметров кристаллов на многозондовой установке пластины разрезают алмазным диском на дискретные элементы (рисунок 1.2), а после передают на участок сборки, для герметизации разрезанных кристаллов в корпус.



Рисунок 1.2. – Карбидокремниевая пластина 4-Н политипа разрезанная на кристаллы

Сборка кристаллов может осуществляться как в крупногабаритные, так и в малогабаритные (до 2 мм) металлополимерные, а также в металлокерамические корпуса (рисунок 1.3).



Рисунок 1.3. – Исполнения дискретных полупроводниковых приборов: (a) – в металлополимерном корпусе, (б) – в металлокерамическом корпусе 14

Силовые модули на основе SiC (рисунок 1.4) получили свое активное развитие в связи с увеличением мощности силовых устройств и нашли применение в схемах, в которых использование дискретных компонентов было неприемлемо из-за их недостаточной мощности (ввиду малых габаритов) либо сложности реализации самой схемы [46,61].



Рисунок 1.4 – Внешний вид силовых модулей

Основной областью применения карбидокремниевых подложек политипа 6H является твердотельная оптоэлектроника и производство интегральных микросхем для электронных приборов.

Миниатюризация керамических изделий на основе карбида кремния, позволяет сэкономить рабочее пространство при компоновке и проектировании радиоэлектронной аппаратуры, для этого необходимо выполнять механическую обработку исходных карбидокремниевых подложек до определенной толщины [60,66,67,70].

Эффективное использование керамических материалов на основе карбида кремния в промышленности возможно при выполнении весьма высоких требований к качеству механической обработки рассмотренных изделий [7,47,61,101,102]. Вследствие повышенной твердости и хрупкости эффективная обработка деталей из карбида кремния возможна только с использованием алмазного инструмента, но даже применение алмаза не позволяет достичь высокой производительности процесса резания, поэтому обработка керамических материалов весьма дорогая. По данным японских исследователей, стоимость обработки керамики в десятки тысяч раз превышает стоимость обработки конструкционных сталей [50,57,59].

Наиболее распространенным методом обработки тонких пластин из карбида кремния является механическая обработка свободным абразивом [6].

Алмазно-абразивная обработка карбидокремниевых пластин выполняется на специализированных установках. Пластины-заготовки чаще всего приклеиваются к металлическим дискам определенного диаметра размещенных на вращающихся притирах, выполненных из чугуна, стекла или стали (рисунок 1.5) [24,47,48,60]. В качестве абразива чаще всего используются пасты на основе микропорошков алмаза синтетического (твердость абразива должна быть больше обрабатываемого материала) с размером зерна 60-3 мкм. Иногда абразивная обработка керамики выполняется алмазными шлифовальными кругами зернистостью 120-5 мкм.



Рисунок 1.5 – Внешний вид станка для обработки SiC пластин PR HOFFMAN PR-1 SERIES [75]

Среди производителей оборудования для механической обработки карбидокремниевых пластин наиболее известны Disco, PR HOFFMAN и Okamoto [63,93,118,121].

Шлифовальные станки фирмы Disco (США) в основном оснащены двумя рабочими столами (рисунок 1.6). На первом рабочем столе выполняется обработка пластин абразивными пастами с зернистостью микропорошка 20-60 мкм с высокой скоростью вращения притира. Результат данной обработки грубый остаточный рельеф поверхности пластины. Финишная обработка пластин с низкой скоростью вращения инструмента и с применением микропорошка зернистостью менее 10 мкм в составе абразивных паст выполняется на втором рабочем столе, что позволяет удалить большую часть нарушенного слоя, созданного при грубой обработке и добиться уровня шероховатости поверхности Ra=0,01 мкм [86,88,99,102].



Рисунок 1.6. – Установки шлифования карбидокремниевых пластин ф. Disco [118]: двухшпиндельная установка шлифования DFG8550 (слева) и портативная настольная двухшпиндельная установка DFG Beta (справа)

Количество этапов в современных процессах абразивной обработки карбид кремниевых пластин, состав паст и суспензий, порядок их использования и введение дополнительных технологических операций может значительно варьироваться, а также имеет направленность в решении технологических задач и проблем конкретного предприятия [82,92,113,114,119-123].

Так, например, в источнике [40] представлен способ обработки подложек из карбида кремния, в котором операции шлифования и полирования проводятся в 5 этапов. Первым этапом является двустороннее шлифование свободным абразивом с алмазным зерном М 40/28 мкм; вторым – окончательное шлифование алмазной пастой АС 10/7 мкм; третьим – полирование алмазной пастой АС 3/2 мкм; четвертым и пятым – полирование в суспензии на основе силиказолей (SiO₂). После очистки химическим и гидромеханическим способом пластины сушат и отжигают в вакууме при температуре 800–1200 °C.

Разработка технологий механической алмазной абразивной обработки карбид кремниевых пластин выполняется научными сотрудниками Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова.

Обработка пластин, в общем случае, также сводится к поэтапному процессу параметры которого представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1. – Режимы абразивной обработки SiC пластин [45]

Способ обработки	Тип абразива	Время обработки, мин.				
Шлифованная сторона пластины						
Шлифование	Паста АСМ 7/5	450				
Полированная сторона пластины						
Шлифование	Паста АСМ 7/5	180				
Полирование	Паста АСМ 3/2 НОМ	270				
Финишное полирование	Паста АСМ 1/0 НОМ	180				

Высотный параметр шероховатости на финишных этапах обработки по заявлениям исследователей составляет около 0,1 мкм по параметру Ra. Однако подробных сведений о назначаемых параметрах режимной части (прижимной силы, скорости вращения инструмента и тд.) и их влияния на длину формируемых в поверхностном слое микротрещин и качество обработанной поверхности керамических изделий не приводится.

Абразивная обработка карбид кремниевых подложек в несколько этапов описано и в работах Т. Kato. [114] Отмечается, что автор достиг высокой собственной производительности процесса при использовании индивидуальной технологии шлифования пластин из карбида кремния. Процесс обработки происходил в 3 этапа, продолжительностью не более 200 мин. Согласно первому этапу образцы пластин шлифовались алмазным кругом малой зернистости в течение 15 минут для удаления нарушенного слоя, образованного в процессе резки, и обеспечения плоскостности пластин. Второй этап – включал доводку и предварительное полирование пластин, с помощью свободных алмазных абразивов в течение 90 мин. Третий этап представлял собой 95-минутное химико-механическое полирование с помощью обычной коллоидной суспензии на основе кремнезема (SiO₂). В результате такой обработки автор получил пластины карбида кремния со среднеквадратичным значением шероховатости по параметру R_a=0,08-0,012 мкм. на площади в 10 мкм². К сожалению, в указанной работе автора отсутствуют сведения о параметрах режимной части каждого из этапов обработки, а только утверждается, что высокая производительность наряду с обеспечением требуемого уровня качества обработанной керамики, оптимизации обеспечивалась каждого за счет отдельного этапа технологического процесса, однако, и условия его оптимизации не сообщаются.

В работах польского ученого М. Goolabczak [118] также описана технология финишной алмазно-абразивной обработки пластин из карбида кремния с использованием поэтапных методов: шлифования, притирки и полирования. Однако вопросы трещинообразования не рассматривались в данной работе.

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

Технологическое оборудование, используемое при данной зернистости. абразивной обработке керамических пластин не содержит в своем составе высокотехнологичных модулей и узлов, продукты абразивной обработки легко удаляются вместе с применяемой пастой или суспензией, благодаря наличию в их составе поверхностно-активных веществ. В отличии от химических и плазмохимических методов обработки пластин где требуется специальной производственной среды (реакторных создание камер, химических ванн) а также эффективных очистных систем при работе с продуктами распада химических соединений, методы механической обработки не нуждаются в создании указанных условий. Однако наряду с представленными преимуществами методы абразивной обработки пластин из карбида кремния имеют также свои недостатки: низкая производительность технологического процесса вследствие необходимости обеспечения высоких требований к качеству изделия и хрупкости керамических материалов, а также повышенная вероятность растрескивания и скалывания пластин в процессе абразивной обработки пастами на основе крупнозернистых микропорошков при неправильном назначении технологических режимов обработки [33].

1.2. Требуемое качество пластин из карбида кремния после алмазноабразивной обработки

Стоимость абразивной обработки пластин из карбида кремния высока ввиду низкой производительности процесса обусловленной высокой твердостью и хрупкостью материала, а использование некорректных режимов и параметров механической обработки (высокие скорости резания, крупная зернистость абразива, повышенное усилие прижатия пластин к притиру и т.д.) зачастую приводит к повреждению обрабатываемой поверхности, к образованию микротрещин и внутренних трещин в материале, и в целом негативно сказывается на производительности технологического процесса

алмазной абразивной обработки, а также в дальнейшем снижает выпуск годных изделий.

Исходные карбидокремниевые пластины (из которых изготавливают подложки) контролируют на соответствие требуемым значениям качества поверхностного слоя в установленной зоне (рисунок 1.7), представляющей собой центральную область поверхности пластины, отделенную от контура пластины краевым участком X [8,9,31,38].



Рисунок 1.7 – Эскиз пластины из карбида кремния: 1 – граница участка качества; 2 – внешняя граница пластины

Качество поверхностей (лицевой и обратной) исходных карбидокремниевых пластин оценивают визуально в соответствии с параметрами, представленными в таблице 1.2, где указаны требования к наличию и размерам поверхностных дефектов. Данные требования должны использоваться при определении пригодности исходной карбидокремниевой пластины для последующего изготовления кристаллов.

Таблица 1.2 – Требования к исходным карбидокремниевым пластинам [74]

Параметр	Предельно допустимое значение	Освещение
Наибольшее количество царапин		
Точки	Не допускаются	
Затемнения		
Максимальное количество загрязняющих		
частиц на подложках диаметром		
75 мм	8	Интенсивное
100 мм	10	
125 мм	10	
Трещины, сколы, кратеры, канавки,		
возвышения	Не допускаются	
Следы отрезного инструмента		

При этом трещиной считаются - любые несовершенства, имеющие общую длину более 0,25 мм, а сколом или канавкой - любые несовершенства, включая следы выхода отрезного инструмента, имеющие размер более 0,25 мм от края к центру пластины в радиальном направлении или в длину в окружном направлении [36].

Также дополнительно выполняется контроль геометрических параметров исходных пластин согласно таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Требования к геометрическим параметрам исходных карбидокремниевых пластин [74]

Наименование параметра	Численные значения
Диаметр пластины D, мм	$100 \pm 0,2$
Толщина пластины в ее центре, мкм	350 ± 20
Прогиб (BOW), мкм, не более	50
Коробление (WARP), мкм, не более	50
Разнотолщинность (TTV), мкм, не более	10

Одним из главных условий при производстве электронных компонентов на базе карбидокремниевых подложек является обеспечение катодного контакта, формируемого после термической диффузии тонких слоев металлов на обратной стороне карбидокремниевой керамики. Актуальным вопросом является снижение количества брака, связанного с разрушением пластин как в процессе абразивной обработки (утонения пластин), так и после двухэтапного термического отжига SiC пластин при температуре 900-1300°C. Указанные особенности производства керамических изделий могут быть достигнуты исключительно при соответствии параметров качества поверхностного слоя обратной стороны карбидокремниевых подложек после абразивной обработки (таблица 1.4). Таблица 1.4 – Основные требования к качеству обратной стороны карбидокремниевых пластин после абразивной обработки*

Наименование параметра	Численные значения		
Шероховатость по параметру R _a , мкм	≤ 1,15		
Толщина пластины в ее центре, мкм	260 ± 20		
Прогиб (BOW), мкм, не более	50		
Коробление (WARP), мкм, не более	50		
Разнотолщинность (TTV), мкм, не более	10		
Толщина нарушенного слоя, мкм, не более	40		
Трещины в поверхностном слое, мкм, не более	20		
Сколы, глубинные кратеры и канавки	Не допускаются		
* – по данным АО «Группа Кремний Эл» (г. Брянск).			

Выполнение указанных требований позволит успешно реализовать заключительные технологические операции изготовления тонких керамических пластин и получить структуры без значительных повреждений, благодаря чему обеспечиться постоянство необходимых электрических параметров конечного изделия [34,37].

1.3. Технологические трудности, возникающие при алмазноабразивной обработки карбидокремниевых пластин

Эффективное выполнение процесса абразивной обработки карбидокремниевых пластин на многих промышленных предприятиях затруднено ввиду большого количества факторов, способных привести к разрушению дорогостоящей керамики и значительному снижению качества поверхностного слоя SiC пластин [39,91].

Как видно из представленного укрупненного технологического маршрута изготовления карбидокремниевого кристалла диода Шоттки абразивной обработке (рисунок 1.1.) пластин предшествует высокотемпературная обработка вызывающая дополнительные напряжения растяжения карбидокремниевых подложек, последующий двойной а

высокотемпературный отжиг может привести к разрушению пластины при наличии значительного количества микротрещин определенной длины в нарушенном слое пластины, образованных на этапе абразивной обработки обратной стороны пластин. Глубина трещиноватого (дефектного) слоя зависит в основном от характеристик абразива (в частности от размеров зерен и их прочности). Размеры алмазного зерна назначаются путем достижения компромисса между необходимой скоростью обработки и получаемой глубиной трещиноватого слоя. Более крупный размер зерна обеспечивает большие скорости удаления материала, наряду с получением увеличенной глубины нарушенного слоя и залегающих в нем микротрещин. Вследствие чего абразивную обработку SiC пластин проводят как правило в 3 и более этапов, последовательно уменьшая размер зерна применяемого абразива.

Американский ученый Т.Вifano в своих исследованиях [102] связал коэффициент интенсивности возникновения микротрещин, формируемых в поверхностных слоях карбидокремниевых пластин с толщиной образуемой стружки (ag) при шлифовании следующей зависимостью:

$$a_g = \beta \left(\frac{E}{H}\right) \left(\frac{K_{IC}}{H}\right)^2,\tag{1.1}$$

где, β – поправочный коэффициент, Е - модуль Юнга, Н – твердость карбидокремниевой пластины по Викерсу, K_{IC} – коэффициент интенсивности возникновения микротрещин. Автором установлено, что критическая толщина стружки a_g при шлифовании SiC пластин не приводящая к их растрескиванию составляет менее 0,18 мкм. При толщине стружки $a_g = 1$ мкм, образовывались трещины, связанные с режимом хрупкого резания, приводящие к значительному растрескиванию и скалыванию пластин.

Китайский ученый Jianqin Gao совместно с Agarwal.S [100] преобразовал полученную ранее зависимость (1.8) в следующий вид:

$$d_c = 0.15 \left(\frac{E}{H}\right) \left(\frac{\kappa_c}{H}\right)^2, \qquad (1.2)$$

где, d_c – диаметр абразивного зерна, применяемого при шлифовании карбидокремниевых пластин.

Для определения критической нагрузки, вызываемой боковыми трещинами и приводящей к растрескиванию пластин автором была предложена следующая формула:

$$P = 2 \cdot 10^5 \left(\frac{K_{\rm C}^4}{H^3}\right),\tag{1.3}$$

Абразивная обработка свободным абразивом при возникновении точечных нагрузок наряду с отсутствием интенсивной пластической деформации приводит к тому, что под воздействием зерен шлифовального инструмента керамика, испытывая сильные механические и термические выкрашивается, нагрузки, В результате ЭТОГО возникает дефект, представляющий собой канавку, ширина которой превышает площадь соприкосновения абразивного зерна с материалом. Следовательно, в областях, прилегающих к канавке, возникают трещины. Скоростная обработка карбидокремниевых пластин алмазными кругами оставляет на поверхности подложек направленные следы обработки. Внешний вид микрорельефа поверхности карбидокремниевых пластин, обрабатываемых свободным и связанным абразивами представлен на рисунках 1.8-1.9 [42-44].

Глубина выколок и направленных следов обработки зависит от диаметра абразивного зерна. При глубине указанных дефектов более 30 мкм возникают трудности с обеспечением требуемых электрических параметров конечных изделий на пластине, что в дальнейшем способно привести к нарушению работоспособности собранных изделий и снижению выхода годной продукции [41,71,80,79].



Рисунок 1.8 – Внешний вид поверхности SiC пластины при обработке свободным абразивом [101]



Рисунок 1.9 – Внешний вид поверхности SiC пластины при обработке связанным абразивом [105]

При последующей чистовой абразивной обработке канавки или следы, образовавшиеся на первоначальных стадиях шлифования, удаляются, поэтому для устранения данного дефекта рекомендуется поэтапная обработка керамики с назначением наименьшей зернистости (10-20 мкм) применяемого абразива на заключительных этапах [10,11,54,56,69].

Отличительной особенностью карбида кремния наряду с очень высокой твердостью является химическая инертность и хрупкость. Именно поэтому на заключительном этапе обработки пластин из карбида кремния необходимо такие режимы, при которых обеспечивается требуемая назначать шероховатость поверхности. Для обеспечения необходимого уровня адгезии металлических покрытий при последующем их напылении и вжигании тонким слоем на обработанной стороне пластины. Чистая поверхность также необходима для качественного проведения процессов диффузии, эпитаксии и технологическому маршруту изготовления изделий из окисления ПО керамики. Обеспечение требуемых значений шероховатости карбидной поверхности может быть достигнуто за счет применения на заключительных шлифования мелкозернистых абразивов, этапах правильного выбора

материала притира, а также научно-обоснованного назначения скорости удаления материала [78,83,85].

В исследованиях [89,90] предложена следующая зависимость шероховатости обработанной поверхности карбидокремниевых пластин при алмазном шлифовании:

$$R_a = \left(\frac{t^2}{a_c}\right) \left(\frac{q}{q+1}\right)^2,\tag{1.4}$$

где t – толщина стружки при шлифовании, а_с – глубина резания, q – скорость вращения шлифовального круга.

Обработка карбидокремниевых пластин больших диаметров также вызывает ряд технологических трудностей, способных привести К разрушению керамики. Дело в том, что исходная пластина-заготовка поставляется потребителю (предприятию) полированной с двух сторон. При абразивном шлифовании обратной стороны исходной пластины возникает неравенство механических напряжений на полированной и шлифованной поверхностях. За счет этого возникает существенная деформация пластин. Иными словами, обе поверхности «помогают» друг другу деформировать саму пластину: поверхность (полированная) сжимается, одна а другая (шлифованная) растягивается, в результате чего силы поверхностного натяжения растягивают каждую из двух поверхностей. Явление изгиба (деформации) тонких керамических пластин при абразивной обработке в науке получило название «Эффект Тваймана» [40].

Данный эффект возникает абсолютно на всех стадиях абразивной обработки пластин и зависит от соотношения толщины к диаметру исходной пластины [99,100].

Из рисунка 1.10. следует, что - чем тоньше обрабатываемая пластина, тем больше прогиб образовывающийся на конкретном этапе абразивной обработки. Так, для диаметра в 40 мм при толщине пластины равной 100 мкм прогиб может достигать значения в 500 мкм [40].



Рисунок 1.10 – Зависимость величины прогиба U кремниевых пластин от толщины d [97]

Обеспечение прогиба пластин не более 50 мкм является одним из главных требований при получении годных кристаллов. При невыполнении данного требования на пластинах становится невозможным выполнять процессы фотолитографии, ввиду потери точности совмещения фотошаблонов с пластиной и значительно повышается брак, вызванный скалыванием и разрушением керамики (до 80%) при установки пластин в базирующих пеналах.

Кроме перечисленных технологических проблем, возникающих при абразивной обработке карбида кремния сам процесс имеет крайне низкую производительность, обусловленную высокой твердостью и хрупкостью материала [84,85,122]. Обработка нескольких пластин может выполняться дней нормированном восьмичасовом рабочем около ПЯТИ при дне предприятия. Для увеличения производительности технологического процесса на пластины оказывают дополнительное усилие прижатия пластин к инструменту. Однако, чрезмерное усилие может привести в значительному увеличению толщины трещиноватого слоя с развитием в нем глубинных

микротрещин, способных привести к дальнейшему разрушению обрабатываемых пластин [94-95].

1.4. Трещинообразование в поверхностных слоях карбидокремниевых пластин при алмазно-абразивной обработке

Формирование трещиноватого (дефектного) слоя происходит не только в следствие механических разрушений путем внедрения абразивных зерен в поверхность обрабатываемых карбидокремниевых пластин, но и при определенных условиях, пластической деформации, возникающей в твердом материале при смещении зерен материала, по дислокационным сеткам. Поэтому в общем случае схема трещиноватого слоя будет состоять из областей, представленных на рисунке 1.11.



Рисунок 1.11 – Послойная структура нарушенного слоя (h) SiC пластины после абразивной обработки [40]:

 h_1 - поверхностный, рельефный слой, состоящий из хаотически расположенных выступов и впадин; h_2 - трещиноватый слой (с большим количеством микротрещин и дислокаций); h_3 - слой материала без трещин, но с дислокационными скоплениями, являющимися продолжением трещин и расположенных вокруг них зон упруго-деформированного монокристалла Под нарушенным слоем расположен неповрежденный после обработки монокристалл [87,89,90].

В течение всего процесса абразивной обработки на обрабатываемой поверхности имеется видоизмененный слой материала, часть которого срезается при каждом последующем переходе (или этапе обработки), а оставшаяся часть характеризует свойства обработанной поверхности. При этом после абразивной обработки поверхностный слой на некоторую глубину имеет развитую дислокационную мелкодисперсную структуру с достаточной силой связи между ее составляющими или находится в бесструктурном состоянии.

Размер трещиноватого слоя при взаимодействии абразивных зерен с обрабатываемыми карбидокремниевыми пластинами определяется размером самих зерен, видом и величиной усилия, оказываемого на обрабатываемые пластины, а также скоростью вращения инструмента. С увеличением времени обработки, происходит увеличение износа абразивных зерен и уменьшается глубина ИХ внедрения, при этом трещиноватый слой изменяется незначительно [40]. Также установлено, что с уменьшением силы прижатия, действующей на керамические заготовки процессе шлифования В трещиноватый слой тоже уменьшается [40].

На основании схемы трещинообразования при герцевском нагружении (рисунок 1.15), во время абразивной обработки карбидокремниевой пластины каждого режущего абразивного зерна образуется фронт вокруг быстрораспространяющихся хрупких микро и субмикротрещин. При нагружении абразивного зерна (А), вдавливаемого в пластину (П) сначала появляются радиальные трещины 1, увеличивающиеся с ростом нагрузки, затем медианные 2, которые могут слиться с радиальными. Последними появляются боковые трещины 3, почти параллельные поверхности пластины, которые при дальнейшем увеличении нагрузки выходят на поверхность и приводят к скалыванию материала [23,26,27,66].



Рисунок 1.12 – Схема трещинообразования в пластине при герцевском нагружении [70]

Современные подходы в изучении процессов деформации и разрушения твердых тел разделяются на два основных направления: классический и некласический подходы [50,58,79,80]. Классический подход не позволяет решить задачу об прочности материалов, так как в нем не учитывается особое напряженно-деформированное состояние материала около вершины остроконечного дефекта-трещины в процессе деформации тела. При этом неклассический подход разрушения предусматривает учет дополнительного состояния материала около остроконечных дефектов (трещин) – основных концентраторов напряжений [28,29,81].

Поскольку главными характеристиками, контролирующими поведение материала в вершине трещины, являются напряжения, энергия и деформация, то в рамках изучения механики сплошных сред существует необходимость введения критериев разрушения, которые аналогично классической теории прочности разделяются на энергетический, силовой и деформационный критерии [25,26,98-99,117].

