

Министерство образования, науки и молодежи Республики Крым
Государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования Республики Крым
«Крымский инженерно-педагогический университет имени Февзи Якубова»

СЕФЕДИН ИСМАИЛ БЕЙ ДИЛЯВЕР ОГЛУ

Номинация: отраслевые технологии

**СТАБИЛИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА ПРИ ШЛИФОВАНИИ
ПРЕРЫВИСТЫМИ КРУГАМИ ЗА СЧЕТ ПРОФИЛИРОВАНИЯ РЕЖУЩЕЙ
ПОВЕРХНОСТИ ЛАЗЕРОМ**

Научная работа выполнена при
поддержке гранта Государственного
Совета Республики Крым молодым
ученым Республики Крым
студента 3 курса
инженерно-технологического
факультета

Симферополь – 2023

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы,
канд. техн. наук

подпись, дата

Э.Э. Ягьяев (введение, заключение)

Исполнитель темы

подпись, дата

И.Д. Сефедин (раздел 1-5, заключение)

Реферат

Отчет 96 с., 24 рис., 12 табл., 60 источников.

ШЛИФОВАЛЬНЫЙ КРУГ, ПРЕРЫВИСТЫЕ АБРАЗИВНЫЕ КРУГИ, ПРОФИЛИРОВАНИЕ, ЛАЗЕРНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ, ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА, АБРАЗИВНЫЙ МАТЕРИАЛ, КЕРАМИЧЕСКАЯ СВЯЗКА

Объектом исследования являются шлифовальные круги на керамических связках.

Цель работы состоит в стабилизации параметров качества при шлифовании за счет совершенствования технологии профилирования режущей поверхности шлифовальных кругов на керамической связке лазерным излучением.

В работе проведен полный факторный эксперимент типа 2^2 для определения влияния задающих параметров при профилировании шлифовальных кругов, влияющих на глубину и ширину профиля при использовании CO_2 – лазера с непрерывным излучением.

В результате исследований получена математическая модель, адекватно описывающая указанный процесс. На основе полученной модели проведена оценка относительного влияния выбранных факторов и их парное взаимодействие на изучаемый.

Построены основные закономерности и взаимосвязи параметров определяющих технологический процесс профилирования шлифовальных кругов лазерным излучением.

Определены оптимальные технологические параметры лазерного профилирования шлифовального круга на керамической связке и разработаны технологические схемы профилирования, которые обладают универсальностью, так как позволяют получать различные формы профиля при комбинировании процессов правки, микроструктурирования и очистки режущей поверхности шлифовального круга.

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	6
Раздел 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА	9
1.1. Исследования в области процессов шлифования кругами с прерывистой поверхностью	10
1.2. Предпосылки использования лазерного излучения для профилирования режущей поверхности шлифовального круга	14
1.3 Выводы по первой главе	21
Раздел 2. ВОЗДЕЙСТВИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ВЕЩЕСТВО	22
2.1. Поглощение лазерного излучения	23
2.2. Спектры поглощения компонентов шлифовального круга на керамической связке	30
2.3. Нагрев вещества	36
2.4. Тепловая модель	38
2.5. Уравнение теплового баланса	42
2.5 Выводы по второй главе	43
Раздел 3. ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ	45
3.1. Механизмы лазерного разделения	45
3.1.1. Режим испарения	46
3.1.2. Режим плавления	48
3.1.3. Режим термораскалывания	48
3.2 Параметры технологических процессов лазерной обработки шлифовальных кругов	49
3.2.1. Задающие параметры	51
3.2.2. Показатели обработки	57

3.3. Лазерные технологические установки для обработки шлифовальных кругов на керамической связке	58
Вводы по третьей главе	62
Раздел 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ, УСЛОВИЯ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ	64
4.1. Экспериментальная лазерная установка для профилирования шлифовальных кругов.....	64
4.2. Подготовка образцов, условия и режимы исследований	67
4.3. Исследование показателей обработки.....	69
4.4. Применение метода планирования эксперимента для определения влияния задающих параметров при профилировании	73
4.5. Выводы по четвертой главе.....	81
Раздел 5. РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ ТЕХНОЛОГИИ ПРОФИЛИРОВАНИЯ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ ...	82
5.1. Технологические схемы профилирования.....	82
5.2. Оптимальные режимы профилирования режущей поверхности шлифовального круга на керамической связке	88
ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБЩИЕ ВЫВОДЫ.....	89
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	90

ВВЕДЕНИЕ

В условиях современных рыночных отношений конкурентоспособность машиностроительной продукции Республики Крым можно обеспечить при реализации наукоемких ресурсосберегающих экологически чистых технологий. Вместе с этим значение процесса абразивной обработки, как высокопроизводительного способа получения высокоточных деталей в машиностроительном комплексе, возрастает, так как операция шлифования занимает до 30% от общего объема механической обработки деталей.

Процесс шлифования обусловлен сравнительно высокой геометрической точностью получаемой поверхности, высокой производительностью обработки и низкой технологической себестоимостью.

Известно также, что профиль и состояние рабочей поверхности шлифовального круга оказывает огромное влияние на процесс шлифования. Значительные тепловыделения в зоне обработки негативно влияют на формирование качественного поверхностного слоя обрабатываемой детали и его физико-механическое состояние. Возникают такие дефекты, как прижоги, растягивающие остаточные напряжения, фазовые и структурные изменения. С увеличением наработки вследствие затупления и засаливания рабочей поверхности шлифовального круга снижается его режущая способность. Связано это с высокими скоростями упругих и пластических деформаций обрабатываемого материала скоротечностью процесса снятия стружки, а также сравнительно высоким коэффициентом трения инструмента о заготовку.

Несмотря на эффективное использование смазочно-охлаждающих жидкостей и других способов отвода тепла из зоны обработки, в настоящее время возникновение дефектов в обработанной детали имеет место быть, особенно при повышенных режимах шлифования.

Из вышесказанного следует, что в процессе шлифования важно не только обеспечить эффективный отвод тепла из зоны обработки, но и сохранить высокую режущую способность круга как можно дольше в процессе шлифования. Для решения

данной проблемы проводятся опытно-конструкторские и научно-исследовательские работы по самым различным направлениям, которые позволяют расширить режимы бездефектного шлифования, повысить производительность обработки и качество поверхностного слоя деталей.

Многочисленными исследованиями доказано, что шлифовальные круги с управляемым рельефом, реализующие принцип прерывистого шлифования считаются перспективными и имеют большое значение в области чистовой обработки, поскольку они могут обеспечить более высокие характеристики шлифования, чем традиционные круги, такие как повышенная способность транспортировать СОЖ, хорошее рассеивание тепла, выделяемого в зоне контакта круга с заготовкой, низкие температуры шлифования, усилия и энергопотребление, наличие плавных потоков стружки и высокая износостойкость круга.

При решении этой проблемы в работе использован подход расширения технологических возможностей абразивной обработки путем использования лазерного излучения для профилирования режущей поверхности шлифовального круга. Данный подход отличается универсальностью для различных условий обработки, характеристик инструмента и производительностью.

Применение лазерного излучения в качестве бесконтактного, высокопроизводительного, универсального инструмента профилирования режущей поверхности является перспективным направлением технологии машиностроения.

Цель работы состоит в стабилизации параметров качества при шлифовании за счет совершенствования технологии профилирования режущей поверхности шлифовальных кругов на керамической связке лазерным излучением.

Для достижения поставленной цели требуется решение следующих **задач**:

1. Анализ существующих методов профилирования шлифовальных кругов.
2. Описание физических основ обработки шлифовального круга на керамической связке лазерным излучением и технологических возможностей лазерного оборудования.

3. Определение оптимальных параметров лазерного излучения для профилирования режущей поверхности круга.

4. Разработка математической зависимости, описывающая формирование геометрии обработанной поверхности, вызванная лазерным профилированием режущей поверхности шлифовального круга.

5. Разработка технологических рекомендаций по совершенствованию технологии профилирования режущей поверхности шлифовальных кругов.

Решение поставленных задач в процессе исследования позволит создать научную основу, с использованием которой возможно совершенствование технологии профилирования шлифовального инструмента методом лазерной обработки.

Объект исследования: шлифовальные круги на керамических связках.

Предмет исследования: профилирование режущей поверхности шлифовального круга лазерным излучением.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

1) применение лазерного излучения в качестве бесконтактного, высокопроизводительного, универсального метода профилирования режущей поверхности, с учетом многокомпонентности состава шлифовального круга;

2) определение оптимальных параметров обработки лазерным излучением необходимых для получения наиболее качественного профиля и геометрии шлифовального круга;

3) разработка технологических рекомендаций и технологического процесса профилирования режущей поверхности шлифовальных кругов лазерным излучением, обеспечивающая оптимальное качество обрабатываемой поверхности.

Раздел 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА

Процесс шлифования обусловлен сравнительно высокой геометрической точностью получаемой поверхности, высокой производительностью обработки и низкой технологической себестоимостью.

Известно также, что профиль и состояние рабочей поверхности шлифовального круга оказывает огромное влияние на процесс шлифования. Значительные тепловыделения в зоне обработки негативно влияют на формирование качественного поверхностного слоя обрабатываемой детали и его физико-механическое состояние. Возникают такие дефекты, как прижоги, растягивающие остаточные напряжения, фазовые и структурные изменения. С увеличением наработки, вследствие затупления и засаливания рабочей поверхности шлифовального круга, снижается его режущая способность. Связано это с высокими скоростями упругих и пластических деформаций обрабатываемого материала скоротечностью процесса снятия стружки, а также сравнительно высоким коэффициентом трения инструмента о заготовку.

Несмотря на эффективное использование смазочно-охлаждающих жидкостей и других способов отвода тепла из зоны обработки, в настоящее время, возникновение дефектов в обработанной детали имеет место быть, особенно при повышенных режимах шлифования.

Профилирование шлифовальных кругов представляет собой новый способ снижения режущих сил и температур, а следовательно, повышения эффективности процесса шлифования.

Механизм процесса шлифования материалов кругами с прерывистой поверхностью достаточно сложен. Теоретическое рассмотрение такого процесса проведено в ряде работ [1–8]. В настоящее время разработано несколько способов профилирования режущей поверхности шлифовальных кругов, отличающихся не только методикой ее проведения, применением различных технических средств, источников энергии, но и конструктивно-технологическими особенностями изготовленного шлифовального инструмента. Каждый из способов дискретизации

позволяет получить шлифовальный инструмент, имеющий свои специфические особенности, которые отражаются на конструкции круга и конечных результатах процесса шлифования. Так, сборные абразивные круги позволяют уменьшить импульсную температуру в 3 раза [9], а следовательно, проводить процессы шлифования на высоких режимах резания с обеспечением требуемого качества поверхностного слоя. При шлифовании кругами с прерывистой поверхностью снижается количество прижогов и термических дефектов, улучшается теплопроводность шлифовального круга [5; 10–12]. Однако применение кругов с прерывистой поверхностью приводит к ухудшению геометрических показателей качества шлифованных поверхностей. Это обусловлено более динамичной работой инструментов и ударным действием режущих элементов на обрабатываемую поверхность [13; 14].

1.1. Исследования в области процессов шлифования кругами с прерывистой поверхностью

Стандартные шлифовальные круги (ШК) также имеют прерывистую режущую поверхность, однако это прерывание характеризуется протяженностью воздушных промежутков между абразивными зёрнами, измеряемой от единиц микрометров до нескольких долей миллиметра. Так как такое прерывание режущей поверхности столь незначительно, им пренебрегают и считают, что стандартные шлифовальные круги имеют сплошную режущую поверхность.

Шлифовальные круги с прерывистой поверхностью – это круги, профиль которых прерывает режущую поверхность с протяженностью воздушных промежутков между соседними режущими элементами инструмента от единиц миллиметров до нескольких десятков миллиметров.

В настоящее время существует множество способов профилирования режущей поверхности шлифовальных кругов, они отличаются не только методикой получения, применением различных технических средств, но и источником энергии. На данный момент можно выделить основные способы формирования прерывистой режущей

поверхности шлифовальных кругов, абразивных сегментов и абразивных режущих элементов [1; 3; 8; 10; 15; 16]:

- выполнение режущей поверхности цельного шлифовального круга в виде чередующихся выступов и впадин механической обработкой пазов или прессованием абразивной массы;
- выполнение шлифовальных кругов со сравнительно большими порами по объему (высокопористые и крупнопористые круги);
- выполнение кругов с участками режущей поверхности, отличающимися твердостью, структурой и зернистостью (композиционные круги);
- выполнение дискретной режущей поверхности в результате сборки режущих абразивных элементов в одном корпусе (дискретные сборные абразивные круги);
- дискретизация режущей поверхности шлифовального инструмента с использованием плазмы и лазерного луча.

Конструктивные особенности профилирования шлифовальных кругов путем механической обработки рассмотрены в работе [16]. На рисунке 1 изображены прерывистые абразивные круги с продольным и радиальным расположением пазов, изготавливаемые путем прорезки пазов на рабочей поверхности.

Представленные способы формирования прерывистой поверхности направлены на повышение эффективности шлифовальных операций: повышение стойкости инструмента, качества шлифованного поверхностного слоя деталей и производительности технологических операций путем уменьшения тепла, поступающего в обрабатываемые заготовки.

Шлифование кругами с прерывистой поверхностью в значительной степени отличается от сплошного шлифования следующим: динамикой и кинематикой формирования обрабатываемых поверхностей; уровнями и градиентами температуры; характером трения, взаимодействием зерен с металлом заготовки; износом абразивных зерен; процессом стружкообразования; скоростями отвода тепла

от обрабатываемых заготовок; аэро-, гидродинамикой процесса; уровнем вибрации элементов; стойкостью шлифовальных кругов и другими важнейшими показателями процесса шлифования.

Современные исследования специфики шлифования кругами с прерывистой поверхностью указывают не только на изменение показателей качества, характеризующих физико-механическое состояние поверхностного слоя деталей, но и показателей качества, характеризующих геометрическую точность обработанных поверхностей. Так исследования показали, что шлифовальные круги благодаря впадинам на рабочей поверхности, прерывающим процесс резания, позволяют охлаждать шлифуемую заготовку в перерывах между резами [1; 17]. В этих исследованиях вскрыта сущность процесса плоского шлифования кругами с прерывистой поверхностью и разработаны теоретические основы снижения тепловыделений в зоне обработки.

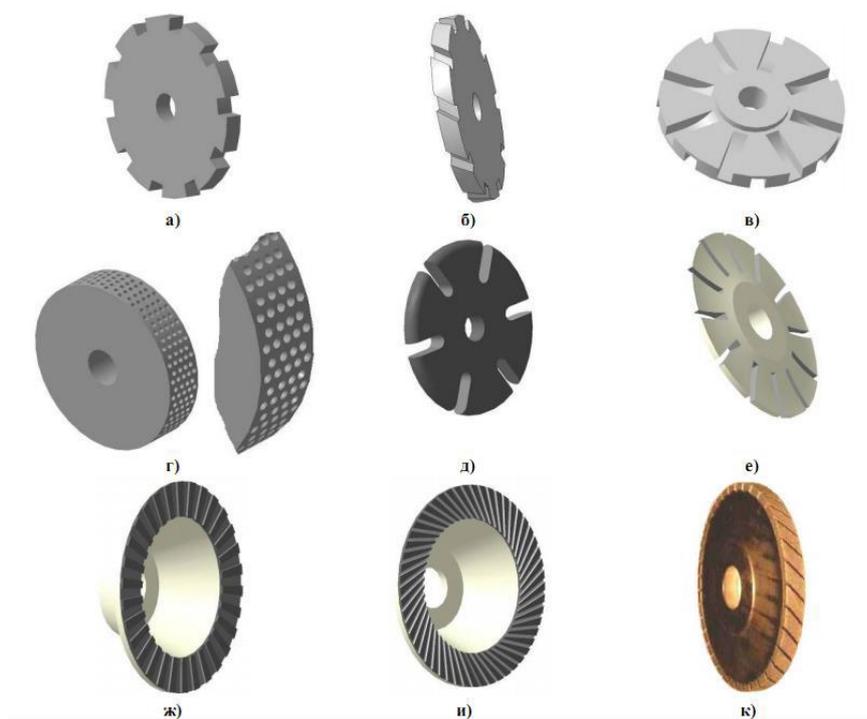


Рисунок 1. Прерывистые шлифовальные круги с продольным и радиальным расположением пазов, изготовляемые путем прорезки пазов на рабочей поверхности [16]: а) прерывистый шлифовальный круг с прямыми пазами; б) с наклонными пазами; в) с радиальным расположением пазов; г) с радиальным расположением отверстий; д) для шлифования беговых дорожек подшипников; е) для шлифования зубьев зубчатых колес; ж) алмазный шлифовальный круг для шлифования торцом; и) алмазный шлифовальный круг для заточки инструмента; к) алмазный шлифовальный круг с наклонными прорезями.

В работах [13; 14; 18–20] отмечается, что в момент взаимодействия передней кромки абразивных выступов цельного круга с прерывистой поверхностью, кромка вступает в ударное взаимодействие с обрабатываемой поверхностью, в результате чего кромка подвергается износу с формированием криволинейной фронтальной режущей поверхности на набегающем на заготовку участке выступа абразивного инструмента. При этом увеличивается длина дуги контакта круга с заготовкой и возрастает число абразивных зерен, участвующих в процессе резания.

Данное явление объясняет более высокую удельную производительность (в 1,5–3,0 раза) и режущую способность кругов с прерывистой поверхностью по сравнению со сплошными кругами. В исследованиях отмечено, что сохранение исходного состояния микроструктуры обрабатываемого поверхностного слоя шлифуемой заготовки из высокопрочных материалов возможно даже при увеличении в 2 раза таких параметров обработки, как глубина резания и подача. Это связано с остыванием заготовки в промежутках между соседними резами шлифовального круга. Эффективность использования профилированных кругов возрастает с увеличением глубины резания. Использование данных кругов облегчает отвод стружки из зоны обработки, позволяет снизить составляющие силы резания до 20–30% и уменьшить температуру обрабатываемой поверхности до 30–40% [1].

Однако применение шлифовальных кругов с прерывистой поверхностью, создавая положительные результаты по некоторым показателям, неизбежно приводят к ухудшению других. Так, мощные воздушные потоки, генерируемые кругом, оттесняют СОЖ от зоны резания и серьёзно препятствуют проникновению жидкости в локальные точки контакта инструмента и заготовки, что не позволяет интенсифицировать процессы шлифования [10; 11, 20; 21]. Также экспериментально установлено, что механическая прочность кругов с прерывистой поверхностью меньше, по сравнению со сплошными кругами аналогичного абразивного материала. Коэффициент запаса прочности для сплошных кругов 2,7, для профилированных – 2,2 [1].

Наличие ударного характера взаимодействия круга и заготовки обусловлено чередованием выступов и впадин на рабочей поверхности шлифовального круга с прерывистой поверхностью, что способствует возникновению вибрации. Такой характер влечёт за собой снижение точности геометрической формы шлифуемых заготовок, а также снижение долговечности шлифовального оборудования. К недостаткам можно отнести сложность технологического процесса изготовления таких типов кругов, что повышает себестоимость инструмента [22].

Перспективным способом профилирования режущей поверхности шлифовального инструмента можно считать использование плазмы и лазерного луча. Так, в работе [3,23] разработан технологический процесс лазерного профилирования режущей поверхности, обеспечивающий наименьшие тепловыделения в инструменте, сохраняя при этом оптимальную механическую прочность.

1.2. Предпосылки использования лазерного излучения для профилирования режущей поверхности шлифовального круга

Методы формирования необходимой технологической поверхности ШК могут быть разделены на четыре основные группы в зависимости от механизма удаления материала, а именно: механический, термический, химический и электрохимический (гибридный) метод [24, 25]. Так же можно классифицировать по способу взаимодействия с веществом: контактный и бесконтактный (рис. 2). Механический метод был единственным процессом профилирования и правки, который использовался в промышленности в прошлом, сегодня существуют термические, химические и гибридные методы. Однако механическая правка и профилирование с использованием алмазных инструментов для шлифовальных кругов SiC/Al₂O₃, по-прежнему является наиболее распространенным процессом [25]. Тем не менее, количество способов и технологий правки и профилирования постоянно росло. При механических способах правки с помощью алмазного инструмента абразивные зерна и связка разрушаются за счет контакта зубьев кристаллов алмаза с поверхностью ШК [25,26,27]. Однако инструменты для правки карбида кремния и оксида алюминия,

которые относятся к механическим, только разрушают связь [25,28]. При немеханическом способе обработки, зерна и связка шлифовального круга истираются или аблируются путем применения электрохимических и термических способов, таких как лазерная обработка поверхности, электроэрозионная (электроразрядная) обработка, электрохимическая механическая обработка и электролитическая в процессе правки [29,30].

Устройство правки и профилирования алмазным инструментом обычно используют для шлифовальных кругов на керамических связках и для кругов из суперабразивов (кубический нитрид бора (сBN), алмаз) [25, 31]. Однако в зоне контакта между шлифовальным кругом и правящим (профилирующим) инструментом генерируются высокие усилия правки, которые вызывают износ инструмента и частичный разрыв и/или распространение трещин в связке шлифовального круга. Из-за постепенно увеличивающегося износа инструмента процесс формирования необходимой технологической поверхности теряет свою точность после определенного количества циклов правки и профилирования, требуя, чтобы обработка периодически повторялась через определенное время, которое связано как с большими затратами на инструмент, так и с большими затратами времени.

