

32.86  
Ш1507

**Е. Б. Шершнев,  
С. И. Соколов,  
В. А. Емельянов**



# **ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ В ЭЛЕКТРОНИКЕ**

Минск

ад 4

32.86  
Щ507

Министерство образования Республики Беларусь  
УО «Гомельский государственный университет им. Ф.Скоринь»

ПОЛУЧЕНО В ДАР

Е. Б. Шершнев,  
С. И. Соколов,  
В. А. Емельянов

**ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ  
И ОБОРУДОВАНИЕ  
В ЭЛЕКТРОНИКЕ**

Абонемент № 4

БН № 5011053  
2024

Учредитель и издатель  
"Гомельский государственный университет  
им. Фридриха Скорины"  
**БИБЛИОТЕКА**

Минск  
«Интегралполиграф»  
2023

ББК: 32.853: 32.86-53  
УДК: 621.382: 621.373.826

**Шершнеv, Е. Б.** Лазерные технологии и оборудование в электронике / Е. Б. Шершнеv, С. И. Соколов, В. А. Емельянов. – Минск : Интегралполиграф, 2023. – 198 с. ISBN-978-985-6845-73-7.

В монографии рассмотрены лазерные технологии и оборудование, которые применяются при производстве изделий в электронике. Описано применение лазерного излучения в качестве инструмента обработки как кварцевого сырья, которое применяется при производстве фотошаблонов с высокой степенью чистоты, так и в производстве кварцевых резонаторов. Кроме того, рассмотрено применение лазерного излучения для изготовления жидкокристаллических панелей и в процессе лазерного импульсного термоупрочнения литых прессформ и штампов в производстве корпусов полупроводниковых приборов.

Монография предназначена для инженерно-технических специалистов, аспирантов и студентов технических вузов, специализирующихся в области технологии производства электронной аппаратуры.

Табл. 34. Ил. 173. Библиогр.: 176 наз.

Рекомендовано для издания советом университета учреждения образования «Гомельский государственный университет имени Франциска Скоринь» (протокол № 2 от 26.10.23).

**Рецензенты:**

доктор технических наук, профессор, *А.А. Хмель*  
кандидат технических наук, доцент, *Д.А. Гавосов*

ISBN 978-985-6845-73-7

© Шершнеv Е. Б., Соколов С. И.,  
Емельянов В. А., 2023  
© Оформление.  
УП «Интегралполиграф», 2023

## СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ .....	6
ВВЕДЕНИЕ .....	7
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ .....	9
1.1 Обзор литературы по лазерной обработке стекла .....	9
1.1.1 Применение лазеров в качестве инструмента для обработки .....	9
1.1.2 Методы лазерной обработки стекла .....	11
1.2 Использование кварцевого сырья в производстве фотошаблонов ....	17
1.3 Использование кристаллического кварца при производстве изделий микроэлектроники .....	18
1.4 Использование лазерного излучения при термоупрочнении материалов .....	23
ГЛАВА 2. ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКЕ .....	24
2.1 Оборудование для проведения экспериментальных исследований по лазерной обработке кварца .....	24
2.2 Методика экспериментальных исследований .....	26
ГЛАВА 3. ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА КВАРЦА, ПРИМЕНЯЕМОГО ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ФОТОШАБЛОНОВ И РЕЗОНАТОРОВ .....	30
3.1 Двухволновой способ обогащения кварцевого сырья .....	30
3.1.1 Моделирование двухволнового лазерного способа обогащения кварцевого сырья .....	30
3.1.2 Экспериментальные исследования по двухлучевой лазерной сепарации кварцевого сырья .....	39
3.2 Лазерное управляемое термораскалывание кварца .....	43
3.2.1 Математическое моделирование процессов лазерного управляемого термораскалывания кварцевого стекла .....	43
3.2.2 Моделирование температурного поля при воздействии на материалы лазерным излучением сложной геометрии .....	51
3.2.3 Моделирование лазерного термораскалывания кварца в рамках линейной механики разрушения .....	53
3.2.4 Моделирование процесса лазерного термораскалывания кристаллического кварца, учитывающего анизотропию его теплофизических и упругих свойств .....	65
3.2.5 Моделирование процессов лазерной обработки различных срезов кристаллического кварца .....	73
3.2.6 Экспериментальные исследования по лазерному термораскалыванию кварцевого стекла .....	78

3.3 Процесс лазерной полировки кварцевого стекла.....	90
3.3.1 Построение модели процесса лазерной полировки кварцевого стекла.....	90
3.3.2 Численный эксперимент по лазерной полировке кварцевого стекла .....	93
3.3.3 Экспериментальные исследования по полировке кварцевого стекла.....	97
3.4 Процесс двухлучевой лазерной сварки изделий из кварцевого стекла.....	99
3.4.1 Построение модели процесса двухлучевой лазерной сварки изделий из кварцевого стекла .....	99
3.4.2 Численный эксперимент процесса двухлучевой лазерной сварки изделий из кварцевого стекла .....	106
ГЛАВА 4. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЛАЗЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ В ПРОИЗВОДСТВЕ ИЗДЕЛИЙ ДЛЯ ЭЛЕКТРОНИКИ.....	111
4.1 Разработка способа получения в объеме стекла трещины параллельной поверхности нагрева лазерным излучением.....	111
4.2 Результаты экспериментальных исследований процесса параллельного термораскалывания стекла лазерным излучением с длиной волны 10,6 мкм.....	121
4.3 Оптимизация процесса параллельного термораскалывания стекла с одновременным использованием лазерных излучений с длинами волн 10,6 мкм и 1,06 мкм .....	125
4.4 Особенности формирования металлических пленок на кварцевой подложке при лазерном воздействии .....	128
4.5 Получение прозрачных токопроводящих покрытий реактивным лазерным напылением.....	130
ГЛАВА 5.....	134
РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ТЕРМОРАСКАЛЫВАНИЯ СТЕКЛЯННЫХ ТРУБОК.....	134
5.1 Теоретическое и экспериментальное исследование, разработка процессов резки стеклянных трубок в производстве ЭЛТ .....	134
5.2 Разработка и внедрение лазерной технологической установки резки колец для плоской ножки ЭОС.....	141
5.3 Разработка и внедрение лазерного технологического модуля для резки и оплавления штенгелей в производстве ЭОС .....	145
5.4 Разработка и внедрение лазерной технологической установки для разгерметизации ЭЛТ .....	149

ГЛАВА 6. ИССЛЕДОВАНИЕ, РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ЛАЗЕРНОГО ТЕРМОУПРОЧНЕНИЯ СТЕКЛОФОРМУЮЩЕГО ПРЕССИНСТРУМЕНТА.....	157
6.1 Исследование процесса термоупрочнения пуансонов для прессования экранов ЭЛТ .....	157
6.2 Разработка и внедрение технологического процесса и оборудования для термоупрочнения пуансонов, ножей отсечки стекломассы, раскатников.....	168
6.3 Исследование, разработка и внедрение процесса лазерного импульсного термоупрочнения литевых прессформ и штампов в производстве корпусов полупроводниковых приборов, модернизация оптической системы установки «Квант – 18» .....	175
Список литературы .....	188

## ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

УЛТ	управляемое лазерное термораскалывание
КТЛР	коэффициент термического линейного расширения
МКР	метод конечных разностей
МКЭ	метод конечных элементов
ЭЛТ	электронно-лучевая трубка
ЭОС	электронно-оптическая система
$\nu$	коэффициент Пуассона
$\alpha$	коэффициент температурного расширения;
$\Delta$	двумерный оператор Лапласа
$\lambda$	коэффициент теплопроводности
$a$	коэффициент температуропроводности
$\alpha_{  }$	коэффициент линейного термического расширения в направлении оси симметрии третьего порядка
$\alpha_{\perp}$	коэффициент линейного термического расширения перпендикулярно оси симметрии третьего порядка
$\lambda_{  }$	коэффициент теплопроводности в направлении оси симметрии третьего порядка
$\lambda_{\perp}$	коэффициент теплопроводности перпендикулярно оси симметрии третьего порядка
$\sigma$	механическое напряжение
$R_a$	среднее арифметическое из абсолютных значений отклонений профиля
$R_z$	наибольшая высота профиля, сумма высоты наибольшего выступа профиля и глубины наибольшей впадины
YAG	yttrium aluminum garnet (русс. алюмо-иттриевый гранат)
$v$	скорость перемещения

## ВВЕДЕНИЕ

Для обеспечения развития и конкурентоспособности предприятий Республики Беларусь необходимо повышать качество выпускаемых устройств с уникальными эксплуатационными свойствами. Это можно реализовать за счет улучшения качества уже существующих материалов или разработки новых способов обработки изделий, используемых в электронной технике.

В настоящее время одним из материалов, применяемых в резонаторах и фотошаблонах для субмикронных интегральных микросхем, является кварц. Это обусловлено тем, что кварцевое стекло обладает широкой спектральной областью прозрачности, низким коэффициентом линейного температурного расширения  $0,54 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  и высокой теплопроводностью  $1,38 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ , а кристаллический кварц обладает точной и стабильной частотой. При производстве интегральных микросхем по субмикронным технологиям чистота кварцевых фотошаблонов определяет качество полученных изделий. Кроме того, возникает необходимость обработки испорченных фотошаблонов в фотошаблоны меньших типоразмеров. Частотно-температурные характеристики резонаторов, полученных из кристаллического кварца, определяются точностью среза пластин, вырезанных из кристалла.

Появление первых лазеров в 1960-х годах дало начало развитию новой области науки и техники – лазерной технологии. Создание и совершенствование различных типов лазеров позволяет вести поиск по их применению во многих областях народного хозяйства для повышения производительности процессов обработки материалов, дает возможность в наиболее полном объеме осуществлять автоматизацию производства.

Лазерные технологии в электронике и микроэлектронике освоены во всем мире давно и широко. При этом различные типы лазерной обработки большей частью либо успешно заменяют традиционные методы обработки, либо попросту не имеют аналогов [1–15].

Возможность избирательного локального нагрева, вызывающего возникновение интенсивных температурных полей с большим градиентом температур, обуславливает в объеме материала значительные термоупругие напряжения, распределение которых определяет процесс лазерного термораскалывания стекла [16–19]. Высокие скорости нагрева и охлаждения позволяют использовать лазерное излучение для термоупрочнения за счет фазовых и структурных превращений в поверхностном слое материала.

Описанию процессов лазерной обработки посвящены работы [20–28], где решен ряд частных задач теории теплопроводности и термоупругости как в нелинейной постановке, так и с использованием усредненных значений физических характеристик, приведены экспериментальные исследования, однако до настоящего времени остается не выясненным ряд особенностей физического механизма лазерного термораскалывания стекла.

Особый интерес вызывает применение двух лазерных лучей, которые обладают разной поглощательной способностью. За счет применения лазерного излучения, которое поглощается на поверхности кварца, и лазерного излучения, поглощающегося в объеме материала, появляется возможность регулировать распределение температурных полей и полей термоупругих напряжений, возникающих в кварце при его лазерной обработке. В связи с этим актуальным является проведение более детальных и углубленных исследований в области лазерной обработки кварца, применяемого при производстве кварцевых фотошаблонов и резонаторов.

## ГЛАВА 1 АНАЛИЗ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

### 1.1 Обзор литературы по лазерной обработке стекла

#### *1.1.1 Применение лазеров в качестве инструмента для обработки*

Для обработки материалов используются четыре основных типа лазерных источников. Благодаря непревзойденному соотношению цены и яркости быстрые  $\text{CO}_2$ -лазеры с осевым потоком остаются непревзойденными для лазерной резки плоских листов. Очень надежные  $\text{CO}_2$ -лазеры с диффузионным охлаждением кольцевого разряда и выходной мощностью 2 кВт позволили создать роботизированные лазеры для 3D-обработки. Твердотельные лазеры выбирают в основном из-за возможности доставки излучения по оптоволокну. В промышленных приложениях по-прежнему используются Nd:YAG-лазеры с ламповой накачкой и гарантированной выходной мощностью 4,5 кВт. Появление лазера с диодной накачкой мощностью 4,5 кВт позволяет создавать новые применения лазера, например, оптику с программируемой фокусировкой. Для диодных лазеров электрооптический коэффициент полезного действия выше 65% так же важен, как и пассивация граней для предотвращения деградации мощности при выгорании [29].

Критерием выбора лазера в качестве инструмента для обработки стекла является длина волны излучения. Для обработки стекла наиболее целесообразно использовать лазеры, работающие в инфракрасной области спектра, так как за исключением специальных непрозрачных стекол, остальные относительно слабо поглощают световую энергию в видимой области спектра [30]. Использование неодимовых лазеров с длиной волны генерации в ближней ИК-области спектра  $1,06 \cdot 10^{-6}$  м целесообразно только для специальных стекол, например, для стекла с повышенным содержанием железа. Кроме того, неодимовые лазеры имеют относительно низкий КПД, максимальное значение которого достигает 5 % [17]. Авторами [31] предпринята попытка использовать YAG-лазеры для термической обработки стекла, создана специальная технологическая установка «Квант-20», но крайне низкая производительность и скорость термораскалывания до  $10 \cdot 10^{-3}$  м/с ставят под сомнение эффективность использования YAG-лазеров. Наиболее целесообразно применение  $\text{CO}_2$ -лазеров с длиной волны излучения  $10,6 \cdot 10^{-6}$  м. В этой области спектра почти все

кремнеземистые стекла проявляют высокую поглощательную способность, причем КПД  $\text{CO}_2$ -лазеров выше и составляет (10 – 30) %. Кроме них для резки стекла авторы [32; 33] считают приемлемыми  $\text{CO}$ -лазеры, с длиной волны генерации  $5,5 \cdot 10^{-6}$  м. Кроме вышеперечисленных лазеров, для прецизионной обработки оксидных стекол находит применение излучение лазера на парах стронция Sr с длинами волн 1, 3 и  $6,4 \cdot 10^{-6}$  м [34; 35]. Это обосновано тем, что данная длина волны приходится на область полупрозрачности этих стекол.

В работе [36] авторы осуществляли микроструктурирование кремниевое стекла путем линейного одномерного сканирования плотно сфокусированного фемтосекундного лазерного пучка с видимым спектром и различной поляризацией в основной массе материала. Оптическая микроскопия показала формирование микроструктур, демонстрирующих повышенную экстинкцию в синем диапазоне спектра при линейной или круговой поляризации лазерного пучка. При этом двулучепреломление в микроструктурах не обнаружено.

В [37] рассмотрена практика прецизионной лазерной обработки и изучены закономерности лазерного сверления, резания, фрезерования и разделения материала импульсами лазерного излучения с длительностью от единиц миллисекунд до сотен фемтосекунд. Рассмотрены процессы формирования отверстия при лазерном сверлении во времени, влияние на форму отверстия частоты следования импульсов, экранирование излучения на продуктах абляции, образование полей термонапряжений в зоне обработки, приводящих к трещинообразованию. Проведена классификация процесса лазерного резания материалов, сформулированы и объяснены основные закономерности этого процесса. Приведены экспериментально установленные режимы оптимального резания различных материалов с использованием различных типов импульсных и непрерывных лазеров, позволяющие обеспечить требования, предъявляемые к прецизионной и высококачественной обработке. Рассмотрена и объяснена методика подбора таких режимов. Проанализировано, в каких случаях целесообразно использовать лазерное фрезерование и каким образом оно должно проводиться. Приведены практические примеры лазерного фрезерования. Рассмотрены перспективы и возможности технологии разделения полупроводниковых и диэлектрических материалов за счет использования механизмов лазерного термораскалывания и формирования в материале внутренних зон разрушения. Приведены технические данные и особенности конструкции различных типов отечественных технологических установок для прецизионной обработки.

Лазерное излучение нашло применение в обработке различных хрупких неметаллических материалов, в том числе и керамики и оксидных стекол [38–40]. В этих работах авторы используют различные типы лазеров, такие как  $\text{CO}_2$ - и YAG-лазеры, причем В. К. Сысоев использует лазер не только для разделения различных материалов, но и для сварки, полировки и вытяжки световодов.

В последнее время различные авторы осуществляют резку стекла с помощью применения одновременного нагрева поверхности и объема стекла излучением двух лазеров, причем длина волны одного должна быть не менее  $4 \cdot 10^{-6}$  м, второго более  $6 \cdot 10^{-6}$  м [40–44].

В настоящее время наиболее эффективным методом разделения хрупких неметаллических материалов является управляемое лазерное термораскалывание, отличительная особенность которого заключается в том, что разделение материала происходит вследствие образования микротрещины, формируемой в результате поверхностного нагрева материала лазерным излучением в сочетании с последующим охлаждением зоны нагрева хладагентом. К основным преимуществам УЛТ относятся высокая точность и безотходность разделения, а также высокая скорость обработки. Исследования по данной тематике получили развитие в Республике Беларусь [45–47], России [49–56], Германии [57–61], США [62–64], Китае [65–69] и в других странах.

### *1.1.2 Методы лазерной обработки стекла*

Согласно классификации В. Стина и Дж. Камолу [70] принято различать пять основных способов лазерного разделения материалов, которые включают: резку испарением, резку плавлением с выдуванием расплава из зоны нагрева, газолазерную резку с использованием активных газов, инициирующих горение и удаления продуктов разложения из зоны нагрева, термораскалывание хрупких материалов и лазерное скрайбирование.

Лазерная резка испарением обычно применяется для обработки кварцевого стекла, обладающего низким коэффициентом линейного термического расширения, сравнительно редко используется для многокомпонентных силикатных стекол, разделение которых невозможно без предварительного подогрева. Наиболее детально этими вопросами занимался К. Чуи [71]. Он использовал три типа  $\text{CO}_2$ -лазеров отличающихся мощностью:  $0,4 \cdot 10^3$  Вт,  $6 \cdot 10^3$  Вт,  $1,8 \cdot 10^4$  Вт. Толщина разделяемого стекла изменялась в интервале  $(1,6 - 3,2) \cdot 10^{-3}$  м. Установлено, что оптимальная температура, до которой разрезаемое стекло должно быть подогрето, составляет около 863 К. Продукты, образующиеся в процессе резания,

удалялись вакуумным насосом. По данным работы [15] величина удельной энергии резания, рассчитанная по экспериментальным значениями, содержащимся в работах Дулея [72], Стельмаха [73], Бабенко [74], составляет  $(4,0 - 5,6) \cdot 10^{10}$  Дж/м, что больше чем в работе Г. А. Мачулки [75] ( $3,26 \cdot 10^7$  Дж/м<sup>3</sup>). Такое расхождение связано с тем, что К. Чуи использовал вакуумный метод удаления продуктов испарения, а в работах Г. А. Мачулки отсутствовал вспомогательный газ. Таким образом, величина удельной энергии процесса зависит от способа удаления продуктов взаимодействия лазерного излучения с веществом.

Повысить производительность процесса можно, если применить поддув в зону нагрева струи активных газов. Например, авторами [76] использованы водородосодержащие смеси. Дальнейшее увеличение производительности возможно лишь экстенсивным путем, за счет увеличения уровня выходной мощности лазеров. По данным отечественных и зарубежных публикаций для обеспечения конкурентоспособности метода мощность лазерного излучения должна быть не менее  $(1 - 5) \cdot 10^3$  Вт [77-80].

Другой метод резки стекла – лазерное скрайбирование, заключается в нанесении по линии разделения чередующихся канавок и отверстий [81; 82]. Этот метод использовали Вольтер [83] и Мачулка [17]. Следует отметить, что при таком методе важно обеспечить достаточную плотность мощности лазерного излучения в зоне возгонки и испарения материала. По данным [81] она должна составлять не менее  $1 \cdot 10^{10}$  Вт/м<sup>2</sup>. Высокие скорости формирования зоны с пониженным уровнем прочности [84] ставят этот метод в более выгодное положение с энергетической точки зрения. Однако рассматриваемые процессы обладают рядом существенных недостатков, один из которых – загрязнение поверхности материала продуктами возгонки и испарения. Прочность таких изделий низка из-за появления остаточных напряжений в области плавления и возгонки материала, а также образования большого количества микротрещин на краях разламывания стекла.

Перечисленных недостатков лишен метод лазерного сквозного термораскалывания стекла [81; 85; 86]. Первые исследования процесса проведены Р. М. Ламли [81] и получили дальнейшее развитие в работах Г. А. Мачулки [87]. Сквозное управляемое термораскалывание также рассмотрено и в других работах [38; 40; 43; 54; 88], где определены оптимальные режимы процесса, а также показано, что термораскалывание осуществляется последовательно через три основных этапа: зарождение трещины, распространение ее с некоторым запаздыванием по отношению к лазерному пучку и завершающий этап, для которого характерно

искривление траектории разделения и опережающее зону нагрева неуправляемое развитие сквозной трещины. Установлено, что за счет применения эллиптической формы лазерного пятна с плотностью мощности  $4 \cdot 10^5 - 1,5 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup> может быть улучшено качество термораскалывания. Однако не в полной мере устраняются проблемы, связанные с искривлением линии резки при несимметричном термораскалывании стекла [88]. Все это привело к необходимости поиска нового универсального метода термораскалывания, который наряду с энергоэкономичностью обладал бы достаточной для промышленных условий производительностью. Сущность метода заключается в нагреве поверхности стекла лазерным излучением и подаче хладагента (воздушно-водяной смеси) в зону нагрева. Изменяя параметры лазерного излучения и технологического процесса, добиваются управляемого развития микротрещины на определенную глубину.

На скорость термораскалывания существенное влияние оказывает плотность мощности лазерного пучка и его форма. Помимо этого, важную роль играет состав хладагента и место его подачи в зону нагрева. Для каждого режима термораскалывания существует максимальное и оптимальное расстояние от лазерного пучка до области подачи хладагента. Изменение расстояния отражается на изменении глубины микротрещины, которая возрастает с увеличением времени прогрева по глубине стекла. Кроме этого, глубина микротрещины практически линейно возрастает с увеличением интенсивности охлаждения воздушно-водяной смесью до достижения оптимального расхода воды порядка  $2 \cdot 10^{-4}$  л/с при давлении воздуха  $1,23 \cdot 10^5$  Па.

Из рассмотренных выше способов резки стекла управляемое термораскалывание на заданную глубину обладает очевидными преимуществами, о чем говорит высокая производительность процесса, которая достигает 0,2 – 0,4 м/с при резке стеклодеталей для жидкокристаллических индикаторов. Однако технологические возможности этого метода до настоящего времени не исчерпаны, и ряд его особенностей требует углубленного изучения.

В зависимости от выбранных параметров лазерной обработки стекла, включая режим работы лазера, скорость относительного перемещения лазерного пучка и стекла, мощность лазера и др., реализуются условия, среди которых преобладает один из нижеперечисленных факторов:

- возникают напряжения, локализованные в малом объеме;
- локальный нагрев до температуры равной или превышающей температуру плавления стекла в зоне лазерного нагрева;
- испарение стекла в зоне лазерного нагрева.

Взаимодействие лазерного излучения со стеклом представляет собой очень сложный процесс, зависящий от совокупности факторов. Математическая модель связанных с этим взаимодействием тепловых процессов сводится к решению частного дифференциального уравнения теплопроводности с источниками, описывающими распределение интенсивности лазерного излучения по сечению лазерного пучка на поверхности обработки. Обзор физических моделей распределения температуры в материале при лазерной обработке содержится в работе Буркхордта [89], где приведены решения отдельных частных задач. Специально для обработки стекла попытки инженерных расчетов и математического моделирования предприняты в работах [17; 90]. Вопросам разрушения оптического стекла под действием лазерного излучения посвящены работы [91–93]. По мнению авторов работы [30], в каждом случае речь идет о деструктивных эффектах, которые строго локализованы. Некоторые задачи, связанные с применением лазерного излучения для обработки материалов, рассмотрены в [72; 73].

Определяющий вклад в температурные поля, вызываемые движущимся лазерным пучком, вносит распределение температуры в плоскости, перпендикулярной направлению относительного перемещения лазерного пучка и стекла. Численный расчет решения уравнения теплопроводности для полубесконечного пространства с адиабатической границей показывает, что расстояние от лазерного пучка до хладагента необходимо выбирать из условия нагрева стекла до температуры, превышающей термостойкость, которая характеризуется способностью выдерживать, не разрушаясь, резкие изменения температуры.

Кроме математического моделирования для определения температурных полей и полей термоупругих напряжений применяется численное моделирование. Численные методы становятся все более важными при исследовании и разработке новых и инновационных процессов в технологии лазерной обработки материалов [93–95]. Определение температурного поля является важнейшей предпосылкой для определения структурных изменений в материалах, способных к трансформации, и напряженных состояний в них. На начальном этапе авторы рассматривают аналитические температурные модели, которые характеризуются простым моделированием источников тепла. Аналитические модели дают возможность очень быстро оценить основные влияющие параметры. Решения первых аналитических моделей не подходят для дифференцированного рассмотрения микроструктурных распределений и остаточных напряжений. Уравнение нестационарной теплопроводности можно представить в виде дифференциального уравнения второго порядка параболического типа. На качество результата численного анализа влия-

ют параметры материала, которые зависят от температуры и структуры. Аналитическое решение этого дифференциального уравнения возможно только при особых предположениях для тепловой нагрузки и физических значений материала. Решения для произвольных источников тепла и зависящих от температуры свойств материала не существует. Поэтому для расчета переходного температурного поля в процессах лазерной обработки используются методы аппроксимации, например, метод конечных элементов (МКЭ) и метод конечных разностей (МКР).

В работах [96; 97] приведена модель лазерного управляемого термораскалывания кварцевого стекла и ее решение. Однако такая модель не учитывает зависимость свойств материала от температуры обработки, что является влияющим фактором, определяющим температуру на поверхности материала при выбранных параметрах обработки, что отмечали авторы [93–95]. Причем зачастую такая зависимость имеет сложную форму, которую нельзя однозначно записать в виде функциональной зависимости. Учесть такое влияние позволяет численное моделирование с использованием метода конечных элементов.

Многие модели решают уравнение теплопроводности без учета сложного взаимодействия между источником тепла и материалом, фазовым переходом твердое тело – жидкость. В целом, влияние измененного температурного поля, которое возникает при учете поглощения или выделения тепла в области фазового перехода, на распределение напряжений пренебрежимо мало. Если моделирование все же требует такого учета, то это можно сделать, изменив значения материалов. Для более точных расчетов необходимо учитывать повышение удельной теплоемкости в диапазоне температуры обработки, интерполяцию температуры по интервалу температур обработки.

Анализ инженерных и точных математических решений для моделирования процессов лазерного управляемого термораскалывания стекла показывает, что в настоящее время отсутствует комплексная модель процесса, позволяющая учесть влияние различных факторов, в том числе временную и пространственную асимметрию теплового лучистого потока по отношению к траектории резки, влияние поверхностной теплоотдачи и объемного поглощения лазерного излучения.

В последнее время большое внимание уделяется изучению особенностей лазерного термораскалывания различных кристаллов [98; 99]. Актуальность данного направления исследований обусловлена существенными недостатками традиционных способов разделения кристаллов, к которым относятся значительные потери обрабатываемого материала и загрязнение рабочих поверхностей. Среди публикаций по данной тематике особый интерес вы-

зывают работы, посвященные изучению управляемого лазерного термораскалывания кристаллов кварца [100]. Важность исследования особенностей применения этой технологии для обработки кристаллов кварца обусловлена широким промышленным применением кварцевых кристаллических элементов, годовое потребление которых превышает 1 млрд. дол. в год [101]. В данных работах показана принципиальная необходимость учета кристаллографической ориентации обрабатываемого материала при выборе параметров лазерного термораскалывания. Однако авторы акцентируют внимание лишь на анизотропии теплового расширения кристаллов кварца, при этом не учитывают зависимости от кристаллографического направления других свойств этих кристаллов.

В основе традиционных методов сварки кварцевого стекла лежит использование газовой горелки. Основным недостатком метода является низкая точность и низкая производительность. Благодаря высокой концентрации энергии в лазерном пучке и высокой точности локализации лазерного излучения лазер позволяет добиться более высокой производительности и точности обработки по сравнению с традиционными методами. Развитие лазерной сварки происходит довольно интенсивно, однако широкое внедрение сварки кварцевых изделий сдерживается недостатком физико-химических исследований процессов лазерной сварки. Известно, что успешное решение внедрения некоторых процессов лазерной сварки реализовано с использованием двухлучевых методов обработки. Отметим, что в настоящее время успешно применяются двухлучевые схемы сварки металлов [102].

Использование лазерного излучения при полировке стеклянных изделий используется достаточно давно [103]. В работе отмечается, что использование механической обработки обладает рядом технологических проблем, таких как использование дорогостоящих абразивов и технологического оборудования. Применение традиционной технологии становится дорогим, а при этом необходимое качество обработки поверхности становится недостижимым. Также отмечается, что в настоящее время применение лазерного метода для задач, связанных с полировкой и формообразованием рельефа стеклоизделий, ограничивается из-за возникновения внутренних напряжений в процессе лазерной обработки, вследствие чего с течением времени растрескивается поверхностный слой, что для высокоточных стеклоизделий приборостроения недопустимо. Эти же проблемы характерны и для лазерной полировки кварцевого стекла.

Известны примеры реализации лазерной полировки кварцевых стекол с использованием излучения  $\text{CO}_2$ -лазера [104–107]. В работах [106; 107] отмечена высокая скорость лазерной полировки, а также возможность

обработки поверхностей различной формы. Кроме того, в этих работах уделяется внимание моделированию процесса лазерной полировки. В них проведено как математическое моделирование, так и численное. Численное моделирование позволяет изучать тепловые и механические изменения во время процесса полировки в кварцевом стекле и изменять параметры для полировки. В процессе численного моделирования можно провести анализ влияния изменений параметров обработки на распределение температурных полей и полей термоупругих напряжений.

В работе [104] обращается внимание на возможность автоматизации процесса полировки лазерным излучением изделий из кварцевого стекла и отсутствие загрязнений нагреваемого объекта источниками нагрева. Однако, лазерной полировке присущ ряд недостатков, затрудняющих ее дальнейшее широкое промышленное распространение [106; 107] и обуславливающих необходимость проведения исследований лазерной полировки кварцевого стекла с использованием излучения  $\text{CO}_2$ -лазера.

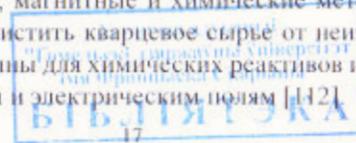
Следует отметить, что для лазерной обработки различных материалов, в том числе и кварцевого стекла, разрабатываются системы управления и автоматизации технологического процесса [108; 109].

## 1.2 Использование кварцевого сырья в производстве фотошаблонов

Фотошаблоны, используемые для производства микросхем, являются важной составляющей данного производства. При их изготовлении применяют такие материалы, как боросиликатное стекло, натриево-кальциево-силикатное стекло и кварцевое стекло. Кварцевое стекло характеризуется высокой твердостью и химической устойчивостью, устойчиво к воздействию воды, щелочных и кислых растворов. При уменьшении размеров транзисторов возникает необходимость применения лазерного излучения меньшей длины волны, что определяет целесообразность использования кварцевого стекла для изготовления фотошаблонов [110]. При этом чистота кварцевого сырья, используемого при изготовлении фотошаблонов, оказывает существенное влияние на эксплуатационные характеристики фотошаблонов [111].

Основными примесями, присутствующими в кварцевом сырье, являются различные полевые шпаты, слюда и сфен. На данный момент самыми распространенными методами очистки кварцевого сырья от примесей являются электрические, магнитные и химические методы. Однако эти методы не позволяют очистить кварцевое сырье от незыбливаемых примесей, которые не доступны для химических реакций и которые не чувствительны к магнитным и электрическим полям [112].

БН 501053



### 1.3 Использование кристаллического кварца при производстве изделий микроэлектроники

Кристаллический кварц является одним из самых распространенных соединений. Однако в природе прозрачные кристаллы кварца встречаются довольно редко, что делает чистый кварц ценным техническим сырьем, которое часто применяется в электронной технике. При этом кристаллы кварца обладают уникальным набором свойств, т. е. сочетают в себе высокую механическую прочность, химическую стойкость и диэлектрические свойства с выдающимися пьезоэлектрическими свойствами. Такое сочетание свойств позволяет создавать пьезоэлектрические устройства, которые должны обладать высокой стабильностью работы.

При разной температуре образования кристаллов кварца формируются различные разновидности кристаллов. В зависимости от температуры образования кристаллы кварца обозначаются различными буквами греческого алфавита. При температуре от 846 до 1153 К образуется  $\alpha$ -кварц, а при температуре до 846 К –  $\beta$ -кварц. При температуре от 1153 до 1743 К образуется тридимит, а при температуре от 1743 до 1983 К – кристобалит, которые представляют собой высокотемпературные модификации кварца. Выше 1983 К любой вид кварца переходит в жидкое состояние. Главное значение в технике имеет  $\beta$ -кварц, обладающий пьезоэффектом. На рисунке 1.1 показано расположение атомов в кристалле  $\beta$ -кварца в проекции на плоскость, перпендикулярную оси Z.

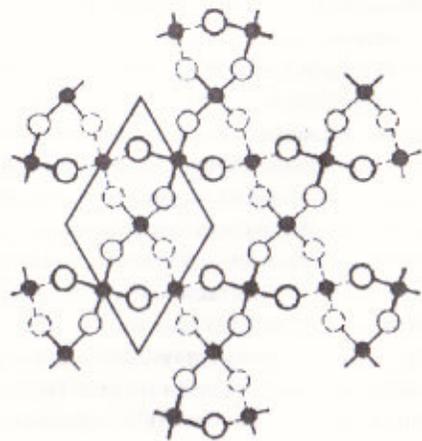


Рисунок 1.1 – Расположение атомов в кристалле  $\beta$ -кварца

Форма кристалла кварца показана на рисунке 1.2. Кристалл кварца имеет вид шестигранной призмы с двумя шестигранными пирамидами на концах. В таком виде кристаллы кварца встречаются редко, т. к. вследствие естественных причин и при добыче кристаллы обычно в большей или меньшей степени разрушаются.