Энергетический критерий был описан английским ученым Гриффитсом А.А., согласно которому одной концентрации напряжений у вершины трещины недостаточно для того, чтобы трещина разрушила твердое тело. Если ограничить доступ достаточной энергии к вершине трещины, то разрушение прекратится. Ученый предложил формулировку энергетического критерия исходя из закона сохранения энергии: трещина начнет распространяться, когда приращение поверхностной энергии (U) компенсируется

соответствующим выделением потенциальной энергии деформации (W) [64,68]:

$$\delta U + \delta W = 0 \tag{1.5}$$

Для пластины единичной толщины последнее уравнение может быть преобразовано в формулу расчета критического напряжения при плоском напряженном состоянии:

$$\sigma = \sqrt{\frac{2\gamma E}{\pi l}}, \qquad (1.6)$$

где γ – интенсивность поверхностной энергии, затрачиваемой на разрушение, Е – модуль упругости, l – длина микротрещины.

Силовой критерий разрушения был сформулирован Дж.Р.Ирвином, исследования которого были направлены на изучения распределения напряжений и деформаций, возникающих в твердом теле под действием приложенных нагрузок.

Интенсивность напряжения по трем направлениям распространения трещины определяется индивидуальными коэффициентами интенсивности (К₁, К₂, К₃,) которые служат мерой локализации напряжений около вершины трещины и определяют поле напряжений [53,54,72,73].

Таким образом силовой критерий начала роста трещины подразумевает, что при достижении значения коэффициента интенсивности (К) близкого к критическому значению (Кс) произойдет разрушение пластины:

$$\mathbf{K} = \mathbf{K}_{\mathrm{c}}; \tag{1.7}$$

$$K_{\rm C} = \sigma_{\rm H} \sqrt{\pi L} \,, \tag{1.8}$$

где σ_н - критическое внешнее напряжение, оказываемое на пластину, L – длина микротрещины в бесконечной пластине.

Для пластины конечных размеров формула (1.8) примет вид:

$$K_{\rm C} = \sigma_{\rm H} \sqrt{\pi L} k_{\rm B} = \sigma_{\rm H} \sqrt{\pi L} \cdot f(L/W), \qquad (1.9)$$

где W – ширина пластины, L – длина микротрещины; k_в=f(L/W) – безразмерная поправочная функция.

Значение К_С получают опытным путём. К_С – есть мера возникновения трещин в твердом материале. Для материалов с малой вязкостью разрушения допускаются только небольшие трещины. Очевидно, что материал с наибольшей вязкостью разрушения имеет наибольшую остаточную прочность [30,32,62,63].

Деформационный критерий разрушения (σ – критерий) также как силовой критерий Ирвина относится к однопараметрическим критериям разрушения твердого материала и определяется коэффициентом предельного раскрытия трещины в вершине, учитывающий критическую величину локальной пластической деформации.

$$\sigma \ge \sigma_c \tag{1.10}$$

В модели Клунниковой Ю.В. установлено, что при взаимодействии абразива и поверхности материала в определенных условиях образуются трещины всех указанных типов не только при вдавливании инденторов, но и при царапании абразивными зернами, а также получена зависимость между зоной пластической деформацией S вокруг отпечатка индентора при вдавливании сферы и длиной радиальных трещин C_R.

$$S = \frac{F_1 \cdot (1 - 2\vartheta)}{\kappa_{1C} \sqrt{2\pi^5 C_R}} \tag{1.11}$$

где F₁ – нагрузка на единичное абразивное зерно; K_{Ic}, – коэффициент интенсивности возникновения микротрещин для обрабатываемого материала; υ – коэффициент Пуассона.

В основе моделей Бритвина А.А. [25] лежит представление о хрупком разрушении твердых тел под действием концентрированных нагрузок от абразивных частиц – инденторов. В модели на основании величины съема материала абразивом рассчитывается максимальная глубина проникновения медианных и радиальных трещин в материал при воздействии абразива остроугольной формы на поверхность обрабатываемого материла. Глубина приповерхностного поврежденного слоя, зависящая от формы и режущей способности абразива, определяется следующим образом:

$$c = \left[4\alpha\beta R_{3}^{2} \left(1 + \left(\frac{H_{s}}{H_{c}}\right)^{\frac{1}{2}} \right)^{-2} (H_{s} \cdot E)^{\frac{1}{2}} K_{Ic}^{-1} \right]^{\frac{2}{3}}, \qquad (1.12)$$

где α и β константы, равные, соответственно, 0,016 и π, E, H_s и K_{Ic}, – соответственно модуль упругости, твёрдость и коэффициент интенсивности возникновения микротрещин обрабатываемого материала, Hc – твёрдость контртела (притира), R₃ – средний радиус абразивных частиц.

Данная модель позволила автору рассчитать зону пластической деформации, на границе которой при превышении критического усилия на частицу абразива формируются и растут боковые трещины, ответственные за разрушение кристалла. Глубина проникновения образуемых при этом боковых трещин h_{бок.тр} характеризуется глубиной проникновения в материала абразивного зерна диаметром d₃ и записывается следующим образом:

$$h_{\text{боктр}} = 2\alpha \left(\frac{E}{H_s}\right)^{\frac{1}{2}} \tan \theta \cdot d_s \left[1 + \left(\frac{H_s}{H_c}\right)^{\frac{1}{2}}\right]^{-1}, \qquad (1.13)$$

где θ – угол конуса индентора.

В работе [25] также утверждается, что изменения размеров трещин, полученных при механической обработке, должны быть пропорциональны величине остаточных напряжений. После абразивной обработки остаточные напряжения по всей площади пластины исчезнут. В связи с этим пластины после абразивной обработки не будут иметь остаточных напряжений в дефектном слое. Их энергия будет израсходована на приращение размеров трещин. При этом, предел прочности пластины в области, где отсутствуют остаточные напряжения, должен быть максимальным и зависеть от зернистости применяемого инструмента d₃.

Выводы по главе 1 и постановка задач исследований

Основываясь на материале, изложенном в данной главе, можно сделать следующие выводы:

1. 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.

2. Установлено, что абразивная обработка тонких керамических 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.

3. Трещинообразование карбидокремниевых пластин, приводящее к их дальнейшему скалыванию или полному разрушению, зависит от зернистости и геометрической формы абразивных частиц, а также от усилия прижатия пластин к инструменту.

4. Односторонняя абразивная обработка карбидокремниевых пластин способна вызвать их деформацию (прогиб), приводящую к дальнейшему разрушению пластин при их совмещении с фотошаблонами или потере точности при выполнении операций фотолитографии.

5. Проведенный анализ результатов исследований в рассматриваемой области показал, что отсутствует научно обоснованный подход к назначению режимов абразивной обработки алмазными пастами обратной стороны карбидокремниевой подложки, ограничивающих трещинообразование и обеспечивающих требуемое качество обработанной поверхности.

На основании сделанных выводов можно сформулировать основную цель данной работы: 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).
II. МАТЕРИАЛЫ, ПРИБОРЫ, ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1. Общая методика и этапы проведения исследований

Для научно обоснованного назначения технологических режимов абразивной обработки алмазными пастами, карбидокремниевых пластин ограничивающих трещинообразование и обеспечивающих требуемое качество обработанной поверхности необходимо выполнить следующие этапы исследований:

1 – обзор литературы, анализ основных требований к качеству пластин из карбида кремния и технологии их абразивной обработки;

2 – формирование цели и постановка задач исследования;

3 – определение параметров и условий абразивной обработки оказывающих наибольшее влияние на длину формируемых микротрещин и качество поверхностного слоя обрабатываемых SiC пластин;

4 – проведение экспериментальных исследований для нахождения рациональных условий абразивной обработки;

5 – разработка методики назначения режимов абразивной обработки алмазными пастами, обеспечивающих требуемое качество, скорость съема материала и ограничивающих трещинообразование карбидокремниевых пластин;

6 – оценка экономической эффективности результатов исследования и разработка нового способа абразивной обработки, обеспечивающего требуемое качество тонких пластин из карбида кремния.

Общая стратегия научных исследований представлена в виде блок схемы, представленной на рисунке 2.1.



Рисунок 2.1. – Блок-схема общей стратегии научных исследований

В рамках 1-го и 2-го этапа на основе анализа литературы был сделан вывод, что задача выбора технологических режимов абразивной обработки алмазными пастами карбидокремниевых пластин, ограничивающих трещинообразование и обеспечивающих требуемое качество обработанной поверхности является актуальной (см. гл.1).

На 3-м этапе после анализа литературных источников, изучения заданных требований, предъявляемых к керамическим подложкам, а также технологических проблем возникающих при выпуске серийных изделий из карбидной керамики определяются условия для ограничения трещинообразования и обеспечения качества поверхностного слоя SiC пластин с учетом скорости съема материала, зависящей от условий и параметров абразивной обработки.

На 4-м этапе выполняются теоретико-экспериментальные исследования для определения взаимосвязей требуемых параметров качества пластин (параметров шероховатости, глубины дефектного слоя, параметров поверхностных микротрещин и прогиба пластины) с режимами и условиями абразивной обработки алмазными пастами карбидокремниевых пластин политипов 4-H и 6-H.

На 5-м этапе разрабатывается методика назначения режимов абразивной обработки алмазными пастами, ограничивающих трещинообразование и обеспечивающих качество обратной поверхности обрабатываемых пластин.

Разработка нового инновационного способа абразивной обработки пластин и обоснование экономической эффективности проведенных исследований выполняются в 6-м этапе научных исследований.

Методику проведения экспериментальных исследований можно представить в виде блок-схемы (рисунок 2.2).



Рисунок 2.2 – Блок-схема методики проведения экспериментальных исследований

Планирование эксперимента заключалось в составлении плана его проведения, в определении необходимых условий выполнения научного

эксперимента, в выборе средств измерений, схемы измерений и количества измерений результатов эксперимента, подготовке образцов [2, 88].

Обеспечение одинаковых условий проведения каждого из опытов в рассматриваемой серии экспериментов происходило путем:

- тщательного удаления абразивной пасты и шлама от механической обработки пластин с поверхности притира после каждого этапа абразивной обработки;

- протиркой притира раствором нефраса перед нанесением абразивной пасты;

- правкой притира, если его неравномерный износ превышал 10 мкм.

Для настройки контрольно-измерительных приборов и оценки их систематической погрешности использовались образцы шероховатости (ГОСТ 9378-93), набор концевых мер (1-Н2 ГОСТ 9038-83).

Статистический анализ полученных результатов измерений основывался на применении методов теории выборок.

Экспериментальные исследования проводились по четырем направлениям.

В рамках выполнения первого направления экспериментальных исследований выполнялась абразивная обработка карбидокремниевых пластин политипов 4-Н и 6-Н пастами на основе синтетических алмазов различной зернистости с изменением скорости вращения инструмента и усилия прижатия пластин к инструменту (притиру с алмазной пастой). Опыты предусматривали выполнение одно, двух и трехстадийной абразивной обработки на разных технологических режимах для оценки качества обработанной поверхности пластины.

Второе направление экспериментальных исследований было посвящено выявлению взаимосвязи длины формируемых микротрещин в поверхностном слое керамических пластин с технологическими режимами алмазноабразивной обработки.

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.

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 рамках третьего направления экспериментальных исследований была выполнена абразивная обработка SiC пластин различных политипов для выявления взаимосвязей параметров шероховатости обработанной режимами поверхности обработки. с технологическими Параметры шероховатости определялись с помощью профилографа-профилометра MarSurhPS10.

Четвертое направление экспериментальных исследований было направлено на изучение деформации пластин в процессе их абразивной обработки. Обрабатывались как цельные пластины, так и четверти пластин на различных технологических режимах. После абразивной обработки образцы пластин подвергались очистке в различных средах (ацетон, керосин технический, глицерин чистый). Величина деформации пластин определялась по завершении каждого этапа абразивной обработки на микроинтерферометре с использованием специальной индикаторной головки.

2.2. Размеры и основные характеристики обрабатываемых пластин из карбида кремния

В исследованиях использовались карбидокремниевые пластины толщиной не менее 325 мкм и диаметром 100.0.8 мм политиповой структуры 4-Н изумрудного цвета, а также карбидокремниевые пластины толщиной не менее 400 мкм и диаметром 76.0.8 мм политиповой структуры 6-Н серого цвета. Обрабатывались также и части, в частности, четверти пластин из карбида кремния. Требования к качеству обратных сторон пластин приведены в таблице 1.4. Внешний вид пластин представлен на рисунках 2.3-2.5, а основные характеристики соответствующих керамических материалов указаны в таблицах 2.1-2.2.



Рисунок 2.3 – Карбидокремниевые пластины 4-Н политипа диаметром 100 мм



Рисунок 2.4 – Четверти пластины 4-Н политипа



Рисунок 2.5. – Карбидокремниевые пластины 6-Н политипа диаметром 76 мм

Таблица 2.1. – Основные характеристики карбидокремниевых пластин при приемке в производство *

Пункт	Ед. изм.	Специф	рикация	
Диаметр	MM	100	76	
Политип/проводимость	-	4H/n-тип	6H/n-тип	
Эпитак. сторона/		Si/(0001)	Si/(0001)	
Ориентация	-	разориентация 4°	разориентация 4°	
Плотность микропор	см-2	≤ 1.00	≤ 1.00	
Сопротивление	Ом.см	≤ 0.023	-	
Oppoportes notoway		Химико-	Химико-	
Поротка рабочих	-	механическое	механическое	
поверхностей		полирование	полирование	
Прогиб	МКМ	± 20	± 20	
Толщина (средняя)	МКМ	≥ 325	\geq 400	
Дефекты поверхности	см ⁻²	≤ 0.8	≤ 0.7	
Царапины	MM	< 100	< 100	
Рабочая площадь	%	≥ 92.0	≥92.0	
* – по данным АО «Группа Кремний ЭЛ» (г. Брянск)				

Таблица 2.2. – Основные механические характеристики политипных структур карбида кремния [1]

Политип	4H	6H
Плотность (г/см ³)	3.211	3.210
Твердость по шкале Мооса	9-9	9,5
Поверхностная микротвердость, кг/ мм ²	2900-3100	
Коэффициент объемного сжатия, Гпа-1	22	20
Модуль упругости (модуль Юнга) Гпа	748	
Температура плавления, °С	27	30

Следует отметить, что гексагональные политипы 6Н и 4Н карбида кремния отличаются последовательностью чередования (укладки) определенного числа различных видов слоев атомов кремния и углерода, определяет кристаллическую которая структуру керамического материала. Таким образом, материал 6H-SiC имеет шестислойную периодичность укладки в кристаллической структуре, а материал 4H-SiC – четырехслойную.

2.3. Установка для алмазно-абразивной обработки пластин из сверхтвердых материалов и вспомогательное технологическое оснащение

Экспериментальные исследования абразивной обработки пластин из карбида кремния выполнялись на установке ЮФ 113203, внешний вид которой представлен на рисунке 2.6.



Рисунок 2.6 – Внешний вид установки ЮФ 113203

Установка ЮФ 113203 предназначена для абразивной обработки карбидокремниевых пластин и других твердых материалов (лейкосапфира,

ситала) после их предварительной резки на заготовки, или снятия покрытий с них. Обработка выполняется с использованием абразивных паст на основе алмазных микропорошков различной зернистости. В установке реализован процесс односторонней окончательной обработки (рисунок 2.7).



Рисунок 2.7. – 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

Рекомендуемые условия работы установки: температура воздуха от +16° С до +30° С, относительная влажность до 80 % при нормальном атмосферном давлении. Основные характеристики установки представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4. – Основные характеристики установки для алмазноабразивной обработки

Характеристика	Значение
Длина, мм	1000
Ширина, мм	1000
Высота, мм	1450
Масса, кг	≈400
Максимальная потребляемая мощность, кВт	0,8
Передаточное отношение шкивов	1/11/2
Передаточное число редуктора	1/50
Диапазон задания скорости вращения планшайбы, мин ⁻¹	350

Установка состоит из следующих узлов, представленных на рисунке 2.8 (наименования узлов приведены в таблице 2.5).



Рисунок 2.8 – Основные узлы установки

Таблица 2.5. – Базовые узл	лы установки
----------------------------	--------------

Наименование и позиции составных частей	Количество, штук	Примечание
1 - Каркас	1	
2 - Редуктор червячный	1	U=1/50
3 - Держатель	1	
4 - Кожух	1	
5 - Блок управления	1	
6 - Притир	1	

Базовым элементом, на котором крепятся все узлы, является каркас (поз.1). На каркас устанавливается корпус с кожухом (поз.4). В корпус на валу в подшипниковых опорах крепится притир с фиксаторами (поз.6). К каркасу крепится плита с двигателем и редуктором (поз.2). Натяжное устройство на плите позволяет регулировать усилие натяжения приводного ремня. Блок управления (поз.5) обеспечивает вращение притира с необходимой частотой при абразивной обработке пластин. Вилкообразный держатель (поз.3) с роликами на конце служит опорой алюминиевой планшайбе, на которую клеятся пластины. Регулировочные болты на корпусе позволяют менять угол плоскости вращения притира.

Крепление карбидокремниевых пластин осуществляется путем приклеивания их рабочей стороной (заранее защищенной ультрафиолетовой пленкой) к алюминиевой планшайбе (материал Д16), посредством клеящейся смеси на основе воска и парафина (рисунок 2.9.) на специальной термической печи (рисунок 2.10).



Рисунок 2.9. – Процесс нанесения клеящейся смеси на планшайбу



Рисунок 2.10. – Термическая печь для наклейки пластин на планшайбы

Охлаждение планшайбы с приклеенными пластинами осуществляется в технологической ванне (рисунок 2.11).



Рисунок 2.11. – Ванна для охлаждения планшайбы с приклеенными пластинами

После приклеивания пластин к планшайбе выполняется ее установка на вращающийся притир.

Для создания необходимого усилия прижатия пластин к притиру во время абразивной обработки с целью повышения производительности выполняемого процесса, на планшайбу дополнительно подкладывают грузы разной массы, и ориентируют их с планшайбой специальными адаптерами по центровому отверстию (рисунок 2.12). Масса грузов и адаптеров указана в таблице 2.6.



Рисунок 2.12. – Алюминиевый груз с адаптерами (а) и стальной груз (б)

Груз	Масса, кг
Дюралюминиевый	4
Стальной	4,7
Адаптер под центровое отверстие малый	0,47
Адаптер под центровое отверстие большой	0,75
Прочие дополнительные грузы	2, 3, 4

Таблица 2.6. – Масса подкладных грузов и адаптеров

2.4. Оборудование для контроля качества карбидокремниевых пластин

Размер поверхностных микротрещин, а также структура поверхностного слоя обработанных пластин фиксировались в виде микрофотографий, полученных электронографическим И оптическим способами с технологических возможностей использованием специализированного исследовательского оборудования: растрового электронного микроскопа Jeol 6610 JSM, цифрового 3-D микроскопа VHX-1000E и исследовательского микроскопа Olympus MX51. Внешний вид оборудования представлен на рисунках 2.13-2.15, а их технические характеристики указаны в таблицах 2.7-2.9.







Рисунок 2.13. – Внешний вид растрового электронного микроскопа Jeol 6610 JSM (а) и загрузочной вакуумной камеры (б)

Принцип работы растрового электронного микроскопа Jeol 6610 JSM заключается в создании изображений, путем сканирования исследуемой поверхности направленным пучком электронов. Электронный луч сканируется в шаблоне растрового сканирования, а положение луча объединяется с обнаруженным сигналом для создания изображения.



Рисунок 2.14. – Внешний вид цифрового 3-D микроскопа VHX-1000E



Рисунок 2.15. – Внешний вид цифрового исследовательского микроскопа Olympus MX51

Таблица 2.7 – Технические характеристики растрового электронного микроскопа Jeol 6610 JSM

Наименование параметра	Характеристики		
Ускоряющее напряжение	От 0.3 до 30кэВ		
Разрешение в режиме с высоким вакуумом с низким вакуумом	30 ангстрем (3.0 нм) 40 ангстрем (4.0 нм)		
Диапазон увеличений	от x5 до x300 000		
Пространственное разрешение	3 нм		
Виды контраста	вторичные электроны; топографический контраст; отражённые электроны; композиционный, топографический, теневой контрасты.		
Катод	Вольфрамовый		
Столик для образцов	Моторизованный столик для образцов с компьютерным управлением: перемещение по оси Х 125мм, Ү: 100мм; Z: от 5 до 80мм; наклон: от –10 до +90°, вращение 360°		
Размер образца	Диаметр до 200мм, толщина до 80мм		

Таблица 2.8 – Технические характеристики цифрового 3-D микроскопа VHX-1000E

Наименование параметра	Характеристики	
Электрический мотор	5-фазный шаговый двигатель	
	1/1.8-дюймовая 2.11 мега пиксельная ПЗС	
ห้องเอกอ (อหานุมุน เน้ อแองเอนา)	матрица. Всего пикселей: 1688(H)x1248(V)	
Камера (активный элемент)	Эффективных пикселей: 1628(H)x1236(V)	
	Фактических пикселей: 1600(H)x1200(V)	
	4800(H)х3600(V), прим. 2000 TV строк	
Разрешение	18Мп х 3ПЗС режим (прекрасное	
	цветовоспроизведение)	
Точность позиционирования	6 µm	
Точность повторяемости	±0.5 μm	
Возможность сшивания	До 10000 x 10000 пикселей к области	
изображений	обозрения	
Возможность построения	Да	
3D-изображений		
Vpannanna	Увеличительный Объектив Высокого	
у величение	Разрешения 5000 [×]	

Таблица 2.9 – Технические характеристики цифрового

исследовательского микроскопа Olympus MX51

Наименование	Vapartaphaturu		
параметра	Ларактеристики		
	Встроенный источник падающего света		
Освещение	мощностью 100 Вт Осветительный блок		
	проходящего света		
	Механическая. Полный диапазон хода – 32мм		
Фокусировка	Величина хода за один оборот: 0,1 мм (точная		
	настройка) Максимальная высота образца – 30 мм		
Револьверная	Механическая, Четырехпозиционная (Светлое		
головка	поле)		
	Механический предметный столик с держателем		
Предметный столик	пластин (6" х 6"). Диапазон перемещения 158 мм х		
	158 мм		
Наблюдательная	Широкопольная F.N. 22, прямое изображение,		
насадка	тринокуляр		
Методы	Светлое поле, темное поле, поляризация, ДИК,		
наблюдения	флуоресценция		

Для измерений шероховатости и построения профилограм обработанной поверхности после абразивной обработки использовался профилограф-профилометр немецкой фирмы «Mahr GmbH» - MarSurf PS10 (рисунок 2.16).



Рисунок 2.16 – Профилограф-профилометр MarSurf PS10

Основные технические характеристики устройства представлены в таблице 2.10.

Наименование параметра	Характеристики	
Принцип измерения	метод ощупывания	
Входы	Индуктивный опорный щуп	
Единицы измерения	метры/дюймы	
	350 мкм, 180 мкм, 90 мкм	
диапазон измерения (мм)	(автоматическое переключение)	
Длина трассирования в соответствии	1 мм, 2 мм, 4 мм, 8 мм, 12 мм, 16	
c ISO 12085 (MOTIF)	MM	
Измерительное усилие	приблиз. 0,7 мН	
Функция калибровки	динамическая	
	до 15 профилей, до 20 000	
Емкость хранилища	результатов	
	литий-ионная аккумуляторная	
Аккумуляторные оатареи	батарея	
Электропитание (широкий диапазон)	от 100 до 264 В	
Размер в мм	160 x 77 x 50	

Таблица 2.10 – Технические характеристики Mahr MarSurf PS10

Данный прибор служит для измерения шероховатости поверхности кремниевых и карбидокремниевых пластин в серийном производстве. Результаты измерения сохраняются в профилометре в формате PDF, которые можно перенести на компьютер.