По сравнению с керамическими связками, разрушение суперабразивных шлифовальных материалов на неорганических и металлических связках еще более сложное и затратнее. Для этой цели обычно используются специализированные правящие инструменты. Однако скорость удаления материала в процессе правки и приемлемая точность шлифовального круга очень ограничены [24,41]. Правка (профилирование) бакелитовых и металлических кругов, т.е. получение макро- и микроструктуры на данных типах шлифовального инструмента осуществляется с использованием специальных инструментов [24,27,28,32].

Для изменения макроструктуры шлифовального инструмента в основном круг снимают с шлифовального станка и перемещают его на специализированное оборудование. Таким образом, процесс связан с высокими временными простоями и дополнительными затратами. Другие недостатки включают очень высокий износ правящего инструмента и образование пыли в случае сухой механической обработки, поэтому требуется постоянный отвод пыли от станка [24].

Несколько исследователей рассматривали профилирование как дополнительную стадию формирования необходимой технологической поверхности [33-36]. Профилирование шлифовальных кругов представляет собой новый способ снижения режущих сил и температур и следовательно, повышение эффективности процесса за счет уменьшения числа статических, динамических и кинематических режущих кромок. Этот способ был предметом нескольких исследований, направленных на улучшение качества резания и текучести хладагента в зоне шлифования [31,33,36,37]. Получение профиля на поверхности шлифовальных кругов с использованием алмазных карандашей (механическим способом), как правило, ограничивается кругами на керамической связке [36,37]. Кроме того, использование алмазных инструментов ограничено некоторым профилем. Механическое профилирование алмазными инструментами связано с теми же техническими ограничениями, что и при обработке инструментов из суперабразивов, например высоким износом правящего инструмента и непрерывной потерей точности после каждого цикла профилирования.

Для преодоления некоторых технических ограничений, связанных с механической обработкой шлифовальных кругов, были разработаны немеханические и нетрадиционные способы, такие как лазерная обработка. Предполагается повышение точности и гибкости процесса при одновременном снижении затрат и времени обработки. Применение лазерного излучения для обработки материалов расширяется в последние годы с развитием и доступностью лазерного оборудования [38]. Лазеры высокой мощности нашли широкое применение в качестве микроинструмента для немеханической обработки материалов при различных технологических операциях, таких, как сварка, резка, абляция, сверление, термораскалывание. Исследуя весь спектр материалов используемый для изготовления шлифовального инструмента, в качестве абразива (электрокорунд, алмаз, кубический нитрид бора, карбид бора, карбид кремния) и связки (керамика, бакелит, металл), не возникает сомнения, что лазерная обработка позволит реализовать такие механизмы разрушения вещества как нагрев, плавление и испарение, тем самым сформировать необходимую технологическую поверхность (рис. 3).

Проводя анализ литературы было выявлено, что отечественные исследователи [23] в конце 90-х годов прошлого столетия предпринимали попытки обработки ШК лазерным излучением. Исследователи применяли высокочастотный твердотельный лазер с длиной волны 1,06 мкм и непрерывное излучение газового лазера на диоксиде углерода с длиной волны 10,6 мкм с целью разрушения металлической связки, удаления налипшей стружки, выравнивания профиля, регулирование выступания абразивных зерен, профилирования кругов. Исследования показали, что сфокусированное лазерное излучение позволяет добиваться локального разрушения материала. Подтвердилась возможность использования лазерного излучения для обработки ШК, причем качество обработки было выше, чем при механической. Однако целесообразность данного метода на тот момент была не лучшей. Дороговизна и размеры оборудования, применение специальной технологической оснастки, степень изученности лазерного оборудования, управление параметрами

обработки и производительность были основными препятствиями для внедрения данного метода в производство.

И так, лазер в настоящее время, производительный, с высоким КПД, бесконтактный и универсальный инструмент, особенно хорошо зарекомендовал себя при обработке и резки таких материалов, как высокопрочный TiNi и суперсплавы на основе него (Ti-6Al-4V, Inconel), супертвердые материалы (алмаз, кубический нитрид бора) и керамика (Al_2O_3 , SiC, Si_3N_4). В дополнение к своей высокой универсальности, лазер проявляет другие положительные характеристики, такие как точечный ввод тепла, небольшая зона или даже зона без воздействия тепла, свободная от силы и контакта обработка и простое пространственное и временное управление [39,40]. Благодаря использованию лазерного излучения для обработки шлифовальных кругов можно преодолеть недостатки процессов механического метода. Поэтому использование лазера для формирования необходимой технологической поверхности шлифовального круга является актуальным. С помощью лазера, шлифовальные круги с различными типами связей и абразивов обрабатываются с хорошей повторяемостью, без износа и с высокой точностью. Кроме того, в перспективе, метод лазерной обработки намного более экономичен, чем обычные методы [41].



Рисунок 3. Применение лазерного излучения для формирования режущей поверхности ШК.

1.3 Выводы по первой главе

Изложенное выше показывает, что применение лазерного излучения для профилирования шлифовальных кругов и использование его в процессе шлифования указывает на эффективность данного метода:

1. Применение профилированных кругов повышает эффективность процесса шлифования, позволяет снизить составляющие силы резания до 30%, уменьшить температуру обрабатываемой поверхности до 40%, способствует лучшему отводу стружки из зоны обработки.

2. Перспективным способом профилирования режущей поверхности шлифовальных кругов является применение специальной технологической оснастки и лазерных источников энергии, что существенно расширит область их применения.

Важной особенностью использования лазеров для профилирования шлифовальных кругов является и то, что этот способ является бесконтактным, легко управляемым и предоставляющим возможность получения профилей сложной формы.

Однако лазерное профилирование всё ещё не используется в промышленности из-за недостаточной проработанности технологического процесса. В частности, определение оптимальных параметров теплового потока лазерного излучения необходимого для обработки компонентов шлифовального круга является актуальной научно-технической задачей.

Раздел 2. ВОЗДЕЙСТВИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ВЕЩЕСТВО

Одним из видов электромагнитной энергии является лазерное излучение (вынужденное испускание атомами вещества порций-квантов электромагнитного излучения). Следовательно, при рассмотрении вопроса взаимодействия лазерного излучения можно говорить об взаимодействии электромагнитной волны с веществом, однако необходимо учитывать такие специфические свойства как монохроматичность и когерентность. С теоретической точки зрения монохроматическое излучение можно сфокусировать в пятно размером порядка длины волны, однако такие искажения как (сферическая абберация, астигматизм, кома) вносимые оптическими элементами и дифракционная расходимость луча, приводит к тому, что диаметр сфокусированного пятна d_f увеличивается, данное выражение можно представить в виде [42]:

$$d_f \sim \Theta f, \quad (2.1)$$

где, Θ – суммарная расходимость лазерного излучения; f – фокусное расстояние линзы.

Технологические процессы лазерной обработки связаны в первую очередь с локальным нагревом, передача электромагнитной волны в вещество. Высокое значение плотности мощности лазерного излучения приводит к существенному сокращению времени нагрева материала, поглощение лазерного излучения материалами сопровождается такими механизмами как плавление и испарение. Данные механизмы нагрева хорошо описываются тепловой моделью и весь процесс лазерной обработки материалов согласно модели может быть условно разделен на несколько стадий: 1) поглощение света и передача энергии решетки; 2) нагревание материала без разрушения; 3) изменение агрегатного состояния (плавление, сублимация, термодеструкция); 4) разрушение материала и удаление вещества с поверхности (абляция); 5) остывание (релаксация внутренних напряжений) [43].

2.1. Поглощение лазерного излучения

При взаимодействии параллельного монохроматического пучка света (излучения) с поверхностью среды оно частично отражается, а частично проникает внутрь вещества, поглощается в нем и достаточно быстро переходит в тепло. Таким образом, вещество, в котором распространяется электромагнитная волна, можно рассматривать как динамическую систему, в которой под действием излучения молекулы испытывают вынужденные колебания, энергия излучения затрачивается на колебания и его интенсивность уменьшается. Изменение плотности светового потока по глубине описывается законом Бугера–Ламберта–Бера:

$$I(z) = AI_0 \exp^{-\alpha z} \quad (2.2)$$

где I_0 – интенсивность (плотность) падающего светового потока на поверхности вещества; A – поглощательная способность материала $A=e-I-R$ (e — степень черноты, R — коэффициент отражения); α – линейный коэффициент поглощения электромагнитной энергии в среде.

Толщина слоя вещества выражена через координату z и отсчитывается от поверхности вглубь материала. Формула (2.2), соответствующая линейному поглощению излучения, применима к металлам, металлизированным полупроводникам и диэлектрикам в широком диапазоне длин волн. Однако значения величин A и α , а также механизмы поглощения света и перехода его в тепло могут сильно отличаться для материалов различных классов [43]. Схематично закона Бугера–Ламберта–Бера можно рассмотреть на рисунке 4.

Стоит отметить, что поглощательная способность A показывает долю поглощенного потока (энергии), в то время как, коэффициент поглощения света в среде α — как быстро поглощается излучение при распространении. Возникший в материале тепловой источник под действием лазерного излучения, характеризуется общей мощностью, пропорциональной A , и локализацией в объеме, зависящей от α .

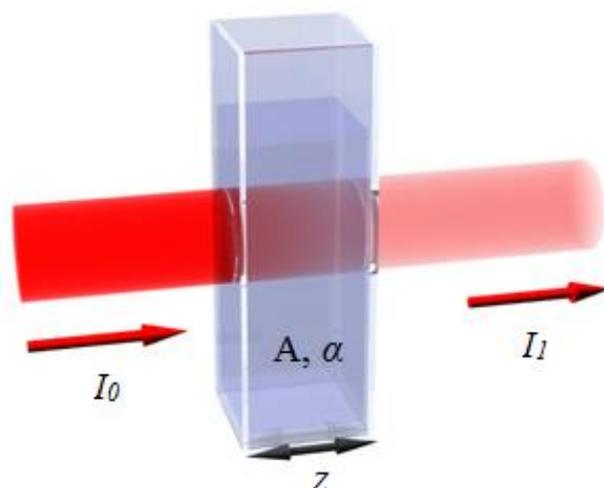


Рисунок 4. Иллюстрация закона Бугера–Ламберта–Бера.

Так как компоненты состава шлифовального круга разнообразны, необходимо исследовать взаимодействие разных классов материалов с лазерным излучением. Значения коэффициентов отражения и показателя поглощения определяются механизмами, которые различны для металлов и неметаллов. Так поглощение излучения в металла происходит при взаимодействии квантов света с электронами проводимости в скин-слое, а в кристаллических диэлектриках определяющим взаимодействием, является колебание решетки из-за малого количества свободных электронов. Из этого следует, что значения показателя поглощения и коэффициента отражения у диэлектриков существенно ниже.

Поглощение света проводниками (металлами):

В металлах электромагнитная волна экспоненциально затухает в очень тонком поверхностном слое – «скин-слое» ($\delta \sim 10^{-5} \dots 10^{-6}$ см, т.е. $\alpha \sim 10^5 \dots 10^6$ см⁻¹), причем поглощение происходит на электронах проводимости. При обработке проводников, расчет тепловых источников можно считать поверхностным, так как, глубина проникновения тепла в глубь металла, хоть и превышает толщину скин-слоя, практически прилегает к поверхности материала.

Взаимодействие света с металлами (проводниками) определяется наличием в них большого числа электронов, настолько слабо связанных с кристаллической решёткой, что эти электроны можно считать практически свободными.

Электростатический положительный заряд ионов решётки металла компенсирует отрицательный заряд этих электронов. Множество свободных электронов (электронов проводимости) называют электронным газом. Концентрация свободных электронов в металлах весьма значительна ($\sim 10^{22} \dots 10^{23} \text{ см}^{-3}$). В поле падающей электромагнитной волны свободные электроны колеблются и излучают вторичные волны, которые при сложении дают сильную отражённую волну. Поглощение света электронами проводимости возможно только при их взаимодействии с решёткой металла и потому частично переходит в тепло. В идеальном проводнике, где потери на Джоулево тепло вообще отсутствуют, поглощение равно нулю, так как падающий свет полностью отражается [44].

Поглощение света приводит к повышению энергии свободных электронов. Поскольку время установления равновесия в газе электронов значительно меньше времени установления равновесия между электронами и решеткой атомов, в металле возникают две термодинамические подсистемы с различными температурами – электронная и фононная. Часть поглощенной энергии электроны передают решетке, однако эффективность передачи невелика вследствие большой разницы масс электронов и ионов. Поэтому в первый момент электронный газ значительно перегревается по сравнению с решеткой. Однако повышение температуры электронного газа происходит лишь до тех пор, пока количество энергии, передаваемой решетке, не сравняется с количеством энергии, получаемой электронами от электромагнитной волны. Ввиду того, что характерное время обмена энергией между этими подсистемами $\tau \sim 10^{-10} \dots 10^{-11} \text{ с}$, а времена воздействия излучения на вещество при лазерной обработке материалов практически всегда на несколько порядков больше, то в дальнейшем будем использовать общую температуру металла [44].

Для хороших проводников коэффициент отражения R , как правило, близок к 1 и, соответственно, поглощательная способность A мала.

Таблица 2.1. Значения поглощательной способности некоторых металлов (чистых; при 20°C) [44].

Металл		Лазеры			
		Ar+ $\lambda \sim 0,488$ мкм	Рубин $\lambda \sim 0,69$ мкм	Nd — АИГ $\lambda \sim 1,06$ мкм	CO2 $\lambda \sim 10,6$ мкм
Al	Алюминий	0,19	0,11	0,08	0,019
W	Вольфрам	0,55	0,50	0,41	0,026
Fe	Железо	0,68	0,45	0,35	0,076
Cu	Медь	0,56	0,17	0,10	0,015
Ni	Никель	0,40	0,32	0,26	0,03
Ag	Серебро	0,05	0,04	0,04	0,014
Ti	Титан	0,48	0,45	0,42	0,08

Поглощение света диэлектриками:

При поглощении диэлектриками существует сильная зависимость поглощения света от длины волны. Поглощение в инфракрасной области определяется колебательными состояниями кристаллической решетки, а в органических соединениях — молекулярными колебаниями. Для этой области типичны значения коэффициента поглощения $\alpha \sim 10^2 \dots 10^4 \text{ см}^{-1}$. В то время как в видимой области поглощение может быть обусловлено примесями, например, (ионами переходных металлов, дефектами кристаллической решетки и т. п.) или «хвостом» сильных ультрафиолетовых полос поглощения. Оно может также вызываться дискретными электронными переходами в молекулярных кристаллах (например, во многих органических соединениях). Типичные коэффициенты в полосе поглощения $\sim 10^3 \dots 10^6 \text{ см}^{-1}$. Коэффициент α может быть соотнесен с пропускательной способностью слоя толщиной h соотношением $(I/I_0) \cdot 100 = \text{Пропускательная способность (\%)} = 100 e^{-\alpha h}$, или $(I/I_0) = e^{-\alpha h}$, где I_0 — интенсивность падающего излучения; I — интенсивность прошедшего излучения [44].

Полезной мерой толщины, на которой происходит значительное ослабление падающего излучения, является $L = 1/\alpha$, где L — длина ослабления. Для сильных

поглотителей $\alpha=10^6 \text{ см}^{-1}$ и $L=10^{-6} \text{ см}$, для относительно слабых — $\alpha=10 \text{ см}^{-1}$ и $L=10^{-1} \text{ см}$ [44].

Соотношение между α и показателем преломления имеет вид:

$$\alpha=4\pi m/\lambda, \quad (2.3)$$

где m — мнимая часть комплексного показателя преломления $\tilde{n}=n-im$; λ — длина волны падающего света.

В таблице 2.2 указаны интервалы волн в ИК-области, в которых диэлектрики и полупроводники номинально прозрачны. В интервале прозрачности этих материалов α может составлять $1 \dots 10 \text{ см}^{-1}$.

Исходя из табличных данных огромное количество материалов со связями Si,Al — O относительно прозрачны в видимой области спектра, но сильно поглощают в окрестности $\lambda \geq 10 \text{ мкм}$. Поэтому для обработки кварца, стекла и силикатных минералов лучше всего применять CO₂-лазер. Органические твердые соединения сильно поглощают в ИК-области, но могут быть прозрачными на более коротких длинах волн (например, полиэтилен). Таким образом, CO₂-лазер является оптимальным для обработки этих материалов. В отличие от металлов, в которых поглощение излучения происходит у поверхности в скин-слое, поглощение в диэлектриках и большинстве полупроводников происходит в слое, определяемом длиной ослабления L , которая может существенно превышать обычную толщину скин-слоя. В ИК-области $L > 10^{-4} \text{ см}$ и, таким образом, во многих случаях нагрев может считаться объемным. В частности, это относится к нагреву тонких пленок, где L может превышать толщину пленки.

Таблица 2.2. Интервал длин волн, на котором пропускательная способность диэлектриков и полупроводников снижается до 10% [44].

Материалы	Интервал длин волн, мкм
Al ₂ O ₃	0,15...6,5
As ₂ S ₃	0,6...13

BaF ₂	0,14...15
CdSe	0,72...24
CaF ₂	0,13...12
CsBr	0,2...45
CuCl	0,4...19
Алмаз (тип IIa)	0,225...2,5; 6...100
GaAs	1...15
Ge	1,8...23
InAs	3,8...7
PbS	3...7
MgO	0,25...8,5
Se	1...20
SiO ₂ , (плавленый)	0,2...4,5
Si	1,2...15
TiO ₂	0,43...6,2
ZnSe	0,5...22
ZnS	0,54...10

Хотя коэффициенты отражения поляризованного света зависят от угла падения и направления поляризации, как и в металлах, при обработке диэлектрическая проницаемость ϵ почти равна единице, и явления, наблюдаемые при обработке металлов с использованием поляризованных лучей, при обработке диэлектриков не обнаруживаются.

Поглощение света полупроводниками:

Электрические и оптические свойства полупроводников связаны с тем, что заполненные электронами энергетические уровни в валентной зоне отделены от зоны проводимости запрещённой зоной. Соответственно, следует использовать квантовый подход, рассматривая свет как поток фотонов с энергией $\hbar\omega$ [44,45].

Полупроводники имеют низкую концентрацию свободных электронов, и если энергия светового кванта меньше ширины запрещенной зоны ($\hbar\omega < E$), то их

оптические свойства подобны свойствам диэлектриков. В ИК-области полупроводники относительно прозрачны; некоторые из них (например, Ge, ZnSe) используются для изготовления оптических ИК-элементов.

Поверхность полупроводника представляет собой неизбежное макроскопическое нарушение периодичности кристаллической решетки. На электронные процессы на поверхности и вблизи неё оказывают влияние не только центры захвата и рекомбинации, но и состояние поверхностных локальных центров. Такие центры могут быть связаны как непосредственно с обрывом периодичности, так и с адсорбированными атомами и молекулами [44].

При анализе теплового действия излучения на полупроводники выделяют следующие механизмы поглощения электромагнитного излучения:

1. Собственное (межзонное) поглощение света.
2. Внутризонное поглощение (поглощение свободными носителями — электронами и дырками).
3. Примесное поглощение.
4. Решеточное (остаточное) поглощение.

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод, что по характеру восприимчивости к лазерному излучению полупроводники занимают промежуточное положение между металлами и прозрачными материалами. В результате поглощения лазерного излучения полупроводниками образуются электронно-дырочные пары, которые передают при рекомбинации энергию излучения кристаллической решетке. Поэтому с ростом мощности лазерного излучения повреждение материала будет происходить в результате нагрева. Такой процесс повреждения характерен для слабо легированного кремния. Однако, при сильном легировании полупроводника повреждения сходны с повреждениями в металлах.

Качество обработки поверхности полупроводника также оказывает большое влияние на порог повреждений в материале. Травление увеличивает порог относительно грубо шлифованных кристаллов более, чем в 3 раза, а для

изготовленных скалыванием или химической шлифовкой — на 10...15%. Царапины оказывают незначительное влияние, хотя повреждения в области царапин более заметны [44].

2.2. Спектры поглощения компонентов шлифовального круга на керамической связке

Зависимость показателя поглощения от длины волны λ поглощаемого света называется спектром поглощения вещества. Структура шлифовальных кругов многокомпонентная, поэтому возникла необходимость подбора оптимального излучения для эффективной обработки. Воздействие лазерного излучения на материал связки и абразивные зерна характеризуется общими закономерностями, связанными с поглощением и отражением излучения, а также специфическими особенностями.

Например, для металлов и ряда других конструкционных материалов целесообразно использовать лазеры, генерирующие излучения в видимой и ближней инфракрасной области спектра, для обработки стекла — лазеры дальнего инфракрасного (ИК) диапазона (рис. 5), а для полимеров — ультрафиолетовые лазеры.

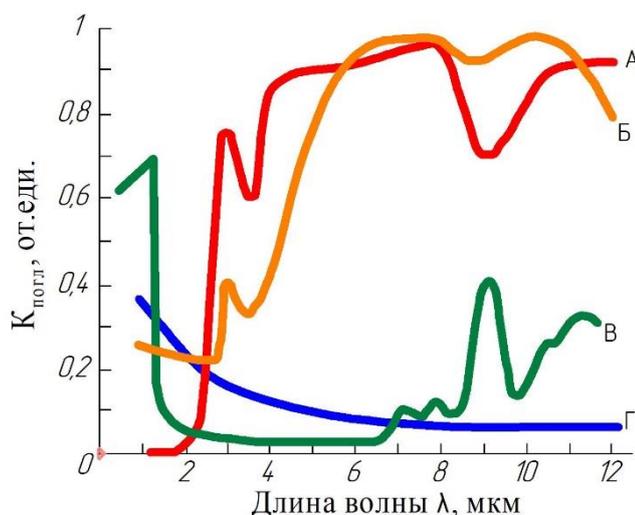


Рисунок 5. Зависимость коэффициента поглощения лазерного излучения от длины волны для материалов: А – стекло, Б – глиноземная керамика, В – кремний [46].