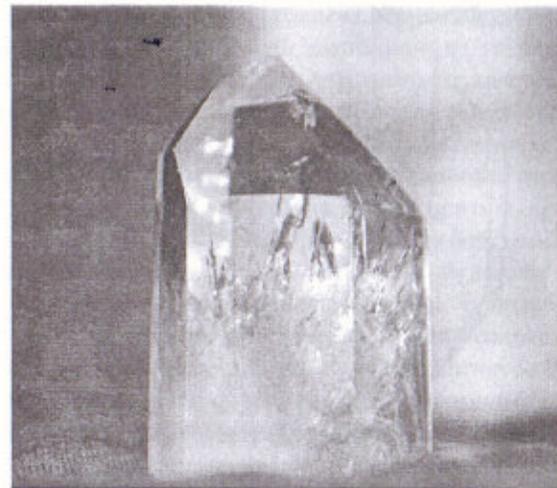


Рисунок 1.2 – Форма кристалла кварца

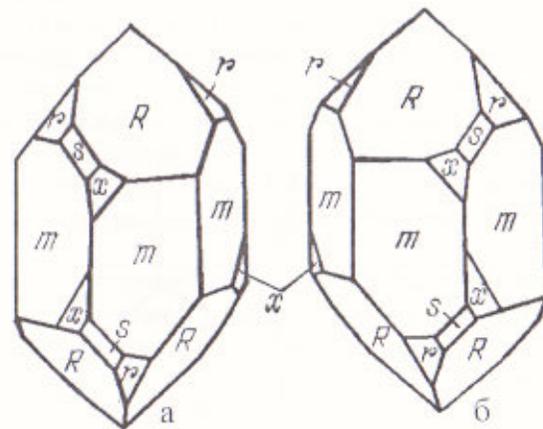


Рисунок 1.3 – Левый (а) и правый (б) кристаллы кварца

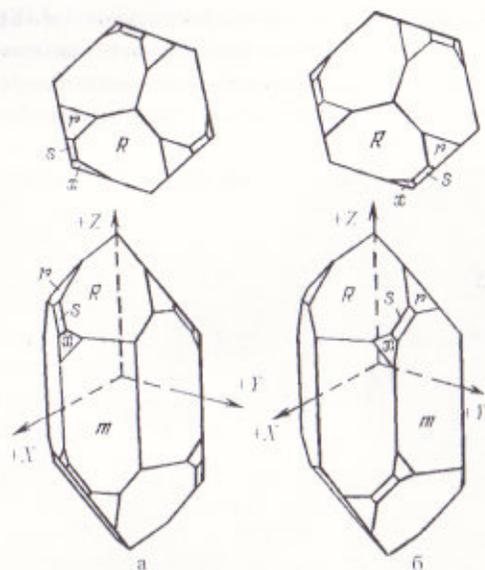


Рисунок 1.4 — Левый (а) и правый (б) кристаллы кварца с кристаллографическими осями

Форма кристалла кварца образована гранями пяти видов (рисунок 1.3). Этим граням в кристалле кварца по шесть (всего в кристалле может быть до 30 граней): *m*-грань, или призматические (грань гексагональной призмы); *R*-грань, или грань большого ромбоэдра; *r*-грань или грань малого ромбоэдра. Три треугольные грань *R* и три грани *r* на концах кристалла образуют шестигранный конус. Кроме того, имеются еще грань тригональной би-пирамиды *S* и тригонального трапецоэдра *x*. Эти грани редко сохраняются на кристаллах и расположены у грани большого ромбоэдра (*R*-грань). По их положению кристалл кварца определяется как левый или правый.

В природе встречаются правый и левый кристаллы, являющиеся зеркальным отображением друг друга.  $\alpha$ -кварц принадлежит к гексагональной системе тригонально-трапецоэдрического класса,  $\beta$ -кварц — к тригональной системе.

При рассмотрении пьезоэлектрических явлений в кварце удобно пользоваться прямоугольной системой координат с обозначением осей *X*, *Y*, *Z*, принятым в математике и физике. Хотя эти оси сдвинуты на определенные углы к истинным кристаллографическим осям кварца, их обычно называют кристаллографическими осями (рисунок 1.4).

Понятие оси относится к неограниченному числу параллельных любой из кристаллографических осей линий, по которым физические свойства однородного кристалла кварца идентичны. Ось *Y* (механическая ось) проходит в направлении, перпендикулярном любой грани призмы. Осей *Y* в кристалле кварца три (рисунок 1.5).

Ось *X* (электрическая ось) направлена перпендикулярно оси *Y* и, следовательно, проходит параллельно какой-либо из граней призмы. Три электрические оси *X* расположены в плоскости, перпендикулярной оптической оси, под углом  $120^\circ$  друг к другу. Каждая из механических осей *Y* перпендикулярна оптической оси и одной из электрических осей.

По оси *X* механические силы вызывают наиболее интенсивное возникновение электрических зарядов на ребрах призмы, кристалл кварца обладает наибольшими пьезоэлектрическими свойствами. Электрическое напряжение, приложенное вдоль оси *X*, вызывают механические напряжения вдоль оси *Y*. Ось *Z* (оптическая ось) направлена перпендикулярно плоскости, образуемой осями *X* и *Y*, она совпадает с продольной осью кристалла. Направление *Z* называется оптической осью потому, что, когда в этом направлении через кристалл проходит поляризованный свет, плоскость поляризации поворачивается.

За положительное направление оси *Y* как в правом, так и в левом кристаллах принимают то ее направление, в котором она пересекает грань *m*-призмы, расположенную под гранью малого ромбоэдра кристалла.

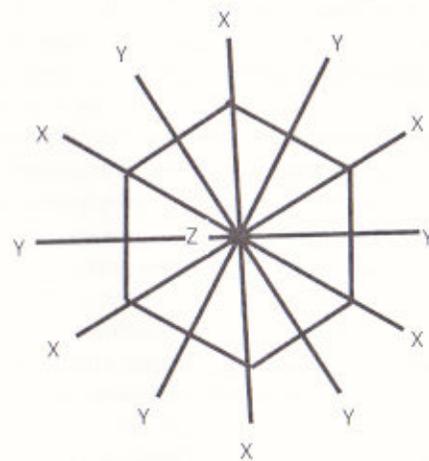


Рисунок 1.5 — Расположение кристаллографических осей

Положительные направления осей X и Z выбирают таким образом, чтобы при выбранном положительном направлении оси Y эти оси образовали правую прямоугольную систему координат. При этом ребро гексагональной призмы m, соединяющее две грани трапецоэдра X, пересекается осью X в левом кристалле в ее положительном направлении, а в правом кристалле – в ее отрицательном направлении.

Условные обозначения срезов для правых и левых кристаллов кварца устанавливаются как общие при расположении кристаллографических осей согласно рисунку 1.4. Как для правых, так и для левых кристаллов применяется правая прямоугольная система координат.

Кварцевый кристалл имеет наиболее точную и стабильную частоту. По этой причине кварцевый кристалл используется как существенный электронный узел для различных устройств. Кварцевый кристалл, который преобразовывает точные механические вибрации в электрические сигналы, используют в качестве источника асинхронизированной опорной частоты для различных типов интегральных схем, цветного сигнала для фотографических устройств, сигнала для часов и т. д. Кварцевые кристаллические устройства стали ключевой частью в современном обществе, даже компьютер не обходится без кварцевых кристаллических устройств. Кварцевые кристаллические устройства включают: кварцевые кристаллические элементы, кристаллические генераторы, кристаллические фильтры, видеоустройства, оптические устройства и др. Кварцевые кристаллические элементы, как например, пластины AT- и GT-срезов, имеют нулевой температурный коэффициент в широком температурном диапазоне (с комнатной температурой в центре графика), и, следовательно, имеют отличные частотно-температурные характеристики. Кроме того, кварцевые кристаллические элементы чрезвычайно стабильны как физически, так и химически, и, следовательно, частотное изменение при старении будет чрезвычайно небольшим. Благодаря этой частотной устойчивости, кварцевые кристаллические элементы использованы для устройств связи, например, в сотовых телефонах и беспроводных устройствах, а также в таких потребительских товарах как телевизоры, видеопроигрыватели, цифровые камеры и компьютеры, чтобы обеспечивать точные сигналы для обработки огромного объема информации одновременно и быстро. Кроме того, кварцевые кристаллические элементы широко используются как источник стандартных сигналов для наручных часов, секундомеров и т. д. Кристаллы кварца используются в ультразвуковых установках, часах, ячейках памяти компьютеров, волноводах. На основе кварцевых резонаторов различных срезов выпускаются прецизионные датчики температуры, давления, усилия, влажности, ускорения.

#### *1.4 Использование лазерного излучения при термоупрочнении материалов*

Существуют технологии лазерной термообработки, легирования и наплавки импульсными и непрерывными лазерами в машиностроении. В [113] Рассмотрены особенности формирования структуры металла и механизмы упрочнения, а также изменение таких свойств, как износостойкость, коррозионная стойкость, сопротивление усталости и теплоустойчивость. Даны конкретные примеры применения лазерных методов обработки поверхностей деталей машин. В [114] приведены сведения о возможности применения лазерной закалки для уменьшения механического изнашивания рабочих поверхностей штампового инструмента – типа гибочных матриц и пуансонов. Проведен анализ путей обеспечения работоспособности рабочего инструмента штамповой оснастки, материалов и влияние легирующих элементов на их свойства. Приведены характеристики лазерного луча и установок, способных проводить лазерное упрочнение и влияние режимов обработки на свойства упрочненной поверхности.

В [115] предложены эмпирические математические модели лазерного упрочнения рабочих кромок деталей формовых комплектов стеклоформующих машин, которые позволили установить взаимосвязь между параметрами обработки и характеристиками зоны упрочнения – твердостью и глубиной. Определен наиболее рациональный режим лазерного упрочнения рабочих кромок деталей формовых комплектов. В [116] выявлено, что в настоящее время невозможно представить изготовление деталей без финишной упрочняющей обработки. С её помощью можно повысить прочностные характеристики любого металла. В зависимости от состава и назначения заготовки, её можно подвергать разным видам упрочняющей обработки таким, как: отжиг, закалка, старение и химико-термическая обработка, а также поверхностное упрочнение лазером.

## ГЛАВА 2. ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКЕ

### 2.1 Оборудование для проведения экспериментальных исследований по лазерной обработке кварца

Для осуществления процессов лазерного термораскалывания кварцевого стекла и кристаллического кварца использовался лазерный технологический макет [117]. Макет обладает следующими техническими характеристиками:

- длина волны излучения  $\text{CO}_2$ -лазера  $10,6 \cdot 10^{-6}$  м;
- режим излучения  $\text{CO}_2$ -лазера непрерывный;
- средняя мощность излучения – не менее 60 Вт;
- рабочий ход по оси X –  $500 \cdot 10^{-3}$  м;
- рабочий ход по оси Y –  $500 \cdot 10^{-3}$  м;
- минимальный шаг –  $0,01 \cdot 10^{-3}$  м;
- режим излучения YAG-лазера непрерывный;
- длина волны излучения –  $1,06 \cdot 10^{-6}$  м;
- мощность излучения –  $250 \pm 25$  Вт;
- расходимость излучения по уровню 0,5 мощности – 14 мрад.

В состав координатной системы, изображенной на рисунке 2.1, входит: координатный стол и система ЧПУ SINUMERIC 802S.

Система ЧПУ SINUMERIC 802S представляет собой микропроцессорную систему числового программного управления с приводами на шаговых двигателях.

В макете установки для лазерной резки используется газовый лазер ИЛГН-802.

Относительная величина мощности лазерного излучения контролируется с помощью индикатора мощности системы питания, испытания и контроля работы излучателя.

Подача хладагента – воздушно-водяной смеси – осуществляется с помощью форсунки-распылителя в виде мелкодисперсного тумана. Форсунки установлены с возможностью их прецизионной настройки относительно линии нагрева в трех взаимно перпендикулярных направлениях. Настройка осуществляется с помощью микрометри-

ческих винтов. Механизм подачи хладагента содержит регулятор давления сжатого воздуха с манометром и регулятор подачи воды с расходомером.

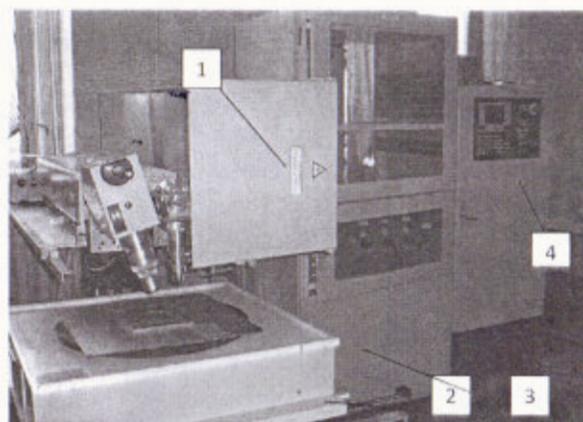


Рисунок 2.1 – Экспериментальная установка, общий вид 1 – защитный кожух; 2 – координатный стол; 3 – силовой шкаф; 4 – ЧПУ SINUMERIC 802S

Экспериментальные исследования процесса лазерной полировки кварцевых стекол и обогащения кварцевого сырья были выполнены на установке для лазерной обработки материалов. На рисунке 2.2 представлен ее общий вид.

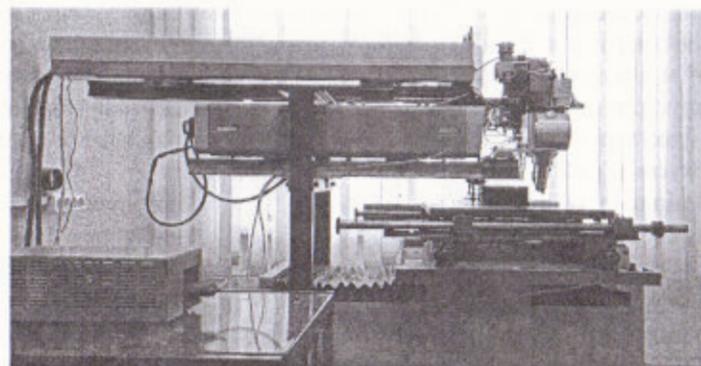


Рисунок 2.2 – Общий вид установки для лазерной полировки кварцевого стекла

Отличием установки для полировки от установки, приведенной на рисунке 2.1, является то, что управление на ней проводилось через компьютер с использованием микроконтроллера Arduino.

## 2.2 Методика экспериментальных исследований

В соответствии с направлениями исследований разработана методика эксперимента, включающая в себя измерение параметров лазерного излучения в зависимости от типа лазера, соответствующего в наибольшей мере решению поставленной задачи, обладающего необходимыми параметрами излучения. К ним относятся: мощность излучения для лазеров, работающих в непрерывном режиме, энергия излучения и длительность импульса, определяющая мощность лазеров в импульсном режиме, плотность мощности, форма и размеры пучка на поверхности материала.

Измерение мощности лазерного излучения производилось при помощи калориметрического измерителя мощности типа ТИ-3, а энергия импульсного излучения измерялась с помощью прибора ИМО-2Н, рассчитанных на работу в диапазоне  $10,6$  и  $1,06 \cdot 10^{-6}$  м. Для учета поглощения излучения в фокусирующей оптике приемник излучения располагался после фокусирующей линзы так, чтобы размеры пучка на приемном элементе соответствовали размерам входного окна.

Значение плотности мощности лазерного излучения определялось как отношение измеренной мощности излучения к площади сечения пучка на поверхности материала. Линейные размеры пучка измерялись по видимому следу, оставленному лазерным излучением на оргстекле при нагревании его в течение  $1$  с для излучения  $10,6 \cdot 10^{-6}$  м и по видимому следу окисления на поверхности стали для излучения  $1,06 \cdot 10^{-6}$  м. При длине волны генерации  $10,6 \cdot 10^{-6}$  м для формирования на поверхности обрабатываемого материала пучка круглого сечения применялись выпуклые и двояковыпуклые сферические фокусирующие линзы из монокристалла хлорида натрия с различным фокусным расстоянием.

С помощью комбинированной сферическо-цилиндрической оптики на поверхности материала получали лазерный пучок эллиптической формы. Для получения пучков специальной геометрии разработаны оптические системы, обеспечивающие формирование лазерного излучения по кольцевому и прямоугольному контуру.

Для предварительной оценки эффектов взаимодействия лазерного излучения со стеклом производились измерения геометрических размеров микротрещины с использованием микроскопа типа МБС-2 (рисунок 2.3), ММУ-3 (рисунок 2.4). Для более точного определения

формы и размеров места взаимодействия использовалась система, состоящая из объектива и USB-камеры, подключенной к компьютеру (рисунок 2.5). Оценка остаточных напряжений в стекле производилась с помощью серийного полярископа-поляриметра ПКС-125 (рисунок 2.6) по компенсационному методу Сенармона [118]. Для определения распределения температурных полей в зоне лазерной обработки использовался тепловизор ИТ-3СМ (рисунок 2.7). Для определения параметров шероховатости  $R_a$  и  $R_z$  использовался измеритель шероховатости Taylor Hobson SURTRONIC 25 (рисунок 2.8).

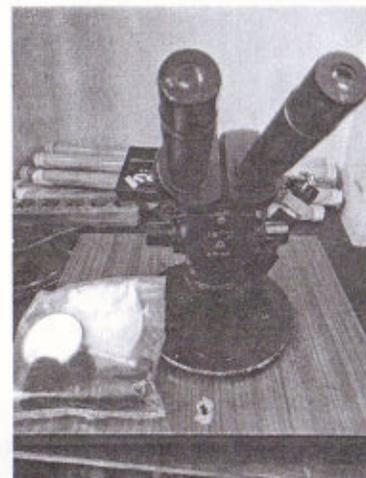


Рисунок 2.3 – Микроскоп МБС-2



Рисунок 2.4 – Микроскоп ММУ-3



Рисунок 2.5 – Объектив с USB-камерой

Рисунок 2.6 – Полярископ-поляри-

метр ПК-125



Рисунок 2.7 – Тепловизор ИТ-3СМ

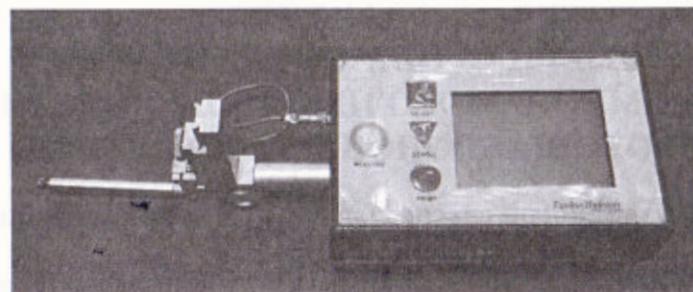


Рисунок 2.8 – Профилометр Taylor Hobson SURTRONIC 25

## ГЛАВА 3. ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА КВАРЦА, ПРИМЕНЯЕМОГО ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ФОТОШАБЛОНОВ И РЕЗОНАТОРОВ

### 3.1 Двухволновой способ обогащения кварцевого сырья

#### 3.1.1 Моделирование двухволнового лазерного способа обогащения кварцевого сырья

Известно, что поглощение излучения ближнего инфракрасного диапазона с длиной волны  $1,06 \cdot 10^{-6}$  м кварцем практически не происходит, при этом, энергия лазерного излучения интенсивно поглощается примесями. В то же время излучение с длиной волны  $10,6 \cdot 10^{-6}$  м поглощается в тонком поверхностном слое кварца. Данные особенности воздействия излучения YAG-лазера с длиной волны  $1,06 \cdot 10^{-6}$  м и  $\text{CO}_2$ -лазера с длиной волны  $10,6 \cdot 10^{-6}$  м обеспечили возможность разработать и создать метод обогащения кварцевого сырья, суть которого заключается в следующем:

- кварцевое сырье помещается на конвейерную ленту;
- частицы кварцевого сырья нагреваются лазерным излучением  $\text{CO}_2$ -лазера с длиной волны  $10,6 \cdot 10^{-6}$  м, которое сфокусировано в виде полосы, до температуры, близкой к температуре плавления;
- одновременно, на частицы кварцевого сырья направляется излучение YAG-лазера с длиной волны  $1,06 \cdot 10^{-6}$  м, сфокусированное в виде полосы. В результате этого происходит нагрев частиц сырья с поглощающими включениями до температур выше температуры плавления кварца;
- далее перегретые частицы кварцевого сырья с примесями контактируют с частицами без примесей, и в результате этого образуются конгломераты из нескольких частиц;
- обработанное сырье механически сепарируется для удаления конгломератов, содержащих примеси;
- после сепарации обработанное сырье возвращается на конвейерную ленту и снова подвергается воздействию YAG-лазера с длиной волны  $1,06 \cdot 10^{-6}$  м с низкой интенсивностью излучения;
- при движении обработанного сырья анализируется температурное поле кварцевого сырья с помощью тепловизора, и в случае обнаружения локального нагрева сырье направляется на повторную обработку до тех пор, пока локальные зоны нагрева не исчезнут.

Рассмотрим случай нагрева частиц, считая их сферическими и расположенными в один слой (рисунок 3.1).

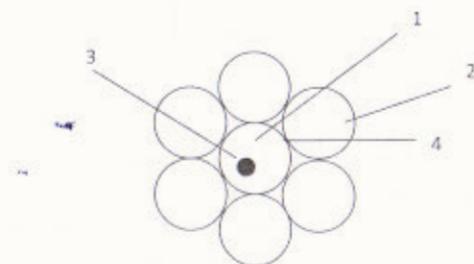


Рисунок 3.1 – Слой частиц кварцевого сырья. 1 – частица кварца с включением из примеси; 2 – частица кварца без примеси; 3 – примесь; 4 – место контакта частиц кварца

В результате воздействия излучения  $\text{CO}_2$ -лазера частицы кварца нагреваются до температуры, близкой к температуре плавления  $T_{\text{пл}}$ . При этом происходит оплавление частицы 1 вследствие нагрева примеси 3 излучением YAG-лазера. После оплавления частицы 1 обеспечивается контакт с частицей 2 в точке 4. В результате частица 2 получает дополнительное тепло, необходимое для частичного оплавления поверхностного слоя. При контакте оплавленных частиц образуется конгломерат из оплавленной частицы с примесью и окружающих ее частиц кварцевого сырья.

Нужно отметить, что для увеличения производительности обогащения кварцевого сырья от примесей целесообразно использование наклонного вибростола. Принципиальная схема установки для обогащения кварцевого стекла описана в [119].

Для оптимизации режимов сепарации кварцевого сырья в системе конечно-элементного анализа ANSYS построена модель нагрева частицы кварца с включением из примеси. В модели частица кварца считалась сферической, как и примесь внутри нее (рисунок 3.2).

Параметры обработки кварцевого сырья выбирались, исходя из следующих технических характеристик оборудования:

- мощности используемых лазеров равны 100 Вт;
- используемая оптическая система позволяет сформировать лазерный пучок размером  $25 \times 2 \cdot 10^{-3}$  м.

При моделировании использовались следующие допущения:

- размеры кварцевых частиц не превышают  $1 \cdot 10^{-3}$  м;
- начальная температура частицы равна 293 К;
- время обработки частицы – 1 с.

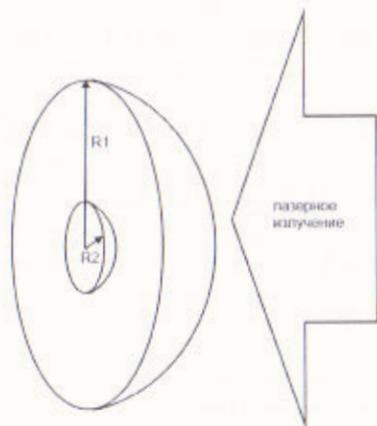


Рисунок 3.2 – Схема воздействия лазерного излучения на частицу из кварца с примесью [120]. R1 – радиус частицы; R2 – радиус примеси

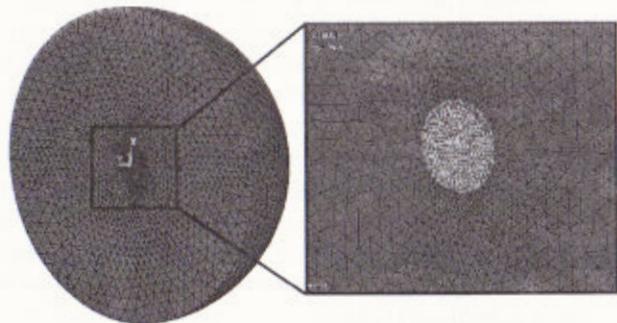


Рисунок 3.3 – Конечно-элементная модель частицы кварца с примесью [120]

При моделировании были использованы следующие физические свойства кварца и примесей [121]:

- плотность кварца – 2206 кг/м<sup>3</sup>;
- коэффициент теплопроводности кварца – 1,34 Вт/(м·К);
- теплоемкость кварца – 732 Дж/(кг·К);
- плотность примеси – 2750 кг/м<sup>3</sup>;
- коэффициент теплопроводности примеси – 0,52 Вт/(м·К);
- теплоемкость примеси – 840 Дж/(кг·К).

При этом свойства примеси выбирались исходя из свойств слюды, как основного вида примеси, содержащейся в кварцевом сырье [121].

Для осуществления эффективной лазерной сепарации необходимо определить температурные поля, которые формируются в частицах кварцевого сырья при воздействии на него лазерного излучения. Для расчета температурных полей использовался МКЭ и аналитическое решение [122; 123].

На рисунках 3.4 – 3.8 представлены графики температур для различных параметров обработки, полученные с использованием аналитического решения, приведенного в [122].

Из рисунков 3.4 – 3.8 видно, что длительность прогрева частиц кварца зависит от плотности мощности лазерного излучения. При этом достижение температуры плавления происходит в разные моменты времени для различных плотностей мощности лазерного излучения, что позволяет подобрать оптимальные параметры обработки, обеспечивающие эффективное образования агломератов.

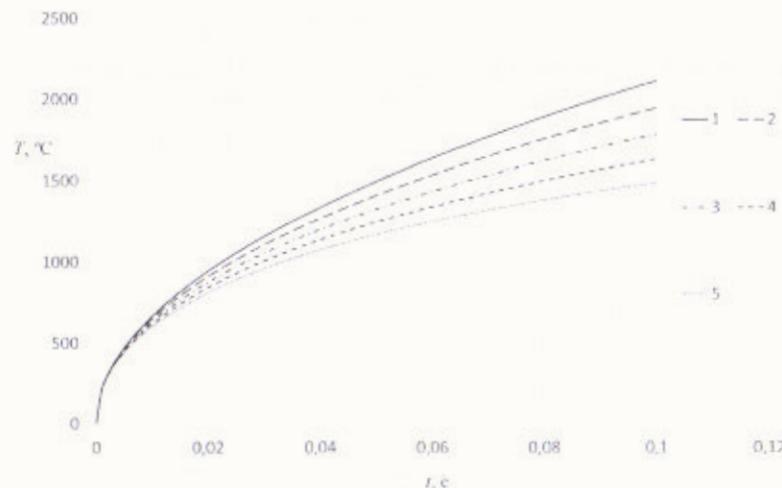


Рисунок 3.4 – Зависимость температуры в частице кварца от времени лазерной обработки на глубине до  $200 \cdot 10^{-6}$  м [124]. 1 –  $0 \cdot 10^{-6}$  м; 2 –  $50 \cdot 10^{-6}$  м; 3 –  $100 \cdot 10^{-6}$  м; 4 –  $150 \cdot 10^{-6}$  м; 5 –  $200 \cdot 10^{-6}$  м

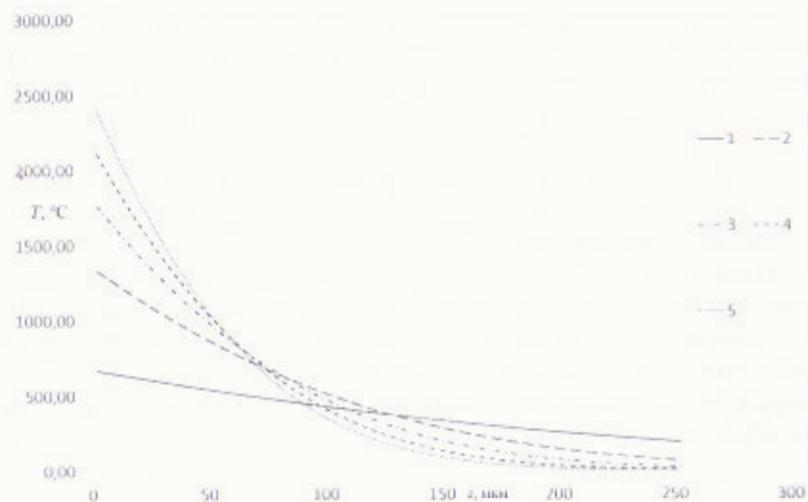


Рисунок 3.5 – Зависимость температуры от глубины в момент времени [124]. 1 – 0,01 с; 2 – 0,04 с; 3 – 0,07 с; 4 – 0,1 с; 5 – 0,13 с

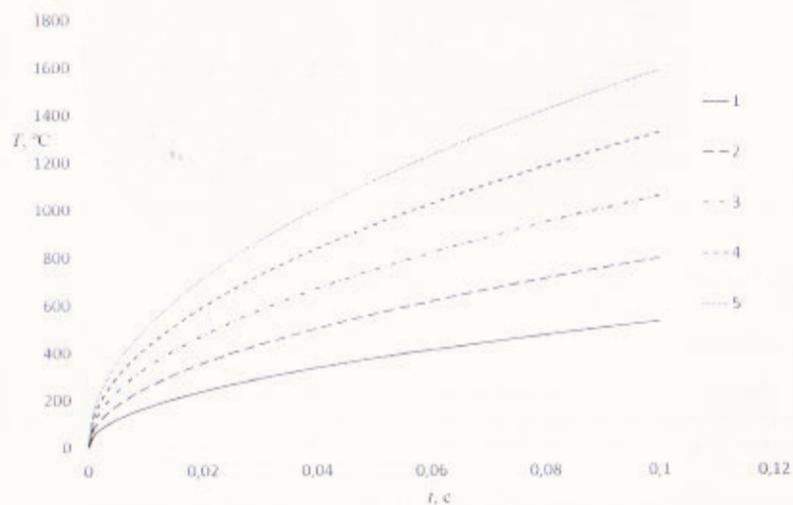


Рисунок 3.6 – Зависимость температуры на поверхности частицы кварца от времени при воздействии  $CO_2$ -лазера [124]. 1 – 50 Вт; 2 – 100 Вт; 3 – 150 Вт; 4 – 200 Вт; 5 – 250 Вт

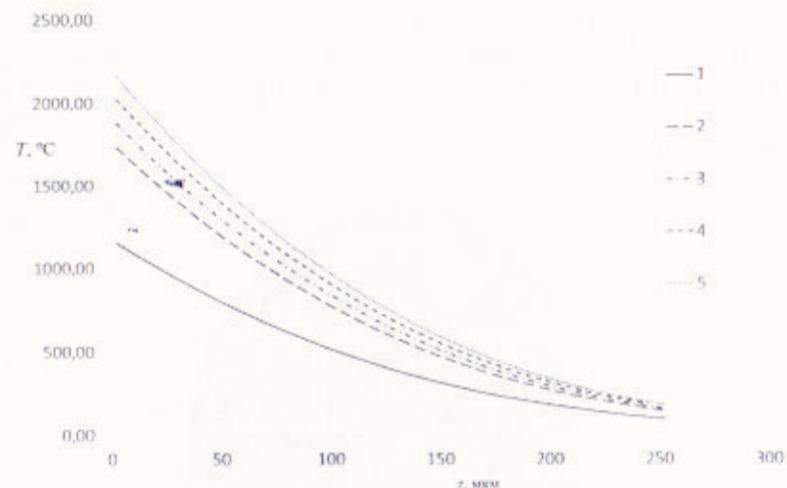


Рисунок 3.7 – Зависимость температуры по глубине частицы кварца от времени [124]. 1 –  $CO_2$ -лазер; 2 –  $CO_2$ -лазер + YAG-лазер 50 Вт; 3 –  $CO_2$ -лазер + YAG-лазер 100 Вт; 4 –  $CO_2$ -лазер + YAG-лазер 150 Вт; 5 –  $CO_2$ -лазер + YAG-лазер 200 Вт

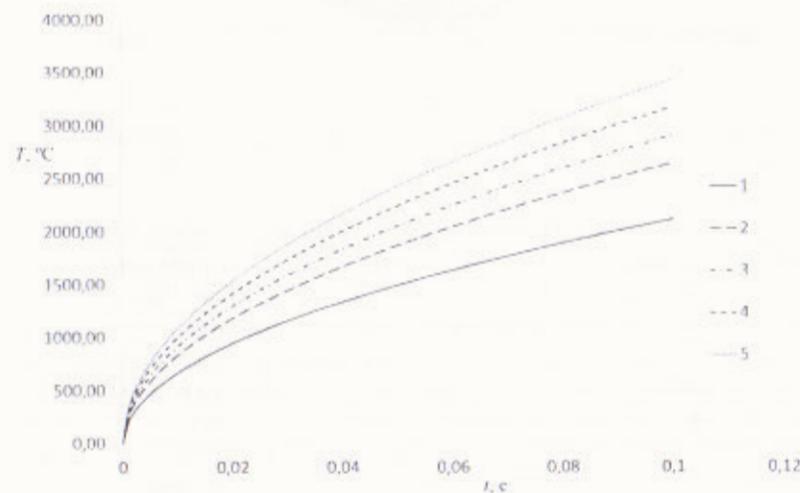


Рисунок 3.8 – Зависимость температуры частицы с примесью от времени при воздействии  $CO_2$ -лазера и YAG-лазера с различной мощностью [124]. 1 – 0 Вт; 2 – 50 Вт; 3 – 100 Вт; 4 – 150 Вт; 5 – 200 Вт

Проведено моделирование процесса нагрева частицы кварца с включением из примеси для сравнения полученных результатов с расчетными [94]. Расчетное распределение температур приведено на рисунке 3.9. Для проверки отличий аналитического и компьютерного моделирования выполнено сравнение температурных полей, полученных двумя способами (рисунок 3.10).