Контроль деформации (прогиба) изготавливаемых керамических пластин проводили на промежуточных операциях и после окончательной абразивной обработки пластин. Во избежание повреждений измеряемой поверхности тонкотолщинных пластин контроль производился бесконтактным интерференционным способом.

Величина деформации (прогиба) карбидокремниевых пластин после абразивной обработки оценивалась с помощью микроинтерферометра МИИ-4 (рисунок 2.17) и специальной индикаторной головки.

Технические характеристики микроинтерферометра представлены в таблице 2.11.



Рисунок 2.17. – Внешний вид микроинтерферометра МИИ-4

Принцип действия прибора основан на явлении интерференции света. Для получения двух систем волн, способных интерферировать, пользуются разделением светового пучка (исходящего из одной точки источника света) на наклонной плоскопараллельной пластинке с полупрозрачным делительным покрытием. В поле зрения микроинтерферометра наблюдаются одновременно интерференционные полосы и исследуемая поверхность. Перемещение исследуемой поверхности вверх или вниз на какую-нибудь малую величину вызывает изменение хода лучей на двойную величину перемещения поверхности, так как свет проходит это расстояние дважды. Изменение хода одной ветви прибора вызывает изменение разности хода лучей В интерферирующих лучей, в результате чего полосы в поле зрения смещаются. Если на исследуемой поверхности имеется выступ или впадина, то в этом месте имеется разность хода и, следовательно, полосы смещаются и становится возможным установить характер и величину прогиба карбидо кремниевых пластин после обработки.

Наименование параметра	Характеристики
Диапазон измерения толщины пленок, мкм	0,1 - 1000
Увеличение при визуальном наблюдении, крат	500
Линейное поле зрения в пространстве предмета, мм	0,3
Габаритные размеры, мм	300×300×420
Масса, кг	30

Таблица 2.11 – Технические характеристики микроинтерферометра МИИ-4

Измерение толщины карбидокремниевых пластин, после каждого съема материала на заданном этапе абразивной обработки, производилось на поверочной плите с использованием стойки оснащенной индикаторной головкой часового типа 1МИГ ГОСТ 9696-82 (рисунок 2.18).



Рисунок 2.18. – Расположение индикатора на поверочной плите

Контрольные измерения толщины обработанной пластины выполнялись на специальной отдельной стойке с поверенной индикаторной головкой

Время всех стадий абразивной обработки фиксировалось с помощью механического секундомера.

2.5. Особенности проведения абразивной обработки карбидокремниевых пластин алмазными пастами

Перед выполнением алмазной абразивной обработки карбидокремниевых пластин выполнялся ряд следующих подготовительных технологических операций:

1. Снятие фаски (внутренней и внешней) на притире с целью исключения возможного растрескивания обрабатываемых пластин об заостренные края притира во время абразивной обработки (рисунок 2.19).



Рисунок 2.19. – Снятие внешней фаски на стеклянном притире

2. На одну строну карбидокремниевой пластины (ее называют лицевой, и данная сторона имеет фотолитографическую разметку под будущие кристаллы) наклеивалась адгезионная ультрафиолетовая пленка с целью защиты указанной стороны от возможных царапин (рисунок 2.20). Марка пленки – ДУ15, толщина пленки составляет 120 мкм.



Рисунок 2.20. – Нанесение защитной пленки на лицевую сторону пластины

3. В зависимости от количества карбидокремниевых пластин в партии запуска на планшайбу наклеивались:

а) Только карбидокремниевые пластины;

б) Карбидокремниевые пластины и кремниевые пластины (для стабилизации процесса обработки), расположенные как показано на рисунке 2.21, (подбор кремниевых подложек осуществляется с учетом толщины карбидокремниевых образцов и защитной пленки).



Рисунок 2.21. – Крепление SiC и Si пластин на планшайбе

4. Охлаждение планшайбы совместно с приклеенными на нее пластинами в водяной ванне до полного приклеивания пластин к планшайбе. Излишки клеевой смеси удалятся ватой технической ГОСТ5679-91, пропитанной Нефрасом – C2-80/120 ГОСТ8781-71.

5. Проверка соответствия толщины каждой керамической пластины и отсутствия вздутия пластин на планшайбе из-за возможного попадания инородных частиц из клеевой смеси под пластины. Оформление эскиза обработки с указанием положения пластин и их начальных толщин. Максимальная разница толщин всех пластин, размещенных на планшайбе не должна превышать 10 мкм.

 Притирка планшайбы с наклеенными пластинами о притир из стекла оптического с помощью пасты АСМ 60/40 ПОМ ГОСТ 25593-83 при скорости вращения планшайбы 28 мин⁻¹ в течение 30 минут.

7. Проведение абразивной обработки алмазными пастами в общем случае состоящей из трех этапов:

I) Обработка алмазной пастой АСМ 60/40 ПОМ ГОСТ 25593-83, с измерением толщины снимаемого слоя каждые 40-50 минут, с грузом определенной массы. Обработка выполняется до тех пор, пока получаемая толщина SiC пластин будет иметь припуск равный 50 мкм на последующие два этапа обработки SiC подложек. Проверка возможного растрескивания пластин каждые 40-50 минут.

II) Обработка алмазной пастой АСМ 40/28 ПОМ ГОСТ 25593-83, с измерением толщины снимаемого слоя материала каждые 40-50 минут, с использованием дополнительного груза массой 2,5-4,8 кг. Проверка возможного растрескивания пластин каждые 40-50 минут.

III) Обработка алмазной пастой АСМ 28/20 ПОМ ГОСТ 25593-83, с измерением толщины снимаемого слоя материала каждые 40-50 минут, без использования подкладного груза. Толщина удаляемого слоя карбидокремниевых пластин на данном этапе механической обработки

составляет 25-30 мкм (до толщины готового изделия 260±20 мкм). Проверка возможного растрескивания пластин каждые 40-50 минут.

8. После абразивной обработки выполнялся нагрев планшайбы с пластинами на термической печи для съема всех пластин с планшайбы.

9. Очистка пластин от клея и частиц абразивной обработки путем погружения карбид кремниевых пластин в подогретые металлические ванны с трихлорэтаном. Затем выполнялась промывка образцов в дистиллированной воде.

10. Контроль качества абразивной обработки обратных поверхностей пластин с использованием специального оборудования (см. п. 2.4).

III. ВЗАИМОСВЯЗЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ АЛМАЗНЫМИ ПАСТАМИ С ПАРАМЕТРАМИ КАЧЕСТВА КАРБИДОКРЕМНИЕВЫХ ПЛАСТИН

3.1. Исследование процесса формирования поверхностных слоев карбидокремниевых пластин при абразивной обработке алмазными пастами

В процессе абразивной обработки керамических материалов их поверхностные слои подвергаются силовому воздействию и изменяют свою структуру. Эти слои называются нарушенными (дефектными).

Учитывая особенности абразивной обработки алмазными пастами, схема к определению толщины нарушенного слоя h карбидокремниевых пластин представлена на рисунке 3.1:



Рисунок 3.1 – Структура нарушенного слоя обрабатываемой керамики: I – наружный рельефный слой, состоящей из хаотически расположенных выступов и впадин, II – слой одиночных выколок и идущих вглубь микротрещин

Нарушенный слой оказывает существенное влияние на электрофизические характеристики готовых приборов на основе карбидокремниевой керамики. Поэтому глубина нарушенного слоя не должна превышать допустимых значений перед дальнейшими этапами производства продукции из карбидной керамики. С целью изучения влияния технологических режимов абразивной обработки, на величину нарушенного слоя карбидокремниевых пластин была проведена серия из 10 экспериментов. Первые пять экспериментов были направлены на абразивную обработку SiC пластин политипа 4-H, эксперименты 6-10 включали механическую обработку пластин 6-H политипа. Режимы проведения экспериментов для обоих политипов идентичны и представлены в таблице 3.1.

Абразивной обработке подвергались четверти карбидокремниевых пластин совместно с кремниевыми образцами, размещенными на одной планшайбе. Кремниевые пластины выступают в роли стабилизирующих элементов и служили для снижения воздействия переменных нагрузок на процессе абразивной обработки co образцы В стороны притира. Экспериментальные исследования выполнялась на установке ЮФ 113203 по обработке сверхтвердых материалов производства АО «Группа Кремний Эл» (рис.2.6, 2.7). В качестве абразивного материала использовались пасты на основе синтетических алмазов различной зернистости. В рамках выполнения первого и шестого эксперимента была выполнена одностадийная абразивная обработка пластин пастой с содержанием крупнозернистого алмазного порошка АСМ 60/40 с дополнительным усилием прижатия пластин к инструменту F'= 47 H. Остальные эксперименты основывались на введении поэтапной абразивной обработки с постепенным уменьшением зернистости алмазного микропорошка применяемой абразивной пасты. Величина дополнительного усилия прижатия пластин к инструменту F' варьировалась с 47 H до 0 H (обработка пластин без подкладного груза). Абразивная обработка пластин без подкладного груза происходила под собственным весом планшайбы равным 4 кг.

Для стабилизации процесса обработки стеклянный притир правился стальным диском в течение 30-40 минут перед каждый опытом. В результате чего отклонение от плоскостности стеклянного притира после правки не превышало 10 мкм.

				Маршрут обработк	СИ		
Номер опыта	Этап обработки	Абразив	Скорость вращения притира, мин ⁻¹	Время обработки, ч	Усилие дополнительного прижатия пластин к инструменту F', Н	Материал притира	Политип пластины
1	1	АСМ 60/40 ПОМ	50	1	47		
2	1	АСМ 60/40 ПОМ	50	1	47		
2	2	АСМ 40/28 ПОМ	30	1,5	47		
3	1	АСМ 60/40 ПОМ	30	1,2	25	-	
5	2	АСМ 40/28 ПОМ	30	1,2	25		
	1	АСМ 60/40 ПОМ	28	1	47		4-H
4	2	АСМ 40/28 ПОМ	35	1	47		
	3	АСМ 28/20 ПОМ	35	2,5	47		
	1	АСМ 60/40 ПОМ	28	1	47		
5	2	АСМ 40/28 ПОМ	35	1	47		
	3	АСМ 28/20 ПОМ	24	2,5	0	Стекло	
6	1	АСМ 60/40 ПОМ	50	1	47	листовое	
7	1	АСМ 60/40 ПОМ	50	1	47	бесцветное	
/	2	АСМ 40/28 ПОМ	30	1,5	47		
0	1	АСМ 60/40 ПОМ	30	1,2	25		
0	2	АСМ 40/28 ПОМ	30	1,2	25		
9	1	АСМ 60/40 ПОМ	28	1	47		6-H
	2	АСМ 40/28 ПОМ	35	1	47	-	
	3	АСМ 28/20 ПОМ	35	2,5	47		
	1	АСМ 60/40 ПОМ	28	1	47]	
10	2	АСМ 40/28 ПОМ	35	1	47	1	
	3	АСМ 28/20 ПОМ	24	2,5	0	1	

Таблица 3.1 – Условия проведения экспериментов по определению толщины нарушенного слоя SiC пластин

Результаты экспериментальных исследований приведены в таблице 3.2. Микрофотографии нарушенного слоя пластин после абразивной обработки представлены на рисунках 3.2-3.5.



Рисунок 3.2 – Микрофотографии нарушенного слоя. Слева – образца №1, справа №2



Рисунок 3.3 – Нарушенный слой обработанных пластин: слева –образца №6, справа №8



Рисунок 3.4 – Нарушенный слой обработанных пластин: слева –образца № 4, справа №9



Рисунок 3.5. – Микрофотографии нарушенного слоя. Слева – образца №5, справа №10

Таблица 3.2 -	- Экспериментальные	значения высоты	нарушенного	слоя
обработанной пове	рхности SiC пластин			

	h _{max} , Максимальная					
Номер опыта	высота образованного нарушенного слоя, мкм					
	Область 1	Область 2	Область 3	$h_{max}^{(3)}$		
1	90	95	89	91,3 ± 7,981		
2	72	80	83	$78,3 \pm 14,117$		
3	45	49	52	$48,6 \pm 8,72$		
4	40	37	43	$40 \pm 7,448$		
5	15	20	10	$15 \pm 12,414$		
6	95	97	115	$102,3 \pm 27,35$		
7	84	75	89	82,6 ± 17,613		
8	54	56	50	$53,3 \pm 7,585$		
9	35	45	47	$42,3 \pm 15,962$		
10	19	22	16	$19 \pm 7,448$		

Примечания: 1. Измерение величины образованного нарушенного слоя выполнялось в трех областях, расположенных на стороне вертикального реза пластины (см. рисунок 3.6.).

2. Длина каждой анализируемой области составляла 5-7 мм.

3. Показаны 95%-ные доверительные интервалы значений максимальной высоты нарушенного слоя.

4. Значения максимальной высоты нарушенного слоя определялись оптическим методом на растровом электронном микроскопе Jeol 6610 JSM при горизонтальном увеличении до 450 раз, цифровом 3-D микроскопе VHX-1000E, а также цифровом микроскопе Olympus MX51 при вертикальном увеличении до 250 раз



Рисунок 3.6. – Расположение областей исследования поверхностных слоев карбидокремниевых пластин

На каждом из обработанных образцов был обнаружен наружный рельефный слой, состоящей из хаотически расположенных выступов и впадин, а также слой как с локальными поверхностными микротрещинами.

Установлено, что наибольшая величина нарушенного слоя ($h_{max} = 91$ мкм – для политипа 4-Н и 102 мкм для 6-Н политипа) была получена при одностадийной обработке опытных образцов №1 и №6 с применением абразивной пасты с зернистостью алмазного порошка 60/40 мкм и дополнительным усилием прижатия пластин к инструменту F'=47 Н. При введении дополнительного этапа абразивной обработки SiC пластин пастой ACM 40/28 (опытные образцы №2 и №7) с сохранением усилия дополнительного прижатия F'=47 Н - глубина нарушенного слоя пластин обоих политипов уменьшается на 15-20 % и составляет 78 и 82 мкм соответственно.

Снижение величины дополнительного усилия прижатия пластин к инструменту до F'=25 Н при двухэтапной абразивной обработке (опытные образцы №3 и №8) также позволило уменьшить глубину нарушенного слоя на 20-30%.

Абразивная обработка пластин в три этапа с последовательным уменьшением зернистости алмазного микропорошка в составе пасты позволила получить наименьшую глубину нарушенного слоя при условии, что на заключительном этапе абразивной обработки пастой ACM 28/20 на пластины не будет использоваться подкладной груз (F'=0, опытные образцы №5 и №10). Величина нарушенного слоя при данном варианте абразивной обработки составила 10-15 мкм для пластин политипа 4-Н и 15-19 мкм для политипа 6-Н.

Таким образом можно утверждать, что на величину нарушенного слоя обработанных карбидокремниевых пластин оказывает преимущественное влияние усилие прижатия пластин к инструменту, зернистость применяемого алмазного микропорошка, а также количество этапов абразивной обработки.

Следует также отметить, что абразивная обработка пастами ACM 60/40 и ACM 40/28 при усилии прижатия образцов к инструменту 90H сопровождалась скалыванием краев подложек или их разрушением. Поэтому в дальнейшем данное усилие в ходе исследований было меньше 90H.

3.2. Скорость съема керамического материала при абразивной обработке алмазными пастами и ее влияние на формирование микротрещин в карбидокремниевых пластинах

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 (рисунок 3.7) [3,73,104]. Поэтому для достижения поставленных задач необходимо получить зависимость для расчета скорости q съема карбида кремния при рассматриваемой абразивной обработке.



Рисунок 3.7 – Взаимосвязи скорости съема материала с технологическими режимами обработки и параметрами качества поверхности карбидокремниевой пластины

Получим формулу для расчета величины q. При этом будем исходить из следующих допущений:

1) инструмент и заготовка (пластина) являются абсолютно жесткими телами;

2) в ходе обработки имеет место полный контакт обрабатываемой поверхности с рабочей поверхностью инструмента;

3) сближение заготовки и инструмента происходит в направлении действия силы F (см. рис. 2.7);

4) за время обработки контактирующие поверхности прирабатываются.

На основании гипотезы Ф. Престона о диспергировании материала при трении скорость съема материала с заготовки в произвольной точке контакта можно представить в виде:

$$q = kpV = kp2\pi rn, \qquad (3.1)$$

где k – коэффициент пропорциональности, зависящий от условий контактирования поверхностей; р – давление в зоне контакта; V – скорость перемещения рассматриваемой точки поверхности заготовки относительно

инструмента; r – радиус, на котором находится рассматриваемая точка поверхности заготовки; n – частота вращения инструмента.

Из уравнения (3.1) можно получить следующую зависимость:

$$p = \frac{q}{2\pi k r n} \tag{3.2}$$

Из условия равновесия керамической пластины следует, что

$$F = \iint_{[S]} pds, \tag{3.3}$$

где F – усилие прижатия пластин к инструменту; [S] – поверхность контакта инструмента и пластин.

Уравнение (3.3) можно представить следующим образом:

$$F = \int_{R_1}^{R_2} 2pf \, \pi r dr, \qquad (3.4)$$

где ΔR=R2–R1 – диаметр пластины или размер заготовки в рассматриваемом направлении при обработке частей пластигы; f − коэффициент, характеризующий форму и расположение пластин на планшайбе.

При подстановке зависимости (3.2) в уравнение (3.4), получим

$$F = \int_{R_1}^{R_2} \frac{qf}{kn} dr \,.$$
 (3.5)

Решая это уравнение, можно определить, что

$$q = \frac{knF}{\Delta Rf}.$$
 (3.6)

Учитывая, что планшайба с пластинами за счет сил трения в зоне контакта с притиром получает вращение вокруг собственной оси симметрии (см. рис. 2.7), то зависимость (3.6) примет вид:

$$q = \frac{kn^m F}{\Delta R \cdot f}$$
(3.7)

Экспериментальные исследования (см. п.3.3) показали, что k=1,0-1,5 и m=0,5-0,7, и зависят от зернистости алмазного микропорошка и политипа карбида кремния.

Из зависимости (3.7) следует, что скорость съема материала с поверхности карбидокремниевой пластины прямо пропорциональна скорости вращения инструмента и усилию прижатия заготовки к инструменту F, а

влияние частоты вращения притира на производительность обработки носит нелинейный характер.

Графическое представление зависимости (3.7) приведено на рисунках 3.8–3.9. Для изучения влияния скорости съема материала на длину формируемых в поверхностном слое карбидокремниевых пластин микротрещин была проведена серия экспериментов. Условия проведения исследований представлены в таблице 3.3.



Рисунок 3.8 – Зависимости скорости q съема материала при абразивной обработке пластин различными абразивными пастами при нагрузке F=87 H



Рисунок 3.9 – Зависимости скорости q съема материала при абразивной обработке SiC керамики различными абразивными пастами без подкладного

```
груза (при F=40 H)
69
```

Обрабатывались четверти карбидокремниевых пластин политипа 4-Н совместно с кремниевыми образцами, размещенными на одной планшайбе. В качестве абразивного материала использовались пасты на основе алмазной крошки различной зернистости. Опыт №1 заключался в проведении одностадийной абразивной обработки пастой АСМ 60/40 при усилии прижатия пластин F=87 H. Опыты №2,3 были направлены на увеличение количества стадий абразивной обработки, сопровождающихся постепенным уменьшением зернистости алмазного порошка при сохранении заданной скорости вращения инструмента и силы прижатия заготовок к притиру. В рамках проведения опытов №4-6 была выполнена абразивная обработка, состоящая из тех же стадий, что и опыты №1-3, но с увеличением скорости вращения притира до 42 мин⁻¹ и уменьшением силы прижатия на заключительных этапах абразивной обработки (таблица 3.3). В качестве притира был использован диск из стекла оптического, бесцветного.

Значения длины формируемых микротрещин при заданных условиях и параметрах абразивной обработки представлены в таблице 3.4.

		Map	ошрут обработки		
Номер опыта	Этап обработки	Абразив	Скорость вращения притира, мин ⁻¹	Время обработки, ч	Усилие прижатия заготовок к притиру, Н
1	1	АСМ 60/40 ПОМ		3	87 H
2	1	АСМ 60/40 ПОМ	20	3	87 H
2	2	АСМ 40/28 ПОМ		3,5	87 H
	1	1 ACM 60/40 ПОМ 50	50	3	87 H
3	2	АСМ 40/28 ПОМ		3	87 H
	3	АСМ 28/20 ПОМ		3,5	87 H
4	1	АСМ 60/40 ПОМ		3	87 H
5	1	АСМ 60/40 ПОМ		3	87 H
	2	АСМ 40/28 ПОМ	42	3,5	40 H
	1	АСМ 60/40 ПОМ		3	87 H
	2	АСМ 40/28 ПОМ		3	87 H
	3	АСМ 28/20 ПОМ		3,5	40 H

Таблица 3.3 – Условия абразивной обработки SiC пластин 4-Н политипа

<u></u>							
Номер опыта	Ско	Длина					
	за 1-й час	за 2-й час	за 3-й час	$q^{(2)}$	микротрещин		
	обработки	обработки	обработки		L ⁽³⁾ , мкм		
1	10	12	15	$12,3 \pm 6,23$	70-80		
2	10	11	10	$10,3 \pm 1,42$	40-50		
3	8	6	7	$7 \pm 2,\!45$	20-25		
4	19	18	20	$19 \pm 2,45$	80-90		
5	7	6	8	$7 \pm 2,\!45$	30-40		
6	3	4	3	$3,\!67 \pm 1,\!42$	10-15		
п	1 11						

Таблица 3.4 – Значения скорости съема материала q и длины формируемых микротрещин L после абразивной обработки

Примечания: 1. Измерение скорости съема материала выполнялось на заключительном этапе абразивной обработки каждые 60 минут. Одностадийная обработка в опытах №1 и №4 являлась заключительной. Толщина снимаемого слоя материала опытных образцов измерялась на поверочной плите с использованием стойки оснащенной индикаторной головкой часового типа 1МИГ ГОСТ 9696-82. 2. Показаны 95%-ные доверительные интервалы значений скорости съема материала в единицу времени. 3. Длина микротрещин образуемых при указанном варианте абразивной обработки определялась оптическим методом на цифровом 3-D микроскопе VHX-1000E при вертикальном увеличении до 250 раз. Значения представлены в укрупненном диапазоне, более подробные исследования образования микротрещин в керамике представлены в разделе 3.3. диссертационных исследований.

Следует отметить, что пластины и их части подбирались для размещения на планшайбе таким образом, чтобы стабилизировать давление при обработке с определенной нагрузкой в разных опытах. Поэтому при F=87H давление на пластины составляло 7...9 кПа, а при F=40H – 3...4 кПа.

Исследования показали, что скорость съема материала существенно влияет на размер поверхностных микротрещин. Так при скорости вращения притира равной 30 мин⁻¹ с применением алмазного микропорошка наибольшей зернистости в составе пасты при усилии прижатия пластин к инструменту F=87 H скорость съема материала составляет ≈ 12 мкм/ч (опыт №1). С увеличением скорости вращения притира до 42 мин⁻¹ и сохранением заданных параметров резания величина съема материала возрастает до 19 мкм/ч (опыт №4). При этом увеличивается и длина микротрещин (до 90 мкм). Абразивная обработка мелкозернистым алмазным порошком (опыт №3) на аналогичных режимах резания снижает скорость съема материала на 20-30 %. Обработка пластин без использования дополнительного нагружения на заключительных этапах (опыты №5,6) также снижает величину скорости съема материала на 40-50%, при этом длина образуемых микротрещин минимальна. При снижении скорости съема материала до 3...4 мкм/ч размер микротрещин уменьшается до 10...15 мкм.