Основными компонентами органических связок шлифовальных кругов обычно являются: керамика (SiO_2) и силикат (SiO_4). Для кристаллических диэлектриков основной механизм поглощения излучения – колебание решетки, так как свободных электронов мало при нормальной температуре.

Керамическая связка, получившая наибольшее распространение, изготавливается из огнеупорной глины, полевого шпата, кварца, талька, мела и жидкого стекла. Связка огнеупорная и химически стойкая. Круги, изготовленные на ней, не боятся влаги, обладают большой производительностью, хорошо сохраняют форму рабочей кромки. Недостатком этой связки является ее хрупкость, круги не выдерживают продолжительной ударной нагрузки. Керамическая связка (К1, К2, К3 и др.) применима для всех видов шлифования [47].

Силикатная связка представляет собой жидкое стекло и имеет небольшую прочность. При работе кругами на силикатной связке не допускается повышение температуры и применение смазочно-охлаждающих жидкостей.

Оба связующих материала обладают общей характерной особенностью, с увеличением длины волны коэффициент поглощения возрастает (рис. 6.1, 6.2). Поэтому для эффективной обработки приемлемо использование лазерного излучения с длиной волны $\lambda \geq 10$ мкм.

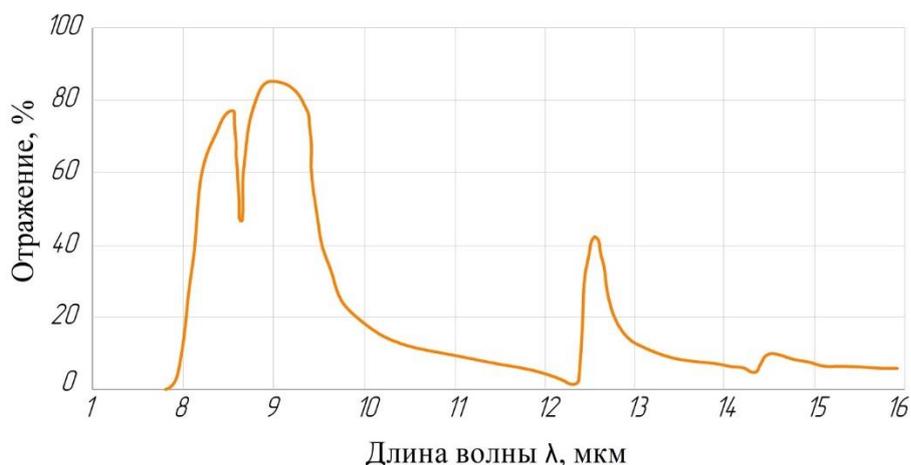


Рисунок 6..1 Зависимость коэффициента пропускания для диоксида кремния, содержащего 1 % оксида кобальта [48].

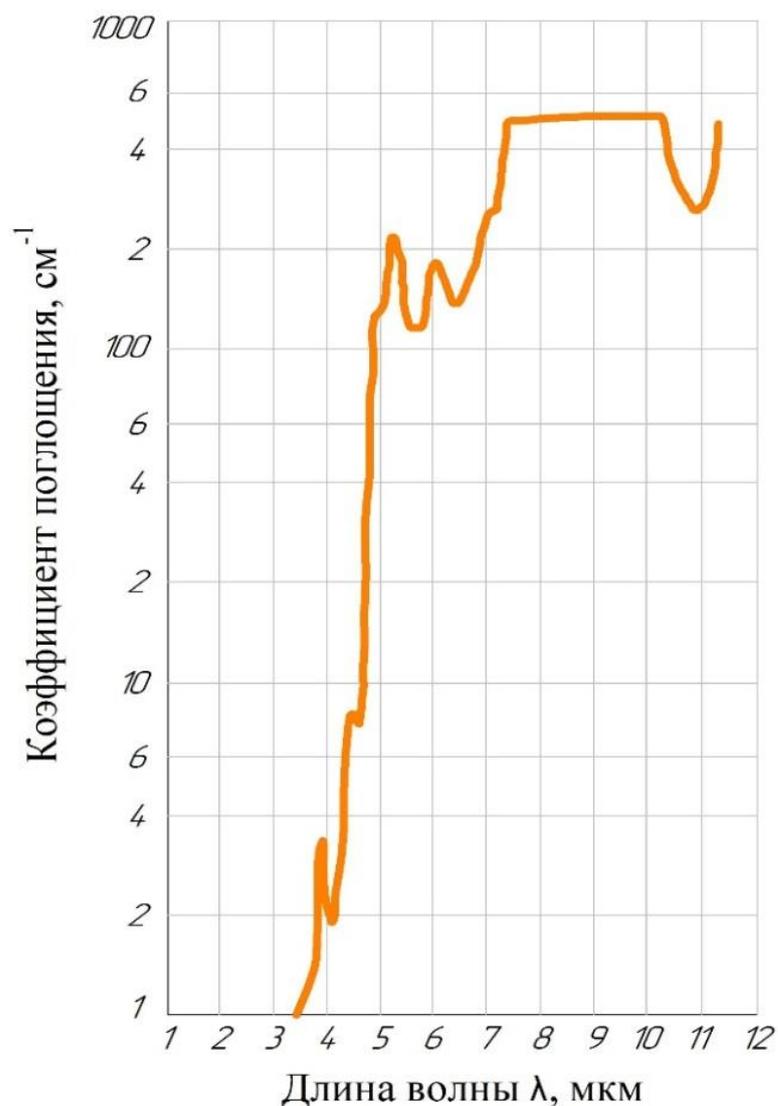


Рисунок 6.2. Зависимость коэффициента поглощения A от длины волны λ для (SiO_2) плавленого кварца [48].

В качестве абразивного материала мы исследуем электрокорунд (Al_2O_3) и карбид кремния (SiC). Данные материалы отличны по своим характеристикам.

Электрокорунд представляет собой кристаллический оксид алюминия. Чем выше содержание кристаллического оксида алюминия в электрокорунде, тем выше его режущие свойства. В зависимости от содержания оксида алюминия различают: нормальный электрокорунд (до 95% Al_2O_3); электрокорунд белый (95...98% Al_2O_3), режущая способность которого на 30...40 % выше. Также используют монокорунд (98...99% Al_2O_3), хромистый, титанистый, циркониевый электрокорунды, легированные соответственно хромом, титаном или цирконием, которые обеспечивают значительное повышение производительности по сравнению с

обычным электрокорундом. Получают плавкой в электрических печах боксита с восстановителем (антрацит, нефтяной кокс) и осадителем (железные опилки). Применяется как абразивный, огнеупорный материал для изготовления литейных форм и стержней, конструктивных элементов радиоламп, абразивных кругов и т.д. [47].

Электрокорунд применяется для шлифования сталей, чугунов и цветных металлов. Абразивные материалы из монокорунда предназначены для получистового и чистового шлифования деталей из цементированных, закаленных и высоколегированных сталей.

Маркировка электрокорунда: нормальный – 12А, 13А, 14А, 15А, 16А; белый – 22А, 23А, 24А, 25А; монокорунд – 43А, 44А, 45А; хромистый – 33А, 34А; титанистый – 37А; циркониевый – 38А.

Электрокорунд является диэлектриком. На рисунке 7 приведены спектры поверхности аморфного гидроксида алюминия (1) при его переходе в кристаллическую γ - Al_2O_3 модификацию (2) и далее при структурно-фазовом переходе в результате высокотемпературного отжига в модификацию α - Al_2O_3 (3).

Электрокорунд белого цвета, поэтому кривые его светопоглощения лежат в УФ-области. В характере спектров двух кристаллических модификаций оксида алюминия проявляются различия в их структурных особенностях, обусловленные разными координационными числами алюминия по кислороду.

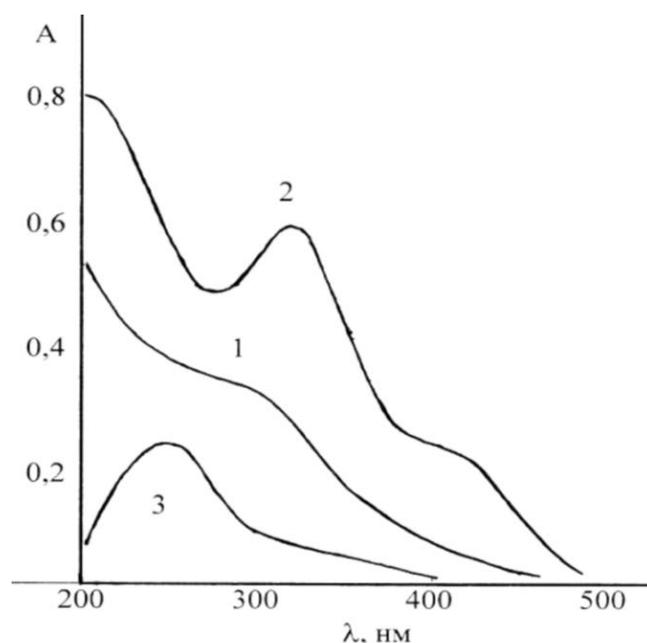


Рисунок 7. Зависимость коэффициента пропускания оксидов и гидроксида алюминия в диапазоне длин волн от 200 до 500 нм: 1 – $\text{Al}(\text{OH})_3$; 2 – $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$; 3 – $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ [49].

Химические соединения Al_2O_3 и SiO_2 их зависимость коэффициента отражения от длины волны можно рассмотреть на примере сапфира и кристаллического кварца, так как, в природе они распространены в виде данных модификаций и состояний (рис. 8).

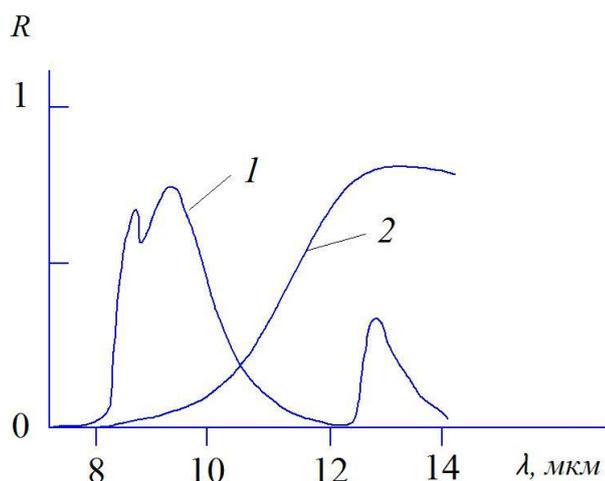


Рисунок 8. Зависимость коэффициента отражения от длины волны: 1 – сапфир (Al_2O_3); 2 – кристаллический кварц (SiO_2) [42].

Теперь рассмотрим карбид кремния (карборунд) — бинарное неорганическое химическое соединение кремния с углеродом. Химическая формула SiC. В природе встречается в виде чрезвычайно редкого минерала — муассанита. Карбид кремния является полупроводником, тип проводимости которого зависит от примесей.

Из-за редкости нахождения в природе муассанита карбид кремния, как правило, имеет искусственное происхождение. Простейшим способом производства является спекание кремнезёма с углеродом в графитовой электропечи Ачесона при высокой температуре 1600—2500 °С.

Карбид кремния (SiC) по сравнению с электрокорундом обладает большей твердостью, но и хрупкостью. При дроблении его зерна имеют более острые кромки, что обеспечивает повышенную производительность обработки. Карбид кремния выпускают двух марок: черный и зеленый. Карбид кремния черный (КЧ) содержит 95...97 % SiC и применяется для обработки хрупких металлических материалов, цветных металлов и неметаллов. Карбид кремния, содержащий не менее 97 % SiC, имеет зеленый цвет и обладает более высокими свойствами. Он используется преимущественно для заточки твердосплавного режущего инструмента [47].

Маркировка карбида кремния: черный – 52С, 55С; зеленый – 64С.

По своим оптическим свойствам карбид кремния отличается от электрокорунда. На рисунке 9 можно исследовать кривые зависимости коэффициента отражения и поглощения SiC от длины волны падающего излучения. Можно заметить, что на участке длин волны 0,2-0,4 мкм, энергия фотонов больше чем ширина запрещенной зоны карбида кремния, структура достаточно хорошо поглощает электромагнитные волны. Дальше мы же наблюдаем плавное уменьшение поглощения света. При длине волны $\lambda > 1$ мкм поглощение света мало, хотя коэффициент отражения достаточно велик, но двигаясь ближе к $\lambda = 10$ мкм мы наблюдаем обратный эффект [45].

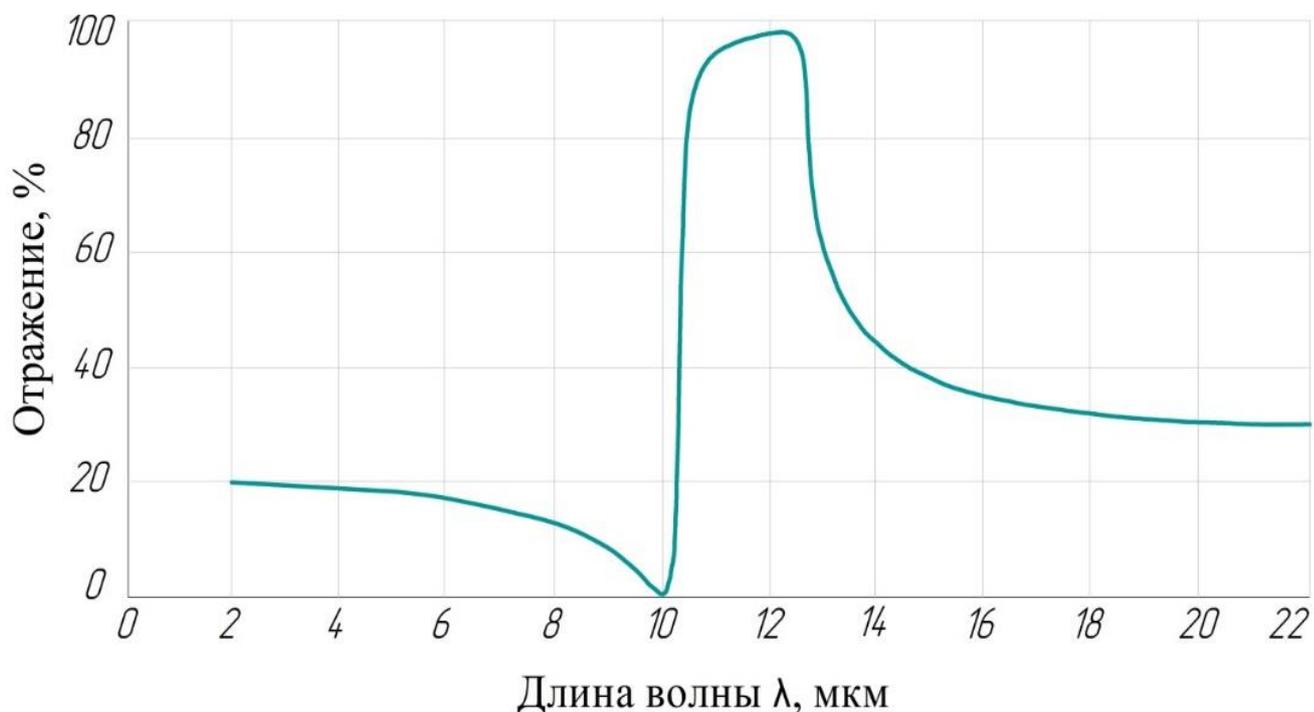


Рисунок 9. Экспериментальные зависимости коэффициентов отражения R и поглощения α для карбида кремния [45].

Сопоставительный анализ спектров поглощения всех компонентов, составляющих рабочую поверхность объекта исследования, а именно: органической связки, электрокорунда и карбида кремния, показал, что в области длинноволнового излучения компоненты имеют достаточно высокий коэффициент поглощения. Это позволило для дальнейших исследований выбрать для оптимального профилирования рабочей поверхности шлифовального круга длину волны $\lambda \geq 10$ мкм.

2.3. Нагрев вещества

На данный момент уже известно, что по своей физической сущности лазерный нагрев не отличается от других видов нагрева. Нагрев происходит из-за увеличения амплитуды тепловых колебаний. Так как мы исследуем неметаллы, то перенос тепла в нашем случае осуществляется механизмом решеточной теплопроводности.

Однако высокие скорости нагревания и охлаждения, большие пространственные градиенты температуры указывают на особенности протекания

тепловых процессов при лазерном нагреве. Стоит отметить так же уникальную специфику лазерного нагрева коротких и ультракоротких лазерных импульсов, ведь тогда необходимо рассматривать отдельно температуры подсистемы электронов и решетки.

При изучении физической сущности технологических операций, стадия нагрева является весьма важной, независимо от того происходил ли процесс без разрушения материала (сварка, диффузия, термообработка) или с разрушением материала (резка, абляция, сверление, термораскалывание).

Необходимо отметить основные физико-химические процессы, такие как: изменение фазового состояния и структуры, химические реакции, физические переходы – плавление, испарение и т.д.

При облучении твердого тела излучением достаточной плотности мощности, температура тела возрастает до температуры плавления $T_{пл}$. Отметим температуры плавления основных компонентов объекта исследования: электрокорунд – 2050 °С, карбида кремния – 2730 °С, диоксида кремния – 1710 °С.

Физическую модель данного процесса, в общем случае можно, описать в следующей последовательности: поглощение лазерного излучения (света); далее процесс поглощения удельной теплоты плавления $L_{пл}$ с последующим нагревом до точки кипения (испарения); испарение после поглощения удельной теплоты парообразования $L_{исп}$; движение испаряемой поверхности в глубь материала и образование плазмы.

2.4. Тепловая модель

Объект нашего исследования – режущая поверхность шлифовального круга. Поверхность нагревается тепловым потоком с заданной плотностью, с внутренней поверхности и боковых стенок осуществляется отвод тепла. С целью обнажения зерен, а также создания профиля необходимо минимизировать энергозатраты на нагрев поверхности до температуры разрушения (испарения) $T_{исп}$. Рассматриваемая система является управляемой, так как изменение микроскопических и макроскопических свойств объекта исследования происходит с помощью характеристик самого излучения.

В общем случае, поглощение излучения описывается функцией, зависящей от концентрации всех реагирующих веществ. Однако монохроматичность лазерного излучения при надлежащем выборе длины волны излучения позволяет вводить тепловую энергию в систему только через один из компонентов реакции, создавая в системе регулируемую обратную связь. Таким образом проявляется селективность лазерной обработки.

Из вышесказанного следует, что плотность мощности излучения E_f играет роль коэффициента передачи по каналу обратной связи, что дает возможность, изменяя мощность, управлять поведением системы.

Так называемую плотность мощности излучения E_f необходимую для нагревания поверхности до заданной температуры, можно выразить следующим образом $E_f = P/S$. Так как температура поверхности T зависит от мощности $P = W_{н}/\tau$ поглощенной единицей площади S , где $W_{н}$ – энергия в импульсе, τ – длительность воздействия, то из уравнения теплопроводности определим соотношение между температурой поверхности и плотностью мощности:

$$\frac{\partial T}{\partial t} - a\Delta T = \frac{Q(x,y,z,t)}{\rho c} \quad (2.4)$$

где Δ – оператор Лапласа $= \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$, Q – объемная плотность поглощенного светового потока, a – температуропроводность, ρ – плотность, c – теплоемкость.

Чтобы решить уравнение (2.4) необходимо задать одно начальное и 6 граничных условий и определить $Q(x, y, z, t)$.

$$T_{x,y,z,0} = T_H, T_{x=\infty,t} = T_{y=\infty,t} = T_{z=\infty,t} = T_H \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x_{0,t}} = \frac{\partial T}{\partial y_{0,t}} = \frac{\partial T}{\partial z_{0,t}} = 0, Q = E_{f0}(1-R)\alpha e^{-\alpha x}$$

После решения системы этих уравнений связь между T и E_f выражается в виде:

$$T = f \left[\begin{array}{l} E_f(1-R) \\ \rho, c, a, R, \alpha \\ x, y, z, t \end{array} \begin{array}{l} \text{поглощенная мощность} \\ \text{теплофизические и оптические параметры} \\ \text{аргументы} \end{array} \right]$$

Так для круглого источника тепла – сфокусированное излучение в пятне с радиусом r_0 , решим уравнение (2.5) и получим:

$$T = \frac{2E_{f0}(1-R)\sqrt{a\tau}}{k} \left(\frac{1}{\sqrt{\pi}} - \text{ierfc} \frac{r_0}{2\sqrt{a\tau}} \right) + T_H \quad (2.6)$$

при $r_0 \gg \sqrt{a\tau}$ импульсный нагрев

$$T = \frac{2E_{f0}(1-R)\sqrt{a\tau}}{k\sqrt{\pi}} + T_H \quad (2.7)$$

при $r_0 \ll \sqrt{a\tau}$ непрерывный нагрев

$$T = \frac{2E_{f0}(1-R)r_0}{k} + T_H \quad (2.8)$$

Формулы (2.7) и (2.8) позволяют посчитать пороговую плотность мощности $E_f^{\text{пор}}$, необходимую для нагревания поверхности до заданной температуры T в импульсном и непрерывных режимах:

$$E_{f\text{имп}}^{\text{пор}} = \frac{(T-T_H)k\sqrt{\pi}}{2(1-R)\sqrt{a\tau}} \quad (2.9)$$

$$E_{f\text{непр}}^{\text{пор}} = \frac{(T-T_n)k}{(1-R)r_0} \quad (2.10)$$

Подставим в формулы (2.9) и (2.10) теплофизические и оптические параметры компонентов шлифовального круга указанные в таблице 2.3 и вычислим значения $E_f^{\text{пор}}$ при применении технологического CO₂-лазера с длиной волны $\lambda=10,6$ мкм.