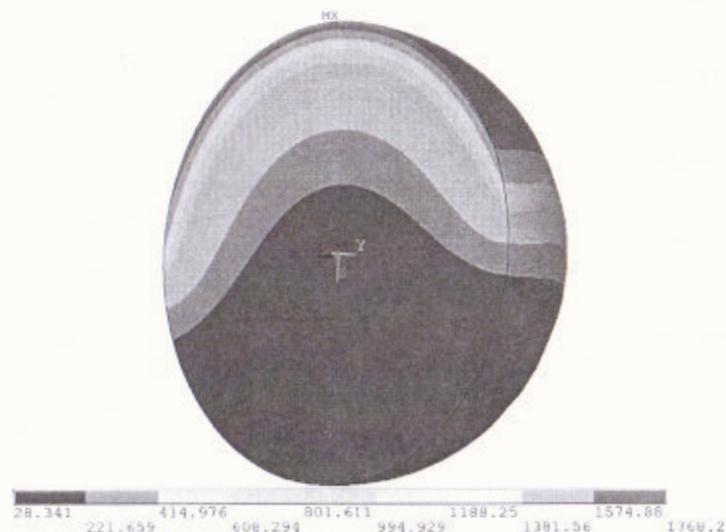


Рисунок 3.9 – Распределение температурных полей в частице кварцевого сырья [124]

Результаты моделирования, приведенные на рисунке 3.10, показали, что распределение температуры до глубины  $50 \cdot 10^{-6}$  м практически совпадает при использовании обеих методик решения, однако при увеличении глубины наблюдается отличие в значениях температур. Но так как сущность метода очистки кварцевого сырья заключается в слипании частиц, то определяющим является распределение температур в приповерхностных слоях частиц, которое является причиной слипания соседних частиц.

Следует отметить, что использование аналитического решения позволяет рассчитать распределение температур с меньшими временными затратами по сравнению с конечно-элементным моделированием, что позволяет использовать это решение для экспресс-оценки параметров обработки.

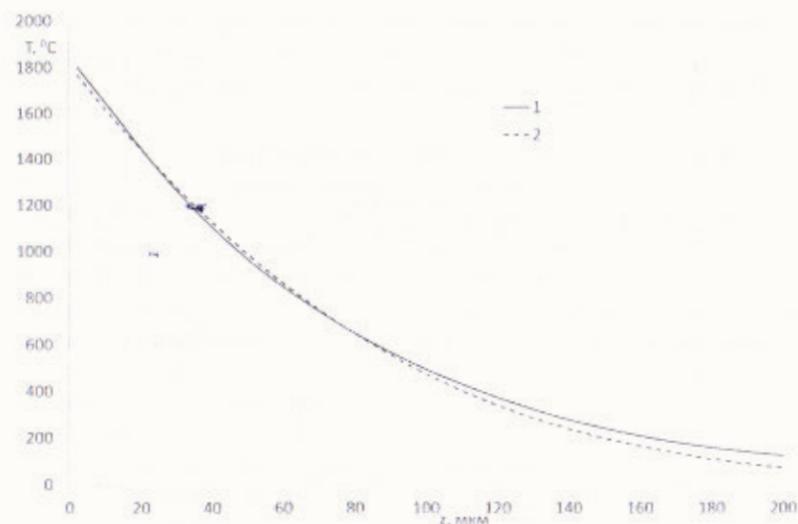


Рисунок 3.10 – Распределение температуры в частице кварцевого сырья при обработке лазерным излучением  $\text{CO}_2$ -лазера с плотностью мощности  $100 \text{ Вт/мм}^2$  [124]. 1 – решение методом конечно-элементного анализа; 2 – аналитическое решение

Таблица 3.1 – Плотность мощности излучения  $\text{CO}_2$ -лазера, необходимая для оплавления частицы кварца при различных размерах частицы и размерах примеси

Размер частицы кварца, $10^{-6}$ м	Размер включения, $10^{-6}$ м	Плотность мощности излучения $\text{CO}_2$ -лазера с длиной волны $10,6 \cdot 10^{-6}$ м, $10^6 \text{ Вт/м}^2$
250	25	0,457
300	30	0,548
350	35	0,635
400	40	0,717
450	45	0,795
500	50	0,867
550	55	0,933

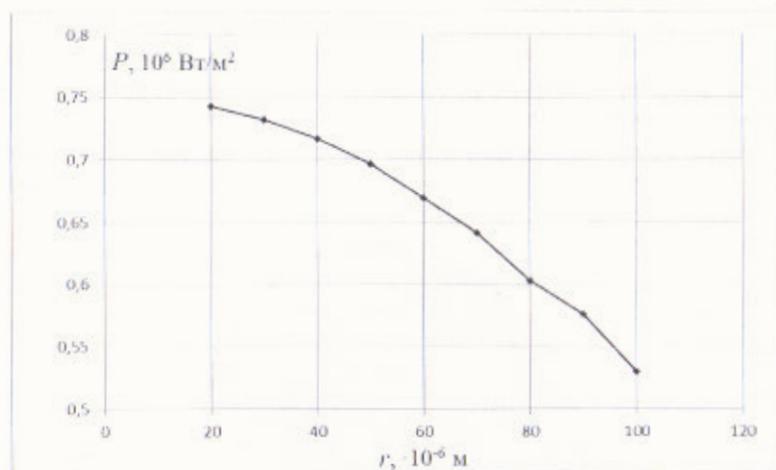


Рисунок 3.11 – Зависимость плотности мощности излучения  $\text{CO}_2$ -лазера, необходимой для оплавления частицы кварца размером  $400 \cdot 10^{-6} \text{ м}$  при различных размерах примеси [119]

Также были определены значения плотности мощности  $\text{CO}_2$ -лазера, при которых обеспечивается нагрев кварцевых частиц различного размера до температуры плавления. При этом варьировались как размеры частиц кварца, так и размеры частиц примеси (см. таблицу 3.1), а также проводились расчеты при фиксированном размере частиц кварца и различных размерах частиц примеси (рисунок 3.11). В расчетах, представленных в таблице 3.1 и рисунке 3.11, плотность мощности излучения YAG-лазера составила  $2 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2$ .

Анализ результатов моделирования показал, что с увеличением размера частицы кварца и пропорциональным увеличением размера примеси, плотность мощности лазерного излучения с длиной волны  $10,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ , необходимая для оплавления частицы кварца, практически линейно растет. При этом увеличение размера частицы примеси при неизменном размере частицы кварца, приводит к снижению значений плотности мощности лазерного излучения с длиной волны  $10,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ , необходимой для оплавления частицы кварца (рисунок 3.11). Это объясняется тем, что с увеличением размера частицы примеси, увеличивается вклад лазерного излучения с длиной волны  $1,06 \cdot 10^{-6} \text{ м}$  в нагрев частицы кварца за счет поглощения этого излучения частицей примеси.

Таким образом, разработанный алгоритм позволяет моделировать процесс двухлучевой лазерной сепарации кварцевого сырья и получать

информацию о распределении температурных полей в системе кварцевая частица – примесь. Полученные данные можно использовать для оптимизации технологических режимов лазерной сепарации кварцевого сырья.

### 3.1.2 Экспериментальные исследования по двухлучевой лазерной сепарации кварцевого сырья

При проведении исследований кварцевое сырье располагалось на конвейерной денте [125]. Далее осуществлялся нагрев сырья низкоинтенсивным YAG-лазером, при этом лазерное излучение было сфокусировано в виде полосы по ширине конвейерной ленты. Сырье перемещалось к устройству измерения температурного поля с последующим анализом полученных данных и определением количества и размера примесных включений в нем. Затем сырье перемещалось по конвейерной ленте в зону воздействия  $\text{CO}_2$ -лазера и YAG-лазера. При этом определяется плотность мощности лазерного излучения, необходимая для плавления примесных включений. В результате нагрева частицы кварцевого сырья, содержащие примесные включения, расплавляются, и вокруг них образуются агломераты (рисунок 3.12).

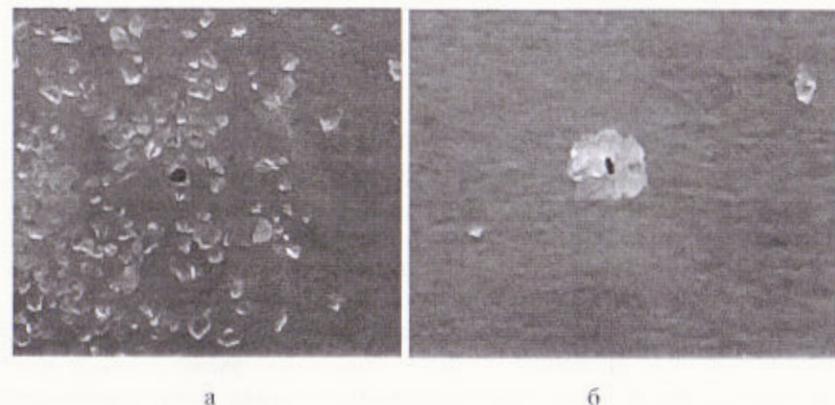


Рисунок 3.12 – Частица примеси в сырье. а – до обработки; б – после обработки

Далее конвейерная лента перемещает кварцевое сырье для его сепарации. Очищенное от агломератов сырье повторно перемещают по конвейерной ленте в зону нагрева низкоинтенсивным YAG-лазером, при этом цикл обработки повторяют до тех пор, пока сырье не достигнет необходимого уровня очистки.

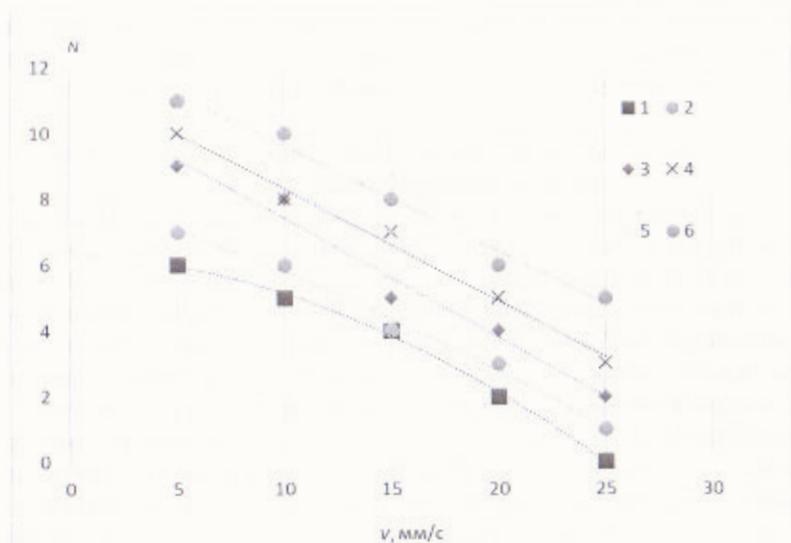


Рисунок 3.13 – Зависимость количества агломератов на 10 грамм сырья от скорости перемещения конвейерной ленты при мощности  $\text{CO}_2$ -лазера 50 Вт и мощности YAG-лазера. 1 – 50 Вт; 2 – 60 Вт; 3 – 70 Вт; 4 – 80 Вт; 5 – 90 Вт; 6 – 100 Вт

В работе проведены экспериментальные исследования, определяющие параметры, необходимые для эффективной сепарации кварцевого концентрата RQ-3K, произведенного ООО «Русский кварц» и используемого на ОАО «Коралл».

Как видно из рисунка 3.13, при увеличении скорости перемещения конвейерной ленты количество образовавшихся агломератов снижается и при скорости  $25 \cdot 10^{-3}$  м/с практически достигает нуля, что свидетельствует о том, что при данной скорости обработки сырье не успевает прогреться до необходимой температуры. При этом увеличение мощности YAG-лазера обеспечивает увеличение количества агломератов [126].

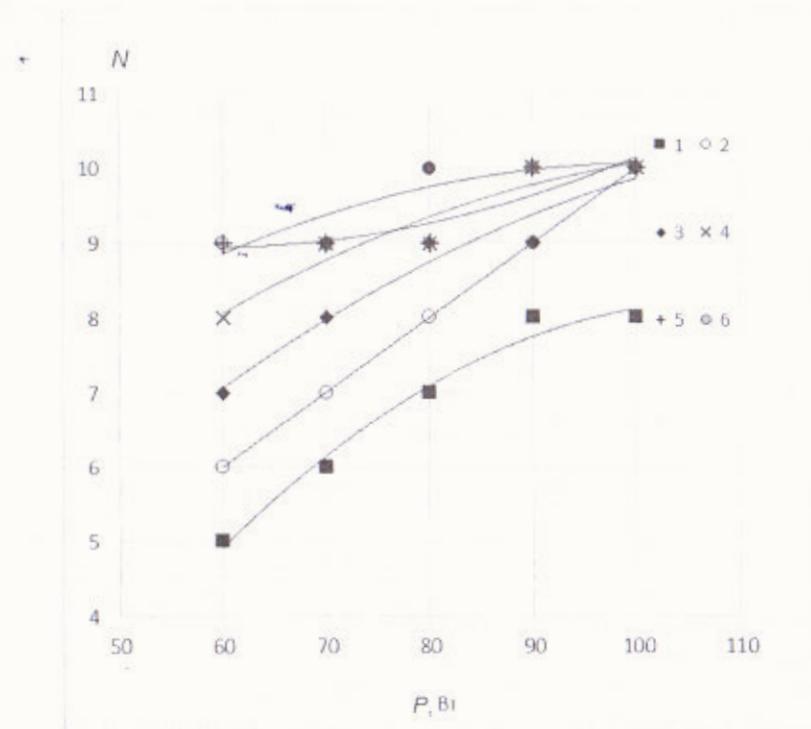


Рисунок 3.14 – Зависимость количества агломератов на 10 грамм сырья при скорости перемещения конвейерной ленты  $5 \cdot 10^{-3}$  м/с и мощности YAG-лазера 50 Вт от мощности  $\text{CO}_2$ -лазера. 1 – 50 Вт; 2 – 60 Вт; 3 – 70 Вт; 4 – 80 Вт; 5 – 90 Вт; 6 – 100 Вт

Как видно из рисунка 3.14, при увеличении мощности  $\text{CO}_2$ -лазера количество агломератов растет до определенного уровня. При этом дальнейшее увеличение мощности не приводит к увеличению производительности, а при больших значениях мощности  $\text{CO}_2$ -лазера приводит к переплавлению сырья и излишним потерям материала, что согласуется с приведенными ранее расчетами.

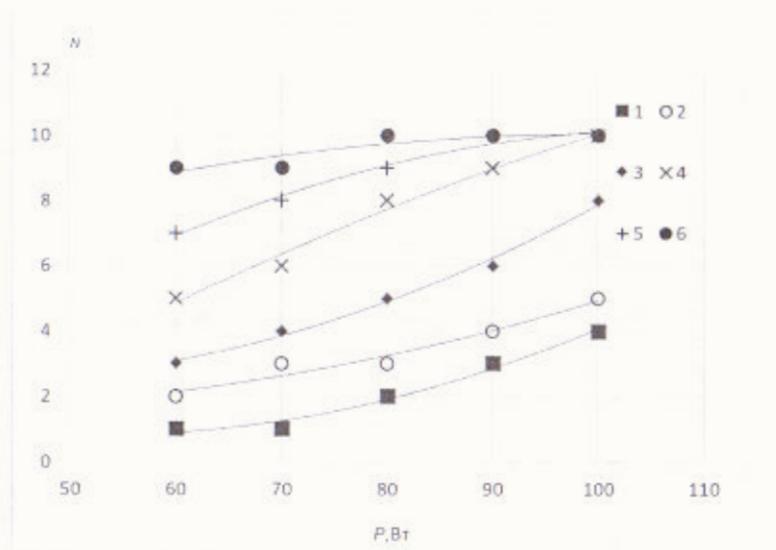


Рисунок 3.15 – Зависимость количества агломератов на 10 грамм сырья при мощности CO<sub>2</sub>-лазера 50 Вт и скорости перемещения конвейерной ленты 5·10<sup>-3</sup> м/с от мощности YAG-лазера. 1 – 50 Вт; 2 – 60 Вт; 3 – 70 Вт; 4 – 80 Вт; 5 – 90 Вт; 6 – 100 Вт

Анализ рисунка 3.15 показывает, что увеличение мощности YAG-лазера целесообразно до определенного уровня, так как ее дальнейшее увеличение не приводит к росту количества агломератов.

Экспериментальные исследования выявили влияние мощности лазерного излучения и скорости обработки на эффективность обогащения сырья от примесей. Для эффективной обогащения кварцевого сырья от примесей мощности CO<sub>2</sub>-лазера и YAG-лазера следует выбирать с условием достижения в зоне обработки плотности мощности порядка (80 – 100)·10<sup>6</sup> Вт/м<sup>2</sup> в зависимости от скорости перемещения сырья в пределах (5 – 10)·10<sup>-3</sup> м/с. Фотошаблоны, полученные из сырья, очищенного с помощью лазерной обработки, уменьшают количество брака на (10 – 15) % за счет исключения примесных частиц в исходном сырье.

### 3.2 Лазерное управляемое термораскалывание кварца

#### 3.2.1 Математическое моделирование процессов лазерного управляемого термораскалывания кварцевого стекла

Для того, чтобы определить процессы, происходящие при воздействии лазерного излучения на различные объекты, необходимо получить распределение температурных полей, для чего необходимо решить неоднородное трехмерное уравнение теплопроводности:

$$\nabla^2 T(r,t) - \frac{1}{a} \frac{\partial T(r,t)}{\partial t} = -\frac{Q(r,t)}{\lambda}, \quad (3.1)$$

где  $Q(r,t)$  – плотность внешних источников тепла;  
 $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  
 $a$  – коэффициент температуропроводности.

Плотность внешних источников тепла определим с учетом модового состава, распределения плотности мощности и формы лазерного пучка на поверхности материала. Большинство используемых в практике CO<sub>2</sub>-лазеров отечественного производства настраиваются на радиальный вид колебаний, при котором след на поверхности стекла от лазерного пучка имеет вид концентрических колец. Лазеры типа ЛГ-25А, ЛГН-703 легко юстируются на вид колебаний ТЕМ<sub>200</sub>, характеризующийся двумя концентрическими кольцами в сечении пучка. Представляют интерес лазерные пучки, приведенные на рисунке 3.16. Распределение плотности мощности (кривая 1) реализуется при одномодовом режиме работы лазеров. Случай вырожденного радиального колебания наиболее близко соответствует используемой на практике кольцевой форме лазерного пучка (кривая 2).

В ходе экспериментальных исследований авторы работ [28; 40; 41; 88; 96] выяснили, что для процесса лазерного термораскалывания лучше всего применять лазерные пучки круглой и эллиптической формы, что позволяет регулировать глубину разделяющей микротрещины.

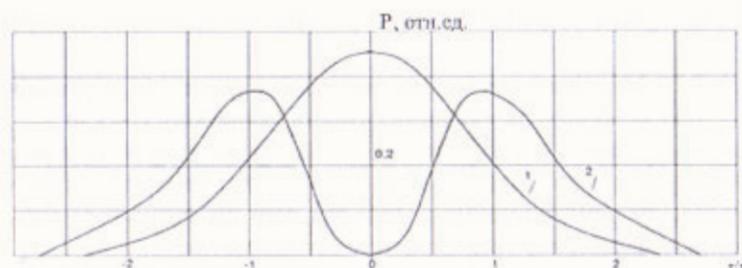


Рисунок 3.16 – Распределение плотности мощности по сечению. 1 – лазерный пучок одномодового режима; 2 – пучок кольцевого сечения

Выберем систему координат так, чтобы ось OX совпала с направлением относительного перемещения лазерного пучка и стекла, а ось OZ – с нормалью к поверхности стекла. Момент времени  $t = 0$  соответствует прохождению пучка через начало координат (рисунок 3.17). Так как лазерное излучение, применяемое для обработки стекла, лежит в широком диапазоне длин волн (1,06; 5,5; 10,6 · 10<sup>-6</sup> м), необходимо для ближней инфракрасной области спектра учесть объемное поглощение среды. Для стекла, обработка которых требует создания температуры, близкой к температуре стеклования, будет оказывать существенное влияние конвективный теплообмен с окружающей средой. Таким образом, помимо объемного поглощения учтем теплоотдачу с поверхности обработки. Зададим распределение интенсивности для движущегося эллиптического пучка в виде [127]

$$Q_{over}(r, t) = \gamma P_0 \exp\left(-\frac{(x - vt)^2}{A^2} - \frac{y^2}{B^2} - \gamma z\right), \quad (3.2)$$

где  $\gamma$  – коэффициент поглощения среды;  
 $P_0$  – плотность мощности в центре пучка;  
 $A$  и  $B$  – полуоси эллиптического гауссова пучка.

Решение уравнения (3.1) с правой частью, определяемой (3.2) найдем, используя метод функции Грина. Функция Грина для полубесконечной среды с учетом теплоотдачи имеет вид [128]

$$G(r, r', t - t') = \frac{a}{8\lambda(\pi a(t - t'))^2} \exp\left[-\frac{(y - y')^2 + (x - x')^2}{4a(t - t')}\right] \left(\exp\left[-\frac{(z - z')^2}{4a(t - t')}\right] + \exp\left[-\frac{(z + z')^2}{4a(t - t')}\right] - 2h\sqrt{\pi a(t - t')} \cdot \operatorname{erfc}\left[\frac{z + z'}{2\sqrt{a(t - t')}} + h\sqrt{a(t - t')}\right] \times \exp[b(z + z') + ab^2(t - t')]\right), \quad (3.3)$$

где  $h = \beta/\lambda$ ;  
 $\beta$  – коэффициент теплоотдачи.

Тогда решение уравнения теплопроводности можно представить в виде:

$$T(r, t) = \int dt' \int d^3 r' G(r, t; r', t') Q(r', t'), \quad (3.4)$$

Интегрирование дает следующее выражения для температурного поля:

$$T(r, t) = \frac{P_0 \gamma a AB}{2\lambda} \int_0^t \frac{dt' \exp\left\{-\frac{(x - v(t - \tau))^2}{4a\tau + A^2} - \frac{y^2}{4a\tau + B^2}\right\}}{\sqrt{(4a\tau + A^2)(4a\tau + B^2)}} f(z, \tau), \quad (3.5)$$

где

$$f(z, \tau) = \exp(\gamma^2 a \tau - \gamma z) \operatorname{erfc}\left(\gamma\sqrt{a\tau} - \frac{z}{2\sqrt{a\tau}}\right) + \frac{\gamma + h}{\gamma - h} \exp(\gamma^2 a \tau + \gamma z) \operatorname{erfc}\left(\gamma\sqrt{a\tau} + \frac{z}{2\sqrt{a\tau}}\right) - \frac{2h}{\gamma - h} \exp(hz + h^2 a \tau) \operatorname{erfc}\left(\frac{z}{2\sqrt{a\tau}} + h\sqrt{a\tau}\right) \quad (3.6)$$

где  $\operatorname{erfc}(\rho) = 1 - \operatorname{erf}(\rho)$ ;

$\operatorname{erf}(\rho) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\rho e^{-u^2} du$  – интеграл вероятности;

$\tau$  – переменная интегрирования.

Выражение, определяемое (3.5), позволяет провести полный анализ температурного режима для конкретных технологических процессов.

Нужно учесть, что разнообразие способов термораскалывания предполагает как осесимметричный нагрев поверхности стекла круглым и эллиптическим лазерными пучками, так и асимметричный нагрев с помощью пучков эллиптического сечения. Асимметричный нагрев выражается в нарушении симметрии фронта нагрева при ориентации осей эллипса под углом к направлению относительно перемещения пучка и стекла (рисунок 3.18). Для учета асимметрии нагрева считаем, что направление относительного перемещения и вектор скорости совпадают с осью OS, повернутой относительно оси OX на угол  $\alpha$ . Смещение в направлении OS определяется декартовыми координатами следующим образом:

$$S^2 = x^2 + y^2; \quad x = S \cdot \cos(\alpha); \quad y = S \cdot \sin(\alpha), \quad (3.7)$$

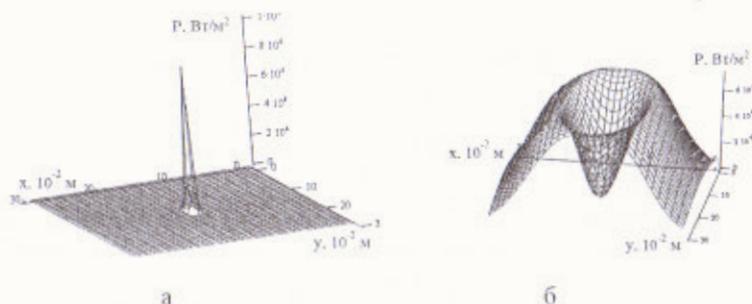


Рисунок 3.17 – Модельное распределение интенсивности гауссовых эллиптических пучков. а - пучок с максимальной интенсивностью в центре; б - пучок с нулевой интенсивностью в центре

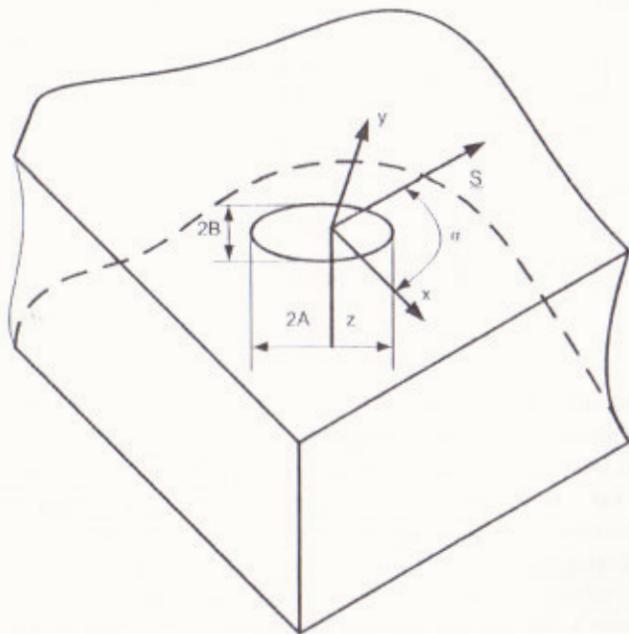


Рисунок 3.18 – Схема асимметричного нагрева листового стекла лазерным эллиптическим пучком с размером  $2A \times 2B$ , в направлении  $S$  со скоростью  $v$  [129]

Тогда с учетом асимметрии фронта нагрева решение (3.6) запишется в виде [129]

$$T(r, t) = \frac{P_0 \gamma a A B}{2\lambda} \int_0^t \frac{d\tau \exp\left\{ -\frac{(S-v(t-\tau))^2 \cos^2 \alpha}{4a\tau + A^2} - \frac{(S-v(t-\tau))^2 \sin^2 \alpha}{4a\tau + B^2} \right\} f(z, \tau)}{\sqrt{(4a\tau + A^2)(4a\tau + B^2)}} \quad (3.8)$$

Работу в режимах TEM200 и вырожденного радиального колебания для эллиптического гауссова пучка опишем с помощью модельного распределения  $Q(r, t)$  с нулевой интенсивностью в центре (рисунок 3.2.б)

$$Q_{\text{модель}}(r, t) = \gamma \frac{P_0}{\pi A B} \left[ \frac{(x-vt)^2}{A^2} + \frac{y^2}{B^2} \right] \exp\left[ -\frac{(x-vt)^2}{A^2} - \frac{y^2}{B^2} \right] \exp(-\gamma z). \quad (3.9)$$

Решение уравнения (3.1) с правой частью, определяемой (3.9) получим методом функции Грина с учетом (3.3). Интегрирование дает выражение для поля температур

$$T(r, t) = \frac{2P_0 a^2 \gamma}{\lambda \pi} \int_0^t \frac{d\tau \cdot \tau}{\sqrt{(4a\tau + A^2)(4a\tau + B^2)}} \exp\left[ -\frac{(x-v(t-\tau))^2}{A^2 + 4a\tau} - \frac{y^2}{4a\tau + B^2} \right] \times \\ \times \left[ \frac{1}{4a\tau + B^2} \left( \frac{B^2 y^2}{2a\tau(4a\tau + B^2)} + 1 \right) + \frac{1}{4a\tau + A^2} \left( \frac{(x-v(t-\tau))^2 A^2}{2a\tau(4a\tau + A^2)} + 1 \right) \right] f(z, \tau) \quad (3.10)$$

Аналогично описанной выше методике найдем выражение для поля температур, вызываемого движущимся эллиптическим гауссовым пучком с нулевой интенсивностью в центре для случая асимметричного нагрева

$$T(r, t) = \frac{2P_0 a^2 \gamma}{\lambda \pi} \int_0^t \frac{d\tau \cdot \tau}{\sqrt{(4a\tau + A^2)(4a\tau + B^2)}} \exp\left[ -\frac{(s-v(t-\tau))^2 \cos^2 \alpha}{4a\tau + A^2} - \frac{(s-v(t-\tau))^2 \sin^2 \alpha}{4a\tau + B^2} \right] \times \\ \times \left[ \frac{1}{4a\tau + B^2} \left( -\frac{B^2 (s-v(t-\tau))^2 \sin^2 \alpha}{a\tau(4a\tau + B^2)} + 1 \right) + \frac{1}{4a\tau + A^2} \left( \frac{(s-v(t-\tau))^2 \cos^2 \alpha}{(4a\tau + A^2) 2a\tau} + 1 \right) \right] f(z, \tau) \quad (3.11)$$

Таким образом, в ходе решения уравнений были получены общие решения неоднородного уравнения теплопроводности в линейной постановке задачи. При этом в решении была учтена асимметрия лазерного излучения, учтено объемное поглощение лазерного излучения материалом и теплоотдача с поверхности в процессе обработки. Они позволяют исследовать распределение температурных полей для всех возможных вариантов осуществления процесса управляемого термораскалывания стекла движущимися эллиптическими пучками с гауссовым распределением интенсивности. Так, например, можно легко осуществить переход к задачам, в постановке которых пренебрегаем теплоотдачей ( $h \neq 0$ ).

Случай поверхностного поглощения получим, осуществив предельный переход в приведенных формулах при устремлении  $\gamma$  к бесконечности.

Следует учесть, что информация о распределении температурных полей недостаточно для определения динамики процесса термораскалывания. В ряде случаев необходимо рассмотреть напряженное состояние с позиций классической теории термоупругости. Принимая во внимание гипотезу Дюамеля, анализ неустановившихся температурных напряжений можно осуществить с помощью квазистатического подхода. Это означает, что установление напряженного состояния происходит значительно быстрее, чем теплового равновесия. Такой подход предполагает решение несвязной задачи термоупругости, которая включает задачу теплопроводности и задачу о нахождении напряжений при заданных температурных полях. Движение лазерного пучка в направлении оси ОХ будем моделировать следующим распределением интенсивности:

$$Q(y, z, t) = P_0 \exp\left\{-\frac{(2A-Vt)^2}{A^2} - \frac{y^2}{B^2}\right\} \delta(z), \quad (3.12)$$

где  $P_0 = P/(\pi AB)$  – плотность мощности эллиптического пучка.

Распределение (3.12) записано с учетом поверхностного поглощения излучения  $\text{CO}_2$ -лазеров многокомпонентными силикатными стеклами. Оно достаточно точно имитирует трехмерную ситуацию для наблюдателя в плоскости  $x = \text{const} = 2A$ , описывая изменение интенсивности в этой плоскости для различных моментов времени. Решение двумерного уравнения теплопроводности с учетом теплоотдачи с поверхности будет иметь вид:

$$T(y, z, t) = \frac{P_0 AB \sqrt{a}}{\lambda \sqrt{\pi}} \int_0^t d\tau \exp\left\{-\frac{(A-V(t-\tau))^2}{A^2} - \frac{y^2}{4a\pi + B^2}\right\} f(z), \quad (3.13)$$

где

$$f(z) = \exp\left\{-z^2/(4a\tau)\right\} / \sqrt{\tau} - \sqrt{\pi ah} \cdot \exp\{h(z+h4a\tau)\} \text{erfc}(z/\sqrt{4a\tau} + h\sqrt{a\tau}). \quad (3.14)$$

Решение (3.13) используем для описания плоского деформированного состояния, которое характеризуется вектором перемещений  $U_i = (0, U_y, U_z)$ . Согласно квазистатической теории термоупругости связь между компонентами  $U_i$  и температурой описывается уравнением [130-133]:

$$\Delta U_i = \frac{(1+\nu)\alpha_T}{1-\nu} \frac{\partial T}{\partial i}, \quad (3.15)$$

где  $i = y, z$ ;

$\nu$  – коэффициент Пуассона;

$\alpha_T$  – коэффициент температурного расширения;

$\Delta$  – двумерный оператор Лапласа.

Учитывая связь между перемещениями и термоупругим потенциалом перемещений:

$$U_i = \frac{\partial \Phi}{\partial i} \quad (3.16)$$

перепишем уравнение (3.15) в виде:

$$\frac{\nabla^2(\Delta \Phi)}{\partial i} = \frac{1+\nu}{1-\nu} \alpha_T \frac{\partial T}{\partial i} \quad (3.17)$$

откуда получим выражение для термоупругого потенциала  $\Phi(y, z, t)$ :

$$\Delta \Phi = \frac{1+\nu}{1-\nu} \alpha_T T \quad (3.18)$$

Решение уравнения (3.15) найдем в виде суммы  $U_i = U_i' + U_i''$  где  $U_i'$  – частное решение неоднородного уравнения (3.15),  $U_i''$  – общее решение однородного уравнения. Так как на поверхности тела отсутствует внешняя нагрузка, граничные условия для термоупругих напряжений  $\sigma_{ij}$  в Па запишутся в виде:

$$\sigma_{13} = \sigma_{23} = 0, z = 0. \quad (3.19)$$

По уравнениям закона Гука находим напряжения, соответствующие термоупругому потенциалу [86; 87]:

$$\sigma_{ik}^* = 2G \left\{ \delta^2 \Phi / (\delta_i \delta_k) - \Delta \Phi \delta_{ik} \right\}. \quad (3.20)$$

Дифференцируя (3.18) по  $t$  и учитывая однородное уравнение теплопроводности получаем:

$$\Delta \frac{\partial \Phi}{\partial t} = \frac{1+\nu}{1-\nu} a \alpha_T \Delta T. \quad (3.21)$$

Интегрирование выражения (3.21) приводит к зависимости:

$$\Phi(y, z, t) = \frac{1+\nu}{1-\nu} a \alpha_T \int_0^t T dt + \Phi_0. \quad (3.22)$$

где  $\Phi_0 = \Phi(t=0)$  – потенциал перемещений, соответствующий начальной температуре  $T_0(y, z)$ .

В нашем случае  $\Phi_0 = 0$ . Применяя преобразования Лапласа к (3.22), имеем:

$$\Phi_L = \frac{1+v}{1-v} \cdot \frac{\alpha \alpha_T}{p} T_L, \quad (3.23)$$

где  $\Phi_L$ ,  $T_L$  – трансформанты Лапласа,  
 $p$  – параметр преобразований Лапласа.