Таким образом, скорость съема материала на оказывает преимущественное влияние зернистость применяемого алмазного микропорошка. С увеличением силы прижатия и частоты вращения притира скорость съема материала возрастает, однако вместе с этим значительно возрастает длина микротрещин, формируемых в поверхностном слое керамической подложки.

3.3. Взаимосвязь скорости съема материала с технологическими режимами алмазно-абразивной обработки и размерами микротрещин, формируемых в карбидокремниевых пластинах

Для выявления искомых взаимосвязей исследования проводились в несколько этапов.

На первом этапе была проведена серия экспериментов по обработке свободным абразивом 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 3.5.

Таблица 3.5. – 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, H	n, мин ⁻¹	q, мкм/ч	L, мкм	F, H	n, мин ⁻¹	q, мкм/ч	L, мкм
ACM 60/40	87	50 35	20,0 19,2	75-90	87	50 35	22,0 20,3	90-105
		24	11,7	65-75		24	13,7	80-90
	40	24	5,5	25-35	40	24	6,5	35-50
ACM 40/28		42	14,0	50-60		42	15,2	50-70
	87	35	12,0	40-50	87	35	12,5	40-60
		24	7,8	35-45		24	8,5	35-55
ACM 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
Применание F усилие приматия пластии к притиру (при $F=87H$ дарление на пластии и составляло 7 Q								

Примечание. F – усилие прижатия пластин к притиру (при F=87H давление на пластины составляло 7...9 кПа, а при F=40H – 3...4 кПа); n – частота вращения инструмента; q – скорость съема карбида кремния; L – наибольшие размеры поверхностных микротрещин; использовалась алмазная паста ACM ПОМ (ГОСТ 25593-84); материал притира – стекло листовое бесцветное (ГОСТ 111-2014)
Анализ полученных результатов показал, что обработка свободным абразивом ACM 60/40 при усилии прижатия пластин к притиру F=87 H характеризуется максимальной скоростью съема керамического материала (до 20-22 мкм/ч). Однако на данных режимах механической обработки было зафиксировано образование поверхностных микротрещин максимальных размеров L=75-105 мкм (рисунок 3.10). Применение алмазного микропорошка ACM 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 ACM 28/20 без использования подкладного груза (при F=40 H) позволила уменьшить размер поверхностных микротрещин до 10-30 мкм, но при этом производительность обработки снизилась до q= 4-5 мкм/ч (рисунок 3.11).





(б)

Рисунок 3.10. – Карбидокремниевые пластины с микротрещинами после алмазно-абразивной обработки при скорости съема материала

 $q = 12 \div 14$ мкм/ч (a); 19÷20 мкм/ч (б)

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 3.5).



Рисунок 3.11. – Дефектные поверхностные слои с микротрещинами карбидокремниевых пластин после алмазно-абразивной обработки при скорости съема материала *q* = 4÷5 мкм/ч (*a*); 8÷9 мкм/ч (*б*)

Следует отметить, что глубина дефектного слоя при обработке исследуемой керамики была сопоставима с максимальными размерами Так, наибольшая поверхностных микротрещин. например, 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 (рисунок 3.12 (a)). Наименьшая толщина дефектного слоя (10-20 мкм) наблюдалась при абразивной обработке пластин в три этапа с последовательным уменьшением зернистости алмазного микропорошка (рисунок 3.12 (б)), причем на заключительном этапе обработки пастой АСМ 28/20 ПОМ подкладной груз не использовался, и нагрузка на пластины составляла F=40 H.



Рисунок 3.12 – Дефектные слои пластин после абразивной обработки алмазными

пастами

На втором этапе исследований был проведен статистический анализ результатов экспериментальных исследований (приложения В и Г), который позволил выявить следующие корреляционные зависимости длины микротрещин L от скорости съема карбида кремния q:

- для пластин 4-Н политипа	$L=1,1q^{1,5};$	(3.8)
----------------------------	-----------------	-------

(3.9)

Полученные теоретико-экспериментальные зависимости (3.8) и (3.9) могут быть с успехом заменены на более простые линейные зависимости, представленные в работах [15,20,21]. Как видно из рисунков 3.13 и 3.14 оба типа зависимостей находятся в доверительных интервалах значений L микротрещин, определенных в ходе экспериментальных исследований. Поскольку разница в результатах экспериментов статистически не значима и можно объединить полученные результаты, то на практике с достаточной степенью точности можно применять упрощенные зависимости вида:

– для материала 4H-SiC L=3,5q; (3.10)

– для материала 6H-SiC

L=4,0q.

(3.11)



Рисунок 3.13 – Графические зависимости длины L поверхностных микротрещин от скорости q съема материала для SiC–пластин политипа 4-Н



Рисунок 3.14 – Графические зависимости длины L поверхностных микротрещин от скорости q съема материала для SiC–пластин политипа 6-H

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 (см. формулу 1.9):

$$L_{T} = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_{C}}{k_{B} \sigma_{H}} \right)^{2} > L(q), \qquad (3.12)$$

где L_{τ} – критическая длина микротрещины, приводящей к разрушению пластины (изменяется в пределах от 0,04 до 0,15 мм); $k_{\rm B}$ – безразмерная поправочная функция, учитывающая отношение длины трещины к ширине пластины и условия нагружения; $\sigma_{\rm H}$ – растягивающие напряжения, действующие на пластину в процессе изготовления изделия; $K_{\rm C}$ – 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 (3.10), (3.11) и (3.9)).

При подстановке в неравенство (3.12) уравнений (3.10), (3.11) и (3.7) получим следующее условие для ограничения трещинообразования карбидокремниевых пластин при абразивной обработке алмазными пастами:

$$\frac{1}{\pi} \left(\frac{K_{\rm C}}{k_{\rm B} \sigma_{\rm H}} \right)^2 > k_{\rm L} \frac{{\rm kn}^{\rm m} {\rm F}}{\Delta {\rm R} \cdot {\rm f}} , \qquad (3.13)$$

где $k_L=3,5$ или 4,0 для соответственно материала 4H-SiC и 6H-SiC.

Следует отметить, что объем партии запуска в отдельных случаях может быть увеличен и достигать до четырех пластин. В этом случае вместо кремниевых стабилизирующих пластин целесообразно располагать на одной планшайбе исключительно карбидокремниевые пластины с целью увеличения производительности процесса, так как данный вариант расположения позволяет выполнить абразивную обработку сразу двух цельных пластин (8 четвертей) в рамках выполнения одной технологической операции.

3.4. Влияние условий и технологических режимов алмазноабразивной обработки на параметры шероховатости обратной стороны карбидокремниевых пластин

Карбидокремниевые пластины после абразивной обработки обратной стороны, как правило, направляются на операции напыления-диффузии металлических покрытий на обработанную сторону с последующим высокотемпературным отжигом пластин для окончательного формирования низкоомного и однородного электрического контакта по всей поверхности керамического изделия, а также образования послойной структуры для последующего монтажа кристалла в корпус [4,5,16,17,18, 22].

Для обеспечения требуемых адгезионных свойств обратной стороны пластины ее шероховатость по параметру R_a≤1,15 мкм (см. табл. 1.4).

Для выявления взаимосвязи Ra с режимами обработки было проведено восемь экспериментов.

Абразивной обработке подвергались как цельные пластины, так и части подложек обоих политипов с различными вариантами их расположения на планшайбе. Обработка пластин выполнялась на различных режимах резания, с варьированием количества этапов обработки, использованием алмазных паст на основе микропорошка различной зернистости и применением притира из стекла оптического. Параметры шероховатости обработанной поверхности, а также профиль микронеровностей в виде профилограммы, были получены с помощью профилографа-профилометра немецкой фирмы «Mahr GmbH» - MarSurf PS10 (см. п.2.4.).

В рамках выполнения первого эксперимента была проведена одновременная обработка двух карбидокремниевых пластин и нескольких их частей (рисунок 3.15.). Абразивная обработка выполнялась в один этап с использованием алмазной пасты на основе алмазного порошка ACM 60/40 ПОМ ГОСТ 22593-83.



Рисунок 3.15 – Внешний вид обработанных пластин первого опыта

Выполнение второго эксперимента было направлено на обработку четырех карбидокремниевых четвертей совместно с кремниевыми пластинами, размещенными на одной планшайбе (рисунок 3.16). Абразивная обработка выполнялась в три этапа с постепенным уменьшением зернистости алмазного микропорошка. Скорость вращения притира была постоянной и составляла 35 мин⁻¹ при усилии прижатия пластин к притиру F=87 H. Скорость

съема и шероховатость поверхности определялись на каждом из этапов механической обработки. Третий опыт заключался В трехстадийной абразивной обработке восьми четвертей карбидокремниевых пластин, планшайбе одной (рисунок 3.19) c размещенных на постепенным зернистости алмазного микропорошка в составе пасты. уменьшением Суммарная обрабатываемого керамического площадь материала соответствовала двум цельным пластинам диаметром 100 мм.



Рисунок 3.16 – Расположение на планшайбе кремниевых и карбидокремниевых образцов (слева) и только четвертей карбидокремниевых пластин (справа)

В рамках четвертого эксперимента также выполнялась абразивная обработка восьми четвертей пластин, размещенных на одной планшайбе, но в два этапа, с применением пасты ACM 60/40 на первой стадии и последующей окончательной обработкой с использованием пасты ACM 40/28.

Проведение пятого и шестого опытов заключалось в выполнении абразивной обработки двух четвертей карбидокремниевых пластин с варьированием количества кремниевых подложек, размещенных на планшайбе (рисунок 3.17). В пятом опыте количество кремниевых подложек, размещенной на планшайбе превышало количество SiC пластин в 3,5 раза, а в шестом опыте в 6 раз. Параметры абразивной обработки соответствовали условиям третьего эксперимента.



Рисунок 3.17 – Размещение керамических пластин на планшайбе при выполнении пятого и шестого опытов

Заключительный эксперимент №7 был направлен на абразивную обработку только карбидокремниевых пластин 6-Н политипа на режимах, соответствующих третьему опыту экспериментальных исследований.

Значения технологических режимов и условия обработки всех опытных партий представлены в таблице 3.6.

Полученные значения параметров шероховатости поверхности после выполнения абразивной алмазной обработки керамики представлены в таблицах 3.7-3.8.

Значения полученных величин скорости съема материала представлены в таблице 3.9.

Профилограммы со значениями высотных параметров шероховатости обработанной поверхности керамических образцов показаны на рисунке 3.18.

Таблица 3.6 – Условия проведения экспериментов по определению параметров шероховатости обрабатываемых SiC пластин

	Условия и режимы обработки							
Номер экспер имента	Этап обработки	Абразив	Скорость вращения притира, мин ⁻¹	Время обработки, мин	Усилие прижатия пластин к притиру F, H	Материал притира	Политип материала пластины	
1	1	АСМ 60/40 ПОМ	48	30 180	40 87	-		
	1	АСМ 60/40 ПОМ	35	180	87	-		
2	2	АСМ 40/28 ПОМ	35	180	87	-		
	3	АСМ 28/20 ПОМ	35	180	87	-		
	1	АСМ 60/40 ПОМ	30	240	87	-		
3	2	АСМ 40/28 ПОМ	35	180	87	-		
	3	АСМ 28/20 ПОМ	35	180	40		4-H	
4	1	АСМ 60/40 ПОМ	30	240	87			
4	2	АСМ 40/28 ПОМ	35	180	87	беспретное		
	1	АСМ 60/40 ПОМ	30	240	87	осецветное		
5	2	АСМ 40/28 ПОМ	35	180	87			
	3	АСМ 28/20 ПОМ	35	180	40			
	1	АСМ 60/40 ПОМ	30	240	87			
6	2	АСМ 40/28 ПОМ	35	180	87			
	3	АСМ 28/20 ПОМ	35	180	40			
	1	АСМ 60/40 ПОМ	30	240	87			
7	2	АСМ 40/28 ПОМ	35	180	87		6-H	
	3	АСМ 28/20 ПОМ	35	180	40			

		Шероховатость поверхностного слоя обработанных пластин по						
H	Іомер		параметру R _a , мкм					
эксп	еримента	Первая	Вторая	Третья	Четвертая	p (1)		
		пластина	пластина	пластина	пластина	Ra		
1 ⁽³⁾		1,20	1,37	1,52	0,9	1,25 ± 0,42		
	1 этап	1,67	1,65	1,63	1,6	$1,63 \pm 0,05$		
2	2 этап	1,14	1,16	1,18	1,21	$1,17 \pm 0,05$		
	3 этап	0,88	0,92	0,86	0,87	$0,89 \pm 0,04$		
	3(4)	0,54	0,54	0,56	0,56	$0,55 \pm 0,02$		
	4 ⁽⁴⁾	0,75	0,76	0,75	0,77	$0,76 \pm 0.015$		
5		0,93	1,0	-	-	$0,97 \pm 0,45$		
6		1,3	1,37	-	-	$1,34 \pm 0,45$		
7 ⁽⁵⁾		0,54	0,54	0,55	0,54	$0,54 \pm 0,008$		

Таблица 3.7 – Шероховатость обработанных SiC пластин по параметру R_a

95%-ные Примечания: 1. Показаны доверительные интервалы значений обработанной поверхности. 2. шероховатости Значения шероховатости обработанной поверхности определялись с помощью профилографапрофилометра Mahr MarSurf PS10 при базовой длине измерений равной 4,8 мм. 3. Представлены значения параметра шероховатости двух цельных и двух частей SiC пластин. 4. Представлены значения параметра шероховатости поверхности четырех четвертей SiC пластин, случайно выбранных из выборки 8 четвертей обработанных пластин. 5. Представлены значения параметра шероховатости поверхности четырех четвертей SiC пластин, случайно выбранных из выборки 7 четвертей обработанных пластин.

		Шероховатость поверхностного слоя обработанных пластин по						
Howen out ita		параметру R _{max} , мкм						
TIOMC	ропыта	Первая	Вторая	Третья	Четвертая	p (1)		
		пластина	пластина	пластина	пластина	N max		
	1 ⁽³⁾	5,6	6,15	5,82	6,47	6,0 ± 0,6		
	1 этап	8,42	8,51	8,92	8,79	8,66 ± 0.37		
2	2 этап	5,78	5,82	5,7	5,81	5,77 ± 0,9		
	3 этап	4,47	4,5	4,52	4,55	$4,51 \pm 0,05$		
	3 ⁽⁴⁾	3,3	3,23	3,26	3,15	$3,24 \pm 0,10$		
	4 ⁽⁴⁾	4,8	4,73	4,67	4,75	4,74 ± 0,09		
5		6,65	6,9	-	-	6,7 ± 2,54		
6		7,6	7,89	-	-	7,75 ± 1,84		
7 ⁽⁵⁾		4,0	4,1	4,05	4,1	4,06 ± 0,08		
Примечания: см. таблицу 3.7.								

Таблица 3.8 – Шероховатость обработанных SiC пластин по параметру R_{max}

Таблица 3.9 – Значения скорости съема материала q при абразивной обработке SiC пластин

Номер		Скорость съема материала q, мкм/ч ⁽¹⁾				
экспе	еримента	q ₁ ,	q ₂ ,	q _{3,}	q ⁽²⁾	
	1	16	16	16	16 ± 0	
	1 этап	20	19	20	$19,67 \pm 1,42$	
2	2 этап	12	12	13	$12,3 \pm 1,42$	
	3 этап	8	9	8	8,3 ± 1,42	
3		5	5	5	5 ± 0	
	4	7	6	7	$6,7 \pm 1,42$	
5		12	11	12	$11,67 \pm 1,42$	
6		13	14	14	$13,67 \pm 1,42$	
7		3	3	4	$3,33 \pm 1,42$	
Примечания: 1.		Измерение скор	рости съема м	иатериала вып	юлнялось на	

примечания: 1. измерение скорости съема материала выполнялось на заключительном этапе абразивной обработки каждые 60 минут. Одностадийная обработка в опыте №1 являлась заключительной. Толщина снимаемого слоя материала опытных образцов измерялась на поверочной плите с использованием стойки оснащенной индикаторной головкой часового типа 1МИГ ГОСТ 9696-82. 2. Показаны 95%-ные доверительные интервалы значений скорости съема материала в единицу времени.



Рисунок 3.18 – Профилограммы поверхности обработанных SiC пластин: опыта №5 – слева, опыта №7 – справа

Из полученных результатов следует, что при скорости съема материала 19...20 мкм/ч (эксперимент №2, первый этап) параметр Ra шероховатости поверхности составляет 1,6 мкм. Снижение скорости съема материла до 8-9 мкм/ч (эксперимент №2, третий этап) уменьшает значения получаемой шероховатости до Ra ≈ 0,9 мкм. Таким образом, с уменьшением величины скорости съема материала шероховатость обработанной поверхности SiC пластин может быть уменьшена в 2-2,5 раза.

Абразивная обработка двух SiC образцов совместно с кремниевыми пластинами (эксперимент №5) способна привести к значительному

ухудшению шероховатости поверхности SiC пластин (параметр Ra \approx 1,0 мкм, при q = 12 мкм/ч). Дальнейшее увеличение количества кремниевого материала размещённого на одной планшайбе (эксперимент №6) приводит к увеличению шероховатости поверхности до Ra=1,4 мкм при относительно небольшом росте величины скорости съема материала до q = 14 мкм/ч. Данный факт свидетельствует о том, что из-за меньшей твердости кремния относительно SiC-образцов, происходит более быстрое удаление материала при абразивной обработке, в результате чего поверхность обрабатываемых SiC пластин может быть значительно загрязнена кремниевой крошкой, о наличии которой свидетельствовало ярко серое окрашивание абразивной пасты в процессе абразивной обработки.

Абразивная обработка только карбидокремниевых пластин политипа 4-H $N_{23,4}$ (эксперименты на аналогичных режимах резания, характеризовалась снижением скорости съема материала до 5-7 мкм/ч за счет увеличения количества обрабатываемого материала большей твердости, но при этом удавалось добиться меньшей шероховатости обработанной поверхности по параметру Ra=0,55...0,6мкм. Результаты абразивной обработки исключительно карбидокремниевых пластин политипа 6-Н (эксперимент №7) отличались от полученных данных по шероховатости пластин политипа 4-Н менее чем на 5 %, и составляли по параметру Ra=0,54...0,57 Стоит обработка МКМ. отметить, что только карбидокремниевых пластин, размещенных на одной планшайбе способствует возникновению значительного ступенчатого износа на дорогостоящем притире, который после выполнения процесса абразивной обработке нуждается в правке специальным стальным диском на протяжении 6 часов. Данный факт наблюдался после абразивной обработки опытных партий №3,7. После выполнения каждого из указанных экспериментов было установлено, что отклонение от плоскостности притира составляло более 10 мкм, после чего притир подлежал правке (рисунок 3.19).

Следует также отметить, что общее изменение толщины (разнотолщинность) керамических пластин в ходе экспериментов не

превышало 3...5 мкм, что существенно меньше предельно допустимого значения (см. табл.1.4).



Рисунок 3.19 – Правка стеклянного притира

Одностадийная абразивная обработка цельных SiC пластин пастой ACM 60/40 привела к получению шероховатости по параметру Ra=1,3...1,4 мкм, при скорости съема материала q=16 мкм/ч.

Необходимо также отметить, что поверхность SiC пластин после рассмотренных процессов абразивной обработки была изотропна. Значения параметров шероховатости поверхности при измерениях в различных направления существенно не меняются.

Наблюдалось частичное растрескивание и скалывание цельных SiC пластин при выполнении первого опыта экспериментальных исследований.

Соотношения между высотными параметрами шероховатости поверхности карбидокремниевых пластин после алмазно-абразивной обработки : Rmax/ Ra=8...10.

Исследования показали, что параметр шероховатости Ra обработанной поверхности имеет тесную корреляционную взаимосвязь со скоростью съема материала при обработке. Определим коэффициент парной корреляции по следующей зависимости[96]:

$$r_{xy} = \frac{\overline{x \cdot y} - \overline{x} \cdot \overline{y}}{\sigma(x) \cdot \sigma(y)},$$
(3.14)

где x и y- средние значения независимой (q- величины скорости съема материала, мкм/ч) и зависимой (Ra – шероховатость обработанной поверхности, мкм) случайных величин; $\sigma(x)$ и $\sigma(y)$ среднеквадратические отклонения указанных величин.

Используя экспериментальные данные (таблицы 3.7 и 3.9), получим:

$$\overline{x} = \overline{q} = \frac{\Sigma q_i}{n} = \frac{16 + 19,67 + 5 + 6,7 + 11,67 + 13,67 + 3,33 + 4,3}{8} = 80,34 \text{ MKM/H};$$

$$\overline{y} = \overline{Ra} = \frac{\Sigma Ra_i}{n} = \frac{1,33 + 1,63 + 0,57 + 0,78 + 1,1 + 1,4 + 0,56 + 0,67}{8} = 8,04 \text{ MKM};$$

$$\overline{xy} = \frac{\Sigma q_8 Ra_8}{n} = \frac{98,14}{8} = 12,26 \text{ MKM}^2/\text{H};$$

$$D(q) = \frac{\Sigma q_n^2}{n} - \frac{-2}{q} = \frac{1065,4}{8} - 10^2 = 33,2 \text{ MKM}^2/\text{H}^2;$$
(3.15)

$$D(Ra) = \frac{\Sigma Ra_n^2}{n} - \overline{Ra}^2 = \frac{9,29}{8} - 1^2 = 0,16 \text{ MKM}^2; \qquad (3.16)$$

$$\sigma(q) = \sqrt{D(q)} = \sqrt{33,2} = 5,76_{\text{MKM/H}}; \qquad (3.17)$$

$$\sigma(Ra) = \sqrt{D(Ra)} = \sqrt{0.16} = 0.4 \text{ MKM.}$$
(3.18)

В данном случае коэффициент парной корреляции равен:

$$r_{xy} = \frac{\overline{x \cdot y} - \overline{x} \cdot \overline{y}}{\sigma(x) \cdot \sigma(y)} = r_{qRa} = \frac{\overline{q \cdot Ra} - \overline{q} \cdot \overline{Ra}}{\sigma(q) \cdot \sigma(Ra)} = \frac{12,26 - 1 \cdot 10}{5,76 \cdot 0,4} = 0,98$$

Таким образом, связь между параметром шероховатости Ra и скоростью съема материала q сильная и прямая ($r_{xy} \rightarrow 1$), тогда искомая зависимость будет иметь вид:

$$y = C_1 + C_2 x$$
 или $Ra = C_1 + C_2 q$. (3.19)

Значения коэффициентов C₁ и C₂ определяются на основе следующих формул, используемых при выполнении регрессионного анализа линейных зависимостей [96]:

$$C_{1} = \frac{\Delta c_{1}}{\Delta} = \frac{\Sigma y \Sigma x^{2} - \Sigma x \cdot \Sigma x \cdot y}{N \cdot \Sigma x^{2} - (\Sigma x)^{2}} = \frac{\Sigma Ra \cdot \Sigma q^{2} - \Sigma q \cdot \Sigma q \cdot Ra}{N \cdot \Sigma q^{2} - (\Sigma q)^{2}};$$
(3.20)

$$C_{2} = \frac{\Delta c_{2}}{\Delta} = \frac{N \cdot \Sigma x \cdot y - \Sigma x \cdot \Sigma y \cdot}{N \cdot \Sigma x^{2} - (\Sigma x)^{2}} = \frac{N \cdot \Sigma q \cdot Ra - \Sigma q \cdot \Sigma Ra \cdot}{N \cdot \Sigma q^{2} - (\Sigma q)^{2}} \cdot$$
(3.21)

где N-количество выполненных опытов, у и х – параметры регрессии.

n_	Значения	Значения	- Autorite in the		
номер опыта	параметра q на n-ом опыте	параметра Ra на n-ом опыте	q _n •Ra _n	q_n^2	Ra_n^2
1	16	1,33	21,28	256	1,77
2.1	19,67	1,63	36,06	386,9	2,66
3	5	0,57	2,85	25	0,3249
4	6,7	0,78	5,226	44,89	0,6084
5	11,67	1,1	12,84	136,2	1,21
6	13,67	1,4	19,14	186,87	1,96
7	3,33	0,56	1,86	11,09	0,3136
8	4,3	0,67	2,88	18,49	0,4489
N= 8	$\sum q_8 = 80,34$	$\sum Ra_8 = 8,04$	$\sum q_8 \bullet Ra_8 = 98,14$	$\sum q_8^2 = 1065,436$	$\sum \text{Ra}_8^2 = 9,2916$

Таблица 3.10 – Эмпирические данные и промежуточные вычисления

Подстав полученные данные в формулы (3.20) и (3.21) получим значения коэффициентов линейной регрессии:

$$C_{1} = \frac{\Delta c_{1}}{\Delta} = \frac{8,4 \cdot 1065,43 - 80,34 \cdot 98,14}{8 \cdot 1065,43 - (80,34)^{2}} = 0,33;$$
$$C_{2} = \frac{\Delta c_{2}}{\Delta} = \frac{8 \cdot 98,14 - 80,34 \cdot 8,04}{8 \cdot 1065,43 - (80,34)^{2}} = 0,06.$$

Выражение (3.19) окончательно примет вид:

$$Ra = 0.33 + 0.06q, 4 \le q \le 20 \text{ мкм/ч.}$$
(3.22)

Последующая проверка показала значимость и адекватность уравнения (3.22) и оно может быть использовано как ограничение при выборе технологических режимов абразивной обработки алмазными пастами.