Таблица 2.3.

Теплофизические и оптические параметры компонентов шлифовальных кругов (SiC, Al₂O₃, SiO₂).

Материал	Критическая температура $T_{\text{исп}}$, К	Теплопроводность k , Вт/м*К	Поглощательная способность $A=e=1-R$ (при $\lambda=10,6$ мкм)	Температуропроводность $a*10^6$, м ² /с
Al ₂ O ₃	3253	22-25	0,8	0,12
SiC	3103	140-200	0,1	2,2
SiO ₂	2503	8	0,85	0,0083

*Составлено авторами на основе [48, 56–60].

В непрерывном режиме лазера, при радиусе лазерного пятна $r_0 = 12,5*10^{-5}$ м и $T_n = 293$ К:

— для электрокорунда:

$$E_{f\text{непр}}^{\text{пор}} = \frac{(3253-293) \times 22}{0,8 \times 12,5 \times 10^{-5}} = 0,65 \times 10^9 \text{ Вт/м}^2;$$

— для карбида кремния:

$$E_{f\text{непр}}^{\text{пор}} = \frac{(3103-293) \times 140}{0,1 \times 12,5 \times 10^{-5}} = 31,47 \times 10^9 \text{ Вт/м}^2;$$

— для диоксида кремния:

$$E_{f_{\text{непр}}}^{\text{пор}} = \frac{(2503-293) \times 8}{0,85 \times 12,5 \times 10^{-5}} = 0,16 \times 10^9 \text{ Вт/м}^2;$$

В импульсном режиме лазера, пороги испарения при длительности импульса $\tau_1 = 10^{-7}$ с и $T_n = 293$ К:

— для электрокорунда:

$$E_{f_{\text{имп}}}^{\text{пор}} = \frac{(3253-293) \times 22 \sqrt{3,14}}{2 \times 0,8 \times \sqrt{0,12 \times 10^{-11}}} = 6,6 \times 10^{10} \text{ Вт/м}^2;$$

— для карбида кремния:

$$E_{f_{\text{имп}}}^{\text{пор}} = \frac{(3103-293) \times 140 \sqrt{3,14}}{2 \times 0,1 \times \sqrt{2,2 \times 10^{-11}}} = 74,3 \times 10^{10} \text{ Вт/м}^2;$$

— для диоксида кремния:

$$E_{f_{\text{имп}}}^{\text{пор}} = \frac{(2503-293) \times 8 \sqrt{3,14}}{2 \times 0,85 \times \sqrt{8,3 \times 10^{-14}}} = 6,39 \times 10^{10} \text{ Вт/м}^2;$$

2.5. Уравнение теплового баланса

Математическое описание ранее указанных физических процессов, возникающих при воздействии непрерывного и импульсного излучения на обрабатываемой поверхности достаточно сложное. Необходимо совместное решение уравнений теплопроводности для твердого тела, расплава, паровой области, систему уравнений гидродинамики для пара, расплава и уравнения распространения излучения через вещество. Полученная система нелинейных уравнений может быть решена только численно. Часто вводят некоторые упрощения процесса теплопередачи такие как: плотность, теплопроводность, теплоемкость считаются не зависящими от температуры. Тогда получаются линейные уравнения и для конкретных условий лазерного воздействия могут иметь аналитические решения. Исходя из анализа, достаточно применения уравнения теплового баланса, которое имеет вид [51]:

$$E(1 - R) = v\rho(c\Delta T + L_{пл} + \gamma L_{исп}) \quad (2.11)$$

где E – поглощенная энергия, Дж; v – объем расплавленного материала, м³; ρ – плотность, 1/м³; c – удельная теплоемкость материала, Дж/(К*кг); $\Delta T = T_{пл} - T_0$, К; T_0 – начальная температура, К; $T_{пл}$ – температура плавления, К; $L_{пл}$ – удельная теплота плавления, Дж/кг; γ – доля испаренного вещества относительно массы расплава; $L_{исп}$ – удельная теплота испарения, Дж/кг.

2.5 Выводы по второй главе

Процессы лазерной обработки связаны в первую очередь с локальным нагревом, так как высокое значение плотности мощности лазерного излучения приводит к существенному сокращению времени нагрева материала. Механизмы нагрева хорошо описываются тепловой моделью и весь процесс лазерной обработки материалов согласно модели может быть условно разделен на несколько стадий: 1) поглощение света и передача энергии решетки; 2) нагревание материала без разрушения; 3) изменение агрегатного состояния (плавление, сублимация, термодеструкция); 4) разрушение материала и удаление вещества с поверхности (абляция); 5) остывание (релаксация внутренних напряжений).

Мы выяснили, что в кристаллических диэлектриках определяющим взаимодействием, является колебание решетки из-за малого количества свободных электронов. Из этого следует, что значения показателя поглощения и коэффициента отражения у диэлектриков существенно ниже.

Анализ длин волн лазерного излучения для обработки многокомпонентного состава шлифовального круга показал, что для оптимального профилирования рабочей поверхности шлифовального круга необходимо лазерное излучение с длиной волны $\lambda \geq 10$ мкм.

Следовательно, для обработки шлифовального круга из электрокорунда (Al_2O_3) на керамической связке SiO_2 целесообразно применять CO_2 -лазер с длиной волны $\lambda = 10,6$ мкм. Таким образом, CO_2 -лазер является оптимальным для обработки этих материалов.

При обработке шлифовальных кругов из карбида кремния (SiC) применение CO_2 -лазера с длиной волны $\lambda = 10,6$ мкм, позволит проводить селективную правку и профилирование. Возможно будет проводить разрушение связки без разрушения абразивного зерна.

Расчёт параметров теплового потока лазерного излучения выполнен для обработки компонентов шлифовального круга на керамической связке.

Пороговая плотность мощности лазерного излучения E_f определена для обработки основных компонентов шлифовального круга.

Полученные расчётные значения позволят задать критерий пороговой плотности мощности лазерной технологической установки, зависящий от структуры материала, типа операции и степени локализации излучения.

Раздел 3. ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Изучая влияние лазерного излучения при обработке неметаллических материалов можно выделить три группы факторов определяющих условия взаимодействия излучения на вещество при осуществлении технологического процесса [42].

К первой группе факторов относятся теплофизические свойства материалов: теплоемкость; плотность; теплопроводность; коэффициент отражения; коэффициент поглощения и т.д.

Ко второй группе факторов относятся энергетические и временные параметры лазерного излучения: мощность и плотность мощности; длина волны; длительность и частота следования импульсов.

Третья группа характеризуется технологическими условиями процесса: скорость перемещения сфокусированного пучка; диаметр сфокусированного пучка; фокусное расстояние; род, давление, скорость газа и конструкция сопла; зазор между соплом и обрабатываемым материалом; положение фокальной плоскости.

3.1. Механизмы лазерного разделения

Механизм разделения материалов различен в зависимости от совокупности групп факторов, так лазерное разделение вещества может быть основано на таких механизмах как: испарение, плавление, горение, термодеструкция и термораскалывание.

Необходимо отметить, что перечисленные механизмы разделения материалов различны с точки зрения энергозатрат. При режиме испарения температура материала в зоне облучения выше температуры кипения и его удаление происходит в виде прокапельной фазы, что требует наибольшего удельного расхода энергии и, как правило, осуществляется с помощью лазеров импульсного действия в операциях сверления, скарибирования, гравирования, абляции.

При разделении в режиме плавления в зоне термического влияния образуется расплав, который не может быть удален под действием избыточного давления, что при последующем охлаждении материала приводит к сплавлению образовавшегося канала. Для удаления расплава направляют поток газа в зону обработки, однако, разделение в режиме плавления и продувки требует на порядок меньше энергии, по сравнению с режимом испарения.

Под действием лазерного излучения ряд материалов (пластики, минералы) может претерпевать необратимые изменения химического состава с выделением газообразных продуктов реакции и образованием вещества с различными физико-химическими свойствами. Кроме того, лазерный нагрев вещества в определенных газовых средах может привести к экзотермической реакции, служащей дополнительным источником тепла. В этом случае энергопотребление процесса может быть уменьшено вдвое по сравнению с предыдущим механизмом.

Во время облучения хрупких материалов (стекла, керамики и т.д.) в объеме образца возникают термоупругие напряжения из-за наличия температурного градиента. Если напряжения превышают предельную прочность, материал разрушается путем растрескивания. Путем изменения режимов лазерной обработки можно достичь контролируемого распространения трещины вслед за лучом. По сравнению с представленными выше механизмами разделения, процесс контролируемого термораскалывания требует самых низких уровней мощности излучения и является минимальным по энергопотреблению [42].

3.1.1. Режим испарения

В общем случае разделение материалов в режиме испарения представлено следующими явлениями [42,43]:

- Поглощение излучения поверхностью и передача энергии твердому телу. Повышение температуры поверхности до температуры кипения происходит

настолько быстро, что жидкая фаза не успевает образоваться в значительном количестве.

- Возгонка материала. Разрушение неметаллических материалов, имеющих сложную химическую структуру, имеет форму последовательного испарения его отдельных компонентов по мере повышения температуры. Частично прозрачные материалы на определенной длине волны характеризуются внутренним режимом кипения.

- Образование эрозионного факела. Удаление пара с поверхности происходит в виде струи при околосвуковых процессах, направленной от испарительной поверхности, в которой вместе с паром движутся конденсированные капли вещества и другие продукты эрозии, выпускаемые со дна и стенок канала.

- Возникновение волн давления. В результате импульса отдачи вследствие распространения продуктов эрозии и значительного температурного градиента возникают волны давления и термомеханические напряжения, которые могут привести к механическому разрушению материала.

- Экранировка поверхности. Пар, исходящий из зоны обработки, может понизить порог формирования плазмы и привести к ослаблению излучения, падающего на поверхность. Рассеяние и поглощение излучения происходит также на продуктах конденсации и твердых частицах вещества. Резонансное поглощение наблюдается при совпадении частоты характерных колебаний молекул в газах или радикалах и частоты генерации лазерного излучения. Явление экранирования приводит к наличию оптимального значения плотности мощности излучения, при котором удельное удаление массы вещества является максимальным.

- Автоколебательный режим испарения. Возникновение эрозионной вспышки и увеличение глубины канала являются самосогласованными пульсациями. Энергетический поток, достигающий поверхности материала, зависит от плотности этого факела. При определённой температуре поверхности материала, плотность факела достигает значений, при которых лазерное излучение начинает значительно поглощаться в нём. Уменьшение энергии, подаваемой на поверхность материала, уменьшит количество испаряемого материала и, соответственно, плотность плазмы в

факеле. Вновь увеличится ввод лазерной энергии на поверхность, увеличится количество испаренного вещества и плотность плазмы. Таким образом, возникает режим автоколебания.

3.1.2. Режим плавления

Разделение материалов в режиме плавления реализуется при меньших значениях плотности мощности и менее энергоемок. Чаще всего это режим обеспечивается на лазерном оборудовании непрерывного действия. Механизм разделения в данном случае представлен следующими явлениями [42,43]:

- Лазерный луч, поглощенный на поверхности материала, вызывает испарение в объеме парогазового канала.
- Сформированный канал является ловушкой для излучения, поглощающей всю его энергию. Стенки канала покрыты слоем расплава, который удерживается на них силой отдачи потоков испаряемого вещества.
- В зависимости от плотности мощности излучения, действующей на материал, возможны три режима удаления расплава: фонтанирование, выплеск, продувка потоком вспомогательного газа.
- При резании, излучение попадает только на переднюю стенку канала. Образовавшийся на нем расплав продувают потоком газа с нижнего края материала.

3.1.3. Режим термораскалывания

Разрушение хрупких материалов лазерным термораскалыванием. Под этим механизмом подразумевается процесс нагрева образца лазерным излучением и, следовательно, вызывающий значительные механические напряжения вследствие наличия высокотемпературного градиента. Когда эти напряжения превышают предельную прочность, в материале возникают трещины и следуют за лучом по мере перемещения луча вдоль поверхности. Необходимым условием появления трещин в материале при тепловом соотношении является нагрев до температуры,

превышающей предел термостойкости, но не достигающей значений температуры стеклования T_c . В случае лазерного термораскалывания предел термического сопротивления ΔT оценивается по формуле [42]:

$$\Delta T = \frac{\sigma(1-\nu)}{\alpha_T E^*} \quad (3.1)$$

где σ – предел прочности материала на разрыв; α_T – коэффициент линейного термического расширения; E^* – модуль Юнга; ν – коэффициент Пуассона.

Температура стеклования соответствует значению, при котором физические свойства материала изменяются наиболее резко. Под ним материал находится в твердой фазе, а над ним – в жидкой.

Режим тепловой обработки характерен для ряда хрупких неметаллов: керамики, ситалла, стекла. Напряжения в материале должны быть максимизированы для обеспечения достаточно быстрого разрушения материала. Чем больше механических напряжений, возникающих в материале, превышает предел термостойкости, тем больше вероятность его разрушения. Поэтому температурные градиенты, создаваемые в хрупком материале лазерным излучением, должны быть максимально большими. Температурный градиент определяется двумя факторами: максимальной температурой нагрева и минимальной площадью нагрева материала, в зависимости от концентрации энергии и скорости движения лазерного луча, который в данном случае делится на свойства материала [42].

3.2 Параметры технологических процессов лазерной обработки шлифовальных кругов

Во многих случаях практического применения лазерного излучения, конечной целью является разрушение материала. Так с технологической точки зрения профилирование шлифовального круга сводится к разрушению связки и абразива и их удалению.

Для выбора оптимальных режимов обработки ШК, а также для проектирования технологических процессов направленный на получение необходимой технологической поверхности, необходимо понимание основных закономерностей и взаимосвязи параметров определяющих данный процесс. Для операции лазерного профилирования совокупность параметров, характеризующих технологический процесс, делится на задающие параметры и показатели обработки которые обеспечиваются первой группой параметров (рис. 10). Задающие параметры включают в себя: параметры установки, свойства материала и условия обработки. Проанализируем более подробно составные части каждой группы.

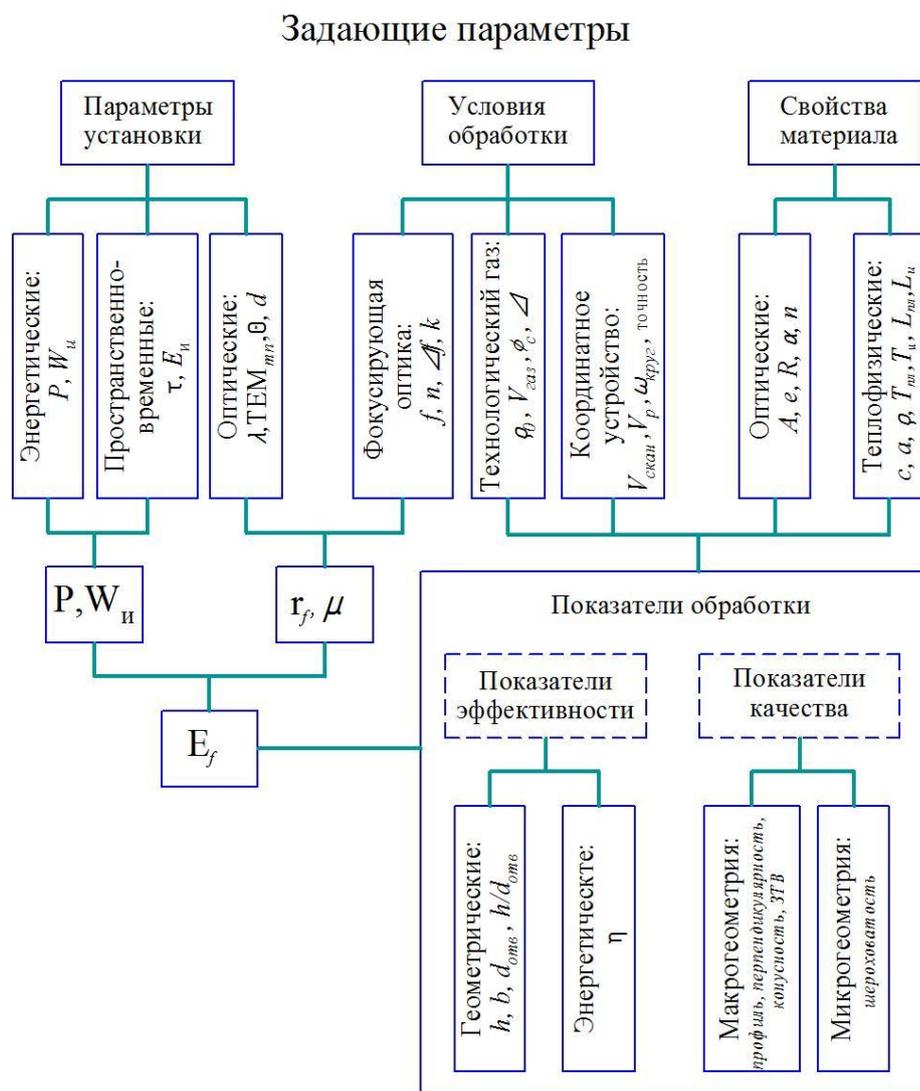


Рисунок 10. Схема задающих параметров технологического процесса лазерной обработки влияющих на качество профилирования ШК.

3.2.1. Задающие параметры

1. Среди параметров, характеризующих лазерную установку для обработки материалов, можно выделить три основных: энергетические, пространственно-временные и оптические.

К энергетическим параметрам относится **мощность излучения** P (для лазеров непрерывного действия) и **энергия в импульсе** $W_{\text{и}}$ (для лазеров импульсного или импульсно-периодического действия). Данные параметры играют важную роль, так как необходимая плотность мощности E_f о которой говорилось ранее, обеспечивается мощностью излучения:

$$E_f = \frac{P}{S} = \frac{W_{\text{и}}}{\tau S} \quad (3.2)$$

Так же необходимо отметить, что мощность импульсного излучения связана со средней мощностью $\langle P \rangle$ как:

$$P_{\text{имп}} = \frac{\langle P \rangle}{f\tau} \quad (3.3)$$

Данная связь указывает на то, что при малой $\langle P \rangle$ можно обеспечить необходимую степень воздействия при коротких τ .

Длительность воздействия τ . Данный параметр относится к пространственно-временным характеристикам и указывает на длительность импульса у импульсно-периодических лазеров или время эффективного воздействия у непрерывных лазеров. Длительность воздействия определяет следующие характеристики процесса [50]:

— пороговая энергия импульса

$$E_{\text{и}} = \frac{kT_{\text{и}}}{2A} \sqrt{\frac{\pi}{a}} \sqrt{\tau} \quad (3.4)$$

— глубина прогреваемого слоя $h_{\text{пр}} \sim \sqrt{a\tau}$ и количество образующейся жидкой фазы;

— величина давления отдачи паров $P_{\text{и}} \sim E_{\text{и}}/\tau$

У лазерных установок с непрерывным излучением эффективное время воздействия выражается формулой:

$$\tau = \frac{d_0}{V_{ск}} \quad (3.5)$$

где d_0 – диаметр пятна излучения в фокусной плоскости, $V_{ск}$ – скорость сканирования (обработки).

Важно отметить, при использовании формулы (3.5) необходимо соблюдать условие (3.4), и понимать, что $h_{исп} \sim V_{и} \tau$, и чем меньше τ , тем меньше толщина слоя, испаренного при воздействии одного импульса.

Важность данного параметра заключается в том, что он позволяет контролировать процесс обработки. Так механизм лазерного разрушения в соответствии с длительностью импульса лазера τ , временем охлаждения электронов τ_e и временем нагрева решетки τ_p , как правило, разделен на три категории: лазеры непрерывного излучения (НИ), короткоимпульсные лазеры и лазеры со сверхкоротким импульсным излучением. Если длительность импульса намного больше, чем время связи электрон-решетка ($\tau_p > 250 \text{ мс} \gg \tau \gg \tau_e$), то тепловая абляция происходит, главным образом, с помощью механизма плавления, и лазер считается непрерывным [38]. Короткоимпульсные лазеры работают с меньшими значениями длительности импульса, порядка наносекунд 10^{-9} , но лазерная энергия, поглощаемая свободными электронами, все еще имеет достаточно времени для передачи энергии за пределы электрон-решетка. В случае короткоимпульсных лазеров имеет место небольшое количество плавления с последующим быстрым испарением, и зона теплового воздействия меньше, чем зона лазера с непрерывным излучением. Длительность воздействия сверхкоротких импульсных лазеров меньше времени охлаждения электронов ($\tau_p < \tau_e \approx 1 \text{ пс} \ll \tau$). При сверхкороткой импульсной лазерной обработке не хватает времени для того, чтобы тепло подавалось в твердую среду. Следовательно, при условии, что энергия импульса превышает энергию связи решетки, решетчатая связь мгновенно разрывается без какого-либо переноса энергии

к соседним ионам. Следовательно, прямой переход твердое вещество — пар может быть достигнуто при незначительном расплавлении и отсутствии отходов [39].

К оптическим параметрам установки относятся:

Длина волны излучения λ . Как мы уже выяснили ранее, длина волны должна лежать в области наибольшей поглотительной способности материала. Поглощающая способность зависит от оптических характеристик материала;

Угловая расходимость Θ . Под расходимостью понимается угол между оптической осью и направлением на первой дифракционный минимум;

Диаметр луча на выходе из резонатора (апертура) d ;

Модовый состав излучения TEM_{mn} (рис. 11).