Для определения компонент напряжений найдем трансформанту Лапласа для температурного поля (3.13):

$$T_L(y, z, p) = \frac{P_0 \sqrt{a} B A}{2 \lambda A} \exp\left\{\frac{A^2 P^2}{4V^2} - \frac{PA}{V}\right\} \operatorname{erfc}\left(\frac{PA}{2V} - 1\right) \int_0^{\infty} \frac{\exp\{-y^2/(4a\tau + B^2) - p\tau\}}{\sqrt{4a\tau + B^2}} d\tau. \quad (3.24)$$

Подставляя (3.24) в (3.23), находим трансформанты Лапласа напряжений (3.20). Окончательно для компонент тензора напряжений после обратных преобразований Лапласа [45] имеем следующие выражения для поля напряжений:

$$\sigma_{22}^* = -k \int_0^t d\tau \left[ -\frac{hz}{2a\tau} - \frac{1}{2a\tau} + \frac{z^2}{(2a\tau)^2} + h^2 - Fh^2 \right] F_1 F_2;$$

$$\sigma_{23}^* = -2k \int_0^t d\tau \beta y (-z/(2a\tau) + h - Fh) F_1 F_2;$$

$$\sigma_{33}^* = -k \int_0^t d\tau (4\beta^2 y^2 - 2\beta) (1 - F) F_1 F_2;$$

$$F = \sqrt{\pi a \tau} h \exp\{hz - h^2 a \tau + z^2/(4a\tau)\} \operatorname{erfc}\left(z/(2\sqrt{a\tau} + h\sqrt{a\tau})\right); \quad (3.25)$$

$$F_1 = \exp\left\{-y^2 \beta - z^2/(4a\tau)\right\} (\beta/\tau)^{1/2};$$

$$F_2 = \operatorname{erf}\left(\frac{v(t-\tau)}{A-2}\right) + \operatorname{erf}(z);$$

$$\beta = (4a\tau + B^2)^{-1};$$

$$K = \frac{1+v}{1-v} \alpha_T a P_0 \sqrt{a} ABG / (\lambda v)$$

Для определения напряжений  $\sigma_{ik}$ , соответствующих вектору смещения  $U_i^*$ , необходимо решить однородное уравнение (3.15) с граничными условиями, удовлетворяющими (3.19):

$$\sigma_{23}^{**} = -\sigma_{23}^*(y, 0), \quad \sigma_{33}^{**} = -\sigma_{33}^*(y, 0), \quad z = 0. \quad (3.26)$$

В соответствии с хорошо изученным методом решения задач по определению термоупругих напряжений в полубесконечной среде, нагруженной на границе силами, зависящими только от одной координаты [130; 133], найдем вторую составляющую тензора напряжений  $\sigma_{ik}$

$$\sigma_{23}^{**} = ik \int_0^t d\tau F_2 \{z(F_+ - F_-) + F_3 [R_+ - R_- - z(N_+ - N_-)]\};$$

$$\sigma_{33}^{**} = k \int_0^t d\tau F_2 \{z(F_+ - F_-) + (N_+ - N_-)(1 - F_3 z)\};$$

$$\sigma_{22}^{**} = k \int_0^t d\tau F_2 \{z(F_+ - F_-) - 2(R_+ - R_-)F_3 + (N_+ - N_-)(1 - F_3 z)\};$$

$$R_{\pm} = \frac{1}{\sqrt{\pi r}} \left( \sqrt{\pi} \beta^{3/2} (z \pm iy) e^{\beta(z \pm iy)^2} \operatorname{erfc}[\sqrt{\beta}(z \pm iy)] - \beta \right);$$

$$F_{\pm} = -\frac{4\beta^2}{\sqrt{\pi r}} \left\{ 1 + \beta(z \pm iy)^2 - \sqrt{\pi} \left[ \frac{2}{3} \sqrt{\beta}(z \pm iy) + \beta^{3/2}(z \pm iy)^3 \right] \exp[(z \pm iy)^2 \beta] \operatorname{erfc}[\sqrt{\beta}(z \pm iy)] \right\};$$

$$N_{\pm} = \left( \beta^{3/2} / \sqrt{\pi r} \right) \left\{ 2\sqrt{\beta}(z \pm iy) - \sqrt{\pi} [1 + \beta 2(z \pm iy)^2] \exp[(z \pm iy)^2 \beta] \operatorname{erfc}[\sqrt{\beta}(z \pm iy)] \right\}. \quad (3.27)$$

Сумма напряжений определяет напряженное состояние, возникающее в изотропном полубесконечном пространстве при нагреве его поверхности движущимся эллиптическим лазерным пучком с гауссовым распределением интенсивности.

### 3.2.2 Моделирование температурного поля при воздействии на материалы лазерным излучением сложной геометрии

В случае действия гауссова пучка с максимальной интенсивностью в центре и пучка с нулевой интенсивностью в центре, действующих одновременно, модельное представление общей интенсивности излучения выглядит как показано на рисунке 3.4.

$$Q_{\text{общее}}(r, t) = Q_{\text{центр}}(r, t) + Q_{\text{асимпт}}(r, t). \quad (3.28)$$

Как показывают результаты моделирования, в случае использования лазерной обработки только кольцевым пучком сжимающие напряжения, возникающие в процессе обработки, более локализованы, чем в случае применения только гауссова пучка (рисунок 3.19). Таким образом, одновременное воздействие двух лазерных излучений, имеющих различное распределение энергии, позволяет управлять развитием микротрещины за счет локализации сжимающих термоупругих напряжений.

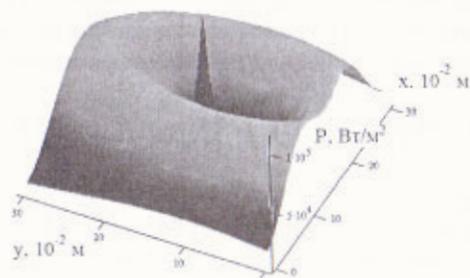


Рисунок 3.19 – Модельное распределение интенсивности гауссова эллиптического пучка с максимальной интенсивностью в центре и пучка с нулевой интенсивностью в центре, действующих одновременно [134]

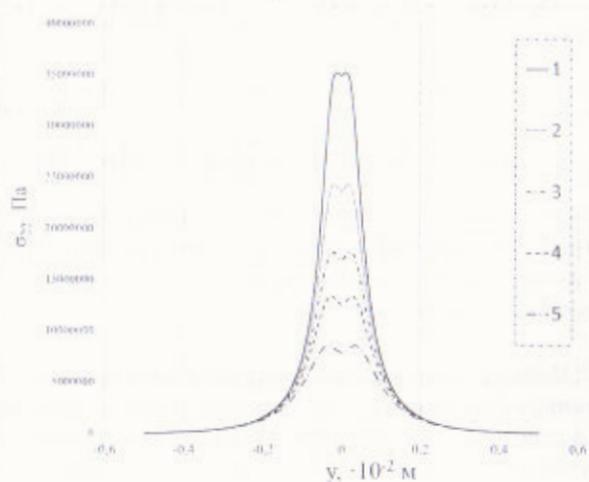


Рисунок 3.20 – Распределение сжимающих напряжений в кварцевом стекле в направлении, перпендикулярном движению гауссова и кольцевого лазерных пучков на различной глубине [134]. 1 – 0 м; 2 –  $1 \cdot 10^{-4}$  м; 3 –  $2 \cdot 10^{-4}$  м; 4 –  $3 \cdot 10^{-4}$  м; 5 –  $4 \cdot 10^{-4}$  м

Например, согласно расчетам, приведенным на рисунке 3.20, при уровне прочности, составляющем  $3 \cdot 10^8$  Па, в кварцевом стекле будет развиваться микротрещина, глубина которой составит порядка  $0,5 \cdot 10^{-4}$  м, при скорости обработки  $13 \cdot 10^{-3}$  м/с и плотности мощности лазера  $1 \cdot 10^7$  Вт/м<sup>2</sup>. Одновременное использование гауссова пучка с максимальной интенсивностью в центре и пучка с нулевой интенсивностью в центре позволяет увеличить скорость обработки на 30 % с  $1 \cdot 10^{-2}$  до  $1,3 \cdot 10^{-2}$  м/с, не нарушая устойчивость микротрещины.

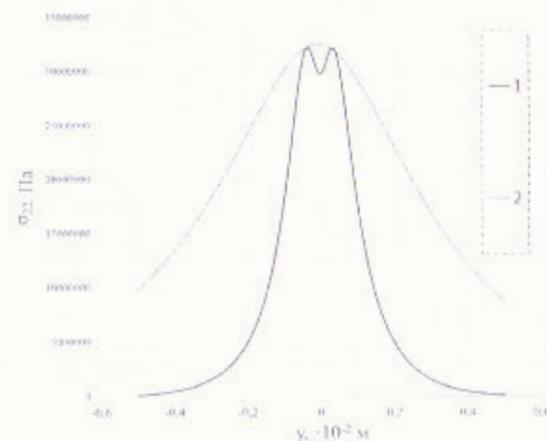


Рисунок 3.21 – Распределение сжимающих напряжений в кварцевом стекле в направлении, перпендикулярном движению [134]. 1 – для движущегося кольцевого пучка; 2 – для движущегося гауссова пучка

Предлагаемая модель процесса позволяет производить вполне удовлетворительные оценки технологических параметров процесса термораскалывания. Расчетные значения глубины микротрещины завышены на 10 – 15 %, что может быть связано с нестабильностью серийных CO<sub>2</sub>-лазеров, достигающей порядка 10 % [134].

### 3.2.3 Моделирование лазерного термораскалывания кварца в рамках линейной механики разрушения

Для начала развития термоиндуцированной трещины должно наступить такое распределение термоупругих напряжений в материале, при котором материал начнет разрушаться. Однако этого недостаточно, т. к. для начала развития термоиндуцированной трещины необходимо некоторое критическое состояние, которое необходимо определить согласно механики разрушения [135; 136].

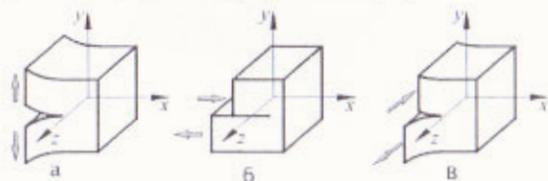
Для моделирования процесса термораскалывания кристаллического кварца в качестве критерия был выбран коэффициент интенсивности напряжения [136; 137]. Коэффициенты интенсивности напряжений характеризуют распределение напряжений около трещин в упругих и являются одними из наиболее важных параметров в механике разрушения.

Механика разрушения рассматривает три типа трещин (рисунок 3.22):

I – трещина нормального отрыва, здесь происходит растяжение плоскости с трещиной (рисунок 3.22, а);

II – трещина поперечного сдвига, здесь происходит разрез в поле сдвига (рисунок 3.7, б);

III – трещина продольного сдвига, здесь происходит продольный сдвиг пространства с разрезом (рисунок 3.22, в);



а – трещина нормального отрыва; б – трещина поперечного сдвига; в – трещина продольного сдвига

Рисунок 3.22 – Три типа трещин

Трещина нормального отрыва является наиболее подходящей моделью для моделирования процессов термораскалывания (рисунок 3.23).

В случае плоской деформации компоненты напряжений и перемещений вблизи трещины типа I определяются по формулам:

$$\sigma_x = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\Theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\Theta}{2} \sin \frac{3\Theta}{2}\right), \quad (3.29)$$

$$\sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\Theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\Theta}{2} \sin \frac{3\Theta}{2}\right), \quad (3.30)$$

$$u_x = \frac{K_I}{G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \cos \frac{\Theta}{2} \left(1 - 2\nu + \sin^2 \frac{\Theta}{2}\right), \quad (3.31)$$

$$u_y = \frac{K_I}{G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin \frac{\Theta}{2} \left(1 - 2\nu + \sin^2 \frac{\Theta}{2}\right), \quad (3.32)$$

где  $G$  – модуль упругости при сдвиге;  
 $\nu$  – коэффициент Пуассона;  
 $r, \Theta$  – полярные координаты с полюсом в вершине трещины.

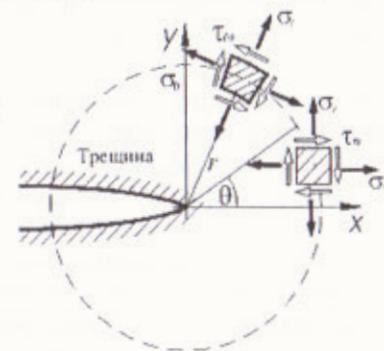


Рисунок 3.23 – Трещина нормального отрыва

При использовании закона Гука, который при высоких значениях напряжений в материале уже не выполняется, на краю трещины при  $r = 0$ , компоненты тензора напряжений стремятся к бесконечности, из-за чего формулы (3.29)–(3.32) не позволяют точно рассчитать напряженное состояние в материале. Однако при достаточно малых  $r$  эти зависимости могут служить для оценки параметров напряженно-деформированного состояния в окрестности берегов трещины.

Формулы (3.29)–(3.32) позволяют определять коэффициент интенсивности напряжений по полю напряжений или перемещений. При этом определение коэффициентов интенсивности напряжений методом конечных элементов по напряжениям или перемещениям называют прямыми методами [138].

При использовании метода конечных элементов для определения коэффициентов интенсивности напряжений результаты получаются более точными, а поле деформации вблизи вершины трещины определяется более точно. Такое моделирование очень сложно, т. к. обычные конечные элементы строятся на аппроксимациях полей напряжений или перемещений с помощью полиномов целого порядка. Эта проблема решается введением в сетку специальных элементов, имитирующих сингулярности напряжений. В этом случае корневую асимптоту, необходимую для моделирования поля напряжений в вершине трещины, можно получить, сдвинув узлы изопараметрического элемента в сторону вершины на четверть стороны элемента.

При этом условиями роста термоиндуцированной трещины являются следующие:

- 1) напряжения в вершине трещины должны быть растягивающими;
- 2) расчетный коэффициент интенсивности напряжений в вершине трещины должен превышать критический коэффициент интенсивности напряжений.

Было выполнено конечно-элементное моделирование процесса термораскалывания кристалла кварца, при котором учитывалось соответствие условий, которые были описаны выше, при этом на начальном этапе наносится дефект, который представляет собой начальную трещину.

Расчеты были проведены с использованием свойств кристаллического кварца и параметров обработки, приведенных ранее.

Скорость перемещения обрабатываемого изделия относительно лазерных пучков считалась равной  $5 \cdot 10^{-3}$  м/с, а расстояние между центрами зоны нагрева и зоны охлаждения считалось равным  $4,5 \cdot 10^{-3}$  м.

Расчеты проводились для пластины с геометрическими размерами  $20 \times 20 \times 0,75 \cdot 10^{-3}$  м. На рисунках 3.24, 3.25 представлены графики зависимости температуры и напряжений, действующих перпендикулярно линии разделения.

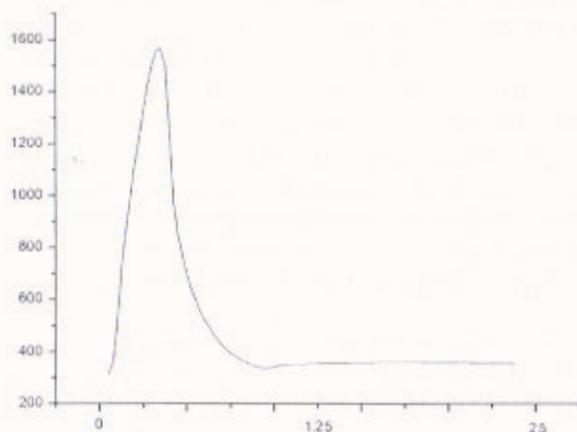


Рисунок 3.24 – График зависимости температуры в вершине трещины от времени [139]

На рисунке 3.26 представлен график зависимости коэффициента интенсивности напряжений  $K_I$  в вершине трещины в процессе термораскалывания кристаллического кварца.

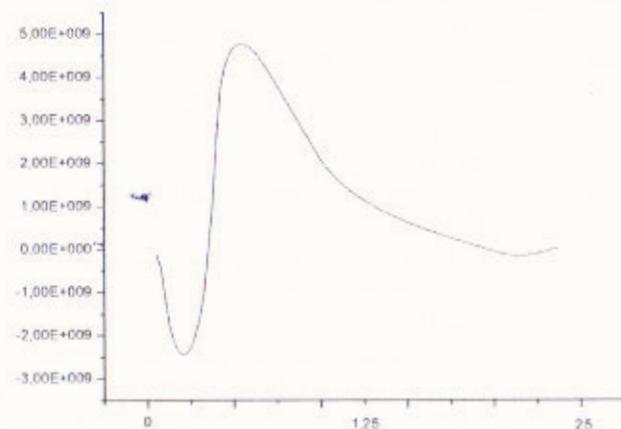


Рисунок 3.25 – График зависимости напряжений в вершине трещины от времени [139]

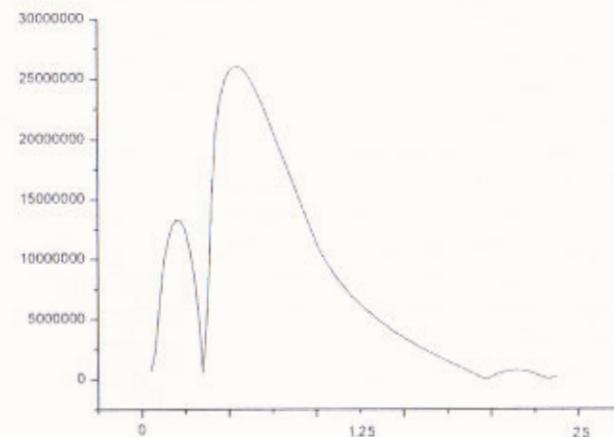


Рисунок 3.26 – График зависимости коэффициента интенсивности напряжений в вершине трещины от времени [136]

Максимальная температура в вершине трещины достигает 1600 К (рисунок 3.24), а максимальные значения растягивающих напряжений в вершине трещины –  $5 \cdot 10^8$  Па (рисунок 3.25) [139].

Как видно из графика, представленного на рисунке 3.11, при лазерном термораскалывании кристаллического кварца в вершине трещины формируются значительные по величине коэффициенты интенсивно-

сти напряжений. Далее, при переходе напряжений из сжимающих в растягивающие, значение коэффициента уменьшается, а затем резко увеличивается. При этом второй максимум значений коэффициентов интенсивности напряжений соответствует уже растягивающим напряжениям в вершине трещины, что означает выполнение обоих необходимых условий для начала развития трещины.

Моделирование лазерного раскалывания кварцевых пластин было выполнено с использованием алгоритма, разработанного в [137; 140]. Расчет полей температурных напряжений осуществлялся в рамках несвязанной задачи термоупругости в квазистатической постановке с использованием метода конечных элементов [122].

Были использованы следующие условия роста лазерно-индуцированной трещины: расчетный коэффициент интенсивности напряжений  $K_I$  в вершине трещины должен превышать критический коэффициент интенсивности напряжений  $K_{Ic}$ , при этом напряжения в вершине трещины должны быть растягивающими [137]. Критический коэффициент интенсивности напряжений  $K_{Ic}$  представляет собой механическую характеристику материала, которая характеризует его способность сопротивляться распространению трещины нормального отрыва при хрупком разрушении [135; 136].

Для повышения точности расчетов  $K_I$  были использованы специальные элементы, моделирующие сингулярность напряжений у вершины трещины. При этом для получения корневой асимптотики у вершины трещины осуществлялся сдвиг узлов изопараметрических элементов на четверть стороны элемента в направлении вершины [135, 137].

На рисунке 3.27 приведена схема расположения зон воздействия лазерного излучения и хладагента в плоскости обработки. Позицией 1 отмечен лазерный пучок, позицией 2 – хладагент, позицией 3 – трещина, позицией 4 – стеклянная пластина. Горизонтальной стрелкой на рисунке указано направление перемещения обрабатываемого изделия относительно лазерного пучка и хладагента.

Для проведения сравнительного анализа в данной работе расчеты выполнялись для кварцевого стекла и для листового силикатного стекла. Свойства данных материалов приведены в таблице 3.2.

Расчеты проводились для прямоугольных пластин с геометрическими размерами  $15 \times 20 \times 1 \cdot 10^{-3}$  м. Моделирование проводилось для случая воздействия лазерного излучения с длиной волны равной  $10,6 \cdot 10^{-6}$  м.

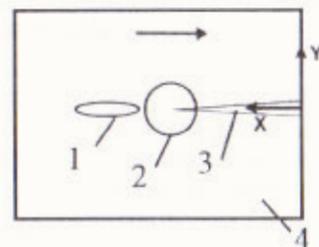


Рисунок 3.27 – Схема расположения зон воздействия лазерного излучения и хладагента в плоскости обработки стеклянной пластины [139]

При расчетах использовались следующие значения параметров лазерного пучка: большая ось  $A = 6 \cdot 10^{-3}$  м, малая ось  $B = 2 \cdot 10^{-3}$  м. Скорость перемещения пластины относительно лазерного пучка и хладагента выбиралась равной  $v = 15 \cdot 10^{-3}$  м/с. Полагалось, что используемые параметры подачи воздушно-водяной смеси обеспечивают охлаждение поверхности стекла с коэффициентом теплоотдачи равным  $7000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$  [141]. Радиус пятна хладагента  $R_h = 3 \cdot 10^{-3}$  м. Длина стартовой трещины изменялась в диапазоне от  $0,75 \cdot 10^{-3}$  до  $1,5 \cdot 10^{-3}$  м.

Таблица 3.2 – Свойства листового и кварцевого стекла

Свойства материала	Листовое силикатное стекло	Кварцевое стекло
Плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$	2450	2200
Удельная теплоемкость, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$	860	880
Теплопроводность, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$	0,88	1,34
Коэффициент линейного термического расширения, $\text{град}^{-1} \cdot 10^{-7}$	89	5
Модуль Юнга, $\cdot 10^9 \text{ Па}$	70	78
Коэффициент Пуассона	0,22	0,17
Критический коэффициент интенсивности напряжений $K_{Ic}$ , $\cdot 10^6 \text{ Па м}^{1/2}$	0,5	0,7

Отметим, что температура в зоне обработки при лазерном раскалывании должна быть ограничена значениями, соответствующими отсутствию релаксации термоупругих напряжений. Для учета особенностей каждого вида стекла выбирают такую величину, как значение темпера-

туры стеклования, которую нельзя превышать при лазерной обработке стекла (для кварцевого стекла это 1473 К, для листового силикатного стекла – 789 К [17]).

В ходе численного эксперимента были определены значения мощности лазерного излучения, обеспечивающие нагрев материала до температуры стеклования, при использовании вышеперечисленных параметров обработки и геометрии образцов. В случае термораскалывания кварцевого стекла максимальная допустимая мощность лазерного излучения  $P = 30$  Вт, а в случае листового силикатного стекла –  $P = 10$  Вт.

Результаты проведенных расчетов представлены на рисунках 3.28 – 3.33.

На рисунках 3.28 – 3.30 цифрой 1 отмечены расчетные кривые, соответствующие случаю термораскалывания кварцевого стекла, а цифрой 2 отмечены расчетные кривые, полученные при моделировании термораскалывания листового силикатного стекла. При проведении сравнительного анализа лазерного термораскалывания кварцевого и листового силикатного стекла длина стартовой трещины задавалась равной  $1 \cdot 10^{-3}$  м, при этом не использовалась техника перестроения конечно-элементной сетки (т. е. длина трещины оставалась постоянной).

Как уже отмечалось ранее, при используемых параметрах обработки нагрев материала осуществлялся до температур стеклования кварцевого и листового силикатного стекла (рисунок 3.28).

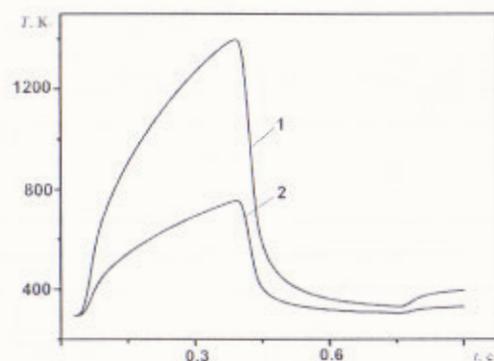


Рисунок 3.28 – Расчетные значения температуры  $T$  в вершине трещины [139]

Как видно из графиков, представленных на рисунке 3.14, при лазерном термораскалывании кварцевых и листовых силикатных стекол в вершине стартового дефекта в результате лазерного нагрева формируются значительные по величине напряжения сжатия. Максимальные по величине значения сжимающих напряжений в вершине стартовой трещины достигают  $-168 \cdot 10^6$  Па для кварцевого стекла и  $-692 \cdot 10^6$  Па для листового силикатного стекла. Далее вследствие воздействия хладагента в вершине стартового дефекта формируются растягивающие напряжения, максимальные значения которых равны, соответственно  $143 \cdot 10^6$  Па в случае моделирования обработки кварцевого стекла и  $388 \cdot 10^6$  Па в случае листового силикатного стекла (рисунок 3.29).

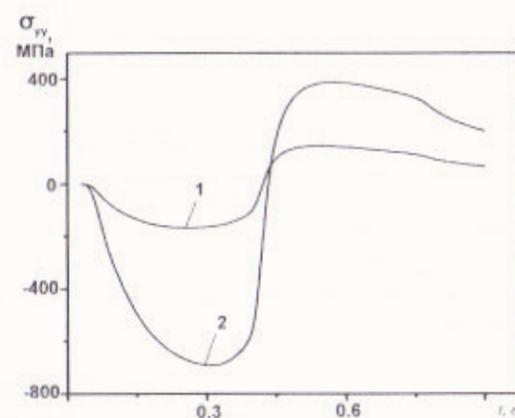


Рисунок 3.29 – Расчетные значения упругих напряжений  $\sigma_{ry}$  в вершине трещины [139]

Как видно из графиков, представленных на рисунке 3.30, в вершине стартовой трещины последовательно формируются два максимума коэффициентов интенсивности напряжений. При этом второй максимум значений коэффициентов интенсивности напряжений, значения которых для кварцевого стекла равны  $0,82 \cdot 10^6$  Па·м<sup>1/2</sup> и  $2,14 \cdot 10^6$  Па·м<sup>1/2</sup>, для листового силикатного стекла соответствует уже растягивающим напряжениям в вершине трещины, что означает выполнение обоих необходимых условий для начала развития трещины.

При сравнении значений величины термоупругих напряжений и значений коэффициентов интенсивности напряжений, формируемых в вершине трещины при термораскалывании листового и кварцевого стекла,

видно, что в случае резки кварцевого стекла максимальные значения коэффициента интенсивности напряжений меньше в 2,6 раза. При этом необходимо учитывать, что сравнение проводится при различных максимальных значениях температуры в зоне обработки (см. рисунок 3.28).

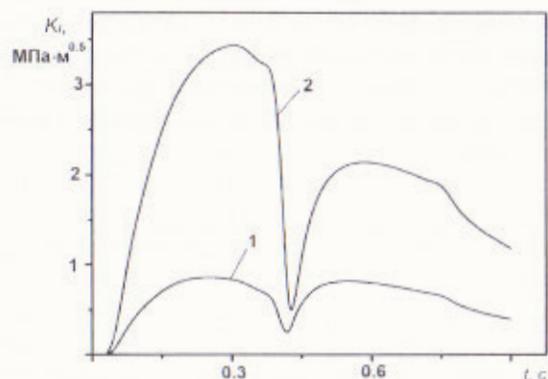


Рисунок 3.30 – Расчетные значения коэффициента интенсивности напряжений  $K_I$  в вершине трещины [139]

Для изучения влияния параметров стартового дефекта на процесс инициализации лазерно-индуцированной трещины были выполнены расчеты значений напряжений и коэффициентов интенсивности напряжений в вершине трещины для различных значений длины стартового дефекта с использованием техники перестроения конечно-элементной сетки.

На рисунках 3.31 – 3.33 цифрой 1 отмечены расчетные кривые, полученные при длине стартового дефекта  $L = 0,75 \cdot 10^{-3}$  м, цифрой 2 отмечены кривые, полученные при  $L = 1 \cdot 10^{-3}$  м, цифрой 3 отмечены кривые, полученные при  $L = 1,5 \cdot 10^{-3}$  м.

Необходимо отметить, что во всех трех расчетных случаях осуществляется развитие лазерно-индуцированных трещин из стартовых дефектов (рисунок 3.31). Однако следует обратить внимание на заметное влияние длины стартового дефекта на величину термоупругих напряжений и коэффициентов интенсивности напряжения в вершине трещины (рисунки 3.32, 3.33).

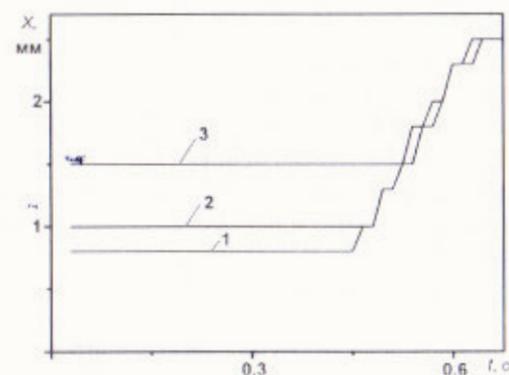


Рисунок 3.31 – Расчетные значения координат  $X$  вершины трещины [139]

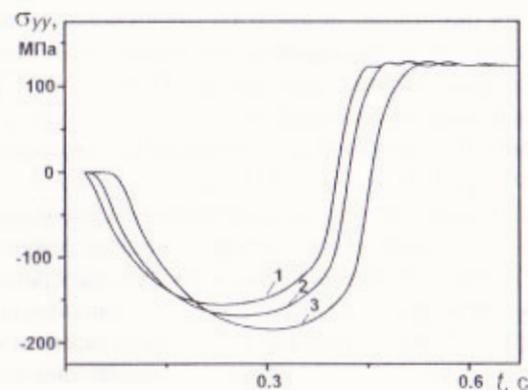


Рисунок 3.32 – Расчетные значения упругих напряжений  $\sigma_{yy}$  в вершине трещины [139]

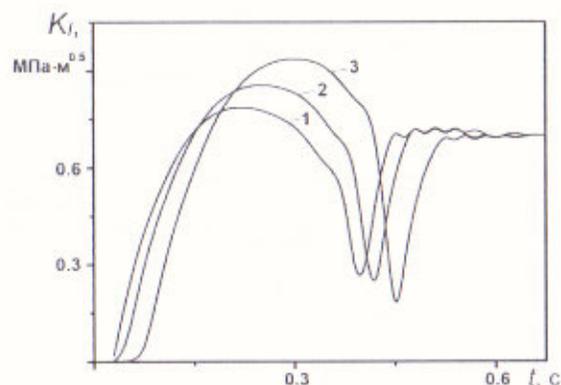


Рисунок 3.33 – Расчетные значения коэффициента интенсивности напряжений  $K_I$  в вершине трещины [139]

Так, при длине стартового дефекта  $L = 0,75 \cdot 10^{-3}$  м максимальные значения коэффициента интенсивности напряжений составляют  $K_I = 0,79 \cdot 10^6$  Па·м<sup>1/2</sup>, при  $L = 1 \cdot 10^{-3}$  м, максимальные значения коэффициента интенсивности напряжений составляют  $K_I = 0,86 \cdot 10^6$  Па·м<sup>1/2</sup>, а при  $L = 1,5 \cdot 10^{-3}$  м максимальные значения коэффициента интенсивности напряжений составляют  $K_I = 0,94 \cdot 10^6$  Па·м<sup>1/2</sup> [139].

Поэтому вероятность лазерно-индуцированной инициации трещин можно увеличить за счет увеличения длины иницирующего дефекта в виде надреза. Это имеет принципиальное значение при процессе лазерно-термического раскалывания кварцевого стекла. При этом, применение технологии моделирования процесса формирования термоиндуцированной трещины в рамках теории термоупругости и линейной механики разрушения с использованием техники перестроения конечно-элементной сетки обеспечивает возможность проведения необходимых расчетов технологических режимов лазерного термораскалывания кварцевых стекол с учетом параметров стартового дефекта.

В работе получены результаты, которые показывают принципиальную необходимость учета параметров стартового дефекта при расчете технологических режимов лазерного раскалывания кварцевых стекол.

### 3.2.4 Моделирование процесса лазерного термораскалывания кристаллического кварца, учитывающего анизотропию его теплофизических и упругих свойств

В последнее время в связи с интенсивным развитием микроэлектроники, практический интерес представляют исследования, посвященные изучению управляемого лазерного термораскалывания различных кристаллов [140; 141]. Недостатком данной работы является то, что численное моделирование термоупругих полей в ней проведено в двумерной постановке задачи и без учета анизотропии упругих свойств кристаллов. Для получения корректных результатов необходимо проведение трехмерного моделирования процесса управляемого лазерного термораскалывания кристаллического кварца с учетом его анизотропии.

Для моделирования процессов лазерного термораскалывания кристаллического кварца был использован метод конечных элементов [122]. С физической точки зрения квазистатическая постановка задачи термоупругости означает использование предположения о том, что напряженное состояние устанавливается значительно быстрее, чем достигается тепловое равновесие [135].

Для определения направления развития трещины была выбрана величина максимальных растягивающих напряжений [135]. Согласно этому положению, микротрещина распространяется в направлении, перпендикулярном действию максимальных растягивающих напряжений. Также необходимо учесть, что трещина, распространяющаяся в зоне растяжения, прекращает свой рост в зоне сжатия.

Как известно кристаллический кварц обладает сильно выраженной анизотропией свойств в зависимости от направления ориентации кристаллографической решетки. При этом у кристаллического кварца вдоль оси симметрии третьего порядка и в плоскости, перпендикулярной ей, значения таких важных свойств, как коэффициент линейного термического расширения и коэффициент теплопроводности отличаются в 1,6 и в 1,8 раза соответственно.

При разделении кристаллического кварца методом лазерного термораскалывания необходимо определять параметры резки с учетом выбора направления резки относительно кристаллографической ориентации исходного образца. Как указывалось выше, такие важные параметры, как коэффициент линейного термического расширения и коэффициент теплопроводности, принимают различные значения в зависимости от ориентации кристаллического кварца. При этом, безусловно, необходимо учитывать при определении интенсивности нагрева в направлении резки значения этих коэффициентов.

Дело в том, что величина термоупругих напряжений, возникающих при изменении температуры в твердом теле прямо пропорциональна произведению соответствующего коэффициента линейного термического расширения на величину изменения температуры:

$$\sigma_x = k_l \alpha_x \Delta T, \quad \sigma_y = k_l \alpha_y \Delta T, \quad \sigma_z = k_l \alpha_z \Delta T \quad (3.33).$$

где  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  – напряжения, действующие в направлении осей X, Y, Z соответственно;

$k_l$  – коэффициент пропорциональности;

$\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$  – коэффициенты линейного термического расширения в направлении осей X, Y, Z;

$\Delta T$  – разность температур.