3.5. Исследование деформации карбидокремниевых пластин после абразивной обработки алмазными пастами

Одним из главных требований, предъявляемых к тонким пластинам при серийном выпуске продукции из карбидной керамики, является обеспечение прогиба керамических подложек до 50 мкм. Исходные пластины поставляются на предприятие полированными с двух сторон. При абразивной обработке одной из сторон пластины обе поверхности будут стремиться деформировать саму пластину: одна поверхность (полированная) будет сжиматься, а другая растягивается. В результате этого силы поверхностного натяжения

растягивают по-разному каждую из двух поверхностей с возникновением существенной деформации керамики («эффект Тваймана»), способной привести к значительным сколам или полному разрушению обрабатываемых пластин. Из литературных источников [41,92] следует, что указанный эффект также напрямую зависит от геометрических параметров обрабатываемых пластин: толщины керамики и диаметра пластины, поэтому для изучения данного явления и определения величины деформации обрабатываемых пластин был проведен ряд экспериментов.

Первый эксперимент заключался в абразивной обработке двух цельных (диаметром 100 мм) и двух половин карбидокремниевых пластин (рисунок 3.15) в два этапа. Режимы и параметры абразивной обработки соответствовали эксперименту №1 из таблицы 3.6.

Второй эксперимент заключался в обработке четырех четвертей SiC пластин 4-Н политипа, размещенных на одной планшайбе совместно с кремниевыми образцами (рисунок 3.20).



Рисунок 3.20 – Размещение кремниевых и карбидокремниевых образцов на планшайбе

Технологические режимы и условия абразивной обработки образцов представлены в таблице 3.11.

Начальная толщина всех карбидокремниевых образцов составляла 370±10 мкм.

Значения величины деформации (прогиба) BOW от текущей толщины S обработанных образцов указаны в таблице 3.12.

	Условия и режимы обработки								
Номер опыта	Этап обработки	Абразив	Скорость вращения притира, мин ⁻¹	Время обработки, мин	Усилие прижатия пластин к притиру F, Н	Материал притира			
1	1.1.		Опыт №1 (см. таблицу 3.11.)						
	1.2.	АСМ 40/28 ПОМ	35	120	87	CTOKIO HUOTODOO			
	2.1	АСМ 60/40 ПОМ	35	180	87	беспретное			
2	2.2	АСМ 40/28 ПОМ	35	120	87	осецветное			
Z	2.3	АСМ 28/20 ПОМ	35	120	87				
	2.4	АСМ 28/20 ПОМ	35	240	40				

Таблица 3.11 – Условия проведения экспериментов по определению величины деформации (прогиба) BOW SiC пластин

68

Таблица 3.12 – Значения величины деформации (прогиба) ВОШ после абразивной обработки SiC пластин

Ц	Mon	BOW, $MKM^{(1)}$							
опыта		BOW BOW	BOW	BOW	$\mathbf{POW}^{(2)}$	пластин			
		Первой пластины	Второй пластины	Третьей пластины	Четвертой пластины	DOW	S ⁽³⁾ , мкм		
1	1.1.	110	115	-	-	$112,5 \pm 32$	322		
1	1.2.	150	160	-	-	155 ± 63	308		
	2.1.	25	27	25	26	$25,75 \pm 6$	310		
\mathbf{r}	2.2.	30	31	29	30	$30 \pm 5,1$	286		
Z	2.3.	33	35	34	35	$34,25 \pm 6,1$	270		
	2.4. 39 40 38 40 $39,25 \pm 6,1$ 258								
При	Примечания: 1. Измерение величины деформации (прогиба) карбидокремниевых пластин выполнялось на каждом из этапов абразивной								
обра	ботки і	интерференционным сп	юсобом на микроинтер	ферометре МИИ-4 пу	гем прохождения по всей	длине пластины	специальной		

индикаторной головки. 2. Показаны 95%-ные доверительные интервалы значений деформации (прогиба) пластин. 3. Указаны значения толщины пластин по окончании выполнения этапа абразивной обработки согласно условиям и параметрам представленным в таблице 3.11.

Как представленных видно ИЗ результатов экспериментальных исследований деформация (прогиб) пластин увеличивается с уменьшением толщины обрабатываемых керамических подложек и не зависит от величины усилия прижатия пластин к притиру или зернистости применяемого алмазного микропорошка в составе абразивной пасты. Цельные SiC пластины наиболее подвержены деформации, величина прогиба после выполнения первого этапа абразивной обработки пастой АСМ 60/40 составляла 110-115 мкм, а также по завершении выполнения первого этапа фиксировалось значительное скалывание и разрушение керамики. Обработка четвертей SiC образцов не вызывает существенной деформации пластин, значения величины прогиба BOW также росли с уменьшением толщины обрабатываемой подложки на всех этапах абразивной обработки. Величина прогиба обработанных пластин соответствовала установленной норме (BOW <50 мкм).

Для изучения возможного влияния условий и технологических режимов алмазно-абразивной обработки на деформацию пластин дополнительно была проведена серия экспериментов на целых пластинах 6-Н политипа диаметрами 76 мм, размещенных совместно с кремниевыми образцами на одной планшайбе с варьированием режимов абразивной обработки (таблица 3.13).

Для обоих пластин была выбрана трехстадийная алмазно-абразивная обработка. Первая пластина обрабатывалась с постепенным уменьшением зернистости алмазного микропорошка в составе используемой абразивной пасты, а также с уменьшением скорости вращения притира. Усилие прижатия пластин к притиру при обработке первой пластины на всех этапах составляло 87 Н. Вторая же пластина обрабатывалась с поэтапным форсированием технологических режимов обработки, утонение при ЭТОМ пластин выполнялось без использования подкладного груза, прижимную силу к пластине создавала только планшайба (F=40H). Время обработки для каждого этапа было постоянным и составляло 30 минут.

Внешний вид целых обрабатываемых пластин 6-Н политипа и размещение их на планшайбе совместно с кремниевыми заготовками представлен на рисунке 3.21.



Рисунке 3.21. – Размещение цельных SiC пластин 6-Н политипа на планшайбе

Результаты экспериментальных исследований представлены в таблице 3.14.

По результатам выполненной абразивной обработки двух пластин было установлено, что технологические режимы не влияют на прогиб пластин. Деформация обрабатываемых пластин увеличивается при уменьшении их толщины и увеличении диаметра, что согласуется с результатами исследований [35,88,103]. Прогиб обработанных пластин увеличивается с уменьшением их толщины и характеризуется меньшими значениями при обработке пластин меньшего диаметра.

Также в процессе экспериментальных исследований было установлено, что прогиб всех обработанных пластин имеет чашевидную форму, направленную от зоны резания.

Таблица 3.13 – Условия проведения эксперимента по определению величины деформации (прогиба) BOW обрабатываемых SiC пластин 6-Н политипа

Howen	Условия и режимы обработки							
постниц	Этап обработки	AGnorup	Скорость вращения	Время обработки,	Общее усилие прижатия	Матариал притира		
пластины		Абразив	притира, мин ⁻¹	МИН	пластин к притиру F, H	татериал притира		
	1.1.	АСМ 60/40 ПОМ	45	30	87			
1	1.2.	АСМ 40/28 ПОМ	35	30	87			
1	1.3.	АСМ 28/20 ПОМ	20	30	87			
	1.4.	АСМ 40/28 ПОМ	20	20	40	беспретное		
2	2.1	АСМ 28/20 ПОМ	20	30	40	осецветное		
	2.2	АСМ 40/28 ПОМ	35	30	40			
	2.3	АСМ 60/40 ПОМ	45	30	40			

Таблица 3.14 – Значения величины деформации (прогиба) ВОШ после абразивной обработки цельных SiC пластин 6-Н политипа

Номер этапа	Начальный прогиб пластины BOW _{нач} , мкм	Начальная толщина пластины S _{нач} , мкм	Прогиб пластины на соответсвующем этапе эксперимента BOW _i ⁽²⁾ , мкм	Толщина пластины на соответсвующем этапе эксперимента S _i ⁽³⁾ , мкм			
			1-я пластина				
1.1.			57 ± 2,45	342			
1.2.	9	360	77 ± 2,45	322			
1.3.			97 ± 3,8	305			
			2-я пластина				
2.1			54 ± 3,8	344			
2.2	10	350	71 ± 2,45	327			
2.3			94 ± 2,45	310			
Примечания: 1. Измерение величины деформации (прогиба) карбидокремниевых пластин выполнялось на каждом из этапов абразивной							
обработки интерференционным способом на микроинтерферометре МИИ-4 путем прохождения по всей длине пластины специальной							
индикаторной головки. 2. Показаны 95%-ные доверительные интервалы значений деформации (прогиба) пластин. 3. Указаны значения							
толщины	пластин по окончании	выполнения этапа абра	азивной обработки согласно условиям пре	дставленным в таблице 3.13.			

На основе полученных экспериментальных данных были построены следующие графические зависимости величины деформации (прогиба) обработанных керамических подложек от толщины после их абразивной обработки (рисунок 3.22-3.23).



Рисунок 3.22 – Зависимость величины прогиба BOW целых карбидокремниевых пластин от их толщины S



Рисунок 3.23. – Зависимость величины прогиба ВОШ четвертей SiC-пластин от их толщины S

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 первая пластина 6-Н политипа после абразивной обработки (этап №1.3, таблица 3.13) подвергалась очистке в различных средах (ацетон технический (ГОСТ 2768-84), керосин технический (ГОСТ 18499-73), глицерин чистый (ГОСТ 6259-75)).

Как видно из полученных значений (таблица 3.15), величина прогиба после обработки пластины растворителями ацетон технический (ГОСТ 2768-84) и керосин технический (ГОСТ 18499-73) не изменилась, однако, после обработки пластины глицерином (ГОСТ 6259-75) прогиб пластины уменьшился на 10-15 %. Далее на первой пластине был выполнен еще один этап абразивной обработки пастой АСМ 40/28 ПОМ на скорости вращения притира n=20 мин⁻¹ при усилии прижатия пластин к притиру F= 40H в течение 20 минут с последующим повторением эксперимента по обработке пластины различными растворителями и измерением величины прогиба. Полученные значения величины прогиба полностью подтверждали полученный ранее результат.

enderben mine en menne e merning bestin menne ebedan						
Deerperuteur	Ацетон технический	Керосин технический	Глицерин (ГОСТ			
Растворитель	(FOCT 2768-84)	(ГОСТ 18499-73)	6259-75)			
Прогиб до	07 ± 3.8	07 ± 3.8	07 ± 3.8			
очистки, мкм	97 ± 3,0	97 ± 3,0	97 ± 3,0			
Прогиб после	07 + 3 8	07 + 2 8	97 + 1 42			
очистки, мкм	<i>71 ± 3</i> ,0	<i>71 ± 3</i> ,0	$07 \pm 1,42$			

Таблица 3.15 – Значения величины деформации (прогиба) BOW карбидокремниевой пластины после очистки в различных средах

В этой связи для достижения прогиба тонких керамических пластин после абразивной обработки алмазными пастами можно рекомендовать дополнительную очистку обработанной поверхности глицерином.

3.5. Выводы по главе 3

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Установлена взамосвязь 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 кристаллических структур материалов.

3. Скорость съема материала с карбидокремниевых пластин и параметр Ra 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 ACM 28/20 до ACM 60/40), скорости вращения притира (от 24 до 50 мин⁻¹) и усилия прижатия пластин к притиру (от 40 до 87 H).

4. Заключительные этапы абразивной обработки алмазными пастами обратной стороны пластин рекомендуется выполнять с использованием паст с алмазным микропорошком ACM 28/20 при нагрузке на пластины не более 40H (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.

IV. ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ НА ПРАКТИКЕ И ОЦЕНКАЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВИССЛЕДОВАНИЙ

4.1. Методика назначения режимов абразивной обработки алмазными пастами карбидокремниевых пластин, ограничивающих трещинообразование и обеспечивающих требуемое качество обработанной поверхности

Проведенные исследования позволили разработать требуемую методику назначения режимов абразивной обработки, блок-схема которой представлена на рисунке 4.1.



Рисунок 4.1. – Блок-схема методики назначения технологических режимов алмазной-абразивной обработки SiC пластин

Указанная методика включает следующие основные этапы:

1. Выбор по таблице 3.5 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 [13,14,57,60,] растягивающих напряжений σ_н, действующих на карбидокремниевую пластину в ходе технологического процесса изготовления керамического изделия.

Практика изготовления карбидокремниевых пластин в АО «Группа Кремний ЭЛ» показала, что растягивающие напряжения, возникающие при высокотемпературной обработке, могут составлять $\sigma_{\rm H}$ =150÷300 МПа.

3. Расчет критической длины L_T микротрещины, приводящей к разрушению карбидокремниевой пластины, используя силовой критерий разрушения Дж.Р. Ирвина (см. неравенство (3.12)).

При известном значении коэффициента $K_C=3,5\div5$ МПа·м^{1/2} [20,21] размер критической длины L_T микротрещин, возникающих при алмазно-абразивной обработке, которые приведут к разрушению карбидокремниевой подложки при различных растягивающих напряжениях $\sigma_{\rm H}$ составит:

σ _н , МПа	150	200	250	300
L _т , мм	0,15	0,10	0,06	0,04

4. Определение с помощью зависимостей (3.10), (3.11) и (3.7) или по таблице 3.5 скорости съема материала и технологических режимов окончательной алмазно-абразивной обработки, обеспечивающих получение поверхностных микротрещин длиной менее L_т и не приводящих к разрушению керамической пластины.

Значительное увеличение зернистости алмазного микропорошка, скорости вращения инструмента и/или усилия прижатия заготовок к притиру приведет к невыполнению неравенства (3.12), и гарантированному разрушению подложек на последующих этапах изготовления продукции из карбидной керамики. Именно поэтому скорость съёма материала q является главным ограничением при выборе режима абразивной обработки.

5. Корректировка выбранных технологических режимов с использованием уравнения (3.22), исходя из обеспечения требуемого значения параметра Ra 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.

Таким образом, с помощью данной методики становится возможным управлять размерами поверхностных микротрещин и обеспечивать качество поверхностного слоя в ходе выполнения алмазно-абразивной обработки путем варьирования скоростью съема материала с карбидокремниевой пластины за счет изменения технологических режимов обработки.

4.2. Разработка инновационного способа абразивной обработки карбидокремниевых пластин для повышения их качества

Базовый технологический процесс абразивной обработки SiC пластин на предприятии AO «Группа Кремний ЭЛ» включал преимущественно одностадийную обработку керамики пастой на основе крупнозернистого (60/40 мкм) алмазного порошка с усилием прижатия пластин к инструменту F = 65-80H при скорости вращения притира равной 20 мин⁻¹. В результате чего, скорость съема материала q составляла 14-18 мкм/ч. Заключительные этапы обработки пластин до требуемой толщины (S=260 ± 20 мкм) на таких режимах приводили к возникновению глубинных микротрещин в поверхностном слое

обрабатываемых подложек, что, в свою очередь, увеличивало количество критических дефектов на обратной стороне пластины, при этом процент выхода годных кристаллов при проверке основных параметров изделий около 50%. Кроме того, базовый технологический процесс предполагал наклейку обрабатываемых SiC пластин с неполным заполнением планшайбы (рисунок 4.2).



Рисунок 4.2. – Схема неполного заполнения планшайбы SiC пластинами

В результате зачастую наблюдалось растрескивание подложек и значительный разброс (более 20 мкм) по толщине пластин в различных точках их расположения относительно планшайбы, что недопустимо.

В этой связи возникла необходимость в разработке нового инновационного способа абразивной обработки пластин.

В ходе выполненных экспериментальных исследований было установлено, что обработка, включающая в себя последовательные этапы съема материала с использованием алмазных паст разной зернистости позволяет получить более чистую поверхность и минимизировать толщину нарушенного слоя и длину поверхностных микротрещин карбидокремниевых пластин.

ограничения критических Для возникновения микротрещин и обеспечения требуемого качества утонение SiC-пластин целесообразно проводить в три этапа с постепенным уменьшением зернистости алмазного микропорошка в составе применяемых абразивных паст, а распределение абразива притира будет более по поверхности равномерным при

использовании дополнительных кремниевых (стабилизирующих) пластин, размещаемых совместно с SiC пластинами на одной планшайбе.

Рекомендуемая поэтапная обработка была защищена патентом РФ на изобретение № 2 790 244: «Способ односторонней шлифовки пластин карбида кремния свободным абразивом» (приложение Б).

Суть изобретения состоит в следующем:

Перед тем как приступить к процессу выполнения абразивной обработки карбидокремниевых пластин выполняется замер их толщины, для доведения толщины дополнительных кремниевых пластин (поз.2) до необходимого значения. Для этого заготовки дополнительных кремниевых пластин (рисунок 4.3) приклеиваются на планшайбу (поз.1) и затем осуществляется абразивная обработка кремниевых пластин до толщины, на 10 мкм превышающей толщину обрабатываемых карбидокремниевых пластин.

Затем карбидокремниевые пластины наклеивают на планшайбу.



Рисунок 4.3. – Схема расположения Si и Si+SiC пластин на планшайбе

В результате наклеивания дополнительных кремниевых и карбидокремниевых пластин на планшайбу согласно схемам, представленным на рисунке 4.3, свободный абразив будет распределяется более равномерно по поверхности притира (рисунок 4.4) и края рабочих пластин будут утоняться

более равномерно, что, в свою очередь, исключит возможность существенного разброса по толщине на всей поверхности карбидокремниевой пластины.



Рисунок 4.4 – Распределение свободного абразива (поз.5) при наклейке на планшайбу (поз.1) только Si пластин (поз.2) – (а), и совместной наклейке Si с SiC (поз.3) пластинами – (б)

Дополнительные кремниевые пластины, наклеенные на свободные места на планшайбе, имеют твёрдость ниже обрабатываемые чем карбидокремниевые пластины и толщину, равную или превышающую толщину карбидокремниевых пластин, с целью их свободного утонения в обработки. процессе Кремниевые заготовки выступают В роли стабилизирующих элементов для равномерного распределения нагрузки на пластины в процессе абразивной обработки, тем самым исключается возможность возникновения ударных нагрузок карбидокремниевых пластин о притир, минимизируется образование трещин и сохраняется целостность керамики.

Толщина кремниевых пластин должна быть больше карбидокремниевых на величину примерно 10 мкм. Так как скорость съема кремния больше чем карбида кремния, то рабочее давление устанавливается после непродолжительного времени обработки.

После наклейки пластин на планшайбу выполняется ее охлаждение в термической ванне до полного застывания пластин на планшайбе. Излишки клеевой смеси удаляются ватой технической ГОСТ5679-91, пропитанной Нефрасом –С2-80/120 ГОСТ8781-71. После этого необходимо осуществить проверку соответствия толщины каждой пластины и исключить возможность вздутия пластин из-за возможного попадания инородных частиц в клеевую смесь под пластины.

Затем выполняется притирка планшайбы с приклеенными пластинами в течение 30 минут путём нанесения на притир пасты ACM 60/40 ПОМ ГОСТ 25593-83, и при скорости вращения притира 30 мин⁻¹. На начальном этапе притиранию подвергнутся дополнительные кремниевые пластины, так как их толщина превышает толщину обрабатываемых карбидокремниевых пластин на 10 мкм.

Далее, когда толщина пластин становится одинаковой, выполняется процесс алмазно-абразивной обработки состоящий из трёх этапов:

I) Обработка алмазной пастой АСМ 60/40 ПОМ ГОСТ 25593-83, с замером толщины снимаемого слоя с поверхности карбидокремниевых пластин каждые 40-50 минут с усилием прижатия пластин к притиру менее 90 H (10 кПа). Обработка выполняется при скорости вращения притира не более 40...50 мин⁻¹, до тех пор, когда необходимо будет оставить припуск в 50 мкм на последующие два этапа технологической обработки. Параметры пасты: А- алмазная паста, СМ- синтетический алмаз, 60/40- зернистость в мкм, П- повышенная массовая доля алмазов, Н – нормальная массовая доля алмазов, 0- смывается органическими растворителями, М- концентрация паст при температуре 20 градусов Цельсия – мазеобразная. Осуществлять проверку возможного растрескивания пластин каждые 40-50 минут.

II) Обработка алмазной пастой АСМ 40/28 ПОМ ГОСТ 25593-83, с замером толщины снимаемого слоя каждые 40-50 минут при давлении на пластины 7...9 кПа. Снимаемый слой на данном этапе механической обработки должен составлять порядка 25-30 мкм. Скорость вращения притира

равна 30 мин⁻¹. Осуществлять проверку возможного растрескивания пластин каждые 40-50 минут.

III) Обработка алмазной пастой ACM 28/20 HOM ГОСТ 25593-83, с замером толщины снимаемого слоя каждые 40-50 минут при давлении на пластины 3...4 кПа. Снимаемый слой на данном этапе механической обработки примерно составляет 25-30 мкм (до толщины готового изделия 260±20 мкм). Скорость вращения притира не более 30 мин⁻¹. Осуществлять проверку возможного растрескивания пластин каждые 40-50 минут.