Поляризация излучения \vec{E} . Состояние поляризации излучения определяется положением вектора напряженности электрического поля относительно положения волнового вектора \vec{k} , описывающего направление движения волны. В случае когда ориентация электрического поля постоянна во времени, а меняется только величина и знак поля, поляризация называется линейной. Если вектор электрического поля, изменился во времени, описывает в плоскости эллипс, поляризация носит название эллиптической. Когда вектор \vec{E} описывает окружность, поляризация называется круговой [42].

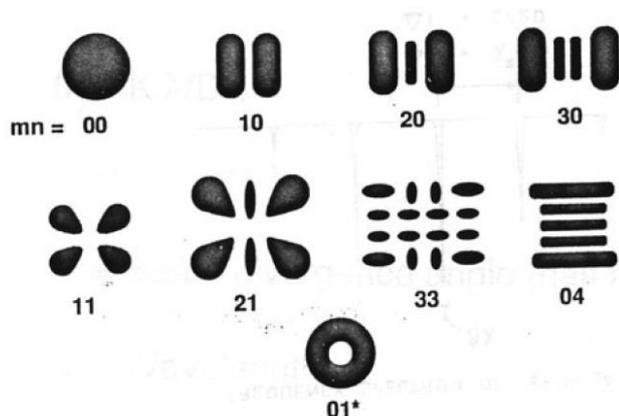


Рисунок 11. Модовая структура пучков некоторых низших порядков [50].

2. Обрабатываемый материал характеризуется набором оптических и теплофизических параметров. Шлифовальные круги на керамической связке являются многокомпонентными по составу и неоднородными по структуре, тем самым контроль показателей качества усложняется. Определим основные параметры.

К оптическим параметрам относятся: коэффициент отражения R ; показатель поглощения α ; показатель преломления n ; степень черноты e и т.д. Так как перечисленные оптические параметры материала зависят от длины волны лазерного излучения, поэтому они во многом связаны с оптическими параметрами установки.

К теплофизическим параметрам относятся: коэффициент теплопроводности α ; удельная теплоемкость c ; плотность ρ ; температуры плавления $T_{пл}$ и испарения $T_{и}$; удельная теплота плавления $L_{пл}$ и испарения $L_{и}$.

3. Технологические условия обработки определяются параметрами фокусирующей оптической системы, устройством формирования и подачи газа, а также параметрами координатного устройства.

Фокусирующая оптика, обеспечивающая формирование на поверхности материала светового пятна необходимых размеров, характеризуется: фокусным расстоянием f , показателем преломления материала линзы n ; радиусами кривизны оптических поверхностей. Параметры обработки так же зависят от положения плоскости наименьшего размера Δf фокусируемого пучка относительно поверхности материала (рис. 12).

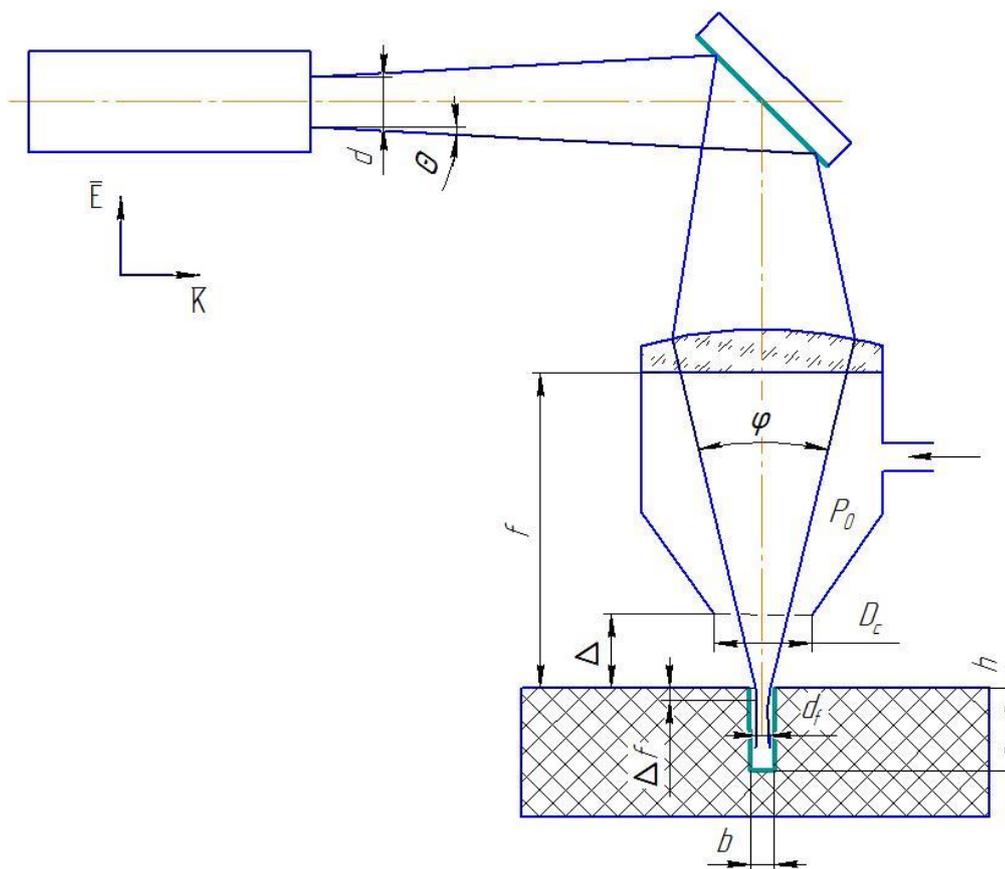


Рисунок 12. Схема параметров лазерной обработки [42].

Устройство подачи газа можно охарактеризовать следующими показателями: тип сопла подачи газа; давление внутри сопла P_0 ; скорость потока газа $V_{газ}$; диаметр выходного отверстия D_c ; зазор между соплом и материалом Δ (см. рис. 12).

Механизм лазерной обработки так же зависит от кинематики взаимодействия лазер — круг. Поглощенная лазерная энергия и степень повторения импульса луча зависят от угла падения лазера на поверхность круга (рис. 13). Кроме того, требуемый процесс формирования необходимой технологической поверхности зависит от движения шлифовального круга и скорости лазерной обработки. Такие требования как, направление лазерного излучения на поверхность круга (тангенциальное или радиальное), угловое положение или скорость шлифовального круга, осевое движение детали и относительная скорость луча (скорость сканирования) могут обеспечиваться осями станка или лазерным сканером.

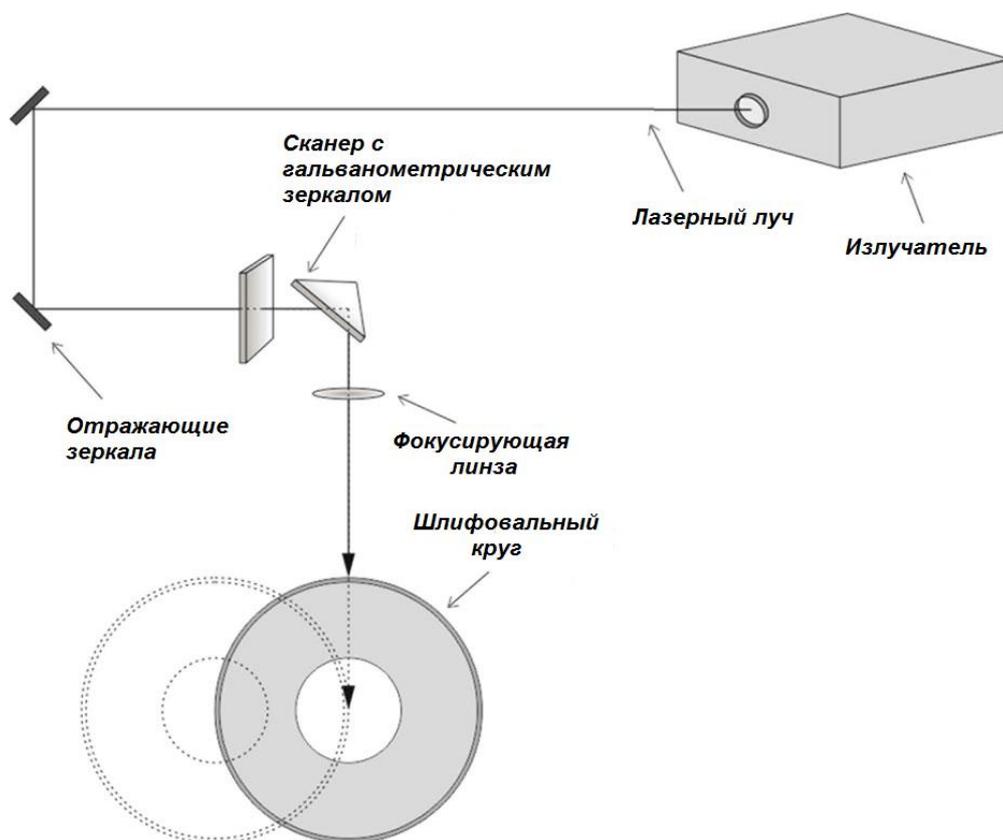


Рисунок 13. Схема передачи лазерного излучения на поверхность круга.

Ряд комплексных параметров которые так же характеризуют технологический процесс, зависят от некоторых перечисленных ранее величин. К таким параметрам относится диаметр сфокусированного луча d_f на поверхности материала, зависящий от фокусирующей оптики, длины волны излучения и диаметра излучения вышедшего из резонатора. Для Гауссова пучка, фокусируемого одиночной линзой, диаметр пятна можно выразить формулой (3.6) [42].

$$d_f = k_a \frac{d^3}{f^2} + 2k_D \lambda \frac{f}{d} \quad (3.6)$$

где k_a – абберационный параметр, зависящий от показателя преломления n материала и радиусов кривизны оптических поверхностей.

Фокусным расстоянием и апертурой пучка определяется следующий комплексный параметр. Угол схождения лучей μ после фокусирующей системы [42]:

$$\mu = 2 \arctg \frac{d}{2f} \quad (3.7)$$

Следующим важным параметром, является плотность мощности излучения в фокальном пятне E_{df} , определяющая эффективность и качество технологического процесса и выражается как [42]:

$$E_{df} = \frac{4P}{\pi d_f^2} \quad (3.8)$$

Ряд вышеотмеченных комплексных параметров определяет итоговые показатели обработки, которые можно охарактеризовать как показатели эффективности и показатели качества (см. рис. 10).

3.2.2. Показатели обработки

К показателям эффективности относятся величины, определяющие геометрические характеристики получаемых профилей. В случае обработки (профилирования) ШК это ширина b и глубина h профиля (см. рис. 12). В случае пробивки отверстий такими показателями являются глубина h , диаметр отверстия $d_{отв}$, и коэффициент формы отверстия $h/d_{отв}$.

Показателем эффективности и производительность процесса обработки является скорость резания V_p . Обобщенным же критерием эффективности процесса лазерной обработки можно считать величину η указывающую, какую энергию необходимо затратить на разрушение единица площади поперечного сечения реза, которая определяется как [42]:

$$\eta = \frac{hV_p}{P} \quad (3.9)$$

Показатели качества процесса характеризуются макро- и микрогеометрией поверхности обработки и включают в себя точность, шероховатость, перпендикулярность, ширину зоны термического влияния, оплавления верхней кромки.

3.3. Лазерные технологические установки для обработки шлифовальных кругов на керамической связке

Установки способные нагреть поверхность объекта, посредством теплового действия света, до температуры, когда в обрабатываемом материале происходят физические процессы, такие как: плавление, испарение, химические реакции, изменение фазового состояния и структуры, можно отнести к лазерным технологическим установкам.

Теплофизика лазерного нагрева указывает на то, что мощность лазерного излучения, является важным параметром теплового воздействия:

$$P = E_f^{\text{пор}} \times S \quad (3.10)$$

Исходя из формулы (3.10) можно определить необходимую мощность для разрушения вещества в фокальной плоскости излучения единицы площади обрабатываемого материала.

Подставим в формулу (3.10) значения пороговой плотности мощности $E_f^{\text{пор}}$ компонентов шлифовального круга полученные в гл.2 и вычислим необходимую мощность технологического лазера для разрушения компонентов круга в непрерывном и импульсном режимах.

При $r_0 = 12,5 \cdot 10^{-5}$ м, в непрерывном режиме $S = 4,9 \times 10^{-8}$ м².

При $r_0 = 1,75 \cdot 10^{-5}$ м, в импульсном режиме $S = 9,6 \times 10^{-10}$ м².

1) Для электрокорунда:

$$P_{\text{непр}}^{\text{пор}} = (4,9 \times 10^{-8}) \times (0,65 \times 10^9) = 31,85 \text{ Вт};$$

при длительности импульса $\tau_1 = 10^{-7}$ с

$$P_{\text{имп}}^{\text{пор}} = (9,6 \times 10^{-10}) \times (6,6 \times 10^{10}) = 63 \text{ Вт};$$

2) Для карбида кремния:

$$P_{\text{непр}}^{\text{пор}} = (4,9 \times 10^{-8}) \times (31,47 \times 10^9) = 1542,03 \text{ Вт};$$

при длительности импульса $\tau_1 = 10^{-7} \text{ с}$

$$P_{\text{имп}}^{\text{пор}} = (9,6 \times 10^{-10}) \times (74,3 \times 10^{10}) = 713,28 \text{ Вт};$$

3) Для диоксида кремния:

$$P_{\text{непр}}^{\text{пор}} = (4,9 \times 10^{-8}) \times (0,16 \times 10^9) = 7,84 \text{ Вт};$$

при длительности импульса $\tau_1 = 10^{-7} \text{ с}$

$$P_{\text{имп}}^{\text{пор}} = (9,6 \times 10^{-10}) \times (6,39 \times 10^{10}) = 61,344 \text{ Вт};$$

Таким образом, из полученных данных видно, что для операции профилирования рабочей поверхности шлифовальных кругов на керамической связке (как в непрерывном так и в импульсном режиме) достаточной мощностью является:

для электрокорунда — $P^{\text{пор}} \approx 32 \text{ Вт};$

для карбида кремния — $P^{\text{пор}} \approx 1542 \text{ Вт};$

для диоксид кремния — $P^{\text{пор}} \approx 8 \text{ Вт}.$

Для проверки критерия, подставим в формулу (3.8) которая определяет эффективность и качество технологического процесса, получены значения пороговой мощности излучения и получим значения пороговой плотности мощности в фокальном пятне, при $d_f = 200 \text{ мкм}$:

$$- \text{ для электрокорунда } E_{df}^{\text{пор}} = \frac{4 \times 32}{\pi \times d_f^2} = 0,65 \times 10^9 \text{ Вт/м}^2;$$

$$- \text{ для карбида кремния } E_{df}^{\text{пор}} = \frac{4 \times 1700}{\pi \times d_f^2} = 0,049 \times 10^9 \text{ Вт/м}^2;$$

$$- \text{ для диоксида кремния } E_{df}^{\text{пор}} = \frac{4 \times 8}{\pi \times d_f^2} = 0,16 \times 10^9 \text{ Вт/м}^2.$$

Сравнивая расчетные значения пороговой плотности мощности необходимой для нагрева поверхности до температуры разрушения и плотности мощности формируемой в фокальном пятне, можно с достаточной уверенностью сказать, что при данных значения мощности технологического лазера будет достаточно для обработки основных компонентов круга.

Полученные величины являются критерием необходимой мощности лазерной технологической установки для обработки режущей поверхности шлифовального, однако, всё еще зависит от структуры материала, типа операции и степени локализации излучения.

Из полученных выражений следует, что время воздействия влияет только на тип операции и объем обработанного материала, а не на величину (пороговой) мощности лазера.

Рассмотрим основные характерные параметры технологических CO₂ – лазеров применяемых в промышленности (табл. 3.1, 3.2).

Таблица 3.1. Основные параметры CO₂ – лазера непрерывного действия [50].

Тип лазера	Длина волны λ , мки	Мощность P , Вт	Угловая расходимость Θ , мрад	Эффективность (КПД) η , %
CO ₂ , с медленной продольной прокачкой	10,6	100-1000	1	10

Таблица 3.2. Основные параметры CO₂ – лазера импульсного действия [50].

Тип лазера	Длина волны λ , мки	Энергия в импульсе W , Дж	Длительность импульса τ , с	Частота повторения импульсов ν , Гц	Угловая расходимость Θ , мрад	Эффективность (КПД) η , %
CO ₂ , с радиочастотной накачкой	10,6	$5 \cdot 10^{-2}$	10^{-4}	100-2500	4	≤ 10

CO ₂ – щелевой	10,2 – 10,8	1-100	3*10 ⁻⁵	100-5000	3	≤ 10
			5*10 ⁻⁴		4	
CO ₂ – ТЕА	10,6	0.1-1	10 ⁻⁶ 10 ⁻⁷	300-1000	3	≤ 10

Ознакомившись с основными параметрами технологических CO₂ – лазеров применяемых в промышленности, можно сделать вывод, что данные установки позволяют осуществлять технологический процесс профилирования режущей поверхности шлифовальных кругов на керамической связке.

Вводы по третьей главе

Как мы выяснили, при воздействии лазерного излучения с плотностью мощности, превосходящей некоторое критическое значение, материал начинает разрушаться. Термин "разрушение" при воздействии лазерного излучения на материалы достаточно условен так как, процесс разрушения является многостадийным.

На первоначальных стадиях разогрева следует отметить вклад в процессы лазерного разрушения термодетформации (упругие, вязкоупругие и пластические), химические реакции (окисление и разложение), стимулирование миграции дефектов вглубь материала и т.п.

При достижении в зоне воздействия излучения критической температуры плавления, материалы расплавляются, и в глубь материала начинает перемещаться фазовая граница жидкость – твердое вещество. Дальнейшее повышение температуры, вплоть до следующей критической температуры разрушения – температуры кипения, приводит к интенсивному испарению. Скорость испарения достигает своего максимального значения при стационарной температуре испарения, когда скорость фазовых границ плавления и испарения совпадают.

Кроме того, как непосредственно в зоне облучения поверхности, так и в области, прилегающей к поверхности материала, протекают физические процессы, вызывающие необратимые изменения в веществе, обусловленные процессами диффузии, адсорбции и десорбции, генерации дефектов и т.п. Следует отметить, что в окончательный процесс разрушения материалов вносят вклад предшествующие этапы, которые протекают при нагреве до температуры разрушения.

Процессы лазерной обработки характеризуются многочисленным набором факторов, зачастую зависящих друг от друга. Однако чрезвычайно важно представлять характер влияния и вид основных закономерностей технологического процесса.

Полученные величины пороговой мощности являются критерием необходимой мощности лазерной технологической установки для обработки режущей поверхности шлифовального, однако, всё еще зависит от структуры материала, типа операции и степени локализации излучения.

Из полученных выражений следует, что время воздействия влияет только на тип операции и объем обработанного материала, а не на величину (пороговой) мощности лазера.

Учитывая разнообразие компонентов шлифовального круга (различные типы абразивных зерен и связующих материалов) и потребность в высокой управляемости, лазерные технологические установки являются отличным инструментом для обработки шлифовального круга. Разработка лазерных технологий в последние годы повысила применимость лазеров. Кроме абляции без расплава, лазеры способны осуществлять локальное удаление компонентов шлифовального круга. Определяющим фактором, влияющим на выборочную абляцию, является нарушение энергии связей между компонентами.

Соответственно, диапазон процессов направленный на получение необходимой технологической поверхности от очистки (абляции связующего материала, удаление стружки, и удержания абразивных зерен) до правки, структурирования и профилирования (контролируемой абляции связующего материала и абразивных зерен) может быть достигнут с помощью лазерных технологических установок.

Раздел 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ, УСЛОВИЯ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

4.1. Экспериментальная лазерная установка для профилирования шлифовальных кругов

Для проведения исследований по определению влияния параметров лазерного излучения при профилировании режущей поверхности шлифовальных кругов была подготовлена экспериментальная установка, работающая вне шлифовального станка и позволяющая проводить эксперименты на кругах промышленного изготовления диаметром до 300 мм. Возможности установки позволяют изменять условия и режимы обработки ШК за счет регулирования энергетического параметра, а также путем изменения скорости обработки, фокусного расстояния, расстояния между соплом и обрабатываемой поверхностью, положения фокальной плоскости и кинематики взаимодействия лазер – круг.

Схема установки приведена на рисунке 14, общий вид установки представлен на рисунке 15. Основными её комплектующими элементами являются лазерно-гравировальный CO₂ станок DirTec 9060 и привод вращательного типа. Лазерный станок работает в непрерывном режиме и оснащен газоразрядной трубкой на 100 Вт. По произведенным расчетам этой мощности достаточно для обработки электрокорунда и керамической связки, а привод вращательного типа (вращатель) позволит получить необходимый профиль, сохраняя фокусную плоскость.

Оптическая система лазерной установки осуществляет отклонение и перемещение излучения с помощью медных зеркал, а фокусировку линзой из искусственного оптического кристалла ZnSe с фокусным расстоянием $f = 50,8$ мм. Согласно характеристикам данного типа линз, при $f = 50,8$ мм оптимальная глубина фокуса $\Delta f = 1,94$ мм, а диаметр фокусного пятна $d_f = 0,15 - 0,2$ мм. Фокусирующая система служит для создания необходимой плотности мощности на поверхности детали. Фокусную плоскость выставляем таким образом, чтобы сфокусированный пучок находился на поверхности ШК. Пучок лазерного излучения

экспериментальной установки может быть направлен радиально или тангенциально плоскости обработки. Вращатель устанавливается в станине лазерно-гравировального станка и позволяет вращать ШК в фокусной плоскости.