Отметим, что при лазерном термораскалывании определяющее влияние на формирование лазерно-индуцированной трещины играют напряжения, действующие перпендикулярно плоскости разделения, а величина этих напряжений пропорциональна линейному коэффициенту термического расширения в том же направлении (а именно, в направлении перпендикулярном плоскости разделения). Таким образом, при формировании трещины в плоскости XZ необходимо рассматривать напряжения  $\sigma_x$ , при формировании трещины в плоскости XY необходимо рассматривать напряжения  $\sigma_y$ , при формировании трещины в плоскости ZY необходимо рассматривать напряжения  $\sigma_z$ .

Отметим, что  $\Delta T$  в данном случае равно разности между максимальной температурой в зоне лазерного нагрева  $T_{max}$  и температурой в зоне воздействия хладагента  $T_{min}$ . В свою очередь, как известно,  $T_{max}$  обратно пропорциональна теплопроводности материала. При этом в случае реализации лазерного термораскалывания таких анизотропных материалов, как кристаллический кварц наиболее существенный вклад в изменение  $T_{max}$  оказывает величина коэффициента теплопроводности в направлении, перпендикулярном плоскости обработки. Таким образом, при формировании трещины, перпендикулярной плоскости YZ необходимо учитывать коэффициент теплопроводности  $\lambda_x$ , при формировании трещины, перпендикулярной плоскости XY, необходимо учитывать коэффициент теплопроводности  $\lambda_y$ , при формировании трещины, перпендикулярной плоскости XZ следует учитывать коэффициент теплопроводности  $\lambda_z$ .

Также известно, что  $T_{max}$  обратно пропорциональна скорости относительного перемещения лазерного пучка и материала и прямо пропорциональна мощности лазерного излучения.

Поэтому для соотношения скорости относительного перемещения лазерного пучка и материала и мощности лазерного излучения в зависимости от изменения значения коэффициента линейного термического расширения и коэффициента теплопроводности кристаллического кварца при трех возможных вариантах резки справедливы следующие условия [142]:

1) случай лазерного термораскалывания кристаллического кварца вдоль оси симметрии третьего порядка, при этом линия реза лежит в плоскости, параллельной оси симметрии третьего порядка

$$\frac{v}{P} = k \cdot \frac{\alpha_y}{\alpha_x} = k \cdot \frac{\alpha_{\parallel}}{\lambda_x};$$

2) случай лазерного термораскалывания кристаллического кварца перпендикулярно оси симметрии третьего порядка, при этом линия реза лежит в плоскости, параллельной оси симметрии третьего порядка

$$\frac{v}{P} = k \cdot \frac{\alpha_z}{\alpha_x} = k \cdot \frac{\alpha_{\parallel}}{\lambda_x};$$

3) случай лазерного термораскалывания кристаллического кварца перпендикулярно оси симметрии третьего порядка, при этом линия реза лежит в плоскости, перпендикулярной оси симметрии третьего порядка

$$\frac{v}{P} = k \cdot \frac{\alpha}{\alpha_x} = k \cdot \frac{\alpha_{\perp}}{\lambda_{\parallel}};$$

где  $v$  – скорость относительного перемещения лазерного пучка и материала, м/с;

$P$  – мощность лазерного излучения, [Вт];

$k$  – коэффициент пропорциональности, [с<sup>-1</sup>];

$\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$  – коэффициенты линейного термического расширения в направлении осей X, Y, Z [K<sup>-1</sup>],

$\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$  – коэффициенты теплопроводности в направлении осей X, Y, Z [Вт/м·К],

$\alpha_{\parallel}, \alpha_{\perp}$  – коэффициенты линейного термического расширения в направлении оси симметрии третьего порядка и перпендикулярно ей соответственно, [K<sup>-1</sup>],

$\lambda_{\parallel}, \lambda_{\perp}$  – коэффициенты теплопроводности в направлении оси симметрии третьего порядка и перпендикулярно ей соответственно, [Вт/м·К].

Коэффициенты линейного термического расширения кристаллического кварца вдоль оси симметрии третьего порядка и перпендикулярно ей составляет соответственно  $\alpha_{\parallel} = 9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ,  $\alpha_{\perp} = 14,8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . Коэффи-

циенты теплопроводности кристаллического кварца вдоль оси симметрии третьего порядка и перпендикулярно ей составляет соответственно  $\lambda_1 = 12,3 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ,  $\lambda_2 = 6,8 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$  [121; 143].

Данные случаи были выбраны в связи с тем, что срезы по данным направлениям широко используются в промышленности: так в оптических приборах используются X-срезы, а в сенсорных устройствах Y-срезы.

Для стабилизации процесса лазерного управляемого термораскалывания кристаллического кварца было предложено использовать два лазерных луча вместо одного. Причем поглощение для первого луча является поверхностным, а для второго луча – объемным. В качестве лазерного излучения с поверхностным поглощением предложено использовать  $\text{CO}_2$ -лазер с длиной волны  $10,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ , а для объемного поглощения – YAG-лазер с длиной волны  $1,06 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ . Расположения двух лазерных пучков с различными коэффициентами поглощения и хладагента относительно друг друга изображено на рисунке 3.34.

Для определения влияния анизотропии теплофизических свойств в различных направлениях были проведены расчеты по определению термоупругих полей, возникающих в кристаллическом кварце при его термораскалывании. В одних случаях учитывалась анизотропия как коэффициента теплопроводности, так и коэффициента линейного термического расширения, в других случаях только один из них, причем сначала выбирался коэффициент вдоль главной оптической оси, а потом коэффициент, перпендикулярный главной оптической оси (таблицы 3.3-3.5).

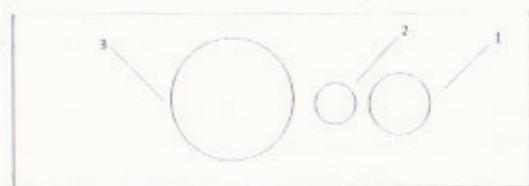


Рисунок 3.34 – Относительное расположение лазерных пучков с различными коэффициентами поглощения и хладагента. 1 – лазерный пучок с поверхностным поглощением; 2 – лазерный пучок с объемным поглощением; 3 – хладагент

Таблица 3.3 – Направление трещины относительно главной оптической оси для 10 различных случаев расчетов

Номер опыта	1	2	3	4	5
Направление трещины относительно главной оптической оси					
Номер опыта	6	7	8	9	10
Направление трещины относительно главной оптической оси					

Таблица 3.4 – Параметры расчетов при математическом моделировании в среде ANSYS при одно- и двухлучевом термораскалывании с учетом анизотропии его теплофизических свойств

Параметры	Номер опыта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$\lambda_1, \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$	6,8	6,8	6,8	6,8	6,8	6,8	6,8	12,3	6,8	12,3
$\lambda_2, \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$	6,8	12,3	6,8	6,8	6,8	12,3	6,8	6,8	6,8	6,8
$\lambda_3, \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$	12,3	6,8	6,8	6,8	12,3	6,8	6,8	6,8	6,8	6,8
$C, \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$	732									
$\rho, \text{ кг/м}^3$	2650									
$\alpha_1 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$	14,8	14,8	14,8	14,8	14,8	14,8	14,8	9	9	14,8
$\alpha_2 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$	14,8	9	14,8	9	14,8	14,8	14,8	14,8	14,8	14,8
$\alpha_3 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$	9	14,8	9	14,8	14,8	14,8	14,8	14,8	14,8	14,8
$E_x, \text{ Па}$	$90 \cdot 10^9$									
$R_{\text{вр}}$	0,19									
$t_{ay}, \text{ с}$	0,025									
$S, \text{ м}$	$0,25 \cdot 10^{-3}$									
$v = S/t_{ay}$	10									
$r_1, \text{ м (CO}_2\text{)}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$									
$r_2, \text{ м (YAG)}$	$1 \cdot 10^{-3}$									
$R_2, \text{ м (H}_2\text{O)}$	$3 \cdot 10^{-3}$									
HFLUX,	$2,12 \cdot 10^6$									
CONV, Вт(м <sup>2</sup> ·с)	7000									
$n$	31									
$t = n \cdot t_{ay}, \text{ с}$	0,775									

Таблица 3.5 – Расчетные значения максимальных температур, максимальных сжимающих  $\sigma_{yy}$  и растягивающих напряжений  $\sigma_{zz}$ , возникающих в кристаллическом кварце при однолучевом и двухлучевом термораскальвании с учетом анизотропии его теплофизических свойств

Параметры	Номер опыта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Температура, сжимающие и растягивающие напряжения при однолучевом термораскальвании										
$T_{max}, K$	972	850	1037	1037	972	850	1037	994	1037	994
$\sigma_{yy} \cdot 10^6 Pa$	-329	-363	-315	-566	-534	-329	-529	-480	-503	-507
$\sigma_{zz} \cdot 10^6 Pa$	46,1	55,5	73,8	79,8	62,8	70,1	93,1	86,8	91,6	88,9
Температура, сжимающие и растягивающие напряжения при двухлучевом термораскальвании										
$T_{max}, K$	973	932	1091	1091	972	932	1091	1043	1091	1043
$\sigma_{yy} \cdot 10^6 Pa$	-271	-292	-269	-468	-449	-304	-463	-398	-414	-419
$\sigma_{zz} \cdot 10^6 Pa$	72,6	91,8	115	129	103	110	147	139	144	143

После проведения расчетов в программной системе ANSYS методом конечных элементов были получены распределения термоупругих полей для всех 10 случаев расчетов.

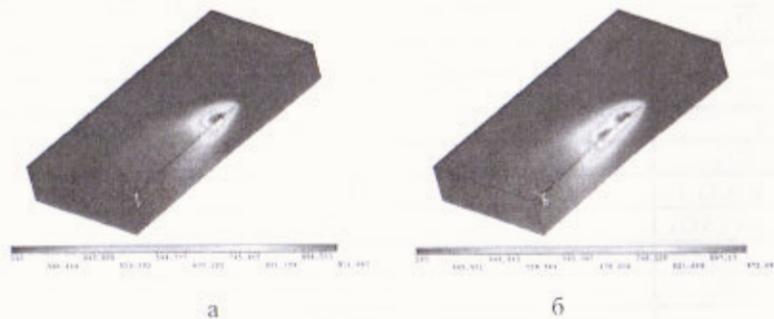


Рисунок 3.35 – Распределение термоупругих полей для случая 1. а – при однолучевом термораскальвании; б – при двухлучевом термораскальвании

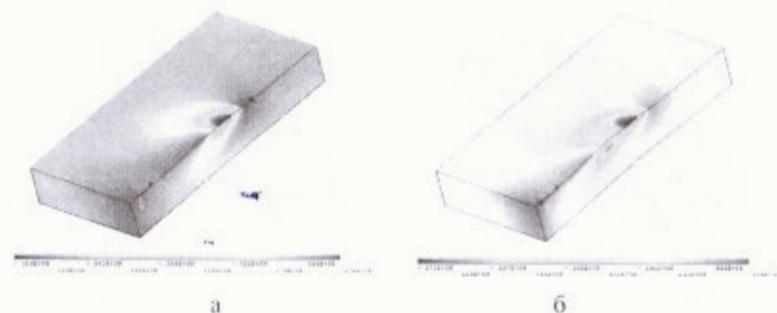


Рисунок 3.36 – Распределение термоупругих напряжений для случая 1. а – при однолучевом термораскальвании; б – при двухлучевом термораскальвании

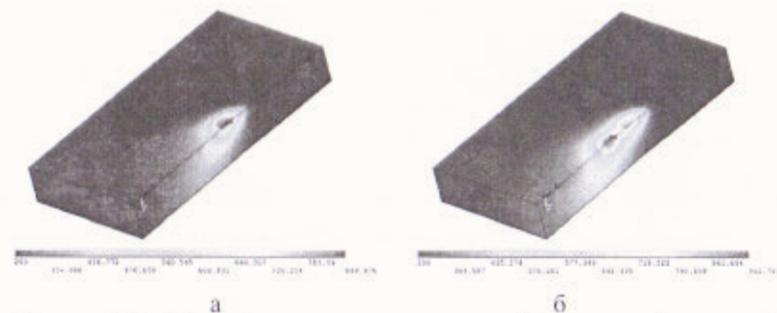


Рисунок 3.37 – Распределение термоупругих полей для случая 2. а – при однолучевом термораскальвании; б – при двухлучевом термораскальвании

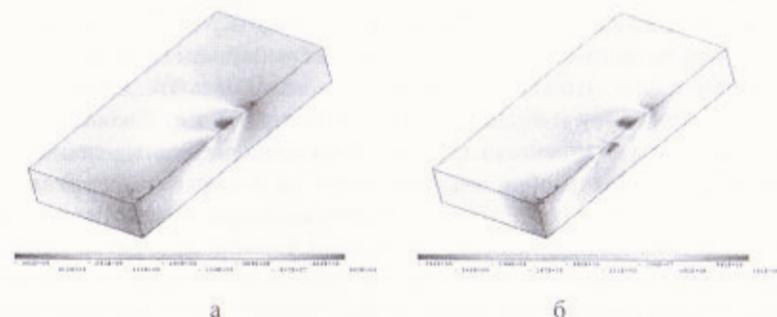


Рисунок 3.38 – Распределение термоупругих напряжений для случая 2. а – при однолучевом термораскальвании; б – при двухлучевом термораскальвании

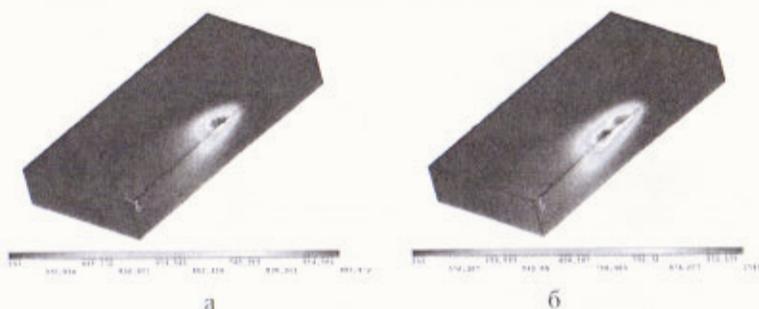


Рисунок 3.39 – Распределение термоупругих полей для случая 8. а – при однолучевом термораскальвании; б – при двухлучевом термораскальвании

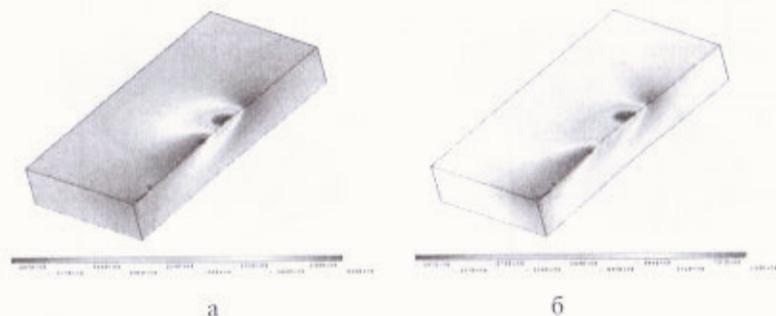


Рисунок 3.40 – Распределение термоупругих напряжений для случая 8. а – при однолучевом термораскальвании; б – при двухлучевом термораскальвании

Расчеты показали, что введение второго луча в процесс лазерного термораскальвания позволяет увеличить максимальные растягивающие напряжения при небольшом увеличении максимальной температуры. Введение второго луча позволяет увеличить качество и стабильность процесса, при этом не происходит превышения температуры плавления кристалла кварца. Таким образом, в зависимости от ориентации кристалла кварца при резке в различных направлениях, следует осуществлять дифференцированный нагрев, обеспечивающий формирование необходимых для создания лазерно-индуцированной трещины термоупругих напряжений в каждом направлении ориентации. В случае лазерного термораскальвания кристаллического кварца вдоль оси симметрии третьего порядка, при этом линия реза лежит в плоскости параллельной оси симметрии третьего порядка (случай 8) напряжения растяжения  $\sigma_{zz}$  равны  $139 \cdot 10^6$  Па. В случае лазерного термораскальвания кристаллического кварца перпен-

дикулярно оси симметрии третьего порядка, при этом линия реза лежит в плоскости параллельной оси симметрии третьего порядка (случай №2) –  $\sigma_{zz} = 91,8 \cdot 10^6$  Па. В случае лазерного термораскальвания кристаллического кварца перпендикулярно оси симметрии третьего порядка, при этом линия реза лежит в плоскости перпендикулярной оси симметрии третьего порядка (случай 1) –  $\sigma_{zz} = 72,6 \cdot 10^6$  Па. Таким образом, для формирования термоиндуцированной трещины в случаях 2 и 1 необходимо принять следующие меры: либо уменьшить скорость резки перпендикулярно оси симметрии третьего порядка в 1,6 – 1,8 раза по сравнению с вариантом резки вдоль оси симметрии третьего порядка (как для случая, когда линия реза лежит в плоскости перпендикулярной оси симметрии третьего порядка, так и для случая, когда линия реза лежит в плоскости, параллельной оси симметрии третьего порядка), либо соответственно увеличить мощность лазерного излучения [144].

### 3.2.5 Моделирование процессов лазерной обработки различных срезов кристаллического кварца

Актуальность данного направления исследований обусловлена существенными недостатками традиционных способов разделения кристаллов, к которым относятся значительные потери обрабатываемого материала и загрязнение рабочих поверхностей. В работе [145] авторами данной статьи были проведены исследования особенностей процесса лазерного термораскальвания кристаллического кварца с учетом анизотропии его свойств. Однако моделирование в [145] было выполнено лишь для стандартных первоначальных ориентаций кристаллических образцов. При этом на практике наиболее широко применяются кристаллы кварца АТ- и ВТ- срезов [146]. В связи с этим в данной работе было выполнено исследование особенностей процесса лазерного раскалывания кристаллического кварца АТ- и ВТ-срезов.

Расчет полей термоупругих напряжений, формируемых в кварцевых пластинах при лазерном раскалывании, был выполнен с использованием метода конечных элементов в рамках несвязанной задачи термоупругости в квазистатической постановке [122; 132].

Расчеты проводились для квадратных пластин с геометрическими размерами  $20 \times 20 \times 1,5 \cdot 10^{-3}$  м и  $20 \times 20 \times 0,75 \cdot 10^{-3}$  м. Моделирование проводилось для случая воздействия лазерного излучения с длиной волны равной  $10,6 \cdot 10^{-6}$  м. Радиус пятна лазерного излучения  $R = 1,5 \cdot 10^{-1}$  м, мощность излучения  $P = 50$  Вт. Скорость перемещения пластины относительно лазерного пучка и хладагента выбиралась равной  $v = 5 \cdot 10^{-3}$  м/с и  $v = 15 \cdot 10^{-1}$  м/с. Термораскальвание проводилось по схеме, приведенной на рисунке 3.12 [145].

При расчетах плотность и удельная теплоемкость кристаллического кварца полагались соответственно равными  $\rho = 2643 \text{ кг/м}^3$  и  $C = 741 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$ . В ходе моделирования учитывались различия физических свойств кристаллического кварца в различных кристаллографических направлениях. Коэффициенты теплопроводности и линейного термического расширения кристаллического кварца полагались соответственно равными  $\lambda_{\parallel} = 12,3 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ ,  $\alpha_{\parallel} = 9 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$  вдоль оси симметрии третьего порядка Z и  $\lambda_{\perp} = 6,8 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ ,  $\alpha_{\perp} = 14,8 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$  – перпендикулярно оси Z [121; 143].

Низкотемпературный кварц принадлежит к тригональной системе, вследствие чего его упругие свойства описываются шестью независимыми компонентами тензора модулей упругости. Для расчетов использовались следующие константы упругой жесткости:  $C_{11} = 86,75 \cdot 10^9 \text{ Па}$ ,  $C_{12} = 5,95 \cdot 10^9 \text{ Па}$ ,  $C_{13} = 11,91 \cdot 10^9 \text{ Па}$ ,  $C_{14} = -17,8 \cdot 10^9 \text{ Па}$ ,  $C_{33} = 107,2 \cdot 10^9 \text{ Па}$ ,  $C_{44} = 57,8 \cdot 10^9 \text{ Па}$  [101; 147].

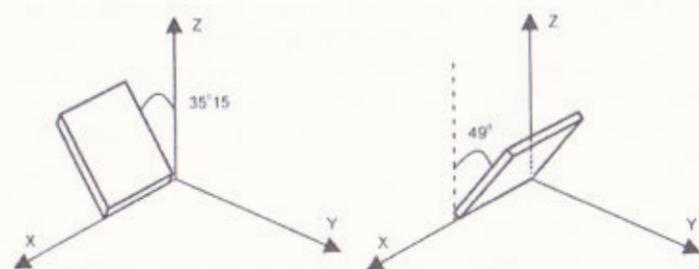


Рисунок 3.41 – АТ- и ВТ-срезы кристаллического кварца

Любое расположение кристаллического элемента относительно осей X, Y, Z может быть получено путем ряда последовательных поворотов одной из первоначальных ориентаций этого кристаллического элемента. В случае АТ-среза выполняется поворот на  $35^\circ$ , а в случае ВТ-среза выполняется поворот на  $49^\circ$  [148] (см. рисунок 3.41).

Матрица  $\{C_{ij}\}$  для АТ-среза может быть записана в следующем виде:

$$\{C_{ij}\} = \begin{pmatrix} 86,74 & -8,25 & 27,15 & -3,66 & 0 & 0 \\ -8,25 & 129,77 & -7,42 & 5,70 & 0 & 0 \\ 27,15 & -7,42 & 102,83 & 9,92 & 0 & 0 \\ -8,66 & 5,70 & 9,92 & 38,61 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 68,78 & 2,57 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2,57 & 28,96 \end{pmatrix} \cdot 10^9 \text{ Па. (3.34)}$$

Соответственно для ВТ-среза матрица  $\{C_{ij}\}$  имеет вид

$$\{C_{ij}\} = \begin{pmatrix} 86,74 & 27,53 & -8,63 & 0,057 & 0 & 0 \\ 27,53 & 98,24 & -5,67 & -12,80 & 0 & 0 \\ -8,63 & -5,67 & 130,86 & 0,17 & 0 & 0 \\ 0,057 & -12,80 & 0,17 & 40,36 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 29,87 & -6,49 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -6,49 & 67,87 \end{pmatrix} \cdot 10^9 \text{ Па. (3.35)}$$

Расчет термоупругих полей, формируемых в кварцевой пластине в результате последовательного лазерного нагрева и воздействия хладагента, осуществлялся для четырех различных вариантов: I – анализ АТ-среза при перемещении лазерного пучка в направлении, параллельном оси X; II – анализ АТ-среза при перемещении лазерного пучка в направлении, перпендикулярном оси X; III – анализ ВТ-среза при перемещении лазерного пучка в направлении параллельном оси X; IV – анализ ВТ-среза при перемещении лазерного пучка в направлении, перпендикулярном оси X.

Таблица 3.6 – Расчетные значения максимальных температур в обрабатываемой пластине

Вариант	Максимальная температура в обрабатываемой пластине T, К			
	$h = 0,75 \cdot 10^{-3} \text{ м}$		$h = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$	
	$v = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$	$v = 15 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$	$v = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$	$v = 15 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$
I	1520	994	1125	842
II	1538	1005	1136	847
III	1502	999	1135	862
IV	1531	1018	1156	871

Результаты проведенных расчетов представлены в таблицах 3.5 – 3.6 и на рисунках 3.27 – 3.30 [145]. В таблице 3.5 содержатся значения максимальных значений температур, формируемых в кварцевой пластине для

четырёх исследуемых вариантов обработки. Расчетные значения максимальных по величине термоупругих напряжений растяжения и сжатия содержатся в таблице 3.6. На рисунках 3.27 – 3.30 представлены распределения температурных полей и полей температурных напряжений для пластин толщиной  $h = 0,75 \cdot 10^{-3}$  м, обрабатываемых со скоростью  $v = 5 \cdot 10^{-3}$  м/с при различных вариантах обработки [149].

Таблица 3.7 – Расчетные максимальные по величине напряжений растяжения и сжатия в зоне обработки

Вариант	Максимальные напряжения в зоне обработки, $10^6$ Па	$h = 0,75 \cdot 10^{-3}$ м		$h = 1,5 \cdot 10^{-3}$ м	
		$v = 5 \cdot 10^{-3}$ м/с	$v = 15 \cdot 10^{-3}$ м/с	$v = 5 \cdot 10^{-3}$ м/с	$v = 15 \cdot 10^{-3}$ м/с
I	Сжатия	650	343	431	281
	Растяжения	85	33	45	22
II	Сжатия	717	381	483	319
	Растяжения	100	40	53	34
III	Сжатия	605	322	401	264
	Растяжения	77	27	42	19
IV	Сжатия	563	316	395	272
	Растяжения	74	31	50	30

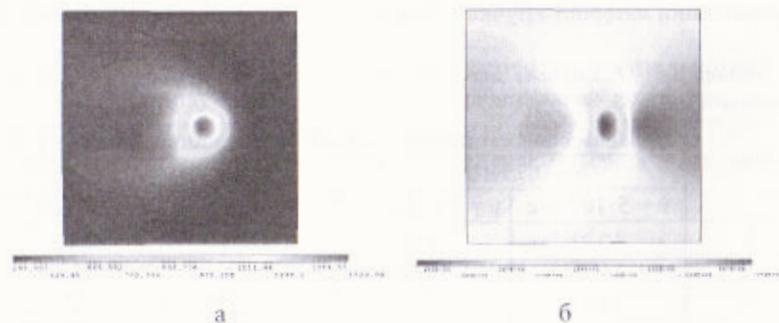


Рисунок 3.42 – Распределение температурных полей (а) и полей термоупругих напряжений (б) при варианте обработки I

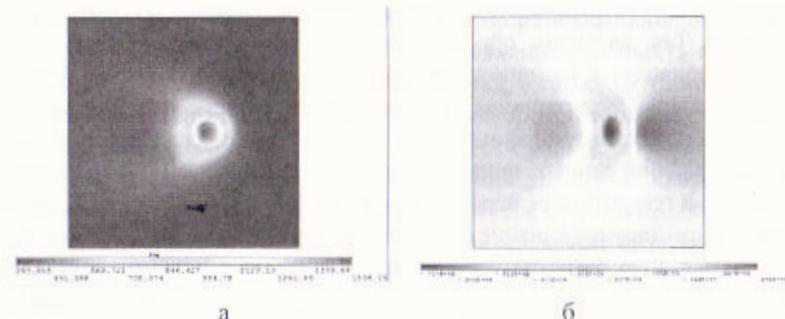


Рисунок 3.43 – Распределение температурных полей (а) и полей термоупругих напряжений (б) при варианте обработки II

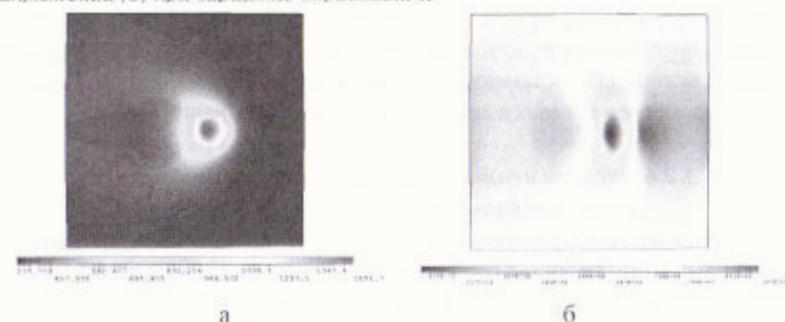


Рисунок 3.44 – Распределение температурных полей (а) и полей термоупругих напряжений (б) при варианте обработки III

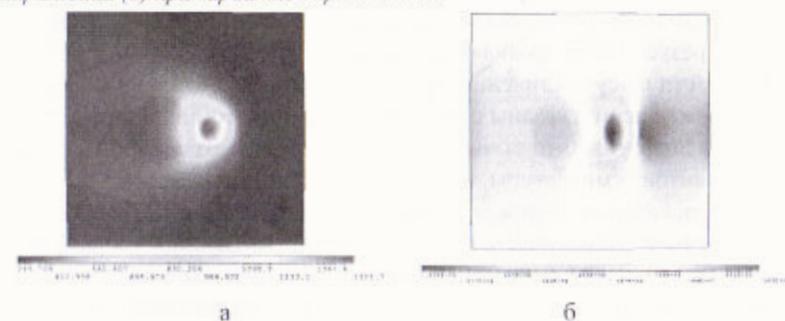


Рисунок 3.45 – Распределение температурных полей (а) и полей термоупругих напряжений (б) при варианте обработки IV

Анализ данных, приведенных в таблице 3.6, показывает, что анизотропия свойств кристаллов кварца в случае обработки АТ- и ВТ-срезов не оказывает существенного влияния на максимальные значения температуры в зоне обработки. Значительно более важными факторами оказываются такие пара-

метры, как скорость обработки и геометрические размеры обрабатываемой пластины. Так, различия, обусловленные анизотропией теплофизических свойств, приводят к разнице в максимальных значениях температуры, не превышающей 3 %, а различия, обусловленные скоростью обработки и геометрией образца для выбранных расчетных параметров, достигают 45 %. Из анализа значений данных, приведенных в таблице 3.7 следует, что скорость обработки и геометрические размеры обрабатываемой пластины также оказывают существенное влияние на значения термоупругих напряжений, формируемых в зоне обработки. Различия, обусловленные этими факторами, приводят к разнице в максимальных значениях растягивающих напряжений порядка (50 – 80) %. При этом и анизотропия свойств кристаллов кварца оказывает существенное влияние на максимальные значения термоупругих напряжений в зоне обработки. Так, соответствующие различия для максимальных значений растягивающих напряжений превышают 35 %. Данная разница в величинах растягивающих напряжений должна быть учтена при выборе параметров процесса лазерного термораскалывания [145].

### 3.2.6 Экспериментальные исследования по лазерному термораскалыванию кварцевого стекла

Уникальные теплофизические свойства кварцевого стекла, такие как низкий коэффициент линейного температурного расширения  $\alpha$  и высокая теплопроводность, делают его незаменимым конструкционным и оптическим материалом при создании целого ряда ответственных изделий и приборов. Однако механическая обработка кварцевого стекла, в первую очередь размерная резка, связана с серьезными трудностями. Поэтому к лазерной резке стекла проявляется повышенный интерес.

Трудности в осуществлении процесса термораскалывания кварцевого стекла прежде всего связаны с низким коэффициентом линейного термического расширения, что вызывает необходимость создания более высоких градиентов температуры, чем в случае обычных стекол.

Термораскалывание может быть осуществлено двумя способами: лазерным пучком эллиптического сечения, ориентированного малой полуосью по направлению перемещения, и круглым пучком с подачей в зону нагрева хладагента – воздушно-водяной смеси. Увеличение зоны эффективного воздействия напряжений за счет увеличения линейных размеров эллиптического пучка сопряжено с потерей точности резки. Таким образом, для обеспечения лазерного воздействия следует использовать пучок круглой формы, при этом для создания разницы температур следует подавать хладагент в зону нагрева, вследствие чего формируются напряжения, которые обеспечивают начало и развитие разделяющей микротрещины.

Для указанных способов лазерного термораскалывания основными параметрами, определяющими процесс, являются скорость перемещения и плотность мощности лазерного пучка, а также глубина образующейся микротрещины. Установлено, что скорость термораскалывания практически линейно зависит от плотности мощности лазерного излучения (рисунок 3.45). Ширина изменения диапазона скоростей при одинаковом уровне плотности мощности для обоих способов термораскалывания кварцевого стекла отличается в три раза (кривые 2,3 на рисунке 3.45). Скорость термораскалывания выше в случае применения охлаждения зоны нагрева. Плотность мощности для осуществления термораскалывания кварцевого стекла лежит в интервале  $(5 - 20) \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>, в то время как для термораскалывания боросиликатного стекла (кривая 1) достаточно плотности мощности  $(1 - 3) \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>. Следовательно, в случае термораскалывания стекла с низким КТЛР необходимы более высокие уровни плотности мощности лазерного излучения [150].

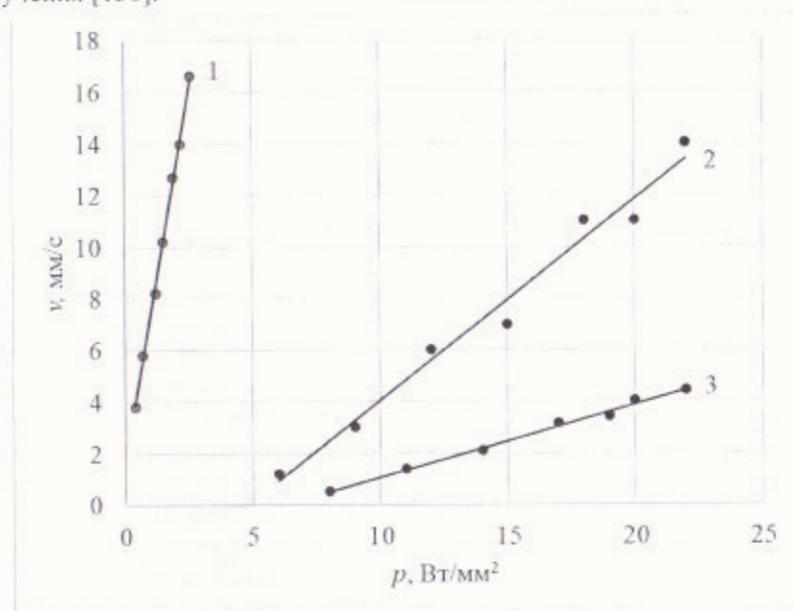


Рисунок 3.46 – Зависимость скорости термораскалывания для боросиликатного (1) и кварцевого (2, 3) стекол от плотности мощности лазерного пучка при различных способах термораскалывания. 1, 2 – с применением хладагента; 3 – без хладагента

На рисунке 3.46 приведены зависимости глубины микротрещины в стекле от скорости относительного перемещения лазерного пучка и стекла. Кривая 1 соответствует термораскалыванию боросиликатного стекла лазерным пучком круглого сечения с плотностью мощности  $1,5 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup> при подаче хладагента в зону нагрева, кривые 2, 3 – термораскалыванию кварцевого стекла при плотности мощности  $1,7 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup> с применением хладагента и термораскалыванию пучком эллиптического сечения без применения хладагента. Из приведенной зависимости следует, что диапазон изменения глубины микротрещины для кварцевого стекла значительно меньше, чем для силикатных стекол и зависит от способа термораскалывания. Так, при плотности мощности, отличающейся более чем в 10 раз, и одинаковым способе термораскалывания (кривые 1, 2 на рисунке 3.46) микротрещина имеет глубину до  $1 \cdot 10^{-3}$  м для боросиликатного стекла и до  $0,2 \cdot 10^{-3}$  м для кварцевого стекла. Для создания более глубокой микротрещины в кварцевом стекле можно использовать эллиптический пучок (кривая 3), что не всегда рационально ввиду значительного снижения скорости процесса.