По окончании абразивной обработки выполнить нагрев планшайбы с пластинами на термической печи и снять утонённые карбидокремниевые пластины с ее поверхности. Осуществить очистку карбидокремниевых пластин от клея и частиц абразивной обработки путём погружения пластин в подогретые металлические ванны с трихлорэтаном. Измерить окончательную толщину пластин, предварительно высушив пластины под лабораторной вытяжкой, визуально и под микроскопом оценить степень повреждения поверхности пластин после абразивной обработки, замерить шероховатость, а также оценить величину и характер деформации (прогиба) обработанных пластин.

Предложенный способ позволяет утонять карбидокремниевые пластины от их исходной толщины равной 350-420 мкм до 250 мкм во всем диапазоне толщин в зависимости от требований заказчика, а также исключает образование критических микротрещин карбидокремниевых пластин наряду с обеспечением качества поверхностного слоя керамики.

4.3. Оценка экономической эффективности результатов исследований

При расчете экономического эффекта от внедрения методики назначения технологических режимов и нового способа алмазно-абразивной обработки, ограничивающих трещинообразование и обеспечивающих требуемое

качество поверхностного слоя, необходимо рассмотреть следующие основные этапы изготовления керамических подложек на основе SiC на предприятии AO «Группа Кремний ЭЛ»:

1. Приобретение карбидокремниевых заготовок толщиной \geq 325 мкм – политипа 4-Н и толщиной \geq 400 мкм политипа 6-Н (стоимость одной пластины диаметром 100 мм составляет ориентировочно C₁ = 250 000 руб. в ценах 2022 года);

2. Ряд подготовительных технологических операций и фотолитографий перед утонением пластин, а также сам процесс абразивной обработки керамики (себестоимость пластины после реализации данного этапа составляет в среднем C₂=280 000 руб.);

3. Этап завершающих операций фотолитографии и производство кристаллов (себестоимость пластины на данном этапе составляет в среднем C₃=460 000 руб.).

При существующей технологии изготовления карбидокремниевых пластин брак, связанный с растрескиванием пластин составляет около 5-7 % от программы выпуска, и вскрывается преимущественно на этапах термического отжига, когда на пластины уже предварительно были нанесены металлические покрытия, содержащие драгоценные металлы.

Внедрение разработанной методики и нового способа абразивной обработки на втором этапе производства карбидокремниевой продукции позволит исключить образование критических микротрещин, приводящих к разрушению керамики как на этапе абразивной обработки обратной стороны пластины, так и на этапе производства кристаллов.

Для определения экономического эффекта от внедрения методики и нового способа абразивной обработки карбидокремниевых пластин воспользуемся следующей зависимостью [8]:

$$\Im = \sum_{t=1}^{T} (\Delta \Pi_t - \mathcal{Z}_t) \alpha_t , \qquad (4.1)$$

где T – расчетный период; $\Delta \Pi_t$ – прирост прибыли предприятия в t-ом году в связи с реализацией внедрения методики и нового способа абразивной

обработки; 3_t – затраты t-года, сопровождающие внедрение и использование рассматриваемого мероприятия; α_t – коэффициент приведения по фактору времени.

Прирост прибыли предприятия в результате нововведений в первом приближении можно принять постоянной величиной, неизменной по годам расчетного периода:

$$\Delta \Pi_t = \Delta \Pi = const$$
 .

В рассматриваемом случае можно считать, что прирост прибыли предприятия эквивалентен снижению текущих затрат, связанных с несвоевременным выявлением брака при реализации базовой технологии:

$$\Delta \Pi = \Delta C = (C_3 - C_2) N_{\delta p}, \tag{4.2}$$

где C₂ и C₃ – себестоимость карбидокремниевых пластин после реализации второго и третьего этапов технологического процесса изготовления изделий из карбидной керамики соответственно; N_{бр} – количество отбракованных пластин

$$N_{\rm 6p} = (5 \dots 7\%) N_{\rm np}, \tag{4.3}$$

здесь N_{пр} – годовая приведенная программа выпуска пластин.

$$N_{\rm np} = \frac{N_{min} + N_{max}}{2} \ 12,$$

где N_{min}, N_{max} – минимальная и максимальная месячная программа выпуска пластин

N_{пр}=
$$\frac{6+17}{2}$$
 12=138 шт/год,

тогда при наименьшем объеме брака:

$$N_{\text{бр}}$$
=0,06 • 138 = 9 шт/год
 $\Delta \Pi = (460\ 000 - 280\ 000)\ 9 = 1\ 620\ 000\ руб$

Величина затрат, сопровождающих внедрение и использование нововведения, определяется суммой

$$3_t = \Delta C_{\text{экспл t}} + H_t + K_t , \qquad (4.4)$$

где $\Delta C_{3\kappa cnn t}$ – затраты на содержание и эксплуатацию установки для обработки сверхтвердых материалов; H_t – налоговые выплаты t-го года; K_t - единовременные (капитальные) затраты, связанные с совершенствованием технологического процесса в t- ом году.

Величину $\Delta C_{
m экспл t}$ можно принять неизменной по годам расчетного периода

$$\Delta C_{\mathfrak{SKCHI}} = \Delta C_{\mathfrak{SKCHI}} = \operatorname{const.}$$

В свою очередь

$$C_{_{3KC\Pi,\Pi}} = C_{_{3M}} + C_{_{3\Pi}} + C_{_{TEK}}, \qquad (4.5)$$

где С_{ам} – амортизация нового оборудования; С_{зп} – заработная плата рабочего, эксплуатирующего установку; С_{тек} – текущие затраты, связанные с эксплуатацией установки.

$$C_{aM} = H_a \frac{m \mu_{ycT}}{100} , \qquad (4.6)$$

где H_a – норма амортизации; m – количество оборудования, Ц_{уст} – цена установки.

Так как установка по обработке сверхтвердых материалов была сконструирована и изготовлена в единичном экземпляре АО «Группа Кремний Эл» и полностью позволяет обрабатывать необходимое количество партий керамических пластин в год, то при норме амортизации H_a = 10% (учитывая, что установка к моменту внедрения методики и рекомендаций для абразивной обработки уже находилась в эксплуатации около 2-х лет) и стоимости изготовления установки Ц_{уст}= 200 000 руб. получим

$$C_{aM} = 10 \frac{1 \cdot 200\ 000}{100} = 20\ 000\ руб$$
,

Затраты на оплату труда рабочих, обслуживающих установку, определим по формуле:

$$C_{3.\Pi.} = N_{np} \frac{t_{\kappa}^{cp}}{60} C_{u.m.} K_{np} K_{\partial on} K_{Hau} , \qquad (4.7)$$

где С_{ч.т.}- часовая тарифная ставка рабочего; t_к^{ср} – среднее время выполнения контрольной операции; К_{пр} – коэффициент, учитывающий премиальные

выплаты; $K_{\text{доп}}$ – коэффициент, учитывающий дополнительную заработанную плату; $K_{\text{нач}}$ – коэффициент, учитывающий начисления на заработную плату. Принимая следующие значения коэффициентов: $K_{\text{пр}} = 1,2$ (величина премии 20 %); $K_{\text{доп}} = 1,12$ (в целом по цехам предприятия дополнительная заработанная плата составляет 12 %); $K_{\text{нач}} = 1,4$ (величина начислений на заработанную плату составляет 40%), $t_{\kappa}^{\text{ср}} = 780$ минут, получим

$$C_{3.п.} = 138 \cdot \frac{720}{60} \cdot 20 \cdot 1, 2 \cdot 1, 12 \cdot 1, 4 \approx 62 318$$
 руб.

Величину прочих текущих затрат можно принять 5...8 % от стоимости технологического оборудования, тогда

$$C_{\text{тек}} = \frac{6 \cdot 200\ 000}{100} = 12\ 000$$
 руб ,

Разовые эксплуатационные расходы составят:

С_{экспл} = 20 000 + 62 318 +12 000 ≈ 94 318 руб.

Принимая во внимание, что $\Delta \Pi_t = \text{const} \ u \ \Delta C_{_{\mathfrak{ЭКСПЛ}\,t}} = \text{const}$, можно считать $\Delta H_t = H = \text{const} \ u$

$$H = \frac{P}{100} (\Delta \Pi - \Delta C_{\mathfrak{skcnn}}), \qquad (4.8)$$

где P – ставка налоговых платежей (в расчетах примем P=30%, с учетом налога на прибыль и других налогов, выплачиваемых из прибыли предприятия).

Величина налоговых выплат тогда составит:

$$H = \frac{30}{100}$$
 (1 620 000- 94 318) \approx 457 704 руб.

Единовременные затраты K_t имеют место только в первый год реализации мероприятия и могут быть определены по следующей зависимости:

$$K_{t} = K_{3d} + K_{o6} + K_{uhctp} + K_{pa6} + K_{nodr}, \qquad (4.9)$$

где K_{зд} – стоимость подготовки необходимого участка производственной площади; K_{об} – стоимость внедряемого (при внедрении) оборудования; K_{раб} – затраты на роботизацию и автоматизацию технологического процесса; K_{подг} – затраты, связанные с подготовкой производства.
В нашем случае, оборудование уже изготовлено и не нуждается во внедрении, а также не требует специфической подготовки производственной площади или соответствующего инструментального обеспечения, тогда

$$\mathbf{K}_{t} = \mathbf{K}_{3d} = \mathbf{K}_{ob} = \mathbf{K}_{uhctp} = \mathbf{K}_{pab} = \mathbf{K}_{nodr} = \mathbf{0}$$

Результат расчета предполагаемого экономического эффекта представлен в таблице 4.1.

Таблица 4.1 — Экономический результат внедрения рекомендованной технологии обработки SiC пластин, тыс. руб.

N₂	Памаралали	Годы			Umana	Π	
п/п	Показатель	1	2	3	ΝΤΟΓΟ	примечания	
1	Инвестиции						
1.1.	Затраты на освоение новой технологии	0	0	0	0	Приобретение или изготовление нового оборудования – не требуется	
2.	Приращение доходов и расходов						
2.1.	Дополнительная прибыль от увеличения операционного дохода	1 620	1 620	1 620	4 860	Экономия от обеспечения целостности керамических подложек, обрабатываемых по рекомендованной технологии	
2.2.	Затраты на содержание и эксплуатацию установки	- 94,3	- 94,3	- 94,3	- 282,9	-	
2.3.	Налоговые платежи	-457,7	-457,7	-457,7	-1 373,1	-	
2.4.	Приращение доходов от инвестиций	1 068	1 068	1 068	3 204	п.2.1 п.2.2 п.2.3.	
3.	Коррекция денежных потоков						
3.1.	Чистые денежные потоки	1 068	1 068	1 068	3 204	п.2.4 п.1.1	

Таким образом, экономический эффект за расчетный период (T= 3 года) подтверждает экономическую целесообразность внедрения результатов исследований для технологического процесса абразивной обработки карбидокремниевых пластин, благодаря которому достигается требуемое качество выпускаемой продукции из карбидной керамики.

В приложении А представлен акт о внедрении результатов работы на АО «Группа Кремний Эл» (г. Брянск).

4.4. Выводы по главе 4

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. На основании результатов теоретических и экспериментальных научных исследований разработана методика назначения режимов абразивной обработки алмазными пастами карбидокремниевых пластин, ограничивающих трещинообразование и обеспечивающих требуемое качество обработанной поверхности.

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

3. 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.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

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 алмазно-абразивной обработки существенное значение для развития керамических материалов, а также для машиностроения страны. Это подтверждается следующими основными выводами, научными И практическими результатами:

1. Установлена взамосвязь 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 6H превышают размеры трещин пластин из керамики политипа 4H при одинаковых режимах обработки на 15-20% из-за различия кристаллических структур керамических материалов.

3. Скорость съема материала с карбидокремниевых пластин и параметр Ra 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 ACM 28/20 до ACM 60/40), скорости вращения притира (от 24 до 50 мин⁻¹) и усилия прижатия пластин к притиру (от 40 до 87 H).

4. Заключительные этапы абразивной обработки алмазными пастами обратной стороны пластин рекомендуется выполнять с использованием паст с алмазным микропорошком ACM 28/20 при нагрузке на пластины не более 40H (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.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Агеев О.А. Карбид кремния: технология, свойства, применение / О.А.
 Агеев, А.Е. Беляев, Н.С. Болтовец. – Харьков: ИСМА, 2010. – 532 с.

 Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер. – Москва: Наука, 1976. – 269 с.

 Алехин С.С. Формирование микротрещин в поверхностных слоях карбидокремниевых пластин при финишной абразивной обработке / С.С. Алехин // Сб. ст. «LVIII Международные научные чтения (Памяти Б.Г. Галеркина)». – Москва: ЕФИР, 2019. – С. 16-19.

4. Алехин С.С. Шероховатость карбидокремниевых пластин после алмазноабразивной обработки / С.С. Алехин // Автоматизированное проектирование в машиностроении. Материалы VII Междунар. науч. конф.. – Новокузнецк: НИЦ МС, 2019. – С. 137-140.

5. Алехин С.С. Повышение качества финишной абразивной обработки пластин из карбида кремния / С.С. Алехин // Обеспечение и повышение качества изделий машиностроения и авиакосмической техники. Материалы Междунар. науч.- конф.. – Брянск: БГТУ, 2020. – С. 203-208.

 Асаев А.С. Финишная обработка линз и изделий из керамики свободным абразивом с применением эффекта кавитации / А.С. Асаев, И.А. Мурог, А.В. Иванайский // МИКМУС. – 2020.– С. 225-228.

7. Асаев А.С. Исследование качества поверхности деталей машин, подвергаемых финишной обработке с применением эффекта присоединительной кавитации / А.С. Асаев, А.В. Иванайский, Т.А. Асаева // Технология машиностроения. – 2020. –№3. – С. 35-38.

Бабук И.М. Экономика машиностроительного производства / И.М. Бабук,
 Э.И. Горнаков. – Минск: Высшая школа, 1990. – 378 с.

Барышева М.М. Ситаловые подложки для рентгеновской оптики / М.М.
 Барышева // Поверхность: рентгеновские, синхронные и нейтронные исследования. – 2013. – № 7. – С. 9–13.

 Бахарев В.П. Технологические особенности финишной обработки керамических материалов / В.П. Бахарев // Конструкции из композиционных материалов. – 2009. – № 3. – С. 35-44.

Бибишкин М.С. Поверхность. Рентген. синхронные и нейтронные исследования / М.С. Бибишкин, С.Ю. Зуев, Н.Н. Салащенко. – М.: Наука, 2003. – 94 с.

12. 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.

13. Бишутин С.Г. Повышение производительности финишной абразивной обработки пластин из карбида кремния // 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.

14. Бишутин С.Г. Особенности финишной абразивной обработки пластин из карбида кремния / 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.

15. Бишутин С.Г. Прогнозирование параметров качества поверхностей деталей машин, формируемых при шлифовании / С.Г. Бишутин, С.С. Алехин // Прогрессивные технологии и процессы. Материалы 5-й Всероссийской науч. конф.. – Курск: ЗАО «Университетская книга», 2018. – С. 44-48.

16. 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 (Т.15). – С. 144-148.

17. Бишутин С.Г. Шероховатость поверхностей пластин из карбида кремния после алмазно-абразивной обработки / С.Г. Бишутин, С.С. Алехин // Сб. тр.

«Современные материалы, техника и технологии». – Курск: ЗАО «Университетская книга», 2019. – С. 9-15.

18. 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.

19. Бишутин С.Г. Качество поверхностных слоев шлифованных карбидокремниевых пластин / 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.

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

21. 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.

22. Бишутин С.Г. Трибологические аспекты алмазно-абразивной обработки пластин из карбида кремния / С.Г. Бишутин, С.С. Алехин // Проблемы прикладной механики. Материалы Междунар. науч. конф.. – Брянск: БГТУ, 2021. – С. 184-188.

23. 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.

24. Бочкин О.И. Механическая обработка полупроводниковых материалов /
О.И. Бочкин. – М.:Высш. школа, 1977. – 152 с.

25. Бритвин А.А. Разрушение и глубина приповерхностных повреждений, возникающих в пластинах сапфира при его обработке свободным абразивом / А.А. Бритвин // Вестник ТГУ. –2003. – №.4 (Т.8). – С. 686-688.

26. Броек Д. Основы механики разрушения / Д. Броек.– М.: Высшая школа, 1980. – 368 с.

27. Вайншток В.А. Расчет коэффициентов интенсивности напряжений для поверхностных трещин в конструкциях / В.А. Вайншток // Проблемы прочности. –1984. – № 3. – С. 29–39.

28. Волков Д.И. Повышение эффективности глубинного шлифования замкового элемента лопатки турбины высокопористым эльборовым шлифовальным кругом / Д.И. Волков, Б.В. Цветков, А.М. Голованова // Вестник машиностроения. – 2021. –№7. – С. 68-71.

29. Волков Д.И. Перспективы развития глубинного шлифования деталей газотурбинных двигателей с использованием высокопористых эльборовых кругов / Д.И. Волков, Б.В. Цветков // Вестник машиностроения. – 2022. –№7. – С. 45-48.

Гаршин А. П. Конструкционные карбидокремниевые материалы / А. П.
 Гаршин. – М.: Машиностроение, 1997. – 152 с.

Гаршин А. П. Карбид кремния. Монокристаллы, порошки и изделия на их основе / А. П. Гаршин. – СПб: Изд-во политехнического университета, 2006. – 352 с.

32. Гольденблат И.И. Критерии прочности и пластичности конструкционных материалов / И.И. Гольденблат. – М.:Машиностроение, 1968. – 191 с.

 Гусев В.В. Технологическое обеспечение качества обработки изделий из технической керамики / В.В. Гусев, Л.П. Калафатова. – Донецк: ДонНТУ, 2012. – 250 с.

З4. Добровольский Г.Г. Точность формы изделий при алмазном микроточении / Г.Г. Добровольский // Сверхтвердые материалы. –1990. – № 4. – С. 58–62.

35. Долотов Н.И. Влияние механической обработки на структуру поверхности монокристаллов карбида кремния / Долотов Н.И. // Физика и химия обработки материалов. –1986. – № 4. – С. 69–71.

36. Дубовой Н.Д. Измерения и контроль в микроэлектронике / Н.Д. Дубовой.
– М.:Высшая школа, 1984. – 367 с.

37. Душко О.В. Алмазное шлифование карбидкремниевой керамики для машиностроения / О.В. Душко, В.М. Шумячер. – Волгоград:Волг-ГАСУ, 2009. – 80 с.

38. Енишерлова К.Л. Методы контроля нарушенных слоев при механической обработке монокристаллов / К.Л. Енишерлова. – М.:Энергия, 1978. – 64 с.

39. Зинкин С.В. Обеспечение качества поверхностей тонкостенных пластин путем абразивной доводки и электрохимико-механического полирования: автореф. дис. ...канд. тех. наук: 05.02.08/ Зинкин Сергей Владимирович. – Пенза, 2012. – 19 с.

40. Ивенин С. В. Обработка пластин монокристаллического карбида кремния / С.В. Ивенин // Вестник Мордовского университета. –2015. – № 4 (Т.25). С. 37–50.

41. Ито С. Прецизионное шлифование тонкой керамики / С. Ито // Кикай Токогу. – 1983.–№6(Т.27). – С. 36 – 40.

42. Калафатова Л.П. Влияние состава смазочно-охлаждающих технологических сред на тепловые и силовые характеристики процесса шлифования ситаллов / Л.П. Калафатова // Научные труды Донецкого национального технического университета. –2008. – С. 30–39.

43. Карбань В. И. Обработка полупроводниковых материалов / В. И. Карбань.
– Киев:Наукова думка, 1982. – 256 с.

44. Качанов Л.М. Основы механики разрушения / Л.М. Качанов. – М.:Наука, 1974. – 312 с.

45. Кондратьев С.В. Исследование морфологии поверхности монокристаллического карбида кремния методом атомно-силовой микроскопии / В.А. Кондратьев, В. Басараб // Наука настоящего и будущего. – 2021–№1– С. 25-28.

46. Крайнев А.Ф. Конструирование машин / А.Ф. Крайнев – М.: Машиностроение, 1994. – 624 с.

47. Кремень З.И. Скоростная алмазная обработка деталей из технической керамики / З.И. Кремень. – СПб.: Машиностроение, 1984. – 131 с.

48. Кузин В.В. Взаимосвязь режимов алмазного шлифования с состоянием поверхности SiC-керамики / В.В. Кузин, С.Ю. Фёдоров, С.Н. Григорьев // Новые огнеупоры. –2017. – № 3. – С. 179-185.

49. Кузнецов А.А. Определение силы резания, действующей на единичную режущую кромку изношенного абразивного зерна / Кузнецов А.А. // Научнотехническое творчество: материалы IV Всероссийского семинара.–2009.– C.54-61.

50. Курносов А.И. Технология и оборудование производства полупроводниковых приборов / А.И. Курносов.– СПб.: Судостроение, 1971. – 264 с.

51. Лепетуха В.П. Особенности стружкообразования при хонинговании труднообрабатываемых материалов / В.П. Лепетуха // Синтетические алмазы. –1972. – № 3. – С. 49–51.

Лобанов Д.В. Технология инструментального обеспечения производства изделий из композиционных неметаллических материалов / Д.В. Лобанов, А.С. Янюшкин. – Старый Оскол:Тонкие наукоемкие технологии, 2012. –296 с.
 Маслов В.П. Влияние параметров нарушенного поверхностного слоя на конструкционную прочность хрупких неметаллических материалов / В.П. Маслов // Проблемы прочности. –1983. – № 8. – С. 62–66.

54. Маслов Е.Н. Теория шлифования материалов / Е.Н. Маслов. – М.: Машиностроение, 1974. – 320 с.

55. Матренин С.В. Техническая керамика / С.В. Матренин, А.И. Слосман. – Томск: ТПУ, 2004. – 75 с.

56. Медведева О.И. Анализ геометрии контактного взаимодействия алмазного круга с обрабатываемой деталью при плоском шлифовании / О.И. Медведева, А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов // Механики XXI века. –2013.– № 12. – С. 104-106.

57. Меженный М.В. Мильвидский, М.Г., Простомолотов, А.И. Моделирование напряженного состояния пластин кремния большого диаметра в процессе термического отжига / М.В. Меженный, М.Г. Мильвидский, А.И. Простомолотов // Физика твердого тела. –2003.– №10 (Т.45). – С. 1794-1799.

 Морозов Н.Ф. Математические вопросы теории трещин / Н.Ф. Морозов. – М.:Наука, 1984. – 255 с.

59. Муратов К.Р. Исследование процесса финишной абразивной обработки минералокерамики / К.Р. Муратов, Е.А. Гашев, Д.М. Лагунов // Вестник ПНИПУ. –2016. – № 2(Т.18). – С. 143-158.

60. Мужиченко О.Г. Термомеханические напряжения в сборочных микроузлах при монтаже БИС. Расчет и эксперимент / О.Г. Мужиченко // Электроника: наука, технология, бизнес. –2000. –№6(Т.30). – С. 63-65.

61. Нечаев Д.А. Повышение эффективности отделочной обработки деталей из поликорундовой керамики: автореф. дис. ...канд. тех. наук: 05.02.07/ Нечаев Дмитрий Александрович. – М., 2010. – 16 с.

62. Никитков Н.В. Скоростная алмазная обработка деталей из технической керамики / Н.В. Никитков, В.Б. Рабинович. – СПб.: Машиностроение, 1984. – 131 с.