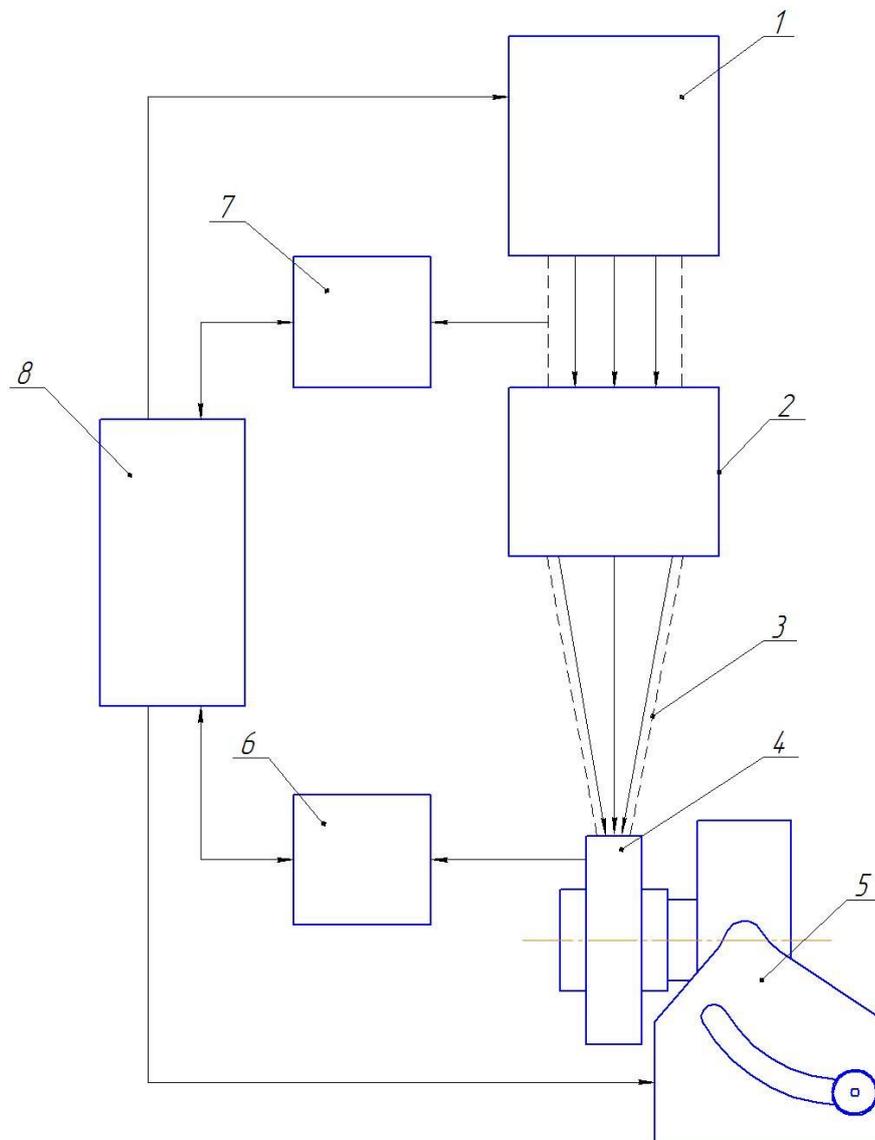


Рисунок 14. Структурная схема лазерной технологической установки для профилирования ШК. 1 – излучатель; 2 – оптическая система; 3 – лазерное излучение; 4 – обрабатываемая деталь; 5 – координатное устройство; 6 – датчики параметров технологического процесса; 7 – датчики параметров излучения; 8 – программное устройство управления.

Подача газа (воздуха) в зону обработки осуществляется компрессором, обеспечивая тонкую линию разреза без перегрева материала, выдувая продукты

испарения из зоны обработки и для предотвращения затвердевания расплавленного соединения в канале реза.

Перемещение оптической системы в продольном и поперечном направлениях, а также вращение поворотного устройства осуществляется с помощью шаговых двигателей, управляемых системой RDC6442G (последняя версия от RUIDA Laser). Программное обеспечение RDC6442G обеспечивает возможность импорта векторных (CorelDRAW, AutoCAD) и растровых (PLT, DXF, BMP, JPG, GIF, PNG, WMF, ICO) файлов, а также, предназначено для настройки и регулирования процессов лазерной резки и гравировки (мощность луча, скорость обработки, количество проходов и т.д.).



Рисунок 15. Общий вид экспериментальной установки.

4.2. Подготовка образцов, условия и режимы исследований

Для исследования взаимодействия лазерного излучения с многокомпонентным составом режущей поверхности шлифовальных кругов на керамических связках использовались следующие образцы промышленного изготовления: круг шлифовальный №1 (125 × 20 × 32 25А 60L 6V 50) и №2 (125 × 20 × 32 64С F150 К 8V 35). Расшифровка приведена в таблице 4.1.

Таблица 4.1. Применяемые шлифовальные круги.

	№1 25А 60L 6V 50 2	№2 64С F150 К 8V 35
Тип абразивного материала	25А – электрокорунд белый	64С – карбид кремния зеленый
Зернистость	60 – размер АЗ основной фракции 800-600 мкм	F150 – размер АЗ основной фракции 82 мкм
Твердость	L – среднемягкий	К – среднемягкий
Структура	6 – средняя	8 – средняя
Связка	V – керамическая	V – керамическая
Окружная скорость	50 м/с	35 м/с

Экспериментальная установка, представленная на рисунке 15, позволяла в автоматическом режиме обрабатывать поверхность. Образцы закреплялись во вращателе с помощью трехкулочкового патрона. Управление движением оптической системы и вращателя осуществляется системой ЧПУ. Общий вид процесса обработки образцов представлен на рисунке 16.

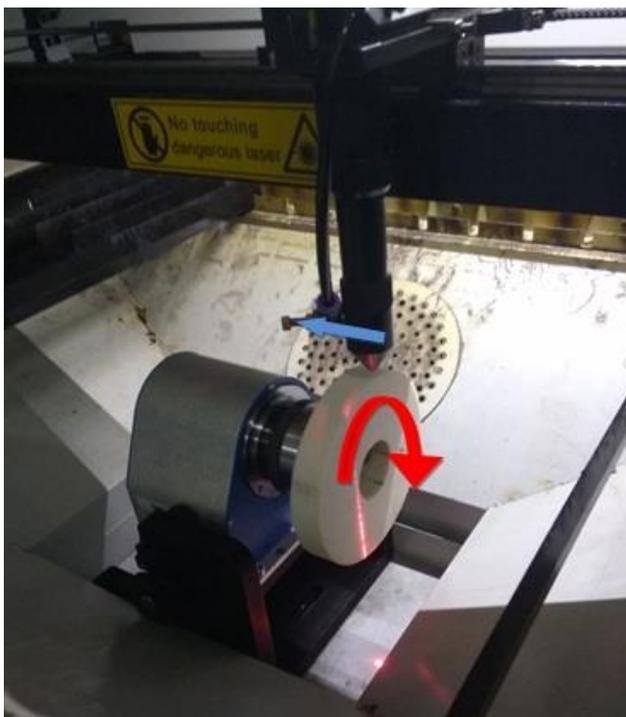
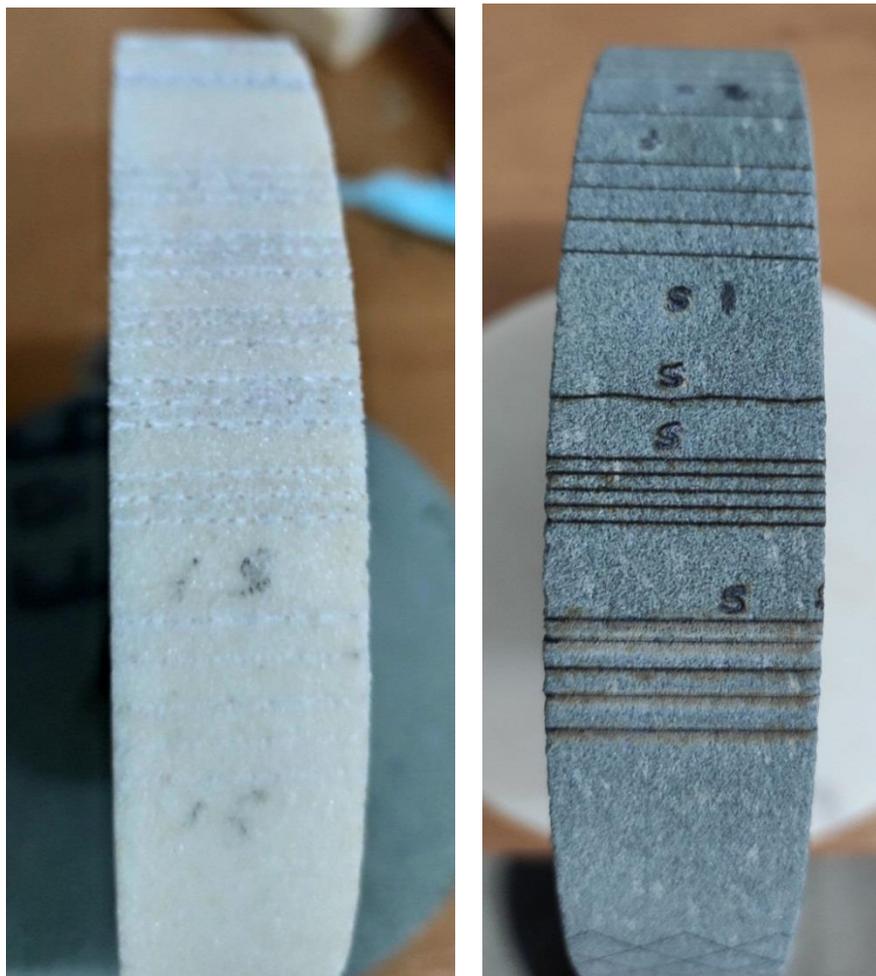


Рисунок 16. Общий вид процесса обработки экспериментальных образцов.

← — направление перемещения сфокусированного излучения;

← — направление вращения круга.

С помощью координатного стола лазерной установки и вращателя, лазерный луч фокусировали перпендикулярно поверхности круга через плосковыпуклую линзу. Перемещение сфокусированного лазерного излучения осуществлялось вдоль оси X в продольном направлении режущей поверхности ШК с заданным шагом между сериями резов с комбинированными параметрами мощности и скорости. Скорость вращения круга синхронизировали с перемещением лазерного излучения для формирования непрерывной канавки на периферии круга (рис. 17). Диаметр луча в пересечении его с плоскостью шлифовального круга $d_f = 200$ мкм. Расстояние между соплом и рабочей поверхностью $\Delta = 6$ мм. Чтобы получить рез длиной 20 мм, мощность лазерной установки изменялась от 5 до 100 Вт, скорость резания от 5 до 60 мм/с.



а)

б)

Рисунок 17. Серия резов на экспериментальных образцах: а) – электрокорунд белый, б) – карбид кремния зеленый.

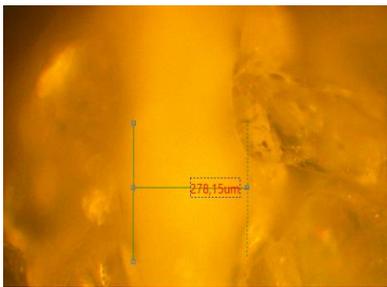
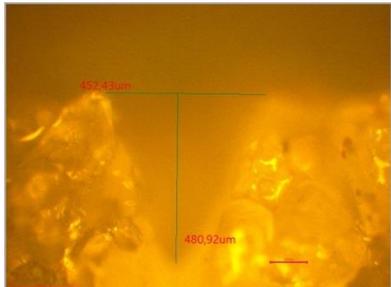
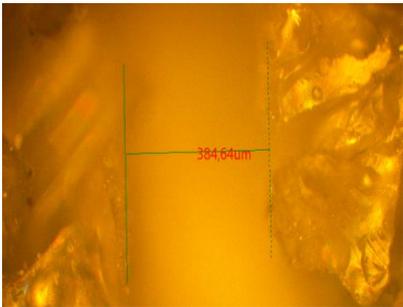
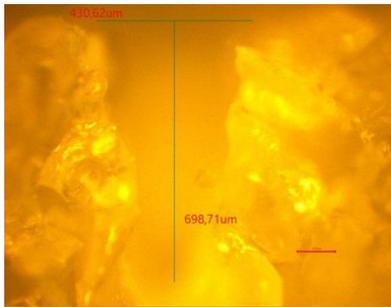
4.3. Исследование показателей обработки

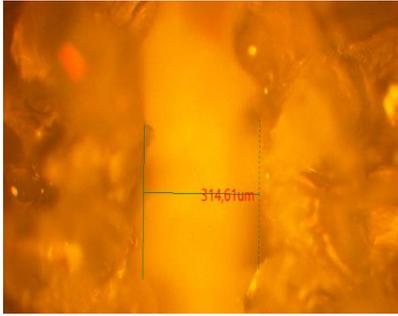
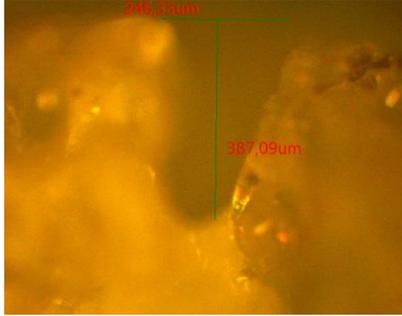
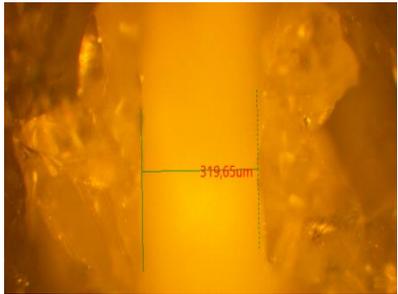
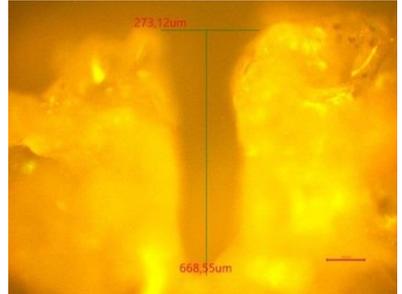
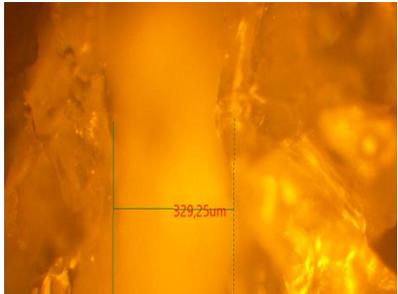
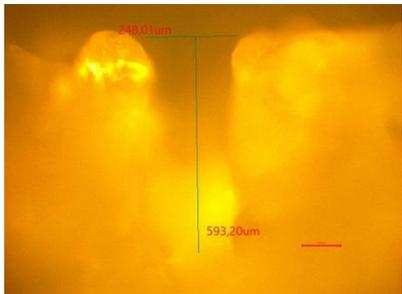
Исследования по определению показателей обработки при лазерном профилировании многокомпонентного состава ШК на керамической связке проводили визуальным наблюдением.

Исследовались геометрические показатели реза, такие как ширина b и глубина h , являющиеся показателями эффективности процесса профилирования, а так же проводилась оценка макро- и микрогеометрии профиля, являющейся показателем качества процесса профилирования.

Измерения проводились с помощью металлографического микроскопа 4XB на увеличении исследуемых объектов в 250 раз. При помощи программы TourView предназначенной для просмотра, сохранения и обработки статических и видеоизображений камер для микроскопов Levenhuk, были получены значения глубины и ширины реза, представленные в таблицах 4.2 и 4.3.

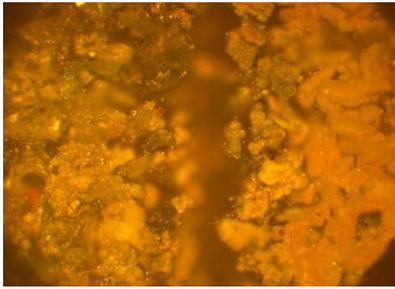
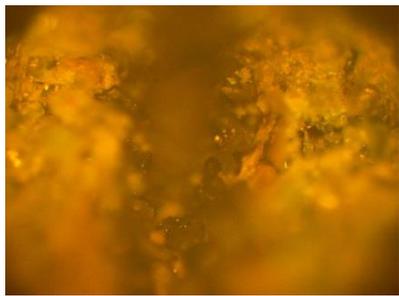
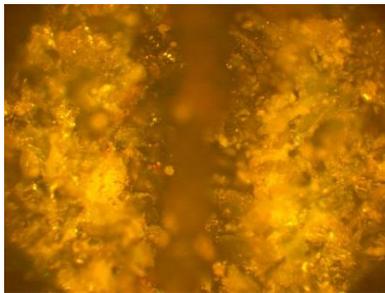
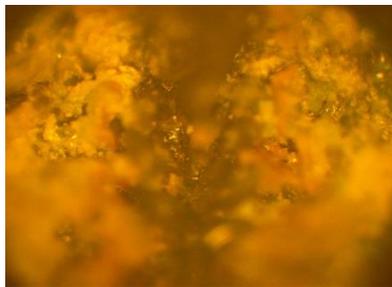
Таблица 4.2. Значения глубины и ширины реза при обработке экспериментального образца №1 (125 × 20 × 32 25A 60L 6V 50).

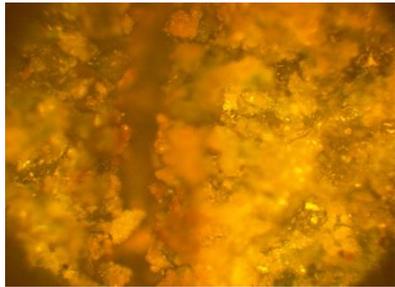
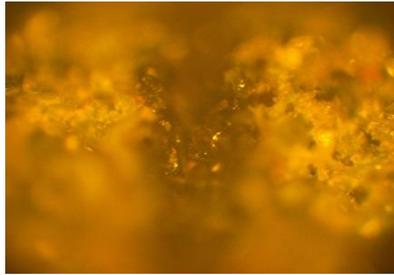
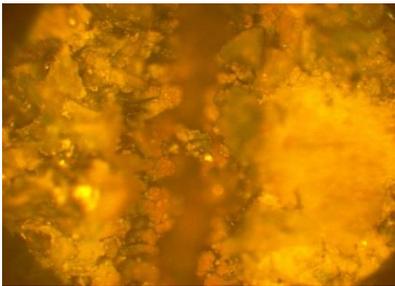
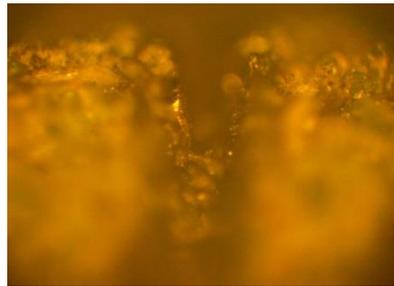
№ опыта	Скорость обработки	Мощность излучения	Ширина реза, при увеличении X250	Глубина реза, при увеличении X250
	<i>V</i> , мм/с	<i>P</i> , Вт	<i>b</i> , мкм	<i>h</i> , мкм
1	20	60	278,15	480,92
				
2	10	60	384,64	698,71
				
3	20	40	314,61	387,09

				
			319,65	668,55
4	10	40		
			329,25	593,2
5	15	50		

Проводя визуальный анализ макрогеометрии резов, можно сразу заметить, что мощности излучения технологического лазера при обработке образца №1 было достаточно для испарения компонентов шлифовального круга. Показатели качества макрогеометрии, можно считать удовлетворительными, так как при комбинировании режимов удавалось получать хороший профиль реза, без образования грата и сплавления образовавшегося канала (опыт № 2 и 4).

Таблица 4.3. Значения глубины и ширины реза при обработке экспериментального образца №2 (125 × 20 × 32 64С F150 К 8V 35).

№ опыта	Скорость обработки	Мощность излучения	Ширина реза, при увеличении X250	Глубина реза, при увеличении X250
	V , мм/с	P , Вт	b , мкм	h , мкм
1	20	60	161,7	440,7
				
2	30	60	125,56	239,32
				
3	20	40	134,16	330,6
				
4	30	40	101,48	295,35

				
			115,3	365,27
5	25	50		

Серия экспериментальных резов полученных на поверхности образца №2, лишь подтвердили расчетные значения необходимой мощности лазерного излучения при обработке шлифовального круга с абразивом из карбида кремния. При данной мощности удавалось получать неглубокие резы, за счет разрушения связующего материала, проявилась селективная лазерной обработки. Макрогеометрия реза неудовлетворительна, так как профиль реза был неоднородным. Так же стоит отметить, цвет реза приобрёл темный окрас (см. рис. 17 б), что говорит об изменениях свойств режущей поверхности ШК зоне термического влияния.

4.4. Применение метода планирования эксперимента для определения влияния задающих параметров при профилировании

Механизм процесса лазерного профилирования режущей поверхности шлифовальных кругов достаточно сложен. Теоретическое рассмотрение такого процесса требует определенных предположений о физических явлениях, происходящих при воздействии лазерного излучения на многокомпонентный состав ШК. Существует и другой подход к изучению лазерной обработки, не требующий

знания механизма этого процесса и основанный на построении математической модели изучаемого процесса в виде уравнения регрессии [52].