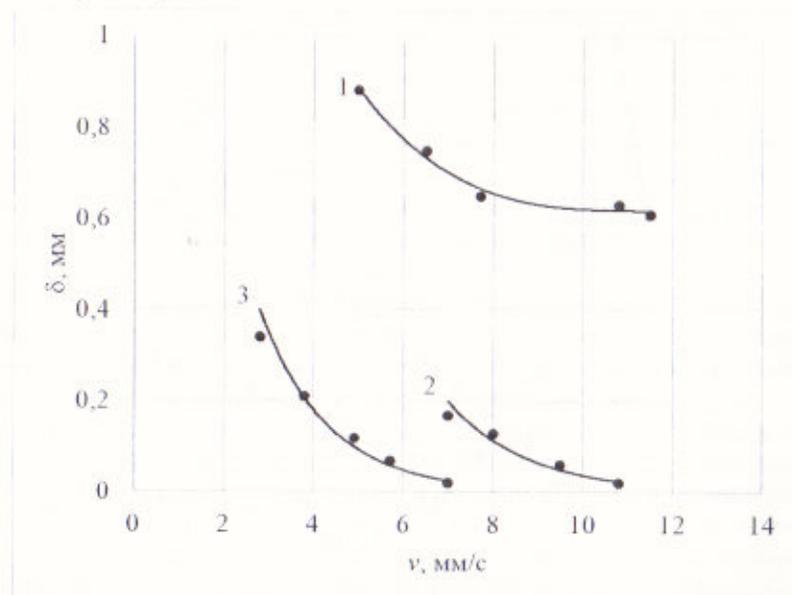


Рисунок 3.47 – Зависимости глубины микротрещины от скорости термораскалывания для боросиликатного (1) и кварцевого стекла с применением хладагента (2) и без применения хладагента (3)

Как показывают экспериментальные исследования, для начала и развития разделяющей микротрещины следует предоставить определенные условия, при которых этот процесс будет возможен. На основании исследований определена следующая схема технологического процесса:

- экспозиция поверхности стекла в течение  $t_d$  неподвижным лазерным пучком;
- воздействие хладагента на нагретую область стекла;
- нанесение надреза в месте экспозиции при относительном перемещении стекла и лазерного пучка.

В результате нагрева в стекле возникают сжимающие напряжения. В момент подачи хладагента происходит скачкообразное изменение знака и величины напряжений вследствие очень быстрого охлаждения локальной области стекла. Для скорости движения хладагента к охлаждаемой поверхности  $(1 - 8) \cdot 10^{-3}$  м/с коэффициент теплоотдачи составляет  $(2,5 - 5,9) \cdot 10^3$  Дж/(м<sup>2</sup>·с·К), что соответствует значению критерия Био большому, чем 100 [141]. Поэтому скорость охлаждения можно считать бесконечно большой и напряжения, формируемые хладагентом в поверхностном слое, определим согласно выражению [151]:

$$\sigma_{22}^{(t)} = -\alpha_T ET / (1-\nu), \quad (4.1)$$

сумма напряжений

$$\sigma_{22}^0 = \sigma_{22}^{(t)} + \sigma_{22}^{(s)} \quad (4.2)$$

определим напряжения растяжения, которые по модулю меньше напряжений сжатия, вызываемых лазерным пучком. Вследствие того, что прочность кварцевого стекла на растяжение значительно меньше, чем на сжатие, инициирование процесса зарождения микротрещины путем создания надреза в зоне подачи хладагента приводит к управляемому развитию последнего в разделяющую микротрещину. Температура на поверхности достигает максимальных значений через определенный промежуток времени на некотором расстоянии от лазерного пучка. По глубине стекла максимум температуры достигается в более поздние моменты времени. После достижения максимальных значений температуры происходит ее спад и постепенное выравнивание по глубине стекла. Следовательно, зона охлаждения должна располагаться на расстоянии большем, чем расстояние от центра пучка до точки максимального нагрева стекла на поверхности. Наибольшая величина напряжений растяжения пропорциональна КТЛР и максимуму температуры. Распределение нормальных напряжений, вызываемых лазерным пучком, показано на рисунке 3.48.

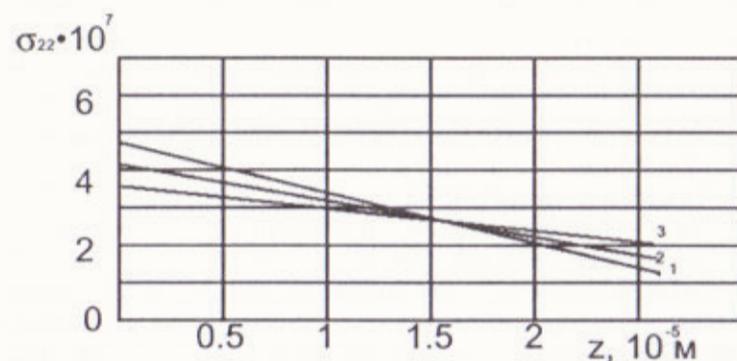


Рисунок 3.48 – Распределение напряжений сжатия по глубине кварцевого стекла в различные моменты времени [127]. 1 –  $t = 0,09 \text{ с}$ ; 2 –  $t = 0,1 \text{ с}$ ; 3 –  $t = 0,12 \text{ с}$ .

При уровне прочности, составляющем  $3 \cdot 10^8 \text{ Н/м}^2$  [141], в кварцевом стекле будет развиваться микротрещина, глубина которой составит  $1 \cdot 10^{-4} \text{ м}$ . Экспериментальная проверка показывает некоторое завышение таких оценок. Неточность расчетных значений составляет 25 – 30 %, что может быть связано, с одной стороны, модельным пренебрежением теплопереноса в направлении оси ОХ, совпадающей с направлением относительного перемещения лазерного пучка и стекла, и, с другой стороны, достаточно высокой нестабильностью мощности серийных  $\text{CO}_2$ -лазеров, достигающей 10 %. Однако предлагаемая модель процесса позволяет производить вполне удовлетворительные, с инженерной точки зрения оценки технологических параметров процесса термораскалывания.

На рисунке 3.49 приведена зависимость глубины микротрещины от величины удельного энергозклада, построенная на основании экспериментальных данных по термораскалыванию фотошаблонных заготовок толщиной  $3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  из кварцевого стекла С5-1 [127]. Удельный энергозклад определяется отношением плотности мощности  $q$  к скорости относительного перемещения лазерного пучка и стекла  $v$ . Изменение удельного энергозклада лазерного излучения в интервале  $(0,8 - 2,0) \cdot 10^9 \text{ Дж/м}$  приводит к линейному росту глубины микротрещины от  $2 \cdot 10^{-5}$  до  $2,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}$ , причем дальнейшее увеличение энергозклада ведет к незначительному возрастанию глубины микротрещины. Так, для кварцевого стекла толщиной  $3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  изменение удельного энергозклада лазерного излучения в интервале от  $2 \cdot 10^9 \text{ Дж/м}^3$  до  $5 \cdot 10^9 \text{ Дж/м}^3$  дает увеличение глубины микротрещины только на 10 – 15 %.

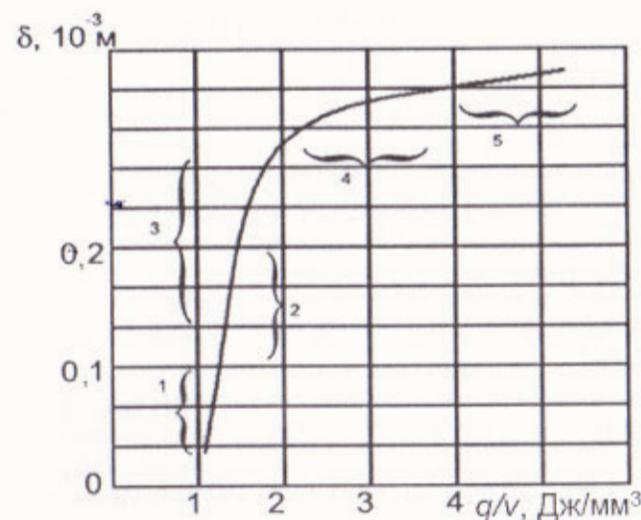


Рисунок 3.49 – Зависимость глубины микротрещины от величины удельного энергозклада для термораскалывания кварцевого стекла С5-1 толщиной  $3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  [127]. 1 –  $q = 2 \cdot 10^9 \text{ Вм/м}^2$ ; 2 –  $q = 9 \cdot 10^8 \text{ Вм/м}^2$ ; 3 –  $q = 6 \cdot 10^8 \text{ Вм/м}^2$ ; 4 –  $q = 5 \cdot 10^8 \text{ Вм/м}^2$ ; 5 –  $q = 4 \cdot 10^8 \text{ Вм/м}^2$ .

Микротрещина, образовавшись от нанесенного надреза, развивается в зоне подачи хладагента вслед за лазерным пучком со скоростью, определяемой относительным перемещением лазерного пучка и стекла. Следовательно, напряжения растяжения достигают своего максимального значения в области подачи хладагента на нагреваемую поверхность, после чего температурный градиент и вызванные им термоупругие напряжения спадают по мере выравнивания температуры на поверхности и в объеме стекла.

Развитие трещины сопровождается увеличением энергии, пропорциональным приросту площади свободной поверхности трещины. Трещина не будет расти, пока работа внешних сил при ее продвижении не будет по крайней мере, равной соответствующему приращению поверхностной энергии тела. Если в однородно-напряженное упругое тело с главными напряжениями  $\sigma_1, \sigma_2$  и  $\sigma_3$  внести очень тонкую круговую трещину радиусом  $s$  в плоскости, нормальном к направлению главного напряжения  $\sigma_1$ , то независимо от величин  $\sigma_2$  и  $\sigma_3$  упругая энергия тела возрастет на величину

$$\Delta W_1 = \frac{8(1 - \nu^2) \sigma_1^2 c^2}{3E}, \quad (3.36)$$

где  $\nu$  – коэффициент Пуассона;

$E$  – модуль Юнга.

Трещина имеет поверхностную энергию:

$$\Delta W_2 = 2\pi c^2 \gamma, \quad (3.37)$$

где  $\gamma$  – свободная поверхностная энергия материала.

Общее приращение свободной энергии тела в результате внесения трещины составляет:

$$\Delta W = -\Delta W_1 + \Delta W_2 = 2\pi c^2 \gamma - \frac{8(1 - \nu^2) \sigma_1^2 c^2}{3E}. \quad (3.38)$$

Здесь через  $\sigma$  обозначено напряжение, нормальное к плоскости трещины. Условие распространения трещины есть  $\delta \Delta W/dc = 0$ , что дает

$$\sigma = \sqrt{\frac{\pi E \lambda}{2(1 - \nu^2) c}}. \quad (3.39)$$

Для плоского деформированного состояния

$$\sigma = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi c(1 - \nu^2)}}. \quad (3.40)$$

Трещина не может расти при меньших напряжениях. Все изложенное справедливо и по отношению к тонким царапинам на поверхности тела. Для кварцевого стекла с  $E = 73 \cdot 10^9$  Па,  $\nu = 0,17$ ,  $\gamma = 69 \cdot 10^{-3}$  Дж/м<sup>2</sup> при царапине толщиной  $0,01 \cdot 10^{-3}$  м минимальное напряжение для роста трещины составляет  $\sigma = 1,8 \cdot 10^3$  Н/м<sup>2</sup>.

Как было сказано ранее, область нагрева поверхности материала лазерным излучением характеризуется распределением термоупругих напряжений, ключевую роль в котором играют напряжения сжатия.

При воздействии световым лучом на нагретую и охлажденную поверхность материала будет происходить разделение светового луча на прямой и преломленный лучи. Это связано с тем, что диэлектрическая проницаемость вещества зависит от деформации и проявляется в виде двойного лучепреломления. При одноосном растяжении или сжатии изотропное тело приобретает свойства оптически одноосного кристалла с оптической осью, параллельной оси растяжения или сжатия. Исследования двойного лучепреломления под действием нагрузок в обрабатываемом

материале позволяет установить характер и распределение в ней напряжений. Измерение разности хода обыкновенного и необыкновенного лучей позволяет оценить механические напряжения в материале.

При постоянной плотности мощности лазерного излучения величина удельного энерговклада будет зависеть от относительного перемещения лазерного пучка и материала. Чем меньше скорость, тем больше остаточные напряжения. Таким образом, измерение величины разности хода обыкновенного и необыкновенного лучей позволяет определить величину остаточных механических напряжений, возникающих на данной скорости относительного перемещения.

Установлено, что процесс термораскалывания кварцевого стекла осуществим, если после воздействия нагрева и охлаждения при относительном перемещении лазерного пучка и стекла вдоль линии термораскалывания образуется зона остаточных напряжений, в которой разность хода прямого и преломленного лучей составляет  $\Delta = (11 - 30) \cdot 10^{-9}$  м. Если значения  $\Delta < 11 \cdot 10^{-9}$  м, развитие надреза в микротрещину не происходит. Создание зоны с остаточными напряжениями свыше  $30 \cdot 10^{-9}$  м нецелесообразно в связи с возможностью появления поперечной посечки на краях микротрещины. Таким образом, создание остаточных напряжений в стекле вдоль линии реза, соответствующих разности хода прямого и преломленного лучей  $\Delta = (11 - 30) \cdot 10^{-9}$  м, гарантирует надежное и качественное термораскалывание стекла (таблица 3.8).

Однако из экспериментальных исследований вытекает, что одного создания максимальных напряжений растяжения вдоль желаемой линии реза путем подачи хладагента в зону нагрева недостаточно для термораскалывания материала.

Известно, что для осуществления термораскалывания материала необходимо локальное ослабление прочности материала, а именно создание начального дефекта на поверхности материала в зоне подачи хладагента. При нанесении дефекта в момент охлаждения нагретой области на поверхности материала существуют максимальные напряжения растяжения.

Таблица 3.8 – Результаты экспериментальных исследований лазерного термораскалывания кварцевого стекла при плотности мощности лазерного излучения  $15 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>

Скорость, $10^{-3}$ м/с	Разность хода, $10^{-9}$ м	Результаты испытаний
1	40	Наблюдается крупная посечка на краях микротрещины
1,4	31	Наблюдается мелкая посечка на краях микротрещины
1,5	30	Края микротрещины гладкие и ровные
2	19	Края микротрещины гладкие и ровные
2,5	11	Края микротрещины гладкие и ровные
2,6	10	Микротрещина отсутствует
3	7	Микротрещина отсутствует

Надежное развитие микротрещины происходит, если дефект наносят в зоне максимальных напряжений растяжения. Целесообразно место нанесения дефекта выбирать исходя из равенства

$$S = M \frac{P^2 l A}{e^d B}, \quad (3.41)$$

где  $S$  – расстояние от заднего фронта лазерного пучка до места нанесения дефекта;

$M$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от теплофизических свойств материала и теплоотдачи хладагента;

$P$  – плотность мощности излучения;

$l$  – расстояние от заднего фронта пучка до переднего фронта зоны охлаждения;

$A$  – длина большой полуоси лазерного пучка;

$B$  – ширина малой полуоси лазерного пучка;

$e$  – экспонента;

$d$  – глубина микротрещины.

Достаточно точного касания механизма нанесения дефекта до поверхности материала в указанной зоне, для того чтобы существующая динамика распределения напряжений привела к развитию дефекта в управляемую несквозную микротрещину.

Установлено, что надежное развитие микротрещины будет происходить, если дефект наносят в зоне охлаждения в момент времени от начала нагрева поверхности, определяемый из равенства

$$t = \frac{S + A}{v}, \quad (3.42)$$

где  $t$  – время нанесения дефекта

$S$  – расстояние от заднего фронта лазерного пучка до места нанесения дефекта,

$A$  – длина большой полуоси лазерного пучка,

$v$  – скорость относительного перемещения лазерного пучка и материала, при которой разность хода обыкновенного и необыкновенного лучей находится в пределах от 11 до  $30 \cdot 10^{-9}$  м.

Измерение разности хода прямого и преломленного лучей в зоне остаточных напряжений вдоль линии нанесения надреза осуществляют с помощью полярископа-поляриметра ПКС-125. Он работает по схеме поляриметра, принцип действия которого основан на преобразовании эллиптически поляризованного света. От осветителя через поляризационную пластинку эллиптически поляризованный свет проходит через стекло и преобразуется пластинкой  $\lambda/4$  в линейно поляризованный свет. Линейно поляризованный свет проходя через светофильтр, выделяющий область спектра порядка  $540 \cdot 10^{-9}$  м, попадает в анализатор. Пластинка  $\lambda/4$  в сочетании с вращающимся анализатором представляет собой компенсатор Сенармона. Поворотом анализатора поле зрения блока оптического контроля перед началом термораскалывания устанавливают на темноту и производят отсчет по шкале анализатора (нулевой отсчет). Блок оптического контроля установлен неподвижно по отношению к перемещениям координатного стола. Его поле зрения обеспечивает контроль зоны стекла, в которой нанесен надрез. Визуально в процессе термораскалывания контролируется наличие микротрещины. По окончании процесса термораскалывания измеряют остаточные напряжения в стекле. Для этого поворотом анализатора получают максимальное затемнение просветленной зоны, образующейся вдоль линии термораскалывания вследствие наличия остаточных напряжений. Разница между полученным отсчетом по шкале и нулевым отсчетом равна углу поворота анализатора  $\beta$  в градусах. Разность прямого и преломленного лучей  $D$  в  $10^{-9}$  м определяют по формуле:

$$\Delta = 3\beta. \quad (3.43)$$

Разность должна составлять  $\Delta = (11 - 30) \cdot 10^{-9}$  м. Визуализация распределения полей термоупругих напряжений при лазерном термораскалывании представлена на рисунке 3.50.

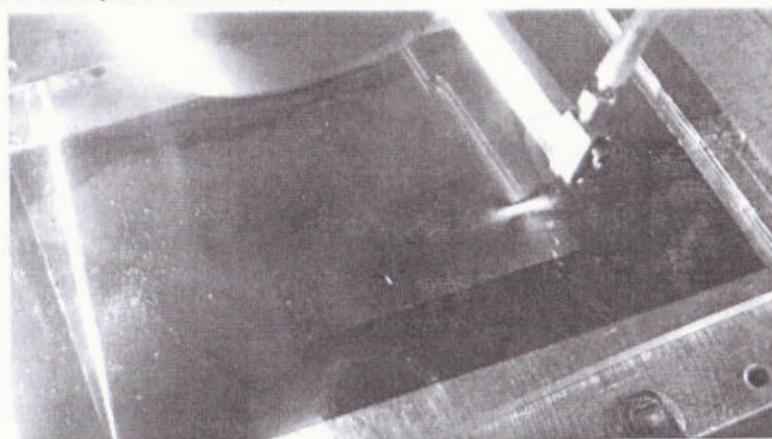


Рисунок 3.50 – Вид рабочей зоны установки для лазерного термораскалывания

Визуальный контроль над образованием микротрещины и измерение величины двухлучепреломления в зоне остаточных напряжений целесообразно проводить при отработке режимов лазерного термораскалывания на образце из конкретной партии стекла [152; 153]. В дальнейшем это необязательно ввиду высокой стабильности и надежности процесса термораскалывания.

### 3.2.7 Проведение экспериментальных исследований лазерного управляемого термораскалывания кристаллического кварца

Экспериментальные исследования процессов лазерного термораскалывания кристаллов кварца были проведены на пластинах кристаллического кварца размерами  $20 \times 10 \times 1,5 \cdot 10^{-3}$  м [154; 155]. Мощность лазерного излучения составляла 30 Вт, пучок был сфокусирован в виде круглого пятна радиусом  $1,5 \cdot 10^{-3}$  м. Термораскалывание проводилось по трем основным срезам кристалла кварца, которые соответствуют случаям 1, 2 и 8 (см. таблицу 3.9). Результаты эксперимента отражены в таблице 4.2.

Таблица 3.9 – Результаты лазерного термораскалывания кристаллического кварца [144]

Ориентация реза	$v, 10^{-3}$ м/с	
	6	15
Случай 8		
Случай 2		Нет реза
Случай 1		Нет реза

В соответствии с полученными экспериментальными данными при одинаковых параметрах обработки лазерное термораскалывание более устойчиво протекает в случае лазерного термораскалывания кристаллического кварца вдоль оси симметрии третьего порядка, при этом линия реза лежит в плоскости параллельной оси симметрии третьего порядка, что соответствует напряжениям растяжения  $\sigma_{zz}$ , равным  $86,8 \cdot 10^6$  Па. В случае лазерного термораскалывания кристаллического кварца перпендикулярно оси симметрии третьего порядка, при этом линия реза лежит в плоскости, параллельной оси симметрии третьего порядка,  $\sigma_{zz} = 55,5 \cdot 10^6$  Па. В случае лазерного термораскалывания кристаллического кварца перпендикулярно оси симметрии третьего порядка, при этом линия реза лежит в плоскости перпендикулярной оси симметрии третьего порядка,  $\sigma_{zz} = 46,1 \cdot 10^6$  Па. То есть при скорости обработки  $6 \cdot 10^{-3}$  м/с термораскалывание наблюдается во всех случаях, а при скорости  $15 \cdot 10^{-3}$  м/с термораскалывание наблюдается только в случае 8, так как в случаях 2 и 1 возникающих растягивающих напряжений  $\sigma_{zz}$  недостаточно для возникновения трещины. Данные результаты находятся в хорошем соответствии с результатами численного моделирования.

### 3.3 Процесс лазерной полировки кварцевого стекла

#### 3.3.1 Построение модели процесса лазерной полировки кварцевого стекла

Моделирование процесса лазерного нагрева кварцевого стекла было выполнено методом конечных элементов [122] в соответствии со схемой, представленной на рисунке 3.51. Цифрой 1 отмечен лазерный пучок, цифрой 2 – кварцевое стекло. На рисунке прямыми линиями со стрелками указаны направления перемещения лазерного пучка относительно обрабатываемого изделия.

Моделирование выполнялось с учетом зависимостей теплофизических свойств кварцевого стекла от температуры, представленных на рисунке 3.52 [106].

Расчеты были выполнены для образца, имеющего форму прямоугольного параллелепипеда с геометрическими размерами  $20 \times 10 \times 3 \cdot 10^{-3}$  м, с использованием следующих значений технологических параметров обработки: плотность мощности лазерного излучения  $P_0 = 2,2 \cdot 10^7$  Вт/м<sup>2</sup>, радиус поперечного сечения лазерного пучка  $R = 1,5 \cdot 10^{-3}$  м. Модуль скорости относительного перемещения лазерного пучка и образца  $v = 2,5 \cdot 10^{-3}$  м/с.

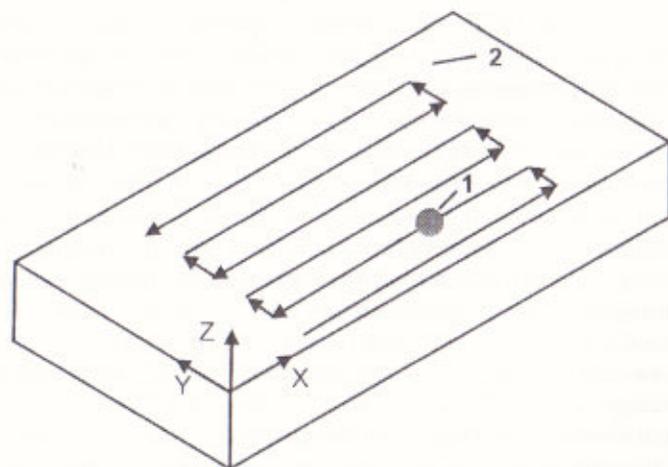


Рисунок 3.51 – Схема перемещения лазерного пучка в зоне обработки [156]. 1 – пятно лазерного пучка; 2 – кварцевая пластина

На рисунке 3.53 представлено разбиение кварцевой пластины на конечные элементы. Символами T1 – T9 отмечено расположение контрольных точек.

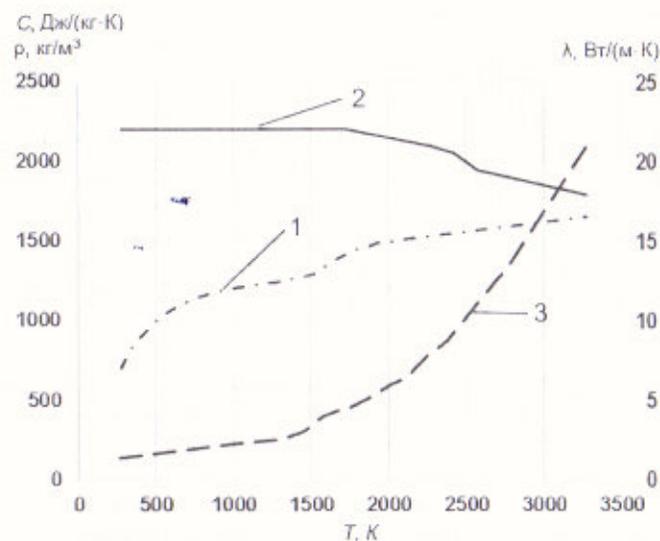


Рисунок 3.52 – Зависимость теплофизических свойств кварцевого стекла от температуры. 1 – теплоемкость  $C$ , Дж/(кг·K); 2 – плотность  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup>; 3 – теплопроводность  $\lambda$ , Вт/(м·K)

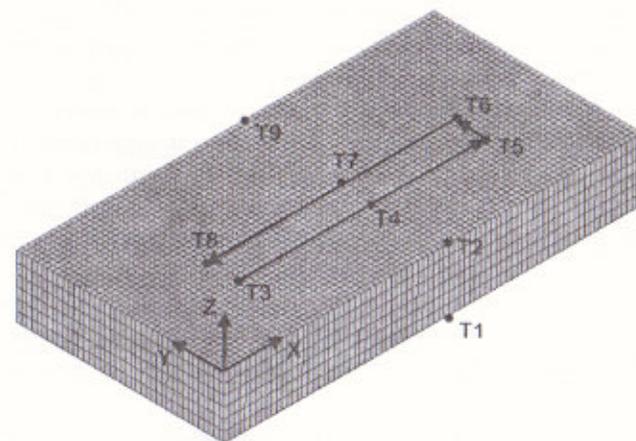


Рисунок 3.53 – Конечно-элементное разбиение расчетной области [156]

Результаты проведенных расчетов представлены на рисунках 3.34–3.35. На рисунке 3.54 показаны расчетные зависимости температуры в контрольных точках от времени.

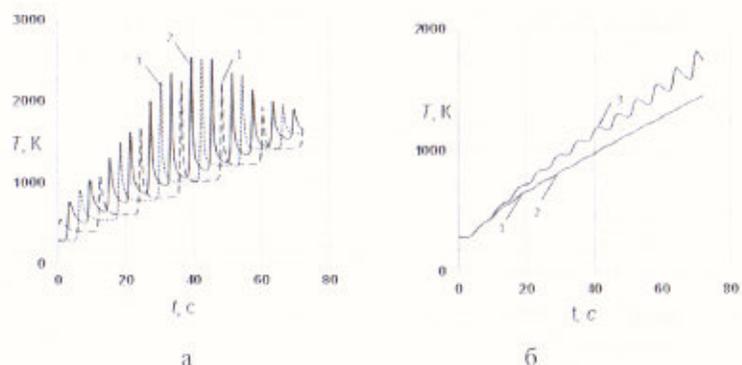


Рисунок 3.54 – Расчетные значения температуры [156]. а – в контрольных точках Т3 (линия 1), Т4 (линия 2), Т5 (линия 3); б – в контрольных точках Т1 (линия 1), Т2 (линия 2), Т9 (линия 3)

Анализируя данные, приведенные на рисунке 3.54, а, видим, что температура в контрольных точках Т3 – Т5 в результате многократного лазерного нагрева кварцевой пластинки по схеме, приведенной на рисунке 3.53, периодически резко повышается. При этом вначале в контрольных точках наблюдается плавное увеличение максимальных значений температуры, которое после прохождения центром лазерного пучка этих точек сменяется их снижением. Значения температуры в контрольных точках Т1 – Т2, Т9, расположенных вне контура обработки, также периодически изменяются и сопровождаются ростом максимальных значений температуры, обусловленным прогревом лазерным излучением обрабатываемой пластины (см. рисунок 3.54, б) [156]. Нужно отметить, что при выбранной схеме и параметрах лазерной полировки участки обрабатываемой поверхности неоднократно достигают температуры размягчения кварцевого стекла, которая находится в диапазоне 1773 – 1943 К [96].

На рисунке 3.55 показаны расчетные распределения температурных полей на поверхности кварцевой пластины в моменты времени, соответствующие прохождению центра лазерного пучка через контрольные точки Т3 – Т8.

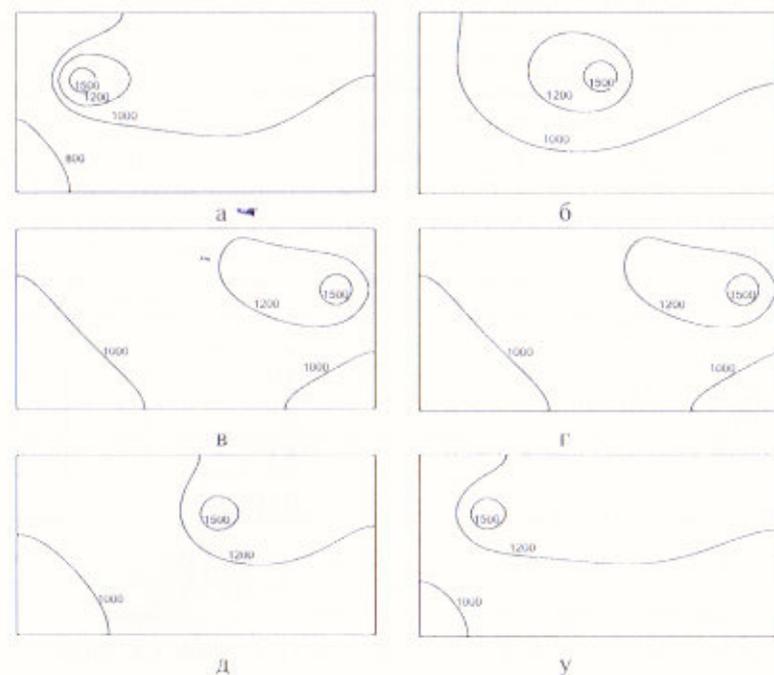


Рисунок 3.55 – Расчетное распределение температуры на поверхности кварцевого стекла. а –  $t = 36$  с; б –  $t = 39$  с; в –  $t = 42$  с; г –  $t = 42,1$  с; д –  $t = 45$  с; е –  $t = 48$  с

Как видно из данных, представленных на рисунке 3.57, локализация изотерм, соответствующих температуре размягчения, имеет круглую форму и практически не изменяется с течением времени. При этом изотермы, соответствующие более низким температурам в ходе обработки, постоянно изменяются. Стабильность формы зоны размягчения при выбранной схеме и технологических параметрах на практике обеспечивает однородность качества обработанной поверхности при реализации процесса лазерной полировки кварцевого стекла [156].

### 3.3.2 Численный эксперимент по лазерной полировке кварцевого стекла

При реализации численного эксперимента была использована методика полного факторного эксперимента первого порядка с двухуровневым варьированием факторов. Сформирован план для трех факторов: скорость обработки  $v$ , шаг сканирования  $h$ , радиус лазерного пучка  $R$ .

При этом определялись следующие выходные параметры: максимальная температура  $T$  и максимальные напряжения  $\sigma_1$  в зоне лазерной обработки. Таким образом, моделью объекта исследования являлись функции отклика ( $T$ ) и ( $\sigma_1$ ), связывающие выходные параметры с факторами ( $v$ ;  $h$ ;  $R$ ).

После преобразования независимых переменных в натуральном масштабе к безразмерным переменным с кодируемыми значениями  $-1$ ,  $+1$  сформирована таблица 3.10 [157].

Таблица 3.10 – Значения независимых переменных в кодированном виде

Независимые переменные	Безразмерные переменные	-1	+1
Скорость обработки, $10^{-3}$ м/с	X1	2	4
Шаг сканирования, $10^{-3}$ м	X2	0,25	0,5
Радиус лазерного пучка, $10^{-3}$ м	X3	1	2

В таблице 3.11 представлены результаты численного эксперимента по моделированию лазерной полировки кварцевого стекла. По данным, представленным в таблице 3.11, были построены регрессионные модели, определяющие зависимости  $T$  и  $\sigma_1$  от параметров обработки, при этом шаг сканирования оказался параметром, не существенно влияющим на выходные параметры для выбранных диапазонов изменения технологических параметров лазерной обработки.

Таблица 3.11 – Результаты численного эксперимента

Номер комбинации факторов	Факторы			T, К	$\sigma_1, \cdot 10^6$ Па
	X1	X2	X3		
1	-1	-1	-1	1813	7,0
2	+1	-1	-1	1724	7,9
3	-1	+1	-1	1813	7,0
4	+1	+1	-1	1724	7,9
5	-1	-1	+1	4149	73,1
6	+1	-1	+1	3585	151,0
7	-1	+1	+1	4149	73,1
8	+1	+1	+1	3585	151,0

Полученные уравнения регрессии имеют следующий вид:

$$T = 2098,5 \cdot R - 163,25 \cdot v - (R - 1,5) \cdot (237,5 \cdot v - 712,5) + 159,75, \quad (3.44)$$

$$\sigma_1 = 10461500 \cdot R + 1967500 \cdot v + (R - 1,5) \cdot (38505000 \cdot v - 11551500) + 156272500, \quad (3.45)$$

Оценка полученных регрессионных моделей была выполнена с использованием следующих критериев:

– средняя абсолютная ошибка (англ. Mean Absolute Error, MAE)

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |d_i - y_i|;$$

– средняя квадратичная ошибка (англ. Root Mean Square Error, RMSE)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (d_i - y_i)^2};$$

– средняя абсолютная процентная ошибка (англ. Mean Absolute Percentage Error, MAPE)

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{d_i - y_i}{d_i} \right| \times 100,$$

где  $d_i$  – значения, определенные методом конечных элементов;

$y_i$  – значения, определенные с использованием регрессионных моделей.