63. Никитков Н.В. Математическое моделирование процессов алмазной абразивной обработки хрупких керамических материалов / Н.В. Никитков // Математическое моделирование в машиностроении. –1997. – №466. – С.29-46.
64. Никифорова С.Н. Технология полупроводниковых приборов и изделий микроэлектроники. Механическая и химическая обработка / С.Н. Никифорова. – М.: Высшая школа, 1989. – 96 с.

65. Никулин Н.И. Выбор оптимальных условий алмазной обработки неметаллических хрупких материалов / Н.И. Никулин // Синтетические алмазы. –1975. – № 6. – С. 46–49.

66. Новиков Н.В. Сопротивление разрушению сверхтвердых композиционных материалов / Н.В. Новиков. – Киев: Наукова думка, 1993. – 220 с.

67. Орлов П.Н. Технологическое обеспечение качества деталей методами доводки / П.Н. Орлов. – М.: Машиностроение, 1988. – 384 с.

Панасюк В.В. Предельное равновесие хрупких тел с трещинами / В.В.
 Панасюк. – Киев: Наукова думка, 1968. – 246 с.

69. Партон В.З. Механика упругопластического разрушения / В.З. Партон,
Е.М. Морозов – М.: Наука, 1985. – 504 с.

70. Пилипенко В.А. Быстрые термообработки в технологии СБИС / В.А. Пилипенко. – Минск:БГУ, 2004. – 531 с.

 Пестриков В.М. Механика разрушения твердых тел / В.М. Пестриков. – СПб: Профессия, 2002. – 318 с.

72. Рогов В. В. Алмазная обработка неметаллических материалов / В. В. Рогов // Синтетические алмазы. –1977. – №5. – С. 51–55.

73. Радькова, Н.О. Повышение механической прочности кремниевых пластин путем снижения трещинообразования при их изготовлении: дис. ...канд. техн. наук: 05.02.08 / Радькова Наталья Олеговна. – Брянск, 2004. – 170 с.

74. Сагателян Г.Р. Современные требования к кремниевым пластинам большого диаметра / Г.Р. Сагателян. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 50 с.

75. Серия Hoffman PR. Планетарная притирочная машина, руководство по эксплуатации и деталям, 1982. – 11 с.

76. Сидорко В.И. Глубина нарушенного слоя при финишной обработке неметаллических материалов / В.И. Сидорко, Ю.Д. Филатов, А.Л. Майстренко // Резание и инструмент в технологических системах: материалы Междунар. науч. конф. –2005. – № 69. – С. 257–268.

77. Силенко П.М. Композиционный материал на основе нанокристаллического SiC, армированного непрерывными волокнами SiC / П.М. Силенко // Порошковая металлургия. –1997.–№5(Т.7) – С.69–75.

78. Слепян Л.И. Механика трещин / Л.И. Слепян. – СПб.: Судостроение, 1981.
– 295 с.

79. Сороченко В. Г. К вопросу о контактном взаимодействии в процессах алмазно-абразивной обработки полимерных композиционных материалов
/ В.Г. Сороченко, А.А. Шепелев // Вестник национального технического университета Украины. – 2008. – №54. – С.175-184.

80. Суслов А.Г. Технологическое обеспечение параметров поверхностного слоя деталей / А.Г. Суслов. – М.: Машиностроение, 1988. – 240 с.

81. Суслов А.Г. Научные основы технологии машиностроения / А.Г. Суслов.
– М.:Машиностроение, 2001. – 684 с.

Танович М. Л. Изучение микрорезания керамических материалов / М. Л.
 Танович // Сверхтвердые материалы. – 1994. – № 1. – С. 49–53.

83. Теплова Т.Б. Квазипластичное удаление поверхностного слоя твердых хрупких материалов с получением нанометрового рельефа поверхности / Т.Б. Теплова // Научный вестник МГГУ. – 2010. – № 8. – С. 73–88.

84. Теплова Т.Б. Разработка научных основ создания технологии прецизионной обработки твердых хрупких минералов: автореф. дис. ... д-ра. тех. наук: 05.03.01/ Теплова Татьяна Борисовна. – М., 2009. – 45 с.

85. Филатов Ю. Д. Механизм образования микрорельефа поверхности при обработке стекла / Ю. Д. Филатов // Сверхтвердые материалы. – 1991. – №5. – С. 61–65.

86. Филатов Ю.Д. Полирование алюмосиликатных материалов инструментом со связанным полировальным порошком / Ю.Д. Филатов // Сверхтвердые материалы. – 2001. – №3. – С. 36–49.

Филатов Ю.Д, Нарушенный слой поверхности при алмазно-абразивной обработке оптических деталей / Ю.Д. Филатов // Контенант. – 2014. – №1. – С. 60-74.

Херцберг Р.В. Деформация и механика разрушения конструкционных материалов / Р.В. Херцберг. – М.:Металлургия, 1989. – 576 с.

Цеснек Л.С. Механика и микрофизика истирания поверхностей / Л.С.
 Цеснек. – М.:Машиностроение, 1979. – 264 с.

90. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения / Г.П. Черепанов. – М.: Наука, 1974. – 640 с.

 Чирков Г. В. Алгоритм установления взаимосвязи эксплуатационных свойств поверхностного слоя материала с технологическими параметрами процесса обработки / Г. В. Чирков // Машиностроитель. – 2004. – №8. – С. 30– 33.

92. Шавва М. А. Анализ взаимосвязи износа круга и сил резания при алмазном шлифовании / М. А. Шавва, С. В. Грубый. – М.:Наука и образование, 2014. – 147 с.

93. Шавва М.А. Сверхточная обработка хрупких оптических материалов в нанометровом диапазоне толщин срезаемого слоя / М.А. Шавва, В.В. Лапшин, С.В. Грубый // – М.: Машиностроение. – 2016. – №4. – С. 52-58.

94. Шальнов В.А. Шлифование и полирование высокопрочных материалов /
В.А. Шальнов. – М.: Машиностроение, 1972. – 272 с.

95. Шкарупа И.Л. Механическая обработка керамических материалов на основе оксида алюминия, нитрида и карбида кремния / И.Л. Шкарупа // Стекло и керамика.– 2004. – №6. – С.16–18.

96. Шорохова И. С. Статистические методы анализа / И. С. Шорохова. – Екатеринбург:Урал, 2015. – 300 с.

97. Эффект Тваймана и асимметрия [Электронный ресурс] / – Режим доступа: https://www.metodolog.ru/00101/00101.html (дата обращения 01.10.2021 г.)

98. Якимов А. В. Оптимизация процесса шлифования / А. В.Якимов. – М.: Машиностроение, 1975. – 176 с.

99. Яковчик Е.В. Повышение эффективности финишной обработки деталей из поликорундовой керамики связанным абразивом: автореф. дис. ... кан. тех. наук: 05.02.08/ Яковчик Евгений Викторович. – Иваново, 2011. – 21 с. 100. Agarwal S. Optimizing machining parameters to combine high productivity with high surface integrity in grinding silicon carbideceramics / S. Agarwal // Ceramics International. – 2016. – pp. 1-19.

101. Agarwal S. Experimental investigation of surface/subsurface damage formation and material removal mechanisms in SiC grinding / S. Agarwal // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2008. – Vol.48 (6). – pp. 698–710.

102.Bifano T. Ductile-regime grinding a new technology for machining brittle materials / T. Bifano, T. Dow, R. Scattergood // Journal of engineering for industry. – 1991. – Vol.113 (2). – pp. 184–189.

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

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

105.Canhua Li. Electro-Chemical Mechanical Polishing of Silicon Carbide / Li. Canhua // Journal of electronic materials. – 2004. – Vol.33 (5). – pp. 481–482.

106. Chen H., Effect of crystallographic orientation on cutting forces and surface finish in ductile cutting of KDP crystals / H. Chen, Y. Dai // Machining Science and Technology. – 2011. – Vol.15 (2). – pp. 231–242.

107.Jianbo D. Experimental investigation on the material removal mechanism in during grinding silicon carbide ceramics with single diamond grain / D. Jianbo, S. Honghua, Z. Wenbo // Precision Engineering. – 2017. – Vol.11 (7). – pp. 136–142. 108.Heydeman V. D. Chemi-Mechanical Polishing of on – axis Semi-insulating Sic Substrates / V. D. Heydeman // Silicon carbide and related Materials. – 2003. – Vol. 457. – pp. 805–808.

109.Han H. High speed deep grinding of tetragonal Zirconia / H. Han, L. Yuchan,T. Luan // SIMTech Technical Report. – 2006. – Vol.8. – pp. 345-348.

110.Huang H. High speed grinding of silicon nitride with resin bond diamond wheels / H. Huang // Journal of Materials Processing Technology. – 2003. – Vol. 141. – pp. 329-336.

111.Hwang T.W. An investigation of high speed grinding with electroplated diamond wheels / T.W. Hwang, C.J. Evans, S. Malkin // Annals of CIRP. – 2000. – Vol. 1. – pp. 245-248.

112. Jackson M. J. Machining with Abrasives / M. J. Jackson // London Springer. – 2011. – pp. 418-419.

113.Kang J. Examination of the material removal mechanisms during the lapping process of advanced ceramic rolling elements / J. Kang, M. Hadfield // Original Research. – 2005. – Vol. 258. – pp. 2–12.

114.Kato T. High throughput Sic water polidhing with good surface morphology / T. Kato // Silicon carbide and related Materials. – 2006. Vol. 556–557. – pp. 753–756.

115.Katakami S. Improvement of Electrical Characteristics of Ion Implanted 4H-SiC MOSFET on a Semi-insulating Substrate / S. Katakami, M. Ogata, S. Ono, M. Arai // Materials Science. – 2007. – Vol. 556-557. – pp. 803-806.

116.Kihuchi M. Mechanochemical polishing of Silicon carbide single crystal chromium (III) oxide abrasive / M. Kihuchi // Ceram. Soc. – 1992. – Vol. 751. – pp. 189–193.

117.Malkin S. Grinding mechanism and strength degradation for ceramics
/ S. Malkin, J.E. Ritter // Journal of Engineering for Industry – 1989. – Vol. 111(5).
– pp. 165-174.

118.Goolëabczak M. Polishing of Hard Machining Semiconductor materials made of Silicon Carbide / M. Goolëabczak // Mechanics and Mechanical Engineering. – 2011. – Vol. 15 (1). – pp. 81-93.

119. Marsh D.M. Stress concentrations a crystal surfaces and the embrittlement of sodium chloride / D.M. Marsh // Mechanics and Mechanical Engineering. – 1960.
– Vol. 5 (58). – pp. 1197-1199.

120.Nazwa T. Precision surface grinding of silicon carbide with fine grain diamond cup wheel / T. Nazwa // Engineering e-Transaction. – 2010. – Vol. 5 (1). – pp. 19-26.

121.Sanjay A. Grinding characteristics, material removal and damage formation mechanisms in high removal rate grinding of silicon carbide / A. Sanjay, P. Venkateswara // International Journal of Machine Tools & Manufacture. – 2010. – Vol. 50. – pp. 1077-1087.

122. Schwierz F. Graphene transistors / F. Schwierz // Nature Nanotech. – 2010. – Vol. 5. –pp. 97-102.

123. Tajima Y. Solid Solubility of Aluminum and Boron in Silicon Carbide / Y. Tajima // J. American Ceramic. – 1982. – Vol. 65 (2). – pp. 27-29.

приложения

Приложение А

«УТВЕРЖДАЮ» пректор на разватию и новой технике-Начальник у МЭТ и НТ Ар «Групна Кремний Эл» Гаврилин А.Н. os 2022 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов научно-исследовательской работы аспиранта Брянского государственного технического университета, Алехина Сергея Сергеевича

по технологическому обеспечению трещиностойкости и качества поверхностных слоев пластин из карбида кремния при алмазно-абразивной обработке

Настоящим актом подтверждается, что разработанная Алехиным С.С. методика назначения режимов алмазно-абразивной обработки карбидокремниевых пластин, обеспечивающих требуемое качество, скорость съема материала и трещиностойкость карбидокремниевых пластин была применена при выполнении абразивной обработки SiC пластин для последующего изготовления полупроводниковых кристаллов 5ДШ402АН5 и 5ДШ408АН5 (черт. ЮФ7.344.422 и черт. ЮФ.757646.001). В результате были определены более производительные режимы шлифования SiC пластин, обеспечивающие требуемое их качество и трещиностойкость.

Ожидаемый годовой экономический эффект от снижения брака (до 20%) при изготовлении указанных изделий за счет применения результатов исследований составит более одного миллиона рублей в ценах 2022 года.

Представитель АО «Группа Кремний Эл» Представитель БрянГТУ: Главный конструктор АО «Группа Кремний Эл» К.Г. Рогач С.С. Алехин

2 790 244⁽¹³⁾ C1

Патент РФ на изобретение № 2 790 244 «Способ односторонней шлифовки пластин из карбида кремния свободным абразивом»

(19)

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



(51) MIIK B24B 37/04 (2012.01) H01L 21/302 (2006.01) B24B 1/00 (2006.01)

RIJ

(11)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) CIIK

B24B 37/04 (2022.05); H01L 21/302 (2022.05); B24B 1/00 (2022.05)

(21)(22) Заявка: 2022100512, 12.01.2022	(72) Автор(ы):	
(24) Дата начала отсчета срока действия патента: 12.01.2022	Алехин Сергей Сергеевич (RU), Бишутин Сергей Геннадьевич (RU), Пронин Андрей Александрович (RU)	ס
Дата регистрации: 15.02.2023	(73) Патентообладатель(и): Акционерное общество "ГРУППА	
Приоритет(ы):	КРЕМНИЙ ЭЛ" (RU)	
(22) Дата подачи заявки: 12.01.2022	(56) Список документов, цитированных в отчете	2
(45) Опубликовано: 15.02.2023 Бюл. № 5	о поиске: RU 2249881 C1, 10.04.2005. SU 1761447 A1, 15.09.1992. SU 1829770 A1,	9
Адрес для переписки:	10.04.1996. SU 1766212 A1, 27.03.1995. RU	0
241037, г. Брянск, ул. Красноармейская, 103, АО "ГРУППА КРЕМНИЙ ЭЛ", Технический отдел	1598778 C, 30.11.1994. DE 102007026292 A1, 11.12.2008.	2 4

(54) СПОСОБ ОДНОСТОРОННЕЙ ШЛИФОВКИ ПЛАСТИН КАРБИДА КРЕМНИЯ СВОБОДНЫМ АБРАЗИВОМ

ົ 0 റ 2

(57) Реферат: Изобретение относится к механической обработке пластин из полупроводниковых материалов и может быть использовано при изготовлении диодов, транзисторов и микросхем. Механическая обработка пластин проводится для их утонения, чтобы уменьшить их тепловое и электрическое сопротивление. Способ включает наклейку на поверхность плоскопараллельной головки обрабатываемых карбидокремниевых

пластин и дополнительных пластин, размещение плоскопараллельной головки на шлифовальнике и подачу свободного абразива. В качестве дополнительных пластин используют кремниевые пластины, диаметр которых равен диаметру

обрабатываемых карбидокремниевых пластин. Сначала на плоскопараллельную головку наклеивают дополнительные кремниевые пластины и осуществляют их шлифовку до величины, на 0,01 мм превышающей толщину обрабатываемых карбидокремниевых пластин. Затем осуществляют наклейку обрабатываемых карбидокремниевых пластин и производят шлифовку наклеенных обрабатываемых карбидокремниевых пластин и дополнительных пластин до заданной величины утонения карбидокремниевых пластин. Упрощается технологический процесс изготовления пластин, повышается качество шлифовки. 4 ил.



Фиг. 3

RU 2790244

ი 1

2790244 C1

RUSSIAN FEDERATION



FEDERAL SERVICE FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) ABSTRACT OF INVENTION

(52) CPC

B24B 37/04 (2022.05); H01L 21/302 (2022.05); B24B 1/00 (2022.05)

 (21)(22) Application: 2022100512, 12.01.2022 (24) Effective date for property rights: 12.01.2022 	 (72) Inventor(s): Alekhin Sergej Sergeevich (RU), Bishutin Sergej Gennadevich (RU), Pronin Andrej Aleksandrovich (RU) 	ק
Registration date: 15.02.2023	(73) Proprietor(s): Aktsionernoe obshchestvo "GRUPPA	C
Priority: (22) Date of filing: 12.01.2022	KREMNIJ EL" (RU)	N
(45) Date of publication: 15.02.2023 Bull. No 5		79
Mail address: 241037, g. Bryansk, ul. Krasnoarmejskaya, 103, AO "GRUPPA KREMNIJ EL", Tekhnicheskij otdel		024

(19)

(51) Int. Cl.

(11)

RU

B24B 37/04 (2012.01) *H01L 21/302* (2006.01) *B24B 1/00* (2006.01)

(54) METHOD FOR ONE-SIDED GRINDING OF SILICON CARBIDE PLATES WITH A FREE ABRASIVE

(57) Abstract:

C

đ

2

0

ര

~

2

FIELD: semiconductor industry.

SUBSTANCE: invention relates to the machining of plates made of semiconductor materials and can be used in the manufacture of diodes, transistors and microcircuits. Mechanical processing of the plates is carried out to thin them in order to reduce their thermal and electrical resistance. The method includes gluing the processed silicon carbide plates and additional plates on the surface of the plane-parallel head, the placement of the plane-parallel head on the grinder and the supply of free abrasive. As additional plates, silicon plates are used, the diameter of which is equal to the diameter of the processed silicon carbide plates. First, additional silicon plates are glued to the plane-parallel head and their grinding is carried out to a value 0.01 mm greater than the thickness of the processed silicon carbide plates. Then, the processed silicon carbide plates are glued and the glued silicon carbide plates and additional plates are polished to a predetermined degree of thinning of the silicon carbide plates.

2 790 244⁽¹³⁾ C1

EFFECT: plate manufacturing is simplified, the quality of grinding is improved.

1 cl, 4 dwg

RU 2 790 244 C1

Предлагаемое изобретение относится к механической обработке пластин из полупроводниковых материалов, в частности карбида кремния (SiC), при изготовлении диодов, транзисторов и микросхем. Механическая обработка пластин проводится для их утонения, чтобы уменьшить их тепловое и электрическое сопротивление.

⁵ Известны способы односторонней шлифовки полупроводниковых пластин, заключающихся в наклейке обрабатываемых пластин на плоскопараллельные головки, размещении головок на вращающемся шлифовальнике и подачу свободного абразива [Бочкин О.И., Брук В.А., Никифорова-Денисова С.Н. Механическая обработка полупроводниковых материалов, 1983. с. 26-27].

При односторонней шлифовке свободным абразивом полупроводниковые пластины одинаковой толщины наклеиваются на плоскопараллельную головку с минимально допустимым расстоянием между ними и зазором от края головки не менее 5-7 мм, для исключения повреждения края пластин. Минимальное количество одновременно обрабатываемых пластин 3 шт., чтобы обеспечить плоскопараллельность их сторон.

15 Рабочее давление головки создается грузами. Однако при неполном заполнении головки пластинами потребуется корректировка массы груза, для обеспечения необходимой величины давления, что усложняет технологический процесс.

Прототипом предполагаемого изобретения является способ односторонней шлифовки пластин свободным абразивом, включающий независимую наклейку с раздельным

- 20 прижимом в двух зонах дополнительных (стопорных) пластин и обрабатываемых пластин на плоскопараллельные головки, размещение головок на шлифовальнике и подачу свободного абразива. Твердость стопорных пластин значительно превышает твердость обрабатываемых пластин, в результате чего возможна обработка полупроводниковых пластин до заданной фиксированной толщины, которая ограничена
- ²⁵ толщиной самих стопорных пластин, что в свою очередь приводит к повышению точности механической обработки при шлифовании пластин до заданной фиксированной толщины (до 340-350 мкм). Раздельная наклейка дополнительных пластин происходит на клеящий состав с температурой плавления на 15-20 градусов выше чем для полупроводниковых. [RU 2249881 C1, H01L 0021/302, 10.04.2005].
- 30 В рассмотренном прототипе способ обработки полупроводниковых пластин направлен на повышение точности получаемой толщины пластины, благодаря наклеенным стопорным пластинам, который позволяет обрабатывать сверхтонкие пластины толщиной до 250 мкм и диаметром 100 мм и более, а также обрабатывать сверхтвердые материалы типа карбида кремния, так как монокристаллы карбида
- 35 кремния являются хрупким материалом, и при шлифовании пластины карбида кремния ударяются о шлифовальник, в результате чего цельные карбидокремниевые пластины скалываются и растрескиваются, особенно при обработке пластин диаметром больше 76 мм, и в дальнейшем их шлифовку проводить нельзя, так как головку и шлифовальник необходимо очистить от осколков карбида кремния. Кроме того, свободный абразив
- 40 из-за сил поверхностного натяжения распределяется более неравномерно по поверхности шлифовальника и края рабочих пластин сошлифовываются быстрее, что увеличивает разброс по толщине пластины.

Целью предполагаемого изобретения является упрощение технологического процесса за счет исключения корректировки массы груза и повышения качества шлифовки

45 благодаря уменьшению разброса толщины по краю пластин, исключения боя и растрескивания карбидокремниевых пластин при шлифовании.

Указанная цель достигается тем, что в предлагаемом способе односторонней шлифовки пластин карбида кремния свободным абразивом, включающем независимую наклейку с раздельным прижимом в двух зонах дополнительных и обрабатываемых пластин на плоскопараллельные головки, размещение этих головок на шлифовальнике и подачу свободного абразива, вначале в одной из зон обрабатываемых пластин наклеивают дополнительные кремниевые пластины и проводят их механическую

доводку до толщины d, где:

d₀≤d≤d₀+0.01 мм

5

10

45

d₀ - наибольшая толщина обрабатываемой пластины карбида кремния, а затем проводят наклейку обрабатываемых пластин карбида кремния (диаметры кремниевых и карбидокремниевых пластин одинаковые.)

Дополнительные кремниевые пластины, наклеенные на свободные места на плоскопараллельной головке имеют твердость ниже, чем обрабатываемые карбидокремниевые пластины, и толщину равную или превышающую толщину карбидокремниевых пластин, с целью их свободного утонения в процессе резания. Кремниевые пластины выступают в роли стабилизирующих элементов для равномерного

- ¹⁵ распределения нагрузки (между обрабатываемыми пластинами) оказываемой на плоскопараллельную головку в процессе шлифования, тем самым исключается возможность возникновения ударных нагрузок в карбидокремниевых пластинах о шлифовальник, минимизируется образование трещин и сохраняется их целостность. Так как площадь обрабатываемой поверхности пластин сохранилась, то корректировать
- ²⁰ массу груза нет надобности, что упрощает процесс шлифования. За счет приклеивания дополнительных кремниевых пластин абразив распределяется более равномерно по поверхности шлифовальника, и уменьшается разброс толщины пластин, а также равномерно распределяется нагрузка на карбидокремниевые пластины в процессе шлифования. Выбор кремниевых пластин в качестве стабилизирующих элементов
- ²⁵ обусловлен относительно низкой стоимостью (в ≈20 раз меньше) и тем что кремниевые пластины не загрязняют поверхность обрабатываемых карбидокремниевых пластин, так как продуктами шлифовки являются частицы кремния, которые также входят в состав карбида кремния. Продукты обработки кремниевых и карбидокремниевых пластин отлично отмываются в стандартных перекисно-аммиачных водных растворах.
- ³⁰ Минимальная толщина кремниевых пластин выбрана одинаковой, чтобы сохранить рабочее давление, а максимальная больше на величину равную 0,01 мм, т.к. скорость обработки кремния больше чем карбида кремния, рабочее давление устанавливается после 1-2 проходов плоскопараллельной головки по шлифовальнику. В отличие от
- прототипа, предложенный способ позволяет утонять карбидокремниевые пластины ³⁵ от их исходной толщины равной 0,35 - 0,37 мм до 0,25 мм во всем диапазоне толщин в зависимости от требований заказчика, а также исключает образование трещин карбидокремниевых пластин и исключает их разрушение.