Метод планирования экспериментов при изучении поведения системы позволяет постановкой специальных экспериментов, при проведении которых изменяются входные переменные, управляющие воздействия и регистрируются выходные переменные, обрабатывать и представлять в виде таблиц, графиков, зависимостей результаты исследований.

При применении методов активного планирования, эксперименты ставятся небольшими сериями, результаты каждой серии обрабатываются и анализируются. К рассматриваемым методам относятся полный факторный эксперимент, который позволяет получить математическую модель влияния различных факторов на показатели обработки в виде уравнения регрессии.

Из анализа основного материала работы для исследования процесса лазерного профилирования ШК на керамической связке выберем экспериментальный образец №1 и выделим два основных фактора влияющих на показатели обработки: мощность излучения – P и скорость обработки V . Данные два параметра в ходе эксперимента будут изменяться, остальные же будут зафиксированными.

Выбранные параметры варьирования имеют разные размерности, различные масштабы измерений и диапазон изменений. Поэтому в методе планирования эксперимента переходят к кодированным факторам, которые являются безразмерными и имеют единый масштаб измерения.

Значения уровней и интервалов варьирования факторов приведены в таблице 4.4.

Обработка результатов проведена по учебному пособию [53].

Таблица 4.4. Значения уровней и интервалов варьирования факторов.

Наименование и обозначения факторов	Уровни варьирования			Интервалы варьирования
	–	0	+	
Скорость обработки	10	15	20	5
Мощность излучения	40	50	60	10

Введём обозначения: x_1 – скорость обработки, x_2 – мощность излучения, которые и будут кодированными факторами, варьируемыми на двух уровнях; N – число опытов; j – номер опыта ($j = 1, 2, \dots, N$); n – число повторных измерений в j -ом опыте; y – функция отклика (ФО); $\langle y \rangle$ – среднее значение ФО.

Нулевой уровень и интервал варьирования для каждого фактора выбирался исходя из параметров лазера и технических особенностей процесса обработки. Глубину и ширину реза обозначим y . В теории планирования эксперимента y называют целевой функцией или функцией отклика.

Так как число факторов невелико (два), было решено провести полный факторный эксперимент типа 2^2 , где число факторов $k = 2$, число уровней $p = 2$, число опытов $N = 4$, число повторных опытов $n = 5$.

Матрица планирования №1 ($y \equiv$ глубина реза) приведена в таблице 4.5.

Таблица 4.5. Матрица планирования №1

$\#$	x_0	x_1	x_2	$x_1 * x_2$	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	$\langle y \rangle$	S_j^2
1	+	+	+	+	529,74	480,92	417,26	412,21	475,87	475,80	5293,00
2	+	–	+	–	723,84	754,68	698,71	733,91	693,70	721,00	637,80
3	+	+	–	–	387,09	343,49	263,09	274,43	285,80	310,78	2778,20
4	+	–	–	+	506,02	697,04	504,35	651,82	668,55	605,56	8657,00

Обработка экспериментальных данных:

1. Оценка воспроизводимости процесса. При одинаковом числе параллельных опытов при каждом сочетании уровней факторов воспроизводимость процесса (отсутствие значительных отклонений) определяется по критерию Кохрена. Сравнивается максимальная величина дисперсии с суммарной.

1.1. Найдём расчётное значение критерия Кохрена G_p :

$$G_p = \frac{S_{j \max}^2}{\sum_{j=1}^4 S_j^2} = \frac{8657}{17366} = 0,4985$$

1.2. Для доверительной вероятности $P = 0,95$, $N = 4$ и числа степени свободы для $S_{j \max}^2$ $f_1 = n - 1 = 4$ по таблице из [54] найдём теоретические значения критерия Кохрена:

$$G_T = 0,6287$$

Так как $G_p < G_T$, то изучаемый процесс является воспроизводимым.

2. Определение дисперсии воспроизводимости.

$$S_y^2 = \frac{(\sum_{j=1}^4 S_j^2)}{N} = \frac{17366}{4} = 4341,5$$

3. Вычисление коэффициентов уравнения регрессии (УР).

$$3.1. a_0 = \frac{1}{N} \times \sum_{j=1}^4 x_0 \times \langle y \rangle_j = 528,29$$

$$3.2. a_1 = \frac{1}{N} \times \sum_{j=1}^4 x_{1j} \times \langle y \rangle_j = -135,00$$

$$3.3. a_2 = \frac{1}{N} \times \sum_{j=1}^4 x_{2j} \times \langle y \rangle_j = 70,12$$

$$3.4. a_{12} = \frac{1}{N} \times \sum_{j=1}^4 (x_1 \times x_2)_j \times \langle y \rangle_j = 12,40$$

4. Оценка значимости коэффициентов УР с помощью критерия Стьюдента.

$$\Delta a = t(P; f_E) \times \sqrt{\frac{S_y^2}{N \times n}} = 2,12 \times \sqrt{\frac{4341,5}{4 \times 5}} = 31,23$$

Значение коэффициента Стьюдента $t(P; f_E)$ для доверительной вероятности $P = 0,95$ и числа степеней свободы $f_E = N \cdot (n-1) = 16$ взяли из [55].

Так как $|a_{12}| < \Delta a$, то коэффициент a_{12} является незначимым. Остальные коэффициенты являются значимыми.

Таким образом, окончательно уравнение регрессии имеет вид:

$$y = 528,29 - 135,00 \times x_1 + 70,12 \times x_2 \approx 528,3 - 135,0 \times x_1 + 70,12 \times x_2 \quad (4.1)$$

Уравнение регрессии (4.1) является линейным уравнением.

5. Оценка адекватности линейной модели.

5.1. Найдём по уравнению (4.1) расчётное значение функции отклика y_{Pj} с использованием для x_1 и x_2 матрицы планирования:

$$y_{P1} = 463,41; y_{P2} = 733,41; y_{P3} = 323,17; y_{P4} = 593,17.$$

5.2. Найдём значение дисперсии адекватности S_A^2 :

$$S_A^2 = \frac{\sum_{j=1}^4 (\langle y \rangle_j - y_{Pj})^2}{N - k - 1} = \frac{614,54}{4 - 2 - 1} = 614,54$$

где k – число коэффициентов УР (4.1), не считая a_0 .

5.3. Найдём расчётное значение критерия Фишера F_P :

$$F_P = \frac{n \times S_A^2}{S_y^2} = \frac{5 \times 614,54}{4341,5} = 0,7078$$

5.4. Для доверительной вероятности $P = 0,95$, числа степеней свободы $f_A = N - k - 1 = 4 - 2 - 1 = 1$, $f_E = 16$, найдём по таблице из [55] табличное значение критерия Фишера F_T :

$$F_T = 4,49$$

Так как $F_p < F_T$, то УР (4.1) адекватно описывает изучаемый процесс.

Матрица планирования №2 ($y \equiv$ ширина реза) приведена в таблице 4.6.

Таблица 4.6. Матрица планирования №2

N_j	x_0	x_1	x_2	$x_1 * x_2$	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	$\langle y \rangle$	S_j^2
1	+	+	+	+	374,09	307,89	278,15	312,50	326,74	319,88	1231,35
2	+	-	+	-	384,64	340,49	422,26	446,72	320,87	383,00	2817,88
3	+	+	-	-	206,11	232,07	289,69	314,61	240,92	256,68	1964,22
4	+	-	-	+	291,57	319,65	315,01	404,70	327,58	331,70	1845,04

Обработка данных матрицы планирования № 2 аналогична обработке данных матрицы планирования №1.

1. Оценка воспроизводимости процесса.

$$1.1. G_p = \frac{2817,88}{7858,49} = 0,3586$$

$$1.2. G_T = 0,6287$$

Так как $G_p < G_T$, то изучаемый процесс является воспроизводимым.

2. Определение дисперсии воспроизводимости.

$$S_y^2 = \frac{7858,49}{4} = 1964,62$$

3. Вычисление коэффициентов уравнения регрессии (УР).

$$a_0 = 322,82; a_1 = -34,54; a_2 = 28,63; a_{12} = 2,98.$$

4. Оценка значимости коэффициентов УР.

$$\Delta a = 2,12 \times \sqrt{\frac{1964,62}{4 \times 5}} = 21,01$$

Так как $|a_{12}| < \Delta a$, то коэффициент a_{12} является незначимым. Остальные коэффициенты являются значимыми.

Таким образом, окончательно УР имеет вид:

$$y = 328,82 - 35,54 \times x_1 + 28,63 \times x_2 \approx 322,8 - 35,5 \times x_1 + 28,6 \times x_2 \quad (4.2)$$

Уравнение регрессии (4.2) является линейным уравнением.

5. Оценка адекватности линейной модели.

$$5.1. y_{P1} = 316,91; y_{P2} = 385,99; y_{P3} = 259,65; y_{P4} = 328,73.$$

$$5.2. S_A^2 = \frac{35,40}{4-2-1} = 35,40$$

$$5.3. F_P = \frac{5 \times 35,40}{1964,62} = 0,0901$$

$$5.4. F_T = 4,49$$

Так как $F_P < F_T$, то УР (4.2) адекватно описывает изучаемый процесс.

Анализ полученных результатов. Абсолютные значения коэффициентов уравнения регрессии (4.1) показывают, что скорость резки оказывает на глубину реза в материале шлифовального круга более сильное (практически в два раза) влияние, чем мощность излучения. Учёт знаков коэффициентов уравнения (4.1) показывает, что скорость резки и мощность излучения влияют на глубину реза в противоположных направлениях, а именно, увеличение скорости резки приводит к уменьшению глубины реза, а увеличение мощности излучения приводит к увеличению глубины реза. Из сказанного выше следует, что одновременное увеличение скорости резки и мощности излучения в одинаковое число раз приведёт к уменьшению глубины реза из-за доминирующего влияния скорости резки. Физически это можно объяснить тем, что с увеличением скорости резки зона

воздействия лазерного излучения не успевает получить достаточно энергии для нагрева, плавления и испарения материала шлифовального круга. Такие же выводы можно сделать из анализа уравнения регрессии (4.2) о влиянии скорости и мощности излучения на ширину реза, но в этом случае доминирующее влияние скорости резки выражено заметно слабее.

Из полученных результатов следует, что при необходимости получения глубоких и широких профилей на режущей поверхности шлифовальных кругов с использованием лазеров с непрерывным излучением, профилирование нужно производить при больших мощностях излучения и невысоких скоростях резки.

4.5. Выводы по четвертой главе

1. Подготовленная экспериментальная установка, для проведения исследований по определению оптимальных параметров лазерного излучения при профилировании режущей поверхности шлифовального круга позволила:

- Осуществлять обработку образцов, для получения необходимого профиля;
- Воздействовать на поверхность образцов с различной скоростью обработки и мощности излучения.

2. Используемый метод исследования позволил с достаточной степенью достоверности исследовать результаты лазерного воздействия на многокомпонентный состав шлифовального круга, с целью выяснения влияния на механизм профилирования задающих параметров лазерной обработки.

3. Проведен полный факторный эксперимент типа 2^2 для определения влияния задающих параметров при профилировании шлифовальных кругов, влияющих на глубину и ширину профиля при использовании CO_2 – лазера с непрерывным излучением.

4. Получена математическая модель, адекватно описывающая указанный процесс. На основе полученной модели проведена оценка относительного влияния выбранных факторов и их парное взаимодействие на изучаемый процесс профилирования.

Раздел 5. РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ ТЕХНОЛОГИИ ПРОФИЛИРОВАНИЯ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ

Очевиден тот факт, что поверхность корундового абразивного круга может быть модифицирована лазерным излучением в той мере, которую не позволяют выполнить иные существующие методы. Профилирование шлифовальных инструментов с использованием лазера позволяет создавать сложные формы профиля на поверхности шлифовальных инструментов (независимо от типов абразивных и связующих инструментов) и, следовательно, изменять макро- и микрогеометрию шлифовального круга. Целью настоящей главы является разработка рекомендаций технологических схем лазерного профилирования шлифовальных кругов на керамических связках, а так же рассмотрение вопросов интеграции метода в производственные системы.

5.1. Технологические схемы профилирования

Кинематика лазерного профилирования режущей поверхности шлифовального круга на керамических связках, заключается в разрушении объема материала с помощью лазерного излучения. Поэтому необходимо рассмотреть кинематические особенности возможных схем профилирования.

Для построения схем профилирования примем допущение, при котором лазерный луч будем считать плоскопараллельным по всей длине и изображать его в виде линии.

Так как, существует принципиальная возможность расположения лазерного луча в пространстве под любым углом к облучаемой поверхности, то процесс профилирования при этом можно осуществлять по двум основным схемам взаимного положения луча и рабочей поверхности шлифовального круга (рис. 18), а именно, луч направлен: а) по нормали к рабочей поверхности (радиально); б) по касательной к направляющей рабочей поверхности круга (тангенциально).

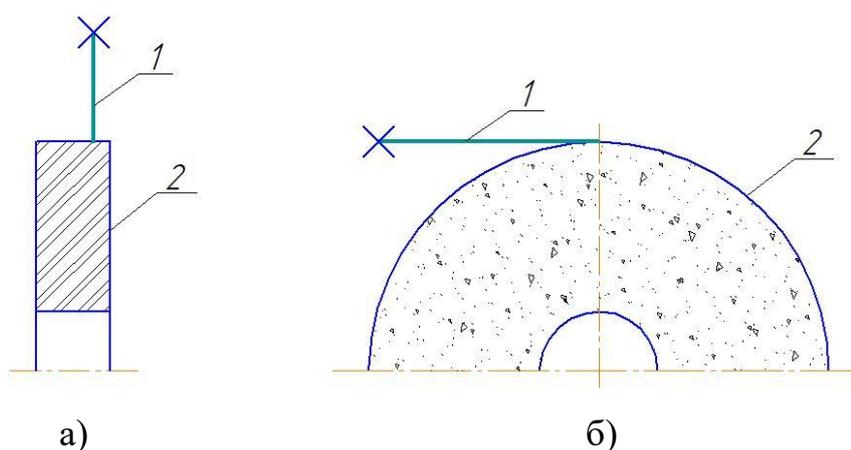


Рисунок 18. Схема взаимного положения излучения и рабочей поверхности шлифовального круга.

Процесс профилирования по первой схеме происходит в результате равномерного вращения круга и равномерного прямолинейного перемещения луча относительно друг друга вдоль оси вращения при расположении рабочей поверхности в фокальной плоскости луча и воздействии излучения с плотностью мощности в этом сечении достаточной для разрушения материала. Однако для получения более глубокого профиля, оптической системе необходимо перемещаться в направлении заглубления профиля для сохранения фокальной плоскости луча.

Для получения сложного профиля рисунок 19, процесс может происходить в результате только прямолинейного перемещения луча (рис. 20)

Траектория следования лазерного луча для получения сложных профилей на поверхности круга осуществляется как параллельной так и перекрестной обработкой (рис. 21). Такие траектории следования обеспечивают полное выжигание абразивного материала из объема ШК за счет пересечения траектории движения лазерного луча (рис.22).

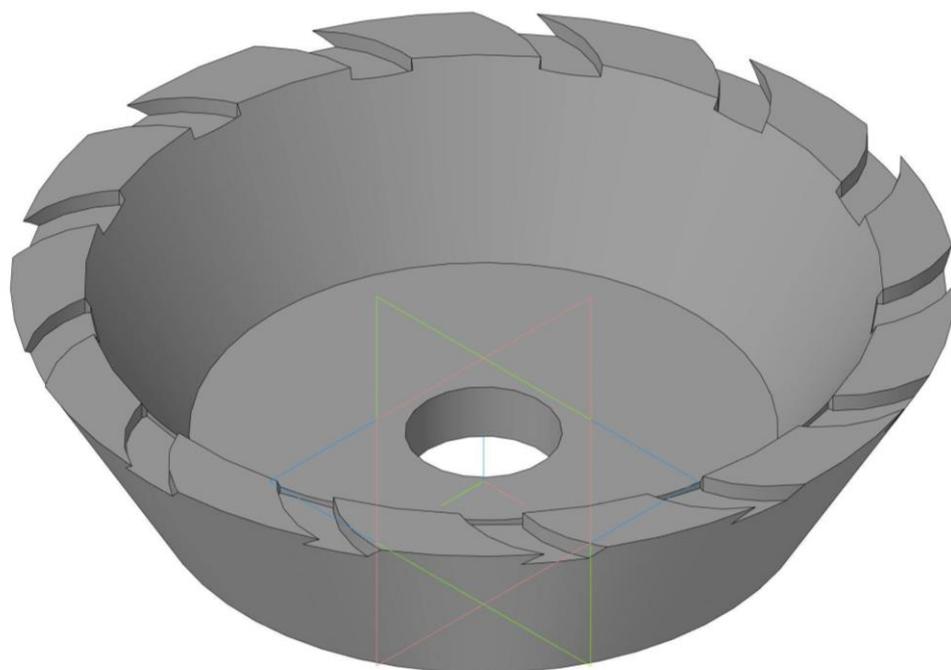


Рисунок 19. Модель шлифовального круга конической чашечной.

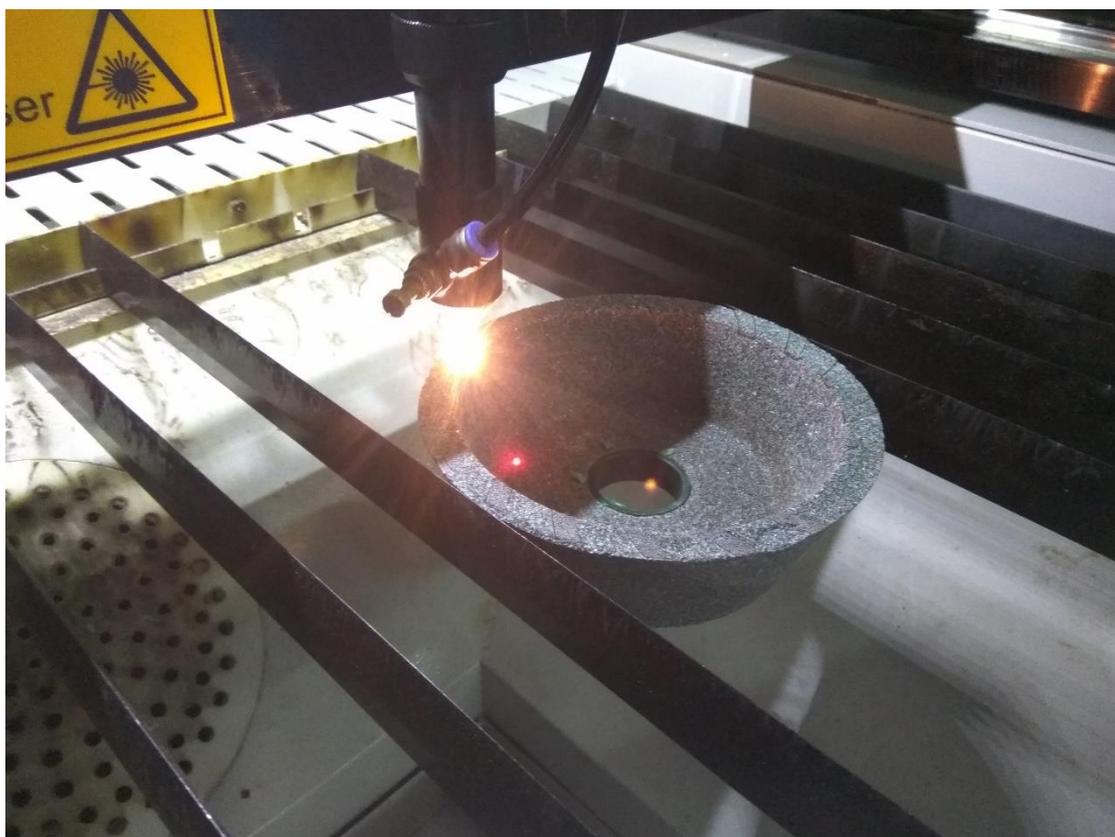


Рисунок 19. Лазерное профилирование чашечного шлифовального круга 100x40x20 мм ЧК 63С.

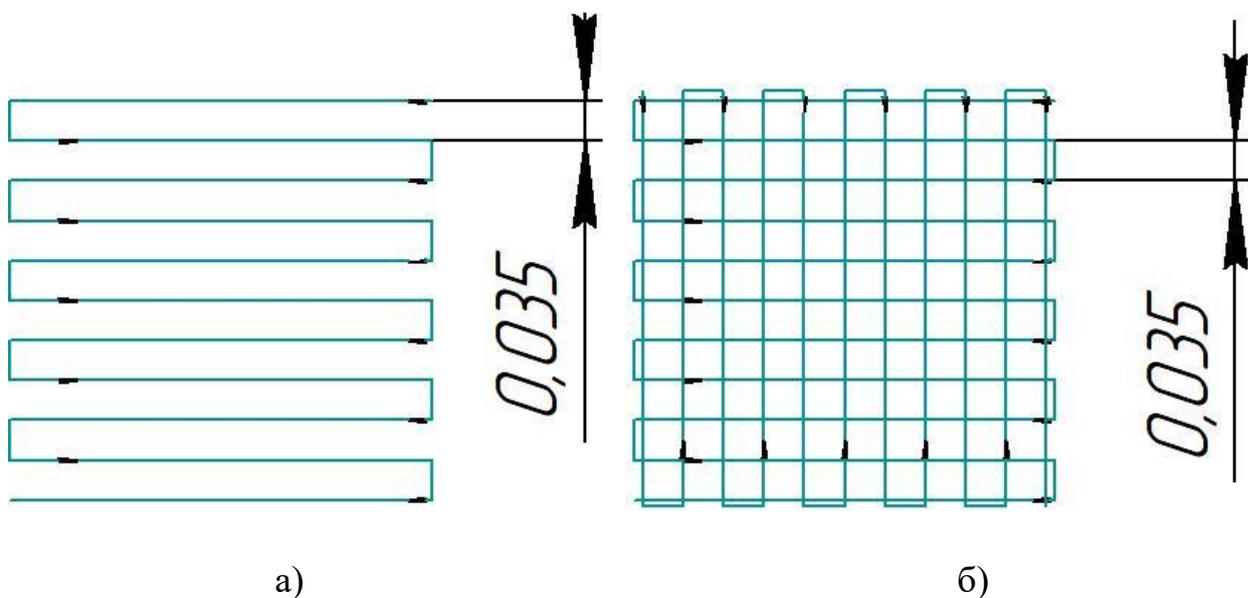


Рисунок 21. Траектории следования лазерного луча с шагом луча 0,035 см: а) параллельная заливка; б) перекрестная заливка.