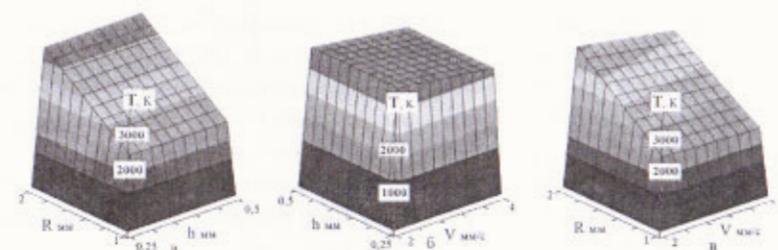


Рисунок 3.56 – Зависимость максимальной температуры  $T$  от параметров обработки [11–А]. а –  $v$  const; б –  $R$  const; в –  $h$  const

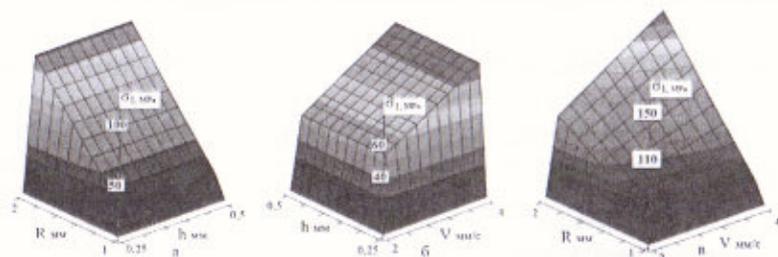


Рисунок 3.57 – Зависимость максимальных напряжений  $\sigma_1$  от параметров обработки. а –  $v \text{ const}$ ; б –  $R \text{ const}$ ; в –  $h \text{ const}$

Значения критериев, используемых для оценки регрессионных моделей, представлены в таблице 3.9.

Полученные данные позволяют сделать вывод о наличии необходимого соответствия регрессионной модели результатам конечно-элементного анализа.

Таблица 3.12 – Результаты оценки регрессионных моделей

Критерий	Тестовый набор	
	T	$\sigma_1$
RMSE	3	140
MAE	3	136
MAPE	6	5

Оптимизация параметров лазерной полировки кварцевого стекла осуществлялась с использованием метода перебора. Этот метод в случае решения экстремальных задач является вариантом прямого метода оптимизации [158]. При этом диапазон значений температуры T, необходимой для эффективной полировки, был принят равным 2000 – 2005 К. Далее были рассчитаны температуры в зоне обработки по приведенной выше формуле. Скорость варьировалась в пределах  $(1 - 20) \cdot 10^{-3}$  м/с с шагом  $1 \cdot 10^{-3}$  м/с, а радиус лазерного пучка изменялся в пределах  $(0,1 - 2) \cdot 10^{-3}$  м с шагом  $0,1 \cdot 10^{-3}$  м. После определения параметров, обеспечивающих формирование заданной температуры в зоне лазерной обработки, были рассчитаны напряжения  $\sigma_1$  (таблица 3.13).

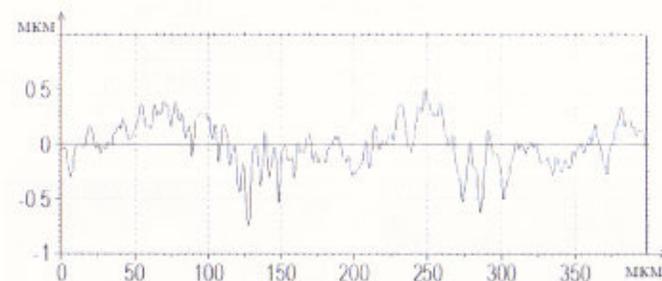
Таблица 3.13 – Расчетные параметры лазерной полировки кварцевого стекла

$v, 10^{-3}$ м	$R, 10^{-3}$ м	T, К	$\sigma_1, 10^6$ Па
5	1,2	2004	45
8	1,5	2001	160
17	0,3	2004	400

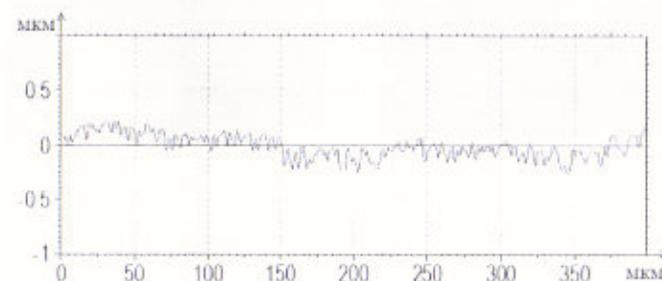
Как видно из таблицы 3.10, формирование температур в заданном диапазоне осуществляется при выборе трех наборов скоростей и радиусов лазерного пучка, при этом в третьем наборе формируются критически большие напряжения в зоне обработки [159].

### 3.3.3 Экспериментальные исследования по полировке кварцевого стекла

Экспериментальные исследования проводились на установке, приведенной в [160]. В качестве образцов использовались кварцевые пластины различного типоразмера. Полировка осуществлялась лазерным пучком, который сканировал поверхность пластины по схеме, представленной на рисунке 3.51. Скорость обработки варьировалась от  $1,25 \cdot 10^{-3}$  до  $5 \cdot 10^{-3}$  м/с. Шаг смещения лазерного пучка после одного прохода в направлении оси Y составлял  $0,25 \cdot 10^{-3}$  м.



а



б

Рисунок 3.58 – Профилграмма пластинки из кварцевого стекла [156]. а – до лазерной полировки; б – после лазерной полировки

Качество обработки поверхности кварцевого стекла оценивалось по параметрам шероховатости  $R_a$  и  $R_z$  [161]. Полученные экспериментальные результаты представлены на рисунке 3.58 и в таблице 3.14.

Как видно из данных, приведенных в таблице 4.3 и на рисунке 3.58, в результате лазерной полировки поверхности кварцевого стекла параметр  $R_a$  уменьшался в 5–8 раз, а параметр  $R_z$  – в 8–12 раз.

В ходе проведения экспериментальных исследований было установлено, что при параметрах обработки, приводящих к перегреву кварцевой пластины, наблюдается формирование борозд на обрабатываемой поверхности (см. рисунок 3.59, а). Кроме этого, в ряде случаев происходит растрескивание образцов (см. рисунок 3.59, б), обусловленное наличием остаточных напряжений.

Таблица 3.14 – Результаты эксперимента по полировке кварцевого стекла

$v, \cdot 10^{-3}$ м/с	До полировки		После полировки	
	$R_z, \cdot 10^{-6}$ м	$R_a, \cdot 10^{-6}$ м	$R_z, \cdot 10^{-6}$ м	$R_a, \cdot 10^{-6}$ м
1,25	4,58	0,333	0,49	0,0645
2,5	2,71	0,278	0,220	0,0374
5	4,07	0,547	0,460	0,0812

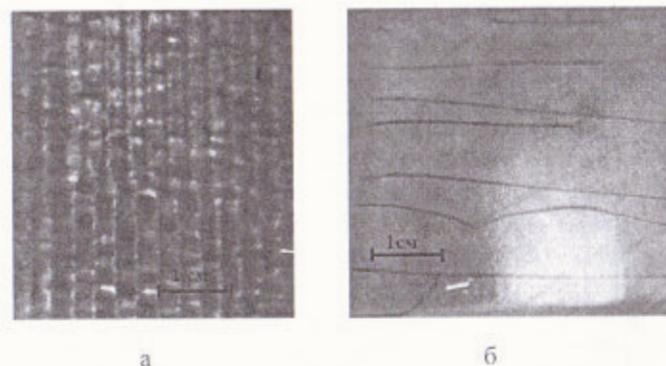


Рисунок 3.59 – Дефекты, возникающие при полировке кварцевого стекла [156]. а – появление борозд; б – появление трещин

Проведена верификация конечно-элементной модели на основании экспериментальных данных, полученных с использованием  $\text{CO}_2$ -лазера и тепловизора ИТ-ЗСМ. На рисунке 3.60 представлено распределение температурного поля в образце при воздействии круглого лазерного пучка, определенное при помощи тепловизора ИТ-ЗСМ.

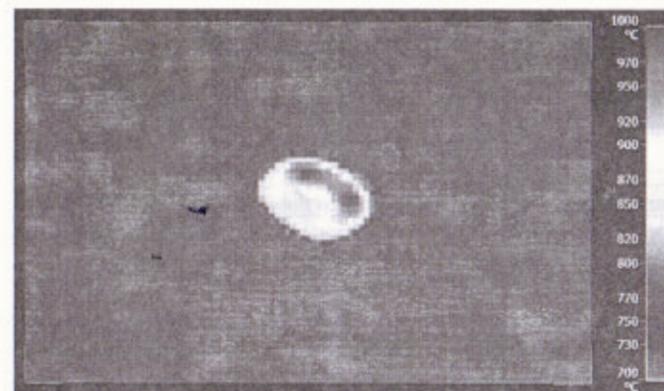


Рисунок 3.60 – Распределение температурного поля при обработке кварцевой пластины, определенное экспериментально.  $^{\circ}\text{C}$  [162]

Относительная ошибка при определении максимальных температур на поверхности кварцевой пластины не превысила 5 %, что позволяет сделать вывод о необходимом соответствии результатов конечно-элементного моделирования экспериментальным данным.

### 3.4 Процесс двухлучевой лазерной сварки изделий из кварцевого стекла

#### 3.4.1 Построение модели процесса двухлучевой лазерной сварки изделий из кварцевого стекла

В работе были выполнены расчеты температурных полей для следующих случаев обработки кварцевых стекол с использованием  $\text{CO}_2$ -лазеров (рисунок 3.61):

- однолучевая сварка кварцевого стекла;
- двухлучевая суперпозиционная сварка кварцевого стекла с использованием лазеров с различной дифракционной расходимостью;
- двухлучевая последовательная сварка кварцевого стекла;
- двухлучевая параллельная сварка кварцевого стекла.

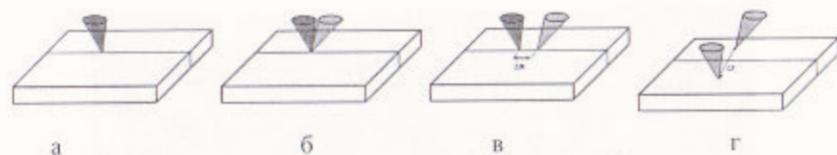


Рисунок 3.61 – Различные способы лазерной сварки. а – однолучевая сварка; б – двухлучевая суперпозиционная сварка; в – двухлучевая последовательная сварка; г – параллельная сварка

Для оптимизации процесса двухлучевой сварки кварцевого стекла необходимо создать адекватную математическую модель лазерной сварки, которая бы учитывала зависимость теплофизических свойств материала от температуры в отличие от других моделей [96]. Эти зависимости имеют следующий вид [163; 164]:

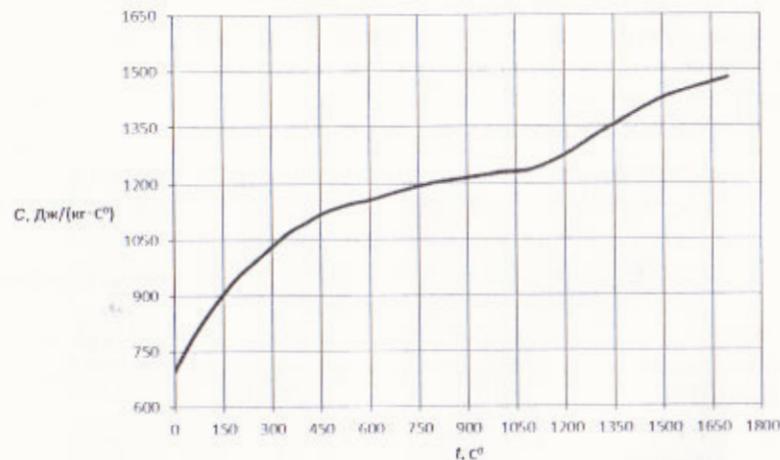


Рисунок 3.62 – Зависимость теплоемкости кварцевого стекла от температуры

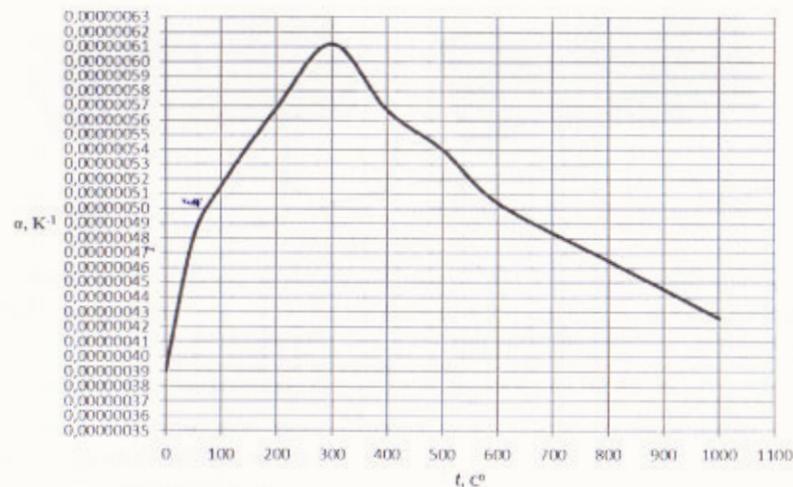


Рисунок 3.63 – Зависимость коэффициента линейного термического расширения кварцевого стекла от температуры

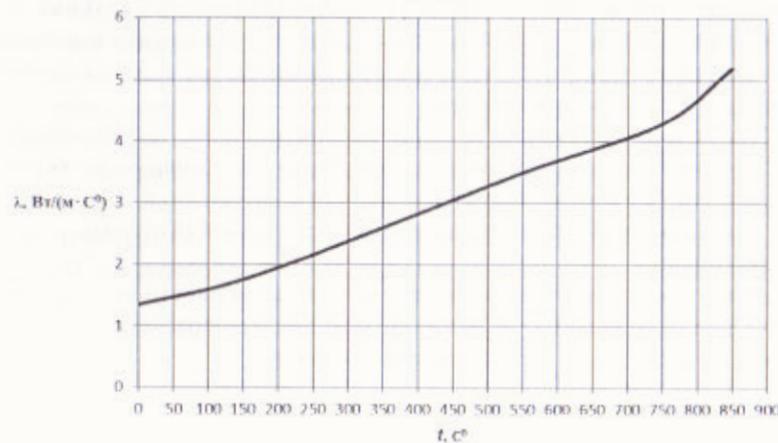


Рисунок 3.64 – Зависимость коэффициента теплопроводности кварцевого стекла от температуры

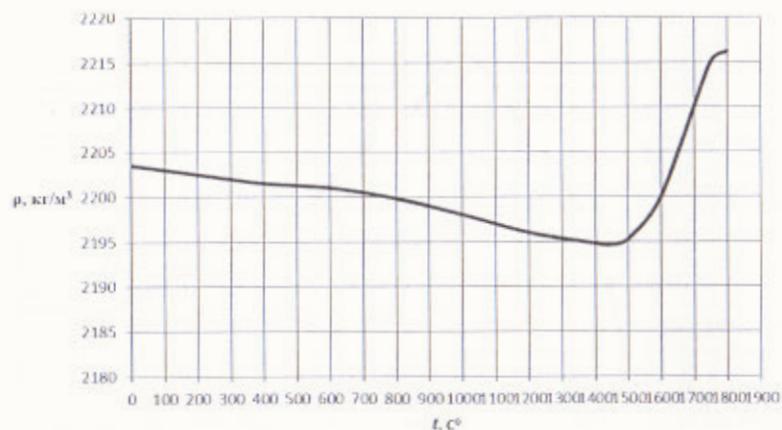


Рисунок 3.65 – Зависимость плотности кварцевого стекла от температуры

Моделирование процесса лазерной сварки проводилось в среде ANSYS, которая рассчитывает распределение температурных полей с помощью конечно-элементного анализа. Анализировалась глубина проплавления кварцевого стекла, мощность лазерного излучения варьировалась с учетом того, чтобы максимальная температура в зоне сварки не превышала температуру кипения.

Для проверки гипотезы о существенном влиянии теплофизических свойств кварцевого стекла при лазерной сварке и необходимости их учета разработано две математические модели. Они отличаются тем, что в одной учитывается зависимость теплофизических свойств от температуры, а в другой нет.

Анализ результатов показывает, что учет зависимости теплофизических свойств приводит к уменьшению максимальной расчетной температуры в зоне сварки в 1,7 раза (рисунок 3.66) [165].

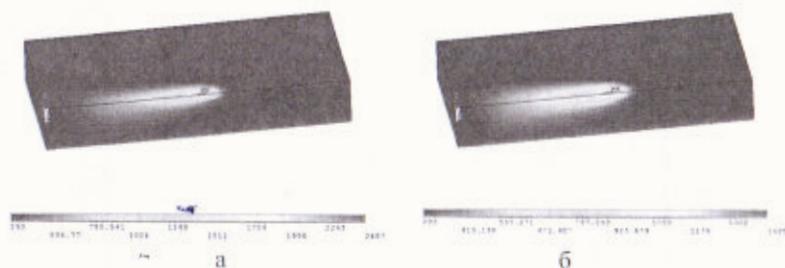


Рисунок 3.66 – Распределение температуры при однолучевой лазерной сварке кварцевого стекла. а – без учета зависимости теплофизических свойств кварцевого стекла от температуры; б – с учетом зависимости теплофизических свойств кварцевого стекла от температуры

Таким образом, для проведения расчетов температурных полей, возникающих при лазерной сварке кварцевого стекла, принципиально необходимо учитывать зависимость теплофизических свойств материала от температуры.

Было проведено моделирование двухлучевой суперпозиционной лазерной сварки кварцевого стекла, в которой использовалось два луча с различной дифракционной расходимостью. У лазеров большой мощности обычно высокая расходимость луча, поэтому чтобы улучшить распределение мощности в сечении пучка можно использовать два менее мощных лазера, но с меньшей расходимостью луча [166]. В случае однолучевой лазерной сварки использовался лазер мощностью 300 Вт, а при суперпозиционной сварке – два лазера мощностью по 150 Вт. Распределение температуры по глубине в кварцевом стекле при однолучевой и двухлучевой суперпозиционной сварке представлено на рисунке 3.67.

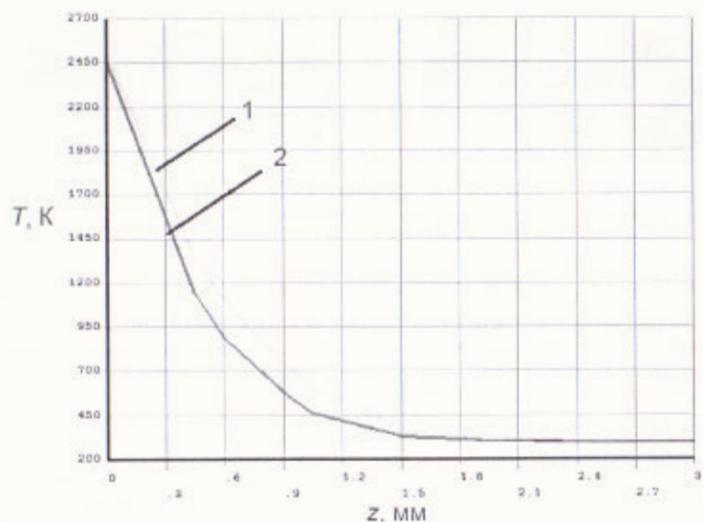


Рисунок 3.67 – Распределение температуры по глубине в зоне сварного шва [165]. 1 – двухлучевая суперпозиционная сварка; 2 – однолучевая лазерная сварка.

Как видно из рисунка, использование двух лазеров меньшей мощности, но с лучшими характеристиками луча, позволило увеличить глубину проплавления с  $0,2 \cdot 10^{-3}$  до  $0,25 \cdot 10^{-3}$  м.

Одним из недостатков лазерной сварки металлов при больших скоростях является гидродинамическая неустойчивость жидкой фазы поверхности ванны расплава, приводящая к образованию неровностей [102]. Для уменьшения негативных последствий большой скорости сварки металлов используют последовательную двухлучевую лазерную сварку с помощью двух лазеров, различной мощности. Было проведено моделирование последовательной двухлучевой лазерной сварки для кварцевого стекла. Общая мощность двух лазеров составила 300 Вт. Мощность лазера при однолучевой сварке составила также 300 Вт. Результаты моделирования представлены на рисунках 3.68 и 3.69.

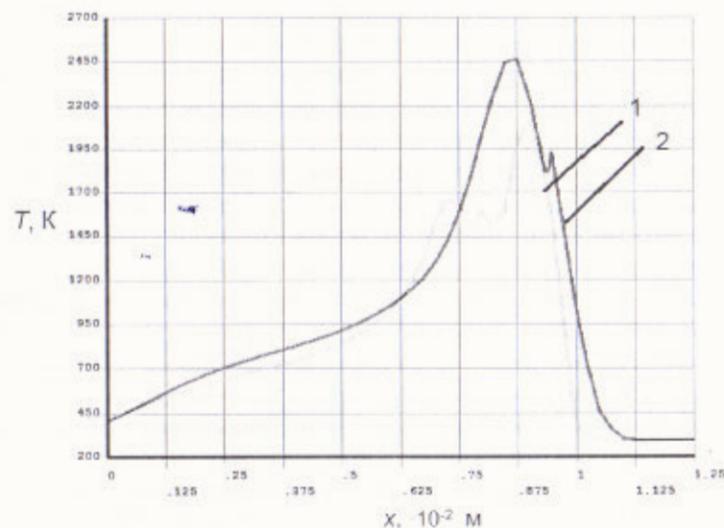


Рисунок 3.68 – Распределение температуры вдоль линии сварки. 1 – при двухлучевой последовательной сварке; 2 – при однолучевой лазерной сварке.

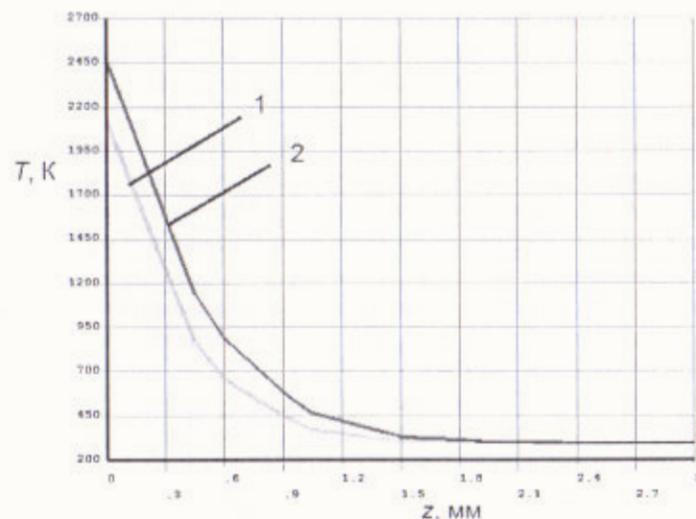


Рисунок 3.69 – Распределение температуры по глубине. 1 – при двухлучевой последовательной сварке; 2 – при однолучевой лазерной сварке.

Как видно из рисунка 3.68, последовательная двухлучевая лазерная сварка позволяет замедлить спад температуры при остывании, однако кварцевое стекло обладает высокой вязкостью даже при высоких температурах, поэтому жидкая фаза ванны расплава шва, испытывающая гидродинамическую неустойчивость, характерная для металлов, для кварцевого стекла не образуется. Кроме того, анализ рисунка 3.69 показывает, что при последовательной двухлучевой сварке уменьшается глубина проплавления, поэтому использование последовательной двухлучевой лазерной сварки нецелесообразно в случае обработки кварцевого стекла.

Из анализа полученных результатов следует, что учет зависимости теплофизических свойств кварцевого стекла от температуры (плотность, теплопроводность, теплоемкость, коэффициент линейного термического расширения) принципиально важен для расчета технологических режимов лазерной сварки. Также в результате моделирования установлено, что двухлучевая суперпозиционная сварка позволяет увеличить глубину проплавления до 25%, по сравнению с традиционной однолучевой сваркой [165].

#### 3.4.2 Численный эксперимент процесса двухлучевой лазерной сварки изделий из кварцевого стекла

При планировании численного эксперимента была использована методика полного факторного эксперимента первого порядка с двухуровневым варьированием факторов.

Сформирован план для пяти факторов: скорость обработки  $v$ , радиус первого лазерного пучка  $r_1$ , радиус второго лазерного пучка  $r_2$ , мощность первого пучка  $P_1$ , мощность второго пучка  $P_2$ . При этом определялись следующие выходные параметры: глубина проплавления  $z$  и максимальная температура в зоне обработки  $T$ . Таким образом, моделью объекта исследования являлись функции отклика ( $z$ ) и ( $T$ ), связывающие выходные параметры с факторами ( $v, r_1, r_2, P_1, P_2$ ), которые менялись в заданных пределах при проведении опытов.

После преобразования независимых переменных в натуральном масштабе к безразмерным переменным с кодируемыми значениями  $-1, +1$  была сформирована таблица 3.15. В таблице 3.16 представлены результаты численного эксперимента по двухлучевой лазерной сварке кварцевого стекла, проведенные при всех значениях факторов.

Таблица 3.15 – Значения независимых переменных в кодированном виде

Независимые переменные	Безразмерные переменные	-1	+1
Скорость обработки $v, 10^{-3}$ м/с	$x_1$	3	4
Радиус первого лазерного пучка $r_1, 10^{-3}$ м	$x_2$	1	1,25
Радиус второго лазерного пучка $r_2, 10^{-3}$ м	$x_3$	1,5	1,75
Мощность первого пучка $P_1$ , Вт	$x_4$	30	35
Мощность второго пучка $P_2$ , Вт	$x_5$	30	35

Таблица 3.16 – Результаты численного эксперимента

Номер комбинации факторов	Факторы					Глубина проплавления $z, 10^{-3}$ м	Максимальная температура в зоне обработки $T, K$
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$		
1	2	3	4	5	6	7	8
1	-1	-1	-1	-1	-1	0,24	2222
2	1	-1	-1	-1	-1	0,20	2111
3	-1	1	-1	-1	-1	0,25	2121
4	1	1	-1	-1	-1	0,18	2014
5	-1	-1	1	-1	-1	0,20	2124
6	1	-1	1	-1	-1	0,15	2017
7	-1	1	1	-1	-1	0,18	1984
8	1	1	1	-1	-1	0,11	1884

Продолжение таблицы 3.16

1	2	3	4	5	6	7	8
9	-1	-1	-1	1	-1	0,30	2404
10	1	-1	-1	1	-1	0,25	2281
11	-1	1	-1	1	-1	0,32	2273
12	1	1	-1	1	-1	0,25	2155
13	-1	-1	1	1	-1	0,27	2307
14	1	-1	1	1	-1	0,22	2188
15	-1	1	1	1	-1	0,26	2136
16	1	1	1	1	-1	0,20	2024
17	-1	-1	-1	-1	1	0,27	2312
18	1	-1	-1	-1	1	0,22	2194

Продолжение таблицы 3.16

1	2	3	4	5	6	7	8
19	-1	1	-1	-1	1	0,30	2227
20	1	1	-1	-1	1	0,23	2112
21	-1	-1	1	-1	1	0,23	2198
22	1	-1	1	-1	1	0,19	2084
23	-1	1	1	-1	1	0,23	2066
24	1	1	1	-1	1	0,16	1959
25	-1	-1	-1	1	1	0,33	2494
26	1	-1	-1	1	1	0,27	2364
27	-1	1	-1	1	1	0,36	2378
28	1	1	-1	1	1	0,29	2253
29	-1	-1	1	1	1	0,30	2380
30	1	-1	1	1	1	0,24	2255
31	-1	1	1	1	1	0,30	2218
32	1	1	1	1	1	0,23	2100

По данным, представленным в таблице 3.16, были построены регрессионные модели, определяющие зависимости  $z$  и  $T$  от параметров обработки. Полученные уравнения регрессии имеют следующий вид:

$$z = 0,2410 - 0,0295x_1 - 0,0011x_2 - 0,0248x_3 + 0,0333x_4 + 0,0173x_5 - 0,0048x_1x_2 + 0,0008x_1x_3 - 0,0011x_1x_4 - 0,0008x_1x_5 - 0,0070x_2x_3 + 0,0030x_2x_4 + 0,0039x_2x_5 + 0,0030x_3x_4 + 0,0002x_3x_5 - 0,0017x_4x_5 + 0,0005x_1x_2x_3 + 0,0017x_1x_2x_4 + 0,0002x_1x_2x_5 - 0,0002x_1x_3x_4 + 0,0008x_1x_3x_5 - 0,0011x_1x_4x_5 + 0,0002x_2x_3x_4 - 0,0008x_2x_3x_5 - 0,0008x_2x_4x_5 - 0,0008x_3x_4x_5 + 0,0002x_1x_2x_3x_4 - 0,0008x_1x_2x_3x_5 + 0,0005x_1x_2x_4x_5 - 0,0014x_1x_3x_4x_5 + 0,0002x_2x_3x_4x_5 + 0,0002x_1x_2x_3x_4x_5, \quad (3.46)$$

$$T = 2182,46875 - 57,7812x_1 - 63,4688x_2 - 62,2188x_3 + 80,6563x_4 + 42,1563x_5 - 1,4063x_1x_2 + 1,4063x_1x_3 - 2,8438x_1x_4 - 1,7188x_1x_5 - 10,4063x_2x_3 - 7,5313x_2x_4 + 2,9683x_2x_5 + 0,0938x_3x_4 - 4,9063x_3x_5 - 0,0313x_4x_5 + 0,3438x_1x_2x_3 + 0,0938x_1x_2x_4 - 0,0313x_1x_2x_5 - 0,0313x_1x_3x_4 + 0,0938x_1x_3x_5 + 0,0938x_1x_4x_5 - 0,0938x_2x_3x_4 - 0,8438x_2x_3x_5 + 0,0318x_2x_4x_5 + 0,0318x_3x_4x_5 - 0,0938x_1x_2x_3x_4 - 0,0318x_1x_2x_3x_5 + 0,0313x_1x_2x_4x_5 + 0,0313x_1x_3x_4x_5 + 0,0938x_2x_3x_4x_5 - 0,0313x_1x_2x_3x_4x_5, \quad (3.47)$$

$$\text{где } x_1 = \frac{v-3,5}{0,5}, x_2 = \frac{r_1-1,125}{0,125}, x_3 = \frac{r_2-1,625}{0,125}, x_4 = \frac{P_1-32,5}{2,5}, x_5 = \frac{P_2-32,5}{2,5}.$$

Была проведена проверка регрессионной модели на тестовом наборе данных, приведенном в таблице 3.17.

Оценка полученной регрессионной модели была выполнена с использованием критериев из раздела 3.2.2.

Значения критериев, используемых для оценки регрессионных моделей, представлены в таблице 3.18.

Таблица 3.17 – Тестовый набор данных

$v, 10^{-3}$ м/с	$r_p, 10^{-3}$ м	$r_z, 10^{-3}$ м	$P_1$ , Вт	$P_2$ , Вт	$z, 10^{-3}$ м	$T$ , К
3,3	1,1	1,6	32	32	0,26	2198
3,3	1,2	1,7	32	32	0,22	2076
3,3	1,2	1,7	34	34	0,27	2169
3,6	1,2	1,7	33	33	0,22	2089
3,6	1,1	1,6	32	34	0,25	2198

Таблица 3.18 – Результаты оценки регрессионных моделей

Критерий	Тестовый набор	
	$z$ , мкм	$T$ , К
RMSE	0,008	21,1
MAE	0,006	18,8
MAPE	2,5	0,9

Полученные данные позволяют сделать вывод о наличии необходимого соответствия регрессионной модели результатам конечно-элементного анализа.

Оптимизация параметров лазерной сварки кварцевого стекла осуществлялась с использованием метода перебора. Этот метод в случае решения экстремальных задач является вариантом прямого метода оптимизации [158].

Диапазон значений температуры  $T$ , необходимой для эффективной лазерной сварки, был принят равным 2000 – 2500 К. Затем были рассчитаны глубины проплавления. Скорость  $v$  варьировалась в пределах  $(3 - 4) \cdot 10^{-3}$  м/с с шагом  $0,1 \cdot 10^{-3}$  м/с, радиус первого лазерного пучка  $r_1$  изменялся в пределах  $(1,0 - 1,25) \cdot 10^{-3}$  м с шагом  $0,025 \cdot 10^{-3}$  м, радиус второго лазерного пучка  $r_2$  изменялся в пределах  $(1,5 - 1,75) \cdot 10^{-3}$  м с шагом  $0,025 \cdot 10^{-3}$  м, мощность первого лазерного пучка  $P_1$  изменялся в пределах  $(30 - 35)$  Вт с шагом 0,5 Вт и мощность второго лазерного пучка  $P_2$  изменялся в пределах  $(30 - 35)$  Вт с шагом 0,5 Вт. Результаты оптимизации приведены в таблице 3.16.

Таблица 3.19 – Результаты оптимизации

№	$v, \cdot 10^{-3}$ м/с	$r_1, \cdot 10^{-3}$ м	$r_2, \cdot 10^{-3}$ м	$P_1$ , Вт	$P_2$ , Вт	$T$ , К	$z, \cdot 10^{-3}$ м
1	3,0	1,25	1,50	35,00	35,00	2378	0,360
2	3,0	1,23	1,50	35,00	35,00	2390	0,357
3	3,0	1,25	1,50	35,00	34,50	2367	0,356

Как видно из таблицы 3.19, формирование температур в заданном диапазоне осуществляется при выборе трех наборов параметров лазерной обработки, при этом значения параметров во всех наборах имеются небольшие различия [167].