Сущность предлагаемого изобретения поясняется фигурами.

На фигуре 1 изображен вид наклеенных на головку дополнительных кремниевых пластин.

На фигуре 2 (вид сбоку) изображен вид наклеенных на головку дополнительных кремниевых пластин.

На фигуре 3 изображен вид наклеенных на головку обрабатываемых карбидокремниевых пластин и дополнительных кремниевых пластин.

На фигуре 4 (вид сбоку) изображен вид наклеенных на головку обрабатываемых карбидокремниевых пластин и дополнительных кремниевых пластин.

Обозначение позиций: 1 - плоскопараллельная головка

2 - кремниевая пластина (Si)

- 3 карбидокремниевая пластина (SiC)
- 4 шлифовальник
- 5 свободный абразив

Предлагаемое изобретение можно применить следующим способом.

5 Шлифование карбидокремниевых пластин 3 выполняется на установке абразивной обработки сверхтвердых материалов. Установка предназначена для абразивной обработки карбидокремниевых пластин и других твердых материалов (например, лейкосапфира, ситалла) после их предварительной разрезки на заготовки, или снятия покрытий с них.

Перед тем как приступить к процессу выполнения абразивной обработки карбидокремниевых пластин 3 выполняется замер их толщины, для доведения толщины дополнительных кремниевых пластин 2 до необходимого значения. Для этого три заготовки дополнительных кремниевых пластин 2 (фигура 1 и фигура 2) приклеиваются на плоскопараллельную головку 1 шлифовальника 4 клеящей основой температура

15 плавления которой выше на 15-20 градусов чем у клея, которым приклеиваются карбидокремниевые пластины, и затем осуществляется шлифовка кремниевых пластин до величины на 0,01 мм превышающую толщину обрабатываемых карбидокремниевых пластин.

Затем карбидокремниевые пластины наклеивают к плоскопараллельной головке 20 шлифовальника более низкотемпературным клеем.

В результате наклеивания дополнительных кремниевых и карбидокремниевых пластин на плоскопараллельную головку, согласно схемам, представленным на фигурах 3 и 4, свободный абразив 5 будет распределяется более равномерно по поверхности шлифовальника, и края рабочих пластин будут сошлифовываться более равномерно,

25 что, в свою очередь, исключит возможность разброса по толщине на всей поверхности карбидокремниевой пластины.

Выполняется охлаждение плоскопараллельной головки совместно с приклеенными на нее пластинами в термической ванне до полного застывания пластин на плоскопараллельной головке. Излишки клеевой смеси удаляются ватой технической 30 ГОСТ5679-91, пропитанной Нефрасом-C2-80/120 ГОСТ8781-71.

Осуществляется проверка соответствия толщины каждой пластины и исключается возможность вздутия пластин из-за возможного попадания инородных частиц в клеевой смеси под пластины.

Выполняется притирка плоскопараллельной головки с приклеенными пластинами ³⁵ путем нанесения на шлифовальник (стеклянный, стальной или чугунный) пасты ACM 60/40 ПОМ ГОСТ 25593-83, и разместив плоскопараллельную головку на шлифовальнике, предварительно выставив на блоке управления значение скорости вращения головки 47 Гц (что соответствует 28 об/мин), начинается процесс абразивной обработки в течение 30 минут. На начальном этапе шлифования притиранию

40 подвергнутся дополнительные кремниевые пластины, так как их толщина превышает толщину обрабатываемых карбидокремниевых пластин на 0,01 мм.

Далее выполняется процесс абразивной обработки карбидокремниевых пластин в общем случае состоящий из трех этапов:

обработка алмазной пастой АСМ 60/40 ПОМ ГОСТ 25593-83, с замером толщины
 45 снимаемого слоя с поверхности карбидокремниевых пластин каждые 40-50 минут, с

оказанием дополнительного нагружения на плоскопараллельную головку соответствующей массой (в зависимости от условий оптимизации между параметром производительности процесса шлифования и глубиной нарушенного слоя с учетом

RU 2 790 244 C1

возможных повреждений поверхности пластин, кг). Обработка выполняется при скорости вращения шлифовальника, не превышающей его максимальную скорость равную 28 об/мин (соответствует значению 50 Гц, выставляемому на передней панели блока управления), до тех пор, когда необходимо будет оставить припуск в 0,05 мм на

⁵ последующие два этапа технологической обработки. Параметры пасты: А - алмазная паста, СМ - синтетический алмаз, 60/40 - зернистость в мкм, П - повышенная массовая доля алмазов, Н - нормальная массовая доля алмазов, 0 - смывается органическими растворителями, М - концентрация паст при температуре 20 градусов Цельсия мазеобразная. Осуществлять проверку возможного растрескивания пластин каждые 10, 50

и 40-50 минут;

 обработка алмазной пастой ACM 40/28 ПОМ ГОСТ 25593-83, с замером толщины снимаемого слоя каждые 40-50 минут, с оказанием дополнительного нагружения на головку массой не превышающей 2,5-4,8 кг. Снимаемый слой на данном этапе механической обработки должен составлять порядка 0,025 мм. Скорость вращения

15 шлифовальника не превышает максимальное значение скорости его вращения равной 28 об/мин. Осуществляется проверка возможного растрескивания пластин каждые 40-50 минут;

 обработка алмазной пастой ACM 28/20 НОМ ГОСТ 25593-83, с замером толщины снимаемого слоя каждые 40-50 минут, без дополнительного нагружения. Снимаемый

20 слой на данном этапе механической обработки примерно составляет 0,025 мм (до толщины готового изделия 0,27±0,015 мм). Скорость вращения шлифовальника не превышает максимальное значение скорости его вращения равной 28 об/мин. Осуществляется проверка возможного растрескивания пластин каждые 40-50 минут.

По окончании механической обработки выполняется нагрев плоскопараллельной

- 25 головки с пластинами на термической печи и снимаются утоненные карбидокремниевые пластины с поверхности плоскопараллельной головки. Осуществляется очистка карбидокремниевых пластин от клея и частиц абразивной обработки путем погружения пластин в подогретые металлические ванны с трихлорэтаном. Измеряется окончательная толщина пластин, предварительно высушив пластины под лабораторной вытяжкой,
- 30 визуально и под микроскопом оценивается степень повреждения поверхности пластин после абразивной обработки, замеряется шероховатость, а также оценивается величина и характер прогиба обработанных пластин.

Были проведены испытания по абразивной обработке карбидокремниевых пластин и получены следующие результаты:

35		1/ ·		Def	X
		Количество	диаметр	Разорос	Характер разрушения
		обрабатываемых	пластин	толщины	пластин и
		пластин			дополнительных работ
	Расположение пластин	6 шт SiC	100 мм	0,02-0,025 мм	Скалывание
40	согласно аналогу, так				частей SiC пластин на
	как по прототипу не				периферии. Очистка
	смогли подобрать				шлифовальника от
	стопорные пластины,				осколков карбида
	необходимой твёрдости				кремния
	Расположение пластин	3 шт SiC + 3 шт Si	100 мм	0,005-0,007	Не наблюдалось
	по предлагаемому			MM	
	способу				

45

(57) Формула изобретения

Способ односторонней шлифовки карбидокремниевых пластин свободным абразивом, включающий наклейку на поверхность плоскопараллельной головки

RU 2 790 244 C1

обрабатываемых карбидокремниевых пластин и дополнительных пластин, размещение плоскопараллельной головки на шлифовальнике и подачу свободного абразива, отличающийся тем, что в качестве дополнительных пластин используют кремниевые пластины, диаметр которых равен диаметру обрабатываемых карбидокремниевых

- ⁵ пластин, при этом сначала на плоскопараллельную головку наклеивают дополнительные кремниевые пластины и осуществляют их шлифовку до величины, на 0,01 мм превышающей толщину обрабатываемых карбидокремниевых пластин, а затем осуществляют наклейку обрабатываемых карбидокремниевых пластин и производят шлифовку наклеенных обрабатываемых карбидокремниевых пластин и дополнительных
- пластин до заданной величины утонения карбидокремниевых пластин.









Фигура 1





Фигура 2

Фигура 4

Статистическая обработка результатов исследований по выявлению зависимости между длиной поверхностных микротрещин и скоростью съема материала для пластин из карбида кремния политипа 4-Н

Запишем доверительные интервалы скорости съема материала и длины образуемых микротрещин для выбранной технологии обработки пластин политипа 4-Н при коэффициенте Стьюдента равному 4,30 при 3-х кратном проведении экспериментальных исследований и доверительной вероятности α=95%.

$$\begin{array}{ll} q_1 = 18,3 \pm 1,42 & L_1 = 86 \pm 2,45 \\ q_2 = 12,3 \pm 1,42 & L_2 = 48,6 \pm 5,88 \\ q_3 = 5 \pm 0 & L_3 = 12,3 \pm 6,23 \end{array}$$

Далее выполним проверку однородности дисперсии по следующему условию для каждого опыта [96]:

$$\frac{\sigma^{2}}{\frac{\max}{\sum_{i=1}^{k} \sigma_{i}^{2}}} < F_{(1-\alpha), f_{i}, f_{i+1}},$$
(B.1)
$$\sigma^{2} = \frac{\sum_{i=1}^{n} (y_{i} - \overline{y_{i}})^{2}}{n_{i} - 1}$$
(B.2)

где σ_{\max}^2 - максимальное значение из k экспериментов, $F_{1-\alpha,f_i,f_{i+1}}$ - критерий

Фишера, f_i, f_{i+1} - число степеней свободы ($f_i = n_i$ -1).

Вычислим оценки дисперсии для каждого опыта:

$$\sigma_1^2 = \frac{(87-86)^2 + (86-86)^2 + (85-86)^2}{2} = 1;$$

$$\sigma_2^2 = \frac{(50-48,67)^2 + (49-48,67)^2 + (47-48,67)^2}{2} = 2,33;$$

$$\sigma_3^2 = \frac{(15-12,33)^2 + (12-12,33)^2 + (10-12,33)^2}{2} = 6,33;$$

Определим табличное значение критерия Фишера:

$$F_{1-\alpha,2,3} = 9,55$$

 $f = 3 - 1 = 2$
 $k = 3$
 $\alpha = 0,05$

Составим отношение дисперсий:

$$\frac{\sigma_3^2}{\sigma_1^2} = 6,33 < 9,55; \qquad \frac{\sigma_3^2}{\sigma_2^2} = 2,71 < 9,55;$$

Таким образом дисперсии однородны, что позволяет вычислять коэффициенты уравнения по методу наименьших квадратов.

Предполагаем, что выявляемая зависимость имеет вид:

$$L = C_1 q^{c_2} \tag{B.3}$$

Тогда,

$$\ln L' = \ln C_{1} + C_{2} \ln q$$

$$S = \sum_{1}^{N} \left(\ln L - \ln L' \right)^{2} \rightarrow \min$$

$$\sum_{1}^{N} \left(\ln L - \ln C_{1} + C_{2} \ln q \right)^{2} = S$$

$$\frac{dS}{dC_{1}} = (-2) \sum_{1}^{N} \left(\ln L - \ln C_{1} + C_{2} \ln q \right) \cdot \frac{1}{C_{1}} = 0$$

$$\frac{dS}{dC_{1}} = (-2) \sum_{1}^{N} \left(\ln L - \ln C_{1} + C_{2} \ln q \right) \cdot \ln q = 0$$

$$\begin{cases} N \ln C_{1} + C_{2} \sum_{1}^{N} \ln q = \sum_{1}^{N} \ln L; \\ \ln C_{1} \sum_{1}^{N} \ln q + C_{2} \sum_{1}^{N} (\ln q)^{2} = \sum_{1}^{N} \ln L \cdot \ln q. \end{cases}$$

$$\sum_{1}^{N} \ln q = \ln 18,3 + \ln 12,3 + \ln 5 = 7,026;$$

$$\sum_{1}^{N} (\ln q)^{2} = (\ln 18,3)^{2} + (\ln 12,3)^{2} + (\ln 5)^{2} = 17,338.$$

$$\sum_{1}^{N} \ln L = \ln 86 + \ln 48,6 + \ln 12,3 = 10,848;$$

$$\sum_{1}^{N} \ln l \cdot \ln q = 26,734;$$

$$\begin{cases} 3\ln C_{1} + 7,026C_{2} = 10,848; \\ 7,026\ln C_{1} + 17,338C_{2} = 26,734. \end{cases}$$

$$\ln C_{1} = \frac{10,848 - 7,026C_{2}}{3}$$

$$\frac{7,026 \cdot (10,848 - 7,026C_{2})}{3} + 17,338C_{2} = 26,734$$

$$C_{2} = 1,5 \qquad C_{1} = 1,1$$

Получаем конечный вид математической зависимости между длиной образуемых микротрещин и скоростью снятия материала для пластин политипа 4-Н:

$$L=1,1q^{1,5}$$
 (B.4)

Далее проверим полученную зависимость на значимость и адекватность. Модель считается значимой, если выполняется условие [93]:

$$F_{pec}^{pacu} > F_{1-\alpha(f_1, f_2)}^{maon}, \tag{B.5}$$

где F^{расч} – расчетное значение критерия Фишера для рассматриваемой модели; F^{табл} – табличное значение критерия Фишера на уровне значимости α со степенями свободы f₁, f₂;

$$f_1 = k = 1,$$

 $f_2 = N - k - 1 = 3 - 1 - 1 = 1,$

где k-число факторов; N – число наблюдений.

$$F_{per}^{pacy} = \frac{M_{per}}{S_{ocm}/f_{ocm}},$$
(B.6)

где M_{per} – сумма квадратов отклонений значений отклика \overline{Y}_i предсказываемых уравнением регрессии, от общего среднего Y_{cp} ; S_{oct} – остаточная сумма квадратов с числом степеней свободы f_{oct} .

$$M_{per} = \sum_{i=1}^{i=N} (\overline{\overline{Y}_{i}} - Y_{cp})^{2}, \qquad (B.7)$$

где $\overline{\mathbf{Y}}_{i}$ - значение отклика, предсказываемое уравнением регрессии для условий *i* –го наблюдения;

$$Y_{cp} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{i=N} \overline{Y}_i, \ \ \overline{Y}_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} Y_{ij},$$
(B.8)

где \overline{Y}_i - среднее экспериментальное значение на i – ом наблюдении; n - число повторений каждого наблюдения; Y_{ij} - экспериментальное значение параметра, полученное на i –ом опыте при j –ом повторении.

$$S_{ocm} = \sum_{i=1}^{i=N} \left(\overline{\overline{Y}}_i - \overline{\overline{Y}}_i \right)$$

$$f_{ocm} = f_2$$

$$Y_{cp} = (86 + 48, 6 + 12, 3)/3 = 48,97$$

$$M_{pee} = ((86, 1 - 48, 97)^2 + (47, 45 - 48, 97)^2 + (12, 3 - 48, 97)^2 = 2726$$

$$S_{ocm} = ((86, 1 - 86)^2 + (47, 45 - 48, 6)^2 + (12, 3 - 12, 3)^2) = 1,332$$

$$f_{ocm} = f_2 = 1$$
(B.9)

 $F_{per}^{pacu} = \frac{2726}{1,332} = 2046 > F_{1-0,05(1,1)}^{madn} = 161$ - условие выполняется, модель значима

Модель считается адекватной, если выполняется условие [96]:

$$F_{a\partial}^{pacu} > F_{1-\alpha(f_1, f_2)}^{madn},$$
(B.10)

$$f_1 = N - k - 1 = 3 - 1 - 1 = 1,$$

$$f_2 = n - 1 = 3 - 1 = 2$$

$$F_{a\partial}^{pacu} = \frac{M_{a\partial}}{S^2}$$
(B.11)

где M_{ad} – дисперсия адекватности; S^2 – дисперсия воспроизводимости эксперимента

$$M_{a\partial} = \frac{\sum_{i=1}^{i=N} (\overline{\overline{Y}_i} - \overline{\overline{Y}_i})^2}{N - K - 1}$$
(B.12)

$$S^{2} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{i=N} S_{i}^{2}$$
(B.13)

где S_i² – дисперсия результатов по данным N повторений i-го наблюдения:

$$S_{i}^{2} = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^{j=n} (Y_{ij} - \overline{Y}_{i})^{2}$$
(B.14)
$$M_{ad} = \frac{((86,1-86)^{2} + (47,45-48,6)^{2} + (12,3-12,3)^{2})}{1} = 1,332;$$
$$S_{3}^{2} = \frac{((87-86)^{2} + (86-86)^{2} + (85-86)^{2})}{2} = 1;$$
$$S_{9}^{2} = \frac{((50-48,6)^{2} + (49-48,6)^{2} + (47-48,6)^{2})}{2} = 2,34;$$
$$S_{13}^{2} = \frac{((15-12,3)^{2} + (12-12,3)^{2} + (10-12,3)^{2})}{2} = 6,33;$$
$$S^{2} = \frac{1+2,34+6,33}{3} = 3,22,$$

 $F_{a\delta}^{pacy} = \frac{1,332}{3,22} = 0,41 < F_{1-\alpha(1,2)}^{mada} = 18,51$ (при $\alpha = 0,05$) - модель адекватна

Статистическая обработка результатов исследований по выявлению зависимости между длиной поверхностных микротрещин и скоростью съема материала для пластин из карбида кремния политипа 6-Н

Запишем доверительные интервалы скорости съема материала и длины образуемых микротрещин для выбранной технологии обработки пластин политипа 6-Н при коэффициенте Стьюдента равному 4,30 при 3-х кратном проведении экспериментальных исследований и доверительной вероятности α=95%.

$$\begin{array}{ll} q_1 = 20 \pm 2,45 & L_1 = 99,7 \pm 6,23 \\ q_{12} = 12,7 \pm 1,42 & L_{12} = 55 \pm 6,32 \\ q_{13} = 5,7 \pm 1,42 & L_3 = 19,3 \pm 6,23 \end{array}$$

Далее выполним проверку однородности дисперсии по условиям (В.1) и (В.2) для каждого опыта:

$$\sigma_{1}^{2} = \frac{(100-99,67)^{2} + (102-99,67)^{2} + (97-99,67)^{2}}{2} = 6,33;$$

$$\sigma_{2}^{2} = \frac{(53-55)^{2} + (58-55)^{2} + (54-55)^{2}}{2} = 7;$$

$$\sigma_{3}^{2} = \frac{(22-19,33)^{2} + (19-19,33)^{2} + (17-19,33)^{2}}{2} = 6,33;$$

Определим табличное значение критерия Фишера:

$$F_{1-\alpha,2,3} = 9,55$$

 $f = 3 - 1 = 2$
 $k = 3$
 $\alpha = 0,05$

Составим отношение дисперсий:

$$\frac{\sigma_2^2}{\sigma_1^2} = 1,1 < 9,55; \qquad \frac{\sigma_2^2}{\sigma_3^2} = 1,11 < 9,55;$$

Таким образом дисперсии однородны, что позволяет вычислять коэффициенты уравнения по методу наименьших квадратов.

Предполагаем, что выявляемая зависимость имеет вид аналогичный зависимости (В.3):

Тогда,

$$\ln L' = \ln C_1 + C_2 \ln q$$

$$S = \sum_{1}^{N} \left(\ln L - \ln L' \right)^2 \to \min$$

$$\sum_{1}^{N} \left(\ln L - \ln C_1 + C_2 \ln q \right)^2 = S$$

$$\frac{dS}{dC_1} = (-2) \sum_{1}^{N} \left(\ln L - \ln C_1 + C_2 \ln q \right) \cdot \frac{1}{C_1} = 0$$

$$\frac{dS}{dC_1} = (-2) \sum_{1}^{N} \left(\ln L - \ln C_1 + C_2 \ln q \right) \cdot \ln q = 0$$

$$\begin{cases} N \ln C_1 + C_2 \sum_{1}^{N} \ln q = \sum_{1}^{N} \ln L; \\ \ln C_1 \sum_{1}^{N} \ln q + C_2 \sum_{1}^{N} (\ln q)^2 = \sum_{1}^{N} \ln L \cdot \ln q. \end{cases}$$

$$\sum_{1}^{N} \ln q = \ln 20 + \ln 12, 7 + \ln 5, 7 = 7, 278;$$

$$\sum_{1}^{N} (\ln q)^2 = (\ln 20)^2 + (\ln 12, 7)^2 + (\ln 5, 7)^2 = 18,463.$$

$$\sum_{1}^{N} \ln L = \ln 99, 7 + \ln 55 + \ln 19, 3 = 11,57;$$

$$\sum_{1}^{N} \ln l \cdot \ln q = 29,124;$$

$$\begin{cases} 3\ln C_1 + 7,278C_2 = 11,57; \\ 7,278\ln C_1 + 18,463C_2 = 29,124. \end{cases} \qquad \begin{aligned} \ln C_1 &= \frac{11,57 - 7,278C_2}{3} \\ \frac{7,278 \cdot (11,57 - 7,278C_2)}{3} + 18,463C_2 = 29,124. \\ C_2 &= 1,33 \quad C_1 = 1,9 \end{cases}$$

Получаем конечный вид математической зависимости между длиной образуемых микротрещин и скоростью снятия материала для пластин политипа 6-Н:

$$L = 1,9q^{1,32}$$
(Γ.1)

Далее проверим полученную зависимость на значимость и адекватность по аналогичной методике расчета, представленной для модели (В.4).

Модель считается значимой, если выполняется условие (В.5) при этом:

$$f_1 = k = 1,$$

 $f_2 = N - k - 1 = 3 - 1 - 1 = 1,$

где k-число факторов; N – число наблюдений.

$$Y_{cp} = (99,7+55+15,3)/3 = 56,67$$

$$M_{pee} = ((99,1-56,67)^2 + (54,4-56,67)^2 + (18,9-52,67)^2 = 2946$$

$$S_{ocm} = ((99,1-99,7)^2 + (54,4-55)^2 + (18,9-15,3)^2) = 13,68$$

$$f_{ocm} = f_2 = 1$$

 $F_{pee}^{pacy} = \frac{2946}{13,68} = 215 > F_{1-0,05(1,1)}^{magn} = 161$ - условие выполняется, модель значима

Модель считается адекватной, если выполняется условие (В.10) при этом:

$$f_{1}=N-k-1=3-1-1=1,$$

$$f_{2}=n-1=3-1=2$$

$$M_{ad} = \frac{((99,1-99,7)^{2} + (54,4-55)^{2} + (18,9-15,3)^{2})}{1} = 13,68;;$$

$$S_{15}^{2} = \frac{((100-99,7)^{2} + (102-99,7)^{2} + (97-99,7)^{2})}{2} = 6,33;$$

$$S_{18}^{2} = \frac{((53-55)^{2} + (58-55)^{2} + (54-55)^{2})}{2} = 7;$$

$$S_{21}^{2} = \frac{((22-19,3)^{2} + (19-19,3)^{2} + (17-19,3)^{2})}{2} = 6,33;$$

$$S_{21}^{2} = \frac{6,33+7+6,33}{3} = 6,55,$$

 $F_{a\delta}^{pacu} = \frac{13,68}{6,55} = 2,1 < F_{1-\alpha(1,2)}^{madn} = 18,51$ (при $\alpha = 0,05$) - модель адекватна