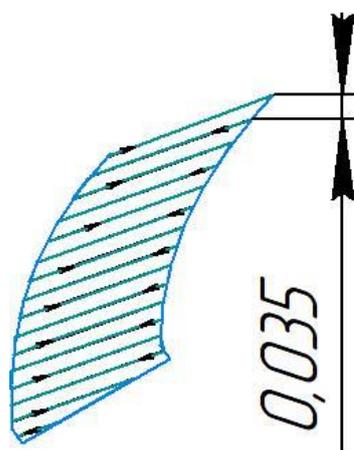


Рисунок 22. Траектория следования лазерного луча для получения профиля, шаг луча (плотность выборки) 0,035 см.

Траектория следования лазерного луча для получения радиальных отверстий на поверхности круга имеет следующий вид (рис. 23). Такая траектория следования обеспечивает полное выжигание абразивного материала из объема радиального отверстия за счет пересечения траектории движения лазерного луча.

Представленная первая схема обработки, проста в настройке и позволяет совмещать операцию правки и профилирования. Для технической реализации требуется трех–четырёх координатная система движения и управления.

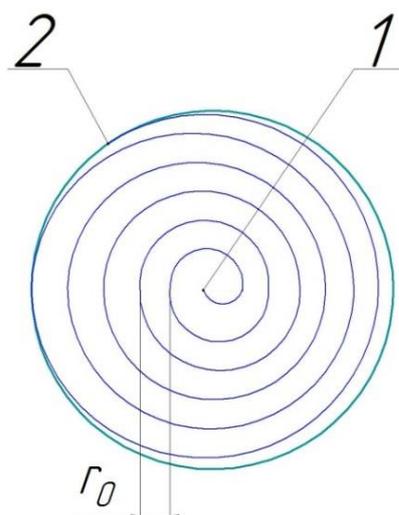


Рисунок 23. Траектория следования лазерного луча для получения радиальных отверстий: 1 – центр формируемого отверстия; 2 – окончание формирования отверстия; r_0 – шаг следования.

Данные процессы обработки можно применять для получения аналогичного профиля шлифовальных кругов изображённых на (см. рис. 1 а,б,г,ж,и,к).

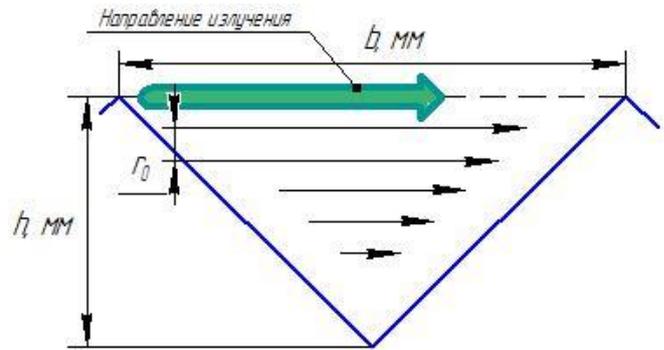
Рассмотрим вторую принципиальную схему, направление луча по касательной к поверхности. Падение луча происходит по касательной к направляющей облучаемой поверхности, кинематическая схема заключается в равномерном вращении круга вокруг своей оси и равномерном прямолинейном перемещении луча или круга относительно друг друга вдоль неё.

Тангенциальное лазерное профилирование улучшает управляемость глубины проникновения лазерного излучения на поверхности круга и позволяет получить точную геометрию периферии круга (рис. 24).

Формирование больших макроструктур также возможно посредством тангенциального лазерного излучения и относительно точного позиционирования лазерного луча на поверхности шлифовального круга в соответствии с желаемой формой. Данную схему обработки можно применять для получения профиля на шлифовальных кругах червячного профиля для операций зубошлифования (рис. 24 а). Траектория следования лазерного луча по профилю круга, в данном случае, будет иметь вид (рис. 24 б).



а)



б)

Рисунок 24. Применение тангенциального лазерного профилирования.

а) –шлифовальный круг червячного профиля для операций зубошлифования.

б) – периферия обработки круга при тангенциальной схеме профилирования.

В случае крупнозернистых шлифовальных кругов с большим средним размером зерен, где требуется более высокий выступ зерен, селективность лазерной обработки будет иметь большое преимущество. Соответственно, за вышеуказанной процедурой может следовать процесс правки и очистки, где мощность лазера устанавливается таким образом, чтобы не повредить зерна и удалить связующий материал.

Фокусное расстояние в ряде случаев применения указанных схем может не позволить работать непосредственно в зоне обработки режущей поверхности, так например, оптические системы лазерной установки при тангенциальном взаимодействии должны иметь длиннофокусные линзы. При использовании данного типа линз мы неизбежно теряем в диаметре сфокусированного излучения из-за оптических искажений. Однако разработанные F-Theta объективы решают множество задач, связанных с лазерной обработкой. Эти объективы обеспечивают улучшенную плавность процесса, позволяют формировать равномерный диаметр пятна, а также увеличивать интенсивность перемещения пятна в плоскости при обработке.

Таким образом, можно сделать вывод, что способом лазерной обработки можно получить любой профиль на режущей поверхности шлифовальных кругов.

5.2. Оптимальные режимы профилирования режущей поверхности шлифовального круга на керамической связке

Одной из задач работы, как уже отмечалось, являлась разработка рекомендаций по совершенствованию технологии профилирования режущей поверхности шлифовальных кругов лазерным излучением.

В соответствии с этой задачей при рассмотрении вопросов интеграции метода в производственный комплекс, были выполнены экспериментальные исследования для определения влияния задающих параметров при профилировании шлифовальных кругов, влияющих на глубину и ширину профиля при использовании CO₂ – лазера с непрерывным излучением.

Исходя из исследований, получены оптимальные технологические параметры лазерной обработки шлифовальных кругов на керамической связке (125 × 20 × 32 25A 60L 6V 50) при радиальной схеме обработки.

Таблица 5.1. Рекомендуемые технологические параметры обработки ШК(125 × 20 × 32 25A 60L 6V 50) лазером с непрерывным излучением.

Параметры Процесс	Длина волны излучения λ , мкм	Мощность излучения P , Вт	Скорость обработки V , мм/с	Фокусное расстояние f , мм	Зазор между соплом и обрабатываемой поверхностью Δ , мм
Профилирование	10,6	60	10	50,8	6
Правка	10,6	40	20	50,8	6
Очистка	10,6	40	40	50,8	5,5

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

В результате комплекса теоретико-экспериментальных исследований решена актуальная научно-техническая задача по совершенствованию технологии профилирования режущей поверхности шлифовального круга лазерным излучением.

1. На основании анализа методов профилирования шлифовальных кругов, перспективным способом обработки, является применение лазерных источников энергии, что позволяет комплексно и целенаправленно модифицировать макро-, микрорельеф и физико-химические свойства режущей поверхности.

2. Установлено, что многокомпонентный состава шлифовальных кругов со связями Si, Al — O, относительно прозрачен в видимой области спектра 0,4–0,7 мкм, но сильно поглощает в окрестности $\lambda \geq 10$ мкм. Поэтому для обработки кругов на керамической связке CO₂-лазер является оптимальным.

3. Построены основные закономерности и взаимосвязи параметров определяющих технологический процесс профилирования шлифовальных кругов лазерным излучением.

4. Получена математическая модель, описывающая влияние задающих параметров технологического процесса лазерного профилирования на показатели эффективности и качества обработки.

5. Определены оптимальные технологические параметры лазерного профилирования шлифовального круга на керамической связке и разработаны технологические схемы профилирования, которые обладают универсальностью, так как позволяют получать различные формы профиля при комбинировании процессов правки, микроструктурирования и очистки режущей поверхности шлифовального круга.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Якимов А. В. Прерывистое шлифование / А. В. Якимов. – Киев-Одесса : Вища школа, 1986. – 176 с.
2. Якимов А. В. Оптимизация процесса шлифования / А. В. Якимов. – М. : Машиностроение, 1975. – 176 с.
3. Морозов А. П. Исследование процесса плоского периферийного шлифования кругом с лазерной дискретизацией режущей поверхности : дис. ... канд. техн. наук / А. П. Морозов. – Владимир, 2010. – 214 с.
4. Ящерицын П. И. Теория резания. Физические и тепловые процессы в технологических системах / П. И. Ящерицын, М. Л. Еременко, Е. Э. Фельдштейн. – Минск : Высшая школа, 1990. – 512 с.
5. Щербаков Д. В. Моделирование тепловых процессов при прерывистом внутреннем шлифовании / Д. В. Щербаков // Известия ТулГУ. Сер. Инструментальные и метрологические системы. Вып. 1. Труды Международной юбилейной НТК «Наука о резании материалов в современных условиях». Ч. 1. – Тула : Изд-во ТулГУ, 2005. – С. 163–167.
6. Гусев В. Г. Технология плоского дискретного шлифования : учебное пособие / В. Г. Гусев, В. В. Морозов ; под ред. д-ра техн. наук, проф. В. Г. Гусева ; Владим. гос. ун-т. – Владимир : Изд-во Владим. гос. ун-та, 2007. – 344 с.
7. Шумячер В. М., Кадильников А. В. Влияние формы поверхности шлифовального круга и ориентации абразивного зерна в связке на начало процесса стружкообразования / В. М. Шумячер, А. В. Кадильников // Станкостроение и инструментальное производство. Технология машиностроения. – 2007. – № 5. – С. 28–34.
8. Блурцян И. Р. Повышение качества поверхностных слоев деталей при внутреннем шлифовании на основе разработки кругов, обеспечивающих повышение

давления СОЖ в зоне обработки : дис. ... канд. техн. наук / И. Р. Блурцян. – Владимир, 2000. – 136 с.

9. Гусев В. Г. Температура поверхностей, шлифуемых дискретными и сплошными абразивными кругами: материалы Всероссийского НТК Теплофизика технологических процессов / В. Г. Гусев, А. В. Морозов, П. С. Швагирев. – Рыбинск : РГАТА, 2005. – С. 34–37.

10. Гусев В. Г. Высокопроизводительные сборные абразивные круги / В. Г. Гусев // Современные проблемы механики и технологии машиностроения : тезисы докладов Всесоюзного НТК. – М. : Станкин, 1989. – 64 с.

11. Поляков А. И. Повышение эффективности внутреннего шлифования цилиндров компрессоров применением сборных комбинированных кругов : автореф. дис. ... канд. техн. наук / А. И. Поляков. – Орел, 2007. – 19 с.

12. Трифонова Ю. В. Исследование процесса формирования геометрии отверстий, шлифуемых кругами с радиально-подвижными, абразивными сегментами : дис. ... канд. техн. наук / Ю. В. Трифонова. – Владимир, 2002. – 215 с.

13. Гусев В. Г. Разрывные и рабочие скорости шлифовальных кругов с лазерной дискретизацией режущей поверхности / В. Г. Гусев, А. В. Морозов, П. С. Швагирев // Известия Тульского гос. ун-та, серия Инструментальные и метрологические системы. Выпуск 2.4.2. – Тула, 2004. – С. 79–83.

14. Гусев В. Г. Критерии оценки дискретных кругов и их влияние на динамику процесса шлифования / В. Г. Гусев, А. В. Морозов, П. С. Швагирев // Станки и инструмент. – 2009. – № 5. – С. 16–20.

15. Полянчиков Ю. Н. Научные основы создания и применения однокомпонентного абразивного инструмента, формируемого импульсным прессованием и высокотемпературным спеканием : дис. ... д-ра техн. наук / Ю. Н. Полянчиков. – Саратов, 2002. – 336 с.

16. Анализ конструктивных особенностей шлифовальных кругов с прерывистой поверхностью / В. Б. Богуцкий Л. Б. Шрон, Б. Л. Шрон, Б. В. Богуцкий // Ученые записки Крымского инженер-но-педагогического университета. Технические науки. Выпуск 35. – Симферополь : НИЦ КИПУ, 2012. – С. 60–64.

17. Волков Д. И. Анализ влияния программируемых изменений скорости продольной подачи на показатели качества поверхностного слоя деталей при глубинном шлифовании / Д. И. Волков, Н. В. Полуглазкова // Материалы Всероссийского НТК. Повышение эффективности механообработки на основе моделирования физических явлений. – Рыбинск : РГАТА, 2009. – С. 219–224.

18. Гусев В. Г. Формирование поверхности в процессе плоского шлифования кругом с лазерной дискретизацией режущей поверхности / В. Г. Гусев, А. В. Морозов, П. С. Швагирев // Материалы Международной НТК «Повышение качества продукции и эффективности производства». Вестник КГУ. – 2006. – № 1. – С. 32–34.

19. Попов В. И. Динамика станков / В. И. Попов, В. И. Локтев. – К. : Техніка, 1975. – 136 с.

20. Гусев В. Г. Конструкции сопел для подачи СОЖ в зону прерывистого шлифования / В. Г. Гусев // Процессы и оборудование абразивно-алмазной обработки // Межвузовский сборник научных трудов ВЗМИ. Вып. 6. – М., 1982. – С. 77–83.

21. Подзолков М. Г. Повышение эффективности внутреннего шлифования на основе разработки продольно-прерывистых кругов с аксиально-смещенным режущим слоем : автореф. дис. ... канд. техн. наук / М. Г. Подзолков. – Орел, 2003. – 22 с.

22. Сефедин И.Д. Теоретический обзор исследований в области процессов шлифования кругами с прерывистой поверхностью / И. Д. Сефедин, Э. Э. Ягъяев // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета: сб. статей. – Симферополь, – 2019. – № 3 (65).

23. Добротворский С.С. Научные основы процесса лазерной правки шлифовальных кругов из сверхтвердых материалов: дис. ... д-р техн. наук: 05.03.17. - Харьковский. гос. университет, Харьков, 1996 - 332 с.
24. Azarhoushang B, Rasifard A. Das Abrichten als ein integraler Bestandteil des Schleifprozesses / Diam Bus: 2014. – № 49: P. 66–73.
25. Tawakoli T, Rasifard A. Dressing of grinding wheels. / In: Jackson JM, Davim PJ (eds) Machining with abrasives // Springer, US, Boston, 2011. – P. 181–244.
26. Linke BS. Wirkmechanismen beim Abrichten keramisch gebundener Schleifscheibe /. Shaker, Aachen, 2007.
27. Marinescu ID. Handbook of machining with grinding wheels / CRC, Boca Raton, 2007.
28. Klocke F, Kuchle A. Grinding, honing, lapping / Springer, Berlin, 2009.
29. Zahedi A, Azarhoushang B, Akbari J et al. Optimization and application of laser-dressed cBN grinding wheels / Adv Mater, 2016. Res 1136: P. 90–96.
30. Pavel R, Pavel M, Marinescu I. Investigation of predressing time for ELID grinding technique / J Mater Process Technol, 2004. – 149: P. 591–596.
31. Rabiey M. Dry grinding with CBN wheels, the effect of structuring / Dissertation, Universitaät Stuttgart, 2011.
32. Azarhoushang B. Intermittent grinding of ceramic matrix composites: unterbrochenes Schleifen von keramischen Faserverbundwerkstoffen / Dissertation, Stuttgart University, Shaker Publication, 2011.
33. Wegener K, Hoffmeister HW, Karpuschewski B et al. Conditioning and monitoring of grinding wheels / CIRP Ann Manuf Technol, 2011. – 60: P. 757–777.

34. Walter C, Komischke T, Kuster F et al. Laser-structured grinding tools— generation of prototype patterns and performance evaluation / J Mater Process Technol, 2014. – 214: P. 951–961.

35. Tawakoli T . Moderne schleiftechnologie und feinstbearbeitung 2014: neue entwicklungen und trends aus forschung und praxis / In: The seminar of moderne schleiftechnologie und feinstbearbeitung // Stuttgart, Volkan, 2014.

36. Zahedi A, Azarhoushang B. Strukturieren und profilieren mittels laser: moderne schleiftechnologie und feinstbearbeitung / In: The seminar of neue entwicklungen und trends aus forschung und praxis // Volkan, 2016.

37. Tawakoli T, Rabiey M. An innovative concept and its effects on wheel surface topography in dry grinding by resin and vitrified bond CBN wheel / Mach Sci Tech, 2008. – 12: P. 514–528.

38. Gadag S. Studying the mechanism of micromachining by short pulsed laser / Southern Methodist University, Dallas, 2011.

39. Varel H, Ashkenasi D, Rosenfeld A et al. Micromachining of quartz with ultrashort laser pulses / Appl Phys, 1997. - A 65: P. 367–373

40. Azarhoushang B. Das abrichten als integraler bestandteil des schleifprozesses: unkonventionelle Abrichtprozesse / Diam Bus, 2014. – 50: P. 82–89.

41. Zahedi A, Tawakoli T, Akbari J et al. Conditioning of vitrified bond CBN grinding wheels using a picosecond laser / Adv Mater Res, 2014. – 1017: P. 573–579.

42. Григорьянц А.Г. Лазерная обработка неметаллических материалов: учебное пособие / А.Г. Григорьянц, А.А. Соколов. – Москва: Высшая школа, 1988. Книга 4 – 191 с.

43. Либенсон М.Н., Яковлев Е.Б., Шандыбина Г.Д. Взаимодействие лазерного излучения с веществом (силовая оптика). Часть II. Лазерный нагрев и разрушение

материалов. Учебное пособие. Под общей редакцией В.П. Вейко – СПб: НИУ ИТМО, 2014. –181с.

44. Ю.М. Климков, В.С. Майоров, М.В. Хорошев. Взаимодействие лазерного излучения с веществом: учебное пособие. — М.: МИИГАиК, 2014.— 108 с.

45. Либенсон М.Н., Яковлев Е.Б., Шандыбина Г.Д. Взаимодействие лазерного излучения с веществом (силовая оптика). Часть I. Поглощение лазерного излучения в твердых телах. Под общей редакцией Вейко В.П. Учебное пособие. Издание второе, переработанное и дополненное.– СПб: Университет ИТМО, 2015. — 130 с.

46. Коденко Н.. Технология лазерной маркировки материалов [Текст] / Н. Коденко, А. Иванов // Новая электроника России: сб. конференции. – 2010. – С. 31-39.

47. Колокатов А.М., Байкалова В.Н. Шлифование абразивным и алмазным инструментом: Учебное пособие / А.М. Колокатов, В.Н. Байкалова. М.: Изд. РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 2015. 76 с.

48. Воронкова Е. М., Гречушников Б. И., Дистлер Г. И., Петров И. П. Оптические материалы для инфракрасной техники. – М. : Наука, 1965. – 315 с.

49. Нечипоренко А.П., Орехова С.М., Плотникова Л.В., Глазачева Е.Н., Волкова К.В., Успенская М.В. Специализированный практикум по физико-химическим методам анализа: электронная и ИК-спектроскопия отражения, люминесцентная и рентгено-флуоресцентная спектроскопия, рефрактометрия, термометрия, кинетическая рН-метрия, индикаторный метод – РЦА. Теория и практика. Часть II. Учебно-методическое пособие. – СПб.: университет ИТМО, 2016. — 181 с.

50. В.П. Вейко, А.А. Петров, А.А. Самохвалов. Введение в лазерные технологии. Опорный конспект лекций по курсу «Лазерные технологии» под редакцией В.П. Вейко.: - СПб: Университет ИТМО, 2018. — 161 с.

51. Гоголева Н.Г. Применение лазеров в науке, технике, медицине. Учебное пособие. СПб: СПбГЭУ «ЛЭТИ», 2006. — 114 с.

52. Полях Д.М. Применение метода планирования эксперимента для изучения некоторых факторов, влияющих на глубину реза при лазерной резке / Д.М. Полях, М.-И. Шейх-Заде, И.Д. Сефедин // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета: сб. статей. – Симферополь, – 2019. – № 2 (64).

53. Теория технических систем : учеб. для студентов вузов, обуч. по направлению подгот. «Инженерная механика» / Ю. Н. Кузнецов, Ю. К. Новоселов, И. В. Луцив ; — Севастополь : Изд-во Севастоп. нац. техн. ун-та, 2010. — 252 с.

54. Большев Л.Н., Смирнов Н.В. Таблицы математической статистики. –М.: Наука, 1983. – 416 с.

55. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике. –М.: Наука, 1980. – 976 с.

56. Чиркин, В. С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники / В. С. Чиркин. – М. : Атомиздат, 1967. – 474 с.

57. Оксид алюминия [Электронный ресурс]: Википедия. Свободная энциклопедия. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/оксидалюминия>.

58. Карборунд [Электронный ресурс]: Википедия. Свободная энциклопедия. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/карборунд>.

59. Диоксид кремния [Электронный ресурс]: Википедия. Свободная энциклопедия. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/диоксидкремния>.

60. Температуропроводность [Электронный ресурс]: Википедия. Свободная энциклопедия. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/температуропроводность>.