## ГЛАВА 4. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЛАЗЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ В ПРОИЗВОДСТВЕ ИЗДЕЛИЙ ДЛЯ ЭЛЕКТРОНИКИ

### 4.1 Разработка способа получения в объеме стекла трещины параллельной поверхности нагрева лазерным излучением

Необходимым условием получения термораскалывания стекла параллельно поверхности является наличие снижения его прочности в объеме на некотором расстоянии от поверхности. Один из вариантов создания таких условий – нанесение в торце стекла надреза глубокой трещины. Однако, известные способы не обеспечивают надежного зарождения в стекле трещины параллельной поверхности. Это связано с тем, что кромка стекла обладает достаточным количеством дефектов, которые, выступая в качестве опасных концентраторов напряжений, создают значительную конкуренцию надрезу в стекле. Устранение влияния дефектов кромки – сложная задача, сопряженная с рядом трудностей. В связи с этим, проведены исследования по обеспечению надежности процесса. Эксперимент показывает, что для зарождения в стекле трещины параллельной поверхности можно использовать процесс лазерного управляемого термораскалывания стекла на заданную глубину. Для этого на поверхности стекла наносят наклонную микротрещину. Наклонное распространение микротрещины 4 от поверхности стекла 1 достигается с помощью смещения зоны охлаждения 3 от линии нагрева траектории термораскалывания лазерным пучком 2 (рисунок 4.1). Пояснить образование наклонной микротрещины, можно используя расчеты тепловых полей для лазерного пучка эллиптического сечения (рисунок 4.1). Очевидно, что для листового стекла, обладающего термостойкостью порядка 100 °С, смещение хладагента относительно оси теплового потока на расстояние  $\Delta l$  составляющее 1,5 мм приведет к образованию микротрещины на поверхности со смещением последней относительно оси нагрева. В силу существующего распределения термоупругих напряжений, микротрещина по глубине стекла выйдет на осевую линию с максимальной температурой нагрева. В результате образуется наклонная трещина, создаются предпосылки для гарантированного зарождения трещины параллельной поверхности стекла.

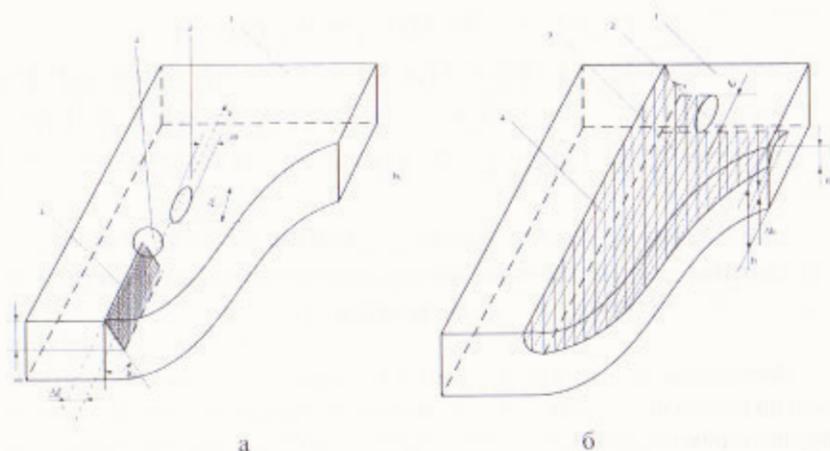


Рисунок 4.1 – Схема получения стеклопластин заданной толщины методом лазерного параллельного термораскалывания стекла. а – образование наклонной микротрещины; б – сканирование стекла для разделения в плоскости параллельной поверхности стекла

Характер изменения угла наклона микротрещины при смещении хладагента относительно оси нагрева при постоянной скорости относительного перемещения лазерного пучка и стекла приведен на рисунке 4.2. Полученную на поверхности наклонную микротрещину 4 используют для отделения от стекла 1 слоя толщиной  $z$ . Для этого стекло сканируют лазерным пучком 2 от микротрещины 4.

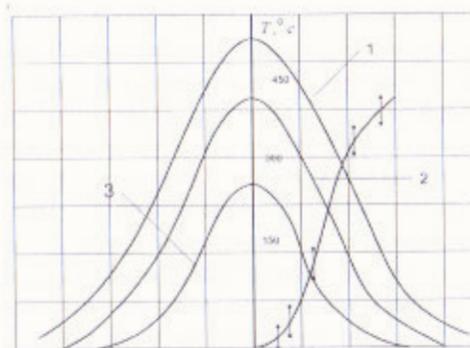


Рисунок 4.2 – Распределение температуры в плоскости  $X=2A$  на оси теплового потока для лазерного пучка размерами:  $A=5 \cdot 10^{-3}$  м,  $B=2.5 \cdot 10^{-3}$  м,  $1-z=0$ ,  $2-z=0.1 \cdot 10^{-3}$  м,  $3-z=0.2 \cdot 10^{-3}$  м, зависимость угла наклона микротрещины от смещения хладагента относительно осевой линии нагрева поверхности стекла

Метод параллельного термораскалывания стекла заключается в следующем. При облучении поверхности стекла сфокусированным излучением  $\text{CO}_2$ -лазера энергия поглощается в тонком поверхностном слое глубиной  $(2-5) \cdot 10^{-6}$  м в зависимости от химического состава стекла. Дальнейшее распространение тепловой энергии вглубь материала осуществляется за счет механизма теплопроводности. При этом по объему стекла имеет место следующее распределение термоупругих напряжений. Максимальные напряжения сжатия сосредоточены на поверхности стекла в области воздействия сфокусированного лазерного излучения. Они ослабевают по мере распространения тепла вглубь исследуемого материала. Напряжения сжатия компенсируются напряжениями растяжения, которые сосредоточены по объему стекла на некоторой глубине в локальной области, определяемой зоной воздействия лазерного излучения (рисунок 4.1).

Изменяя параметры лазерного излучения и скорость движения теплового источника относительно стекла, можно добиться условия, когда напряжения растяжения сосредоточенные в объеме стекла на некоторой глубине, превысят предел прочности стекла. В этом случае произойдет разрушение стекла параллельно облучаемой поверхности. Возможность параллельного термораскалывания становится очевидной, если принять во внимание тот факт, что предел прочности стекла на сжатие в 8–10 раз выше, чем на растяжение.

Известно, что лазерная технология резки стекла позволяет повысить прочность изделий остекления на 20–30% по сравнению с традиционными методами раскря [168]. В связи с этим, получает актуальность вопрос разработки технологии изготовления стеклянных деталей со специальной геометрией кромок, обладающих повышенной прочностью. Это возможно осуществить на основе комбинированных методов лазерного термораскалывания стекла.

На практике не всегда удается согласовать глубину взаимоперпендикулярных трещин. Поэтому приходится принимать специальные меры для увеличения глубины микротрещины до уровня трещины параллельной поверхности стекла. В частности, увеличение глубины микротрещины можно осуществить с помощью повторного лазерного нагрева поверхности стекла [88] по линии термораскалывания. Экспериментальная зависимость, характеризующая изменение глубины микротрещины от скорости перемещения лазерного пучка и изменение глубины микротрещины при повторном нагреве, показаны на рисунке 4.3. Установлено, что повторный нагрев приводит к увеличению глубины исходной микротрещины более чем в два раза и существует возможность управления ее

глубиной с помощью изменения скорости перемещения лазерного пучка. Применение такого способа гарантирует докальвание микротрещины до трещины параллельной поверхности. Окончательно изделие с прямоугольными кромками получаем путем приложения симметричного усилия относительно микротрещины на поверхности стекла (рисунок 4.4).

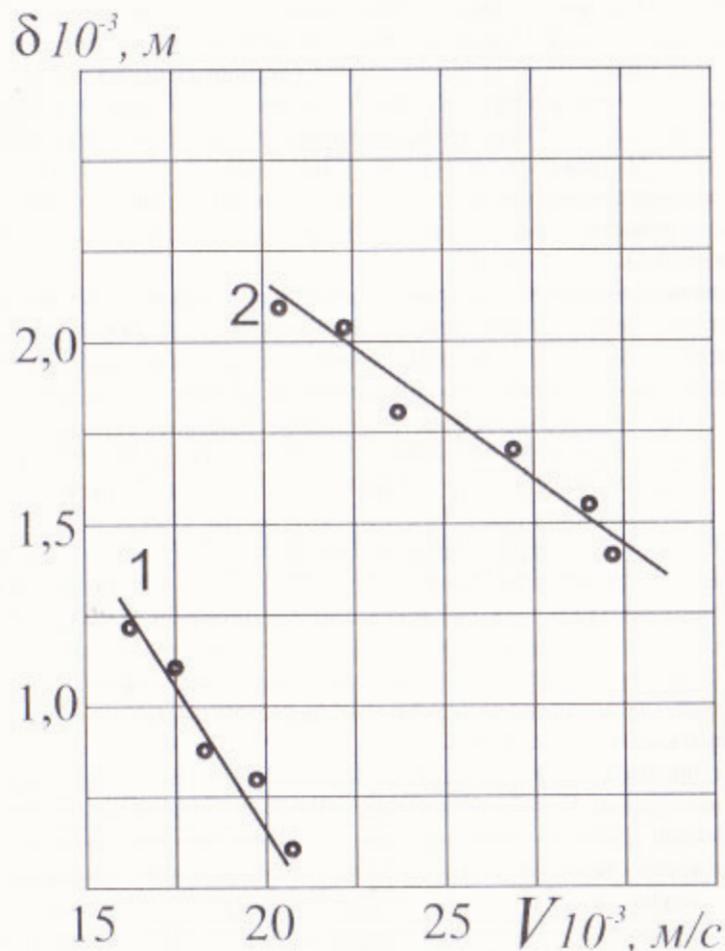


Рисунок 4.3 – Зависимость глубины микротрещины от скорости перемещения лазерного пучка с плотностью мощности  $1,5 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2$  при ее образовании (1) и повторном нагреве (2)

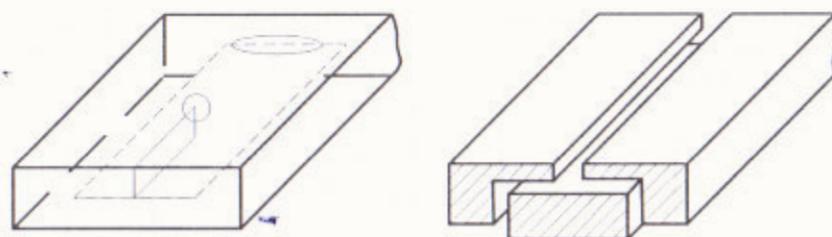


Рисунок 4.4 – Схема термораскалывания стекла по двум взаимортогональным плоскостям

Изделия остекления с прямоугольной геометрией кромок обладают повышенной механической прочностью. Однако, острые кромки такого профиля создают предпосылки для резкого разупрочнения при малейших механических повреждениях. В связи с этим, разработан новый метод комбинированного термораскалывания стекла для образования скругленных кромок. В основу положен способ параллельного термораскалывания стекла. Сущность метода заключается в том, что при нагреве стекла лазерным пучком, ориентированным под углом к направлению относительного перемещения (случай асимметричного нагрева) в стекле образуется наклонная трещина, скругленные кромки которой направлены к нагреваемой поверхности и в объем стекла (рисунок 4.5). На рисунке 4.6 приведена зависимость скорости распространения трещины в стекле от угла поворота лазерного пучка с  $A=5,1 \cdot 10^{-4} \text{ м}$ ,  $B=0,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ .

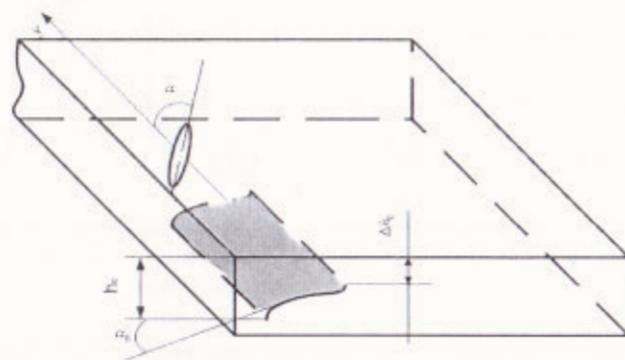


Рисунок 4.5 – Схема образования скругленной кромки

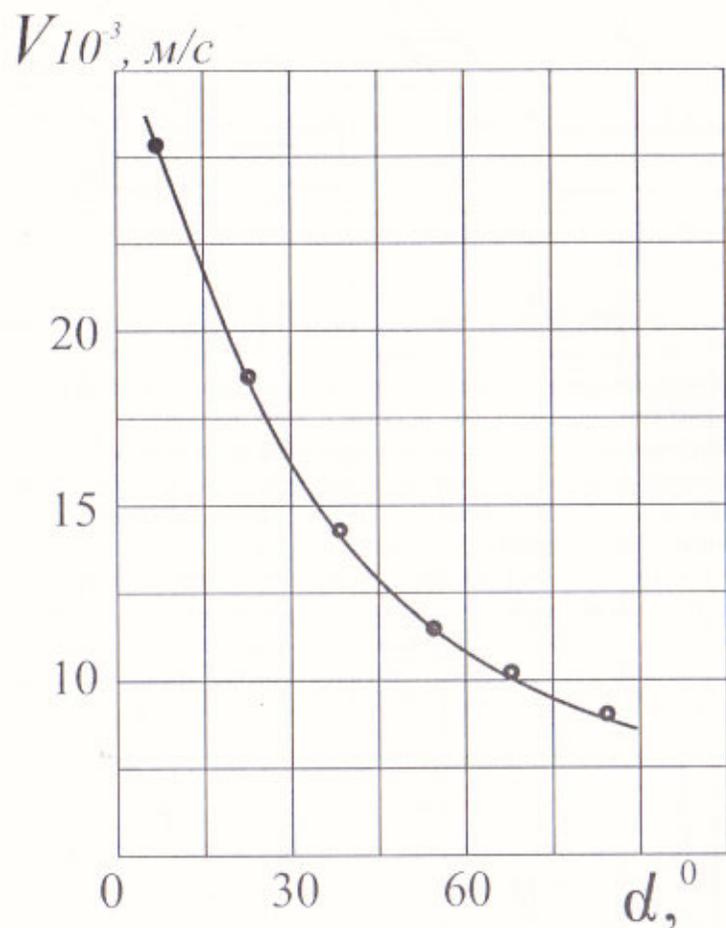


Рисунок 4.6 – Зависимость скорости распространения трещины в стекле от угла поворота лазерного пучка с  $A=5,1 \cdot 10^{-3}$  м,  $B=0,6 \cdot 10^{-3}$  м

На рисунке 4.7 представлена зависимость глубины расположения наклонной трещины в стекле от угла поворота лазерного пучка относительно направления перемещения. Скругленная кромка наклонной трещины, находящаяся на расстоянии  $\Delta h_0$  от поверхности нагрева, может быть ориентирована как вглубь стекла, так и к его поверхности. Установлено, что при углах поворота от 0 до 50 градусов она направлена от поверхности вглубь стекла, причем угол наклона трещины изменяется незначительно

и лежит в пределах от 0 до 4 градусов. Направление расположения краевой трещины на глубине  $h_0$  стабильно. Она всегда ориентирована от поверхности нагрева вглубь стекла.

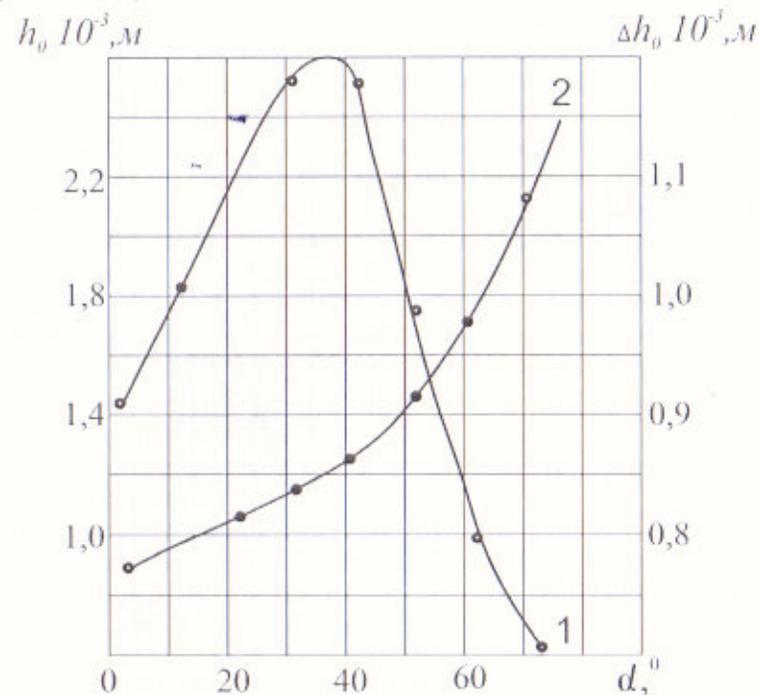


Рисунок 4.7 – Изменение глубины расположения наклонной трещины (1) и скругленной кромки (2) в объеме стекла от угла поворота эллиптического пучка  $CO_2$ -лазера

Изменить направление ее расположения можно, применив лазерные пучки специальной геометрии. Например, это могут быть два эллиптических пучка, направленных под острым углом друг к другу. Характер изменения угла наклона трещины в объеме стекла от угла ориентации лазерного пучка, и изменение ширины трещины приведены на рисунке 4.8. При близких к нулю углах поворота луча, угол наклона трещины асимптотически приближается к нулю. При значениях  $\alpha=50$  градусов происходит сначала плавное, а затем резкое возрастание угла наклона трещины. Причем, для угла поворота лазерного пучка  $\alpha=70$  градусов и постоянной скорости перемещения лазерного пучка происходит перегрев поверхно-

сти стекла, приводящий, в отдельных случаях, к ее растрескиванию и отделению узкой полоски стекла вдоль линии максимального нагрева (так называемая стеклянная стружка).

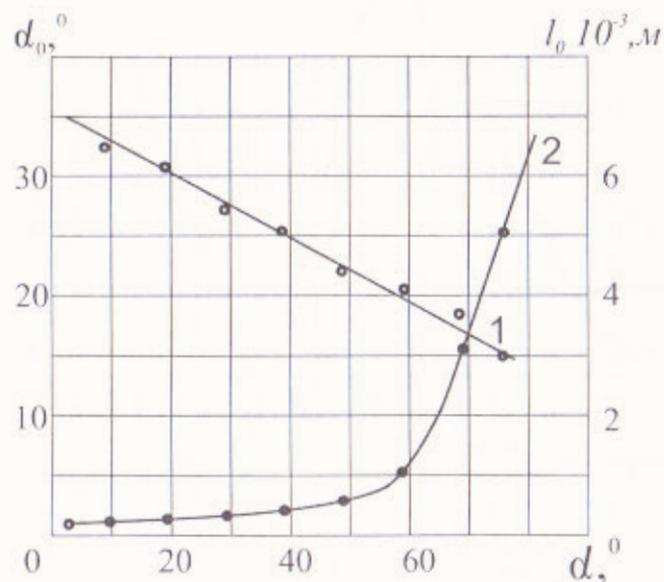


Рисунок 4.8 — Изменение наклона трещины в объеме стекла (2) и ее ширины (1) от угла поворота лазерного эллиптического пучка  $CO_2$ -лазера при постоянной скорости перемещения пучка и стекла

Таким образом, используя асимметричный нагрев можно добиться заданной геометрии скругленных кромок. Для завершения процесса необходимо нагреть поверхность стекла до выкалывания трещины. Пояснить образование наклонной трещины со скругленными кромками, в объеме стекла используя численные расчеты полученных выражений для тепловых полей при асимметричном лазерном нагреве движущимся эллиптическим пучком с гауссовым распределением интенсивности можно с помощью формулы (3.8).

Рассмотренные выше методы резки стекла, такие как термораскалывание на заданную глубину и термораскалывание параллельно поверхности, целесообразно объединить в одном цикле для получения стеклоизделий с прямоугольными кромками. В этом случае, одновременно с трещиной параллельной поверхности стекла, в зоне подачи хладагента

распространяется микротрещина, направленная от поверхности вглубь стекла. Термораскалывание стекла происходит по двум взаимортогональным плоскостям. Изменяя мощность лазерного излучения, скорость перемещения и линейные размеры лазерного пучка можно создать условия, при которых глубина залегания трещины параллельной поверхности стекла, и глубина микротрещины будут одинаковыми. Для этого необходимо выбрать расстояние от лазерного пучка до места подачи хладагента на нагретую поверхность стекла. Возможность такого выбора дает знание распределения и величины термоупругих напряжений для конкретного набора параметров характеризующих режим термораскалывания. Нормальное напряжение  $s_{33}$ , вносящее основной вклад в термораскалывание стекла на заданную глубину, достигает максимального значения спустя 0,12 секунд от начала нагрева. Это соответствует расстоянию  $1,4 \cdot 10^{-3}$  м от центра лазерного пучка, имеющего линейные размеры полуосей, равные:  $A=0,7 \cdot 10^{-3}$  м и  $B=4,5 \cdot 10^{-3}$  м. Развитие микротрещины возможно при напряжениях больших либо равных напряжениям, определяющим техническую прочность стекла. Принимая их равными  $1,2 \cdot 10^8$  Н/м<sup>2</sup>, из зависимости приведенной на рисунке 4.9 следует, что расстояние для подачи хладагента составляет  $(1,4 - 2,1) \cdot 10^{-3}$  м.

На рисунке 4.9 приведены результаты таких расчетов для конкретного набора технологических параметров. Температурное поле построено в плоскости перпендикулярной к направлению перемещения лазерного пучка. Кривым 1-4 соответствует распределение температуры, вызываемое при нагреве стекла участками интенсивности излучения, определяемыми расстоянием  $K$  ( $K = 0,5; 1,0; 1,5; 2,0$ ) от начала лазерного пучка. Как следует из приведенной зависимости (рисунок 4.9), значение температуры возрастает по мере движения лазерного пучка и максимум смещен относительно осевой линии нагрева.

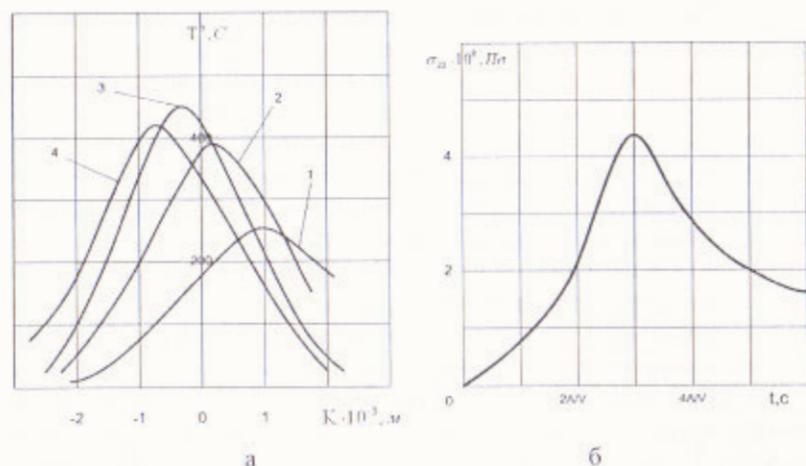


Рисунок 4.9 – Изменение температурного поля в стекле для пучка размерам  $A=0,7 \cdot 10^{-3}$  м и  $B=4,5 \cdot 10^{-3}$  м, повернутого относительно направления перемещения на угол  $45^\circ$  (а); зависимость нормальных напряжений от времени (б)

Такой характер изменения температурного поля определяет развитие трещины в объеме стекла, которое по мере увеличения температуры и смещения ее максимального значения принимает наклонное положение по отношению к поверхности нагрева. Рассмотренный процесс используется для получения непосредственно скругленных кромок на изделиях остекления и в сочетании с другими видами термораскалывания стекла. Один из вариантов реализации такого сочетания приведен на рисунке 4.10. В соответствии с рассмотренными ранее способами получают в объеме стекла трещину параллельную поверхности (рисунок 4.10 а).

После образования в стекле 1 трещины 2 по всему заданному контуру осуществляют повторный нагрев линии реза (рисунок 4.10 а). При этом лазерный пучок 3 ориентируют под углом к направлению движения и смещают в сторону на величину  $d$ , которую определяют исходя из ширины  $l_0$ , образующейся наклонной трещины в объеме стекла (пример зависимости  $l_0$  от угла поворота лазерного пучка приведен на рисунке 4.10). Тогда при относительном перемещении лазерного пучка и стекла, под действием термоупругих напряжений, вызываемых асимметричным нагревом, от трещины параллельной поверхности стекла 2 происходит развитие трещины 4. Последняя развивается вглубь стекла, образуя скругленную кромку.

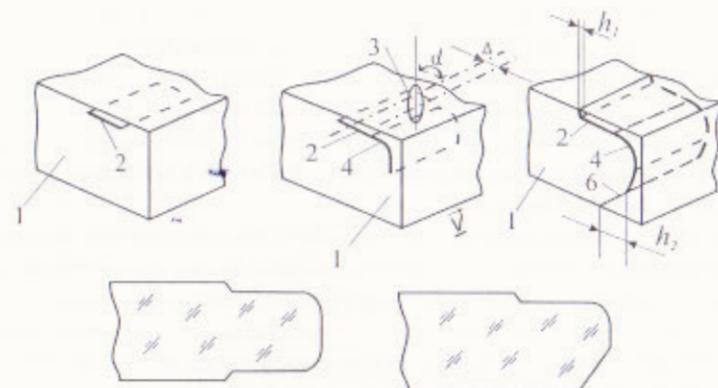


Рисунок 4.10 – Схема получения кромок специальной геометрии методом комбинированного термораскалывания стекла

Для завершения резки осуществляют нагрев поверхности с одной, а затем, с другой стороны, источниками тепла, которые смещают к центру вырезаемого изделия на величину  $h_1$  и  $h_2$  относительно края трещины 2 и трещины 4 соответственно. На рисунке 4.10 б показаны возможные варианты скругленных кромок.

Рассмотренные способы комбинированного термораскалывания стекла позволяют получать изделия остекления с заданной геометрией кромок. Качество таких кромок обеспечивает равноценную прочность по всей поверхности, а также дает возможность проведения упрочнения торцевой поверхности изделия. Кроме указанных выше, новые способы обладают по сравнению с традиционными методами следующими преимуществами: исключают ряд трудоемких, трудно поддающихся механизации операций резки, шлифовки торцов, фасетирования и полировки; позволяют повысить производительность труда и снизить трудоемкость и долю ручного труда при изготовлении фигурных стеклоизделий.

#### 4.2 Результаты экспериментальных исследований процесса параллельного термораскалывания стекла лазерным излучением с длиной волны 10,6 мкм

Установлено, что для параллельного термораскалывания стекла используется осе симметричный нагрев, движущимися пучками круглого и эллиптического сечения. При сканировании стекла (рисунок 4.11) от ми-

кратрещины I на глубине формируется трещина 5 шириной  $l_0$ , плоскость которой не строго параллельна поверхности нагрева, а характеризуется стрелой прогиба  $\Delta h$ . Стрела прогиба наименее выражена для лазерного пучка эллиптического сечения, ориентированного малой полуосью по направлению перемещения. Так например, для круглого лазерного пучка с плотностью мощности  $1,5 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup> стрела прогиба составляет  $(0,2 - 0,4) \cdot 10^{-3}$  м, в то время, как для эллиптического пучка это значение снижается до  $(0,05 - 0,1) \cdot 10^{-3}$  м.

Помимо формы лазерного пучка, существенное влияние на качество процесса термораскалывания стекла параллельно поверхности оказывает плотность мощности и скорость перемещения лазерного пучка.

В связи с этим проведены экспериментальные исследования по определению зависимости между глубиной расположения трещины  $h_0$ , параллельной поверхности стекла, и шириной дорожки сканирования  $l_0$  с одной стороны, и скоростью перемещения лазерного пучка при постоянной плотности мощности с другой стороны. Экспериментальные данные приведены на рисунке 4.11.

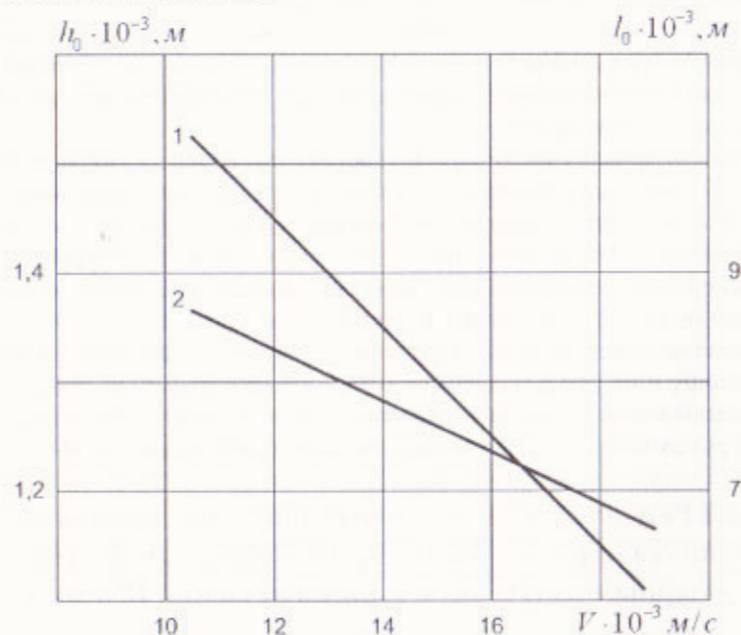


Рисунок 4.11 — Зависимость глубины (1) и ширины (2) трещины параллельной поверхности от скорости относительно перемещения стекла и лазерного пучка с  $B = 4,15 \cdot 10^3$  м;  $A = 0,5 \cdot 10^3$  м;  $P = 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>

Очевидно, что с ростом плотности мощности происходит увеличение глубины и ширины трещины, параллельной поверхности стекла. Установлено, что качественное термораскалывание требует корректировки скорости относительного перемещения при увеличении плотности мощности лазерного пучка. Диапазон плотности мощности составляет  $(0,3 - 4) \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>, скорость относительного перемещения при этом изменяется в диапазоне  $(0,003 - 0,037)$  м/с. Толщина откалываемой пластины в зависимости от выбранного из данных диапазонов режимов термораскалывания изменяется от  $(0,9 - 2,5) \cdot 10^{-3}$  м. Причем скорость термораскалывания, а следовательно, и производительность процесса, минимальны в случае необходимости получения максимальной толщины откалываемой пластины.

Анализ выражений для температурных полей и напряжений для движущегося лазерного пучка с гауссовым распределением интенсивности показывает, что основной вклад в развитие трещины параллельной поверхности вносят напряжения ориентированные перпендикулярно поверхности нагрева. Эти напряжения, будучи на поверхности равными нулю, в глубине стекла могут достигать величин равных и превышающих значение технической прочности стекла. Зная результаты моделирования, можно с достаточной точностью прогнозировать развитие трещины, параллельной поверхности стекла, и параметры лазерного излучения, необходимые для осуществления процесса. Очевидно, что необходимо создать условия лазерного нагрева такие, чтобы значения напряжений растяжения, большие либо равные технической прочности стекла, совпали по толщине с глубиной микротрещины. Следует отметить, что вероятность процесса зарождения трещины, параллельной поверхности стекла, от наклонной микротрещины возрастает при ориентации эллиптического пучка малой осью по направлению перемещения. В этом случае к берегам наклонной микротрещины прикладывается напряжение  $\sigma_{11}$ , которое согласно выражению (3.25) и (3.26) определяется суммой напряжений  $\sigma_{22}$  и  $\sigma_{33}$ . Напряжение  $\sigma_{22}$ , играющее решающую роль в процессе термораскалывания на заданную глубину, будет приложено вдоль микротрещины и эффективное значение его будет меньше, чем в случае ориентации эллипса большой полуосью по направлению перемещения. Вследствие движения лазерного пучка, после прохождения поверхностной микротрещины, в стекле развивается трещина параллельно поверхности под действием напряжений  $\sigma_{33}$ .

Проведены расчеты одного из полученных режимов термораскалывания стекла с целью сравнения полученных экспериментальных результатов и расчетных значений термоупругих напряжений, полученных с

помощью формул для математической модели процесса. На рисунке 4.12 (кривая 1) представлена зависимость напряжений в фиксированной точке поверхности листового стекла для различных моментов времени от начала нагрева лазерным пучком с плотностью мощности  $0,8 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup> при скорости относительного перемещения  $1,8 \cdot 10^{-2}$  м/с. Максимальное значение напряжения достигает к моменту времени от начала нагрева, порядка 0,17 секунды. Кривая 2 рисунок 4.12 соответствует распределению напряжений по глубине стекла в этот момент времени. Учитывая, что прочность стекла согласно [151] составляет  $1,2 \cdot 10^7$  Н/м<sup>2</sup>, следует ожидать образования трещины параллельной поверхности стекла на глубине  $0,8 \cdot 10^{-3}$  м. Данные оценки несколько занижены. Согласно экспериментальным данным (рисунок 4.12) глубина залегания трещины параллельной поверхности стекла при плотности мощности  $q = 3,24 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup> составляет  $0,97 \cdot 10^{-3}$  м, ширина –  $8,72 \cdot 10^{-3}$  м.

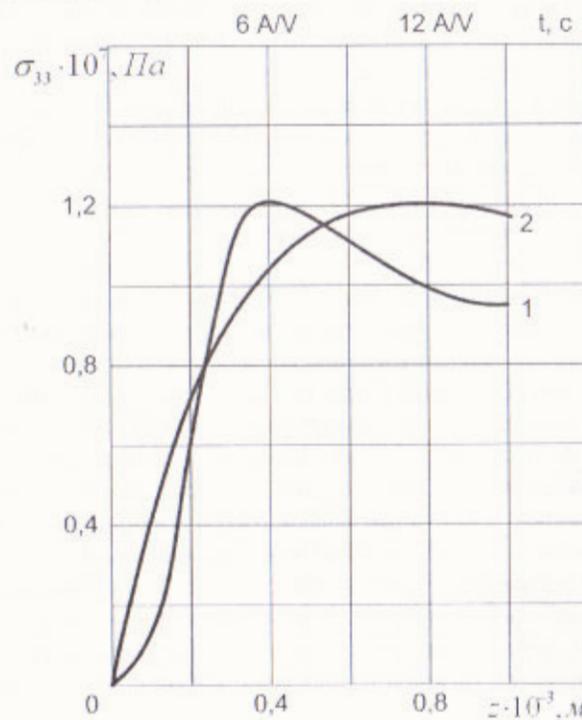


Рисунок 4.12 – Зависимость напряжений растяжения в плоскости перпендикулярной поверхности стекла от времени (1) и распределение напряжений по глубине стекла (2)

Таким образом, на основе анализа литературных данных и экспериментальных исследований установлены и подтверждены следующие основные характеристики процесса лазерного термораскалывания стекла в плоскости параллельной поверхности при использовании излучения CO<sub>2</sub> лазера:

- диапазон плотности мощности  $(0,3 - 4) \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>;
- скорость относительного перемещения  $(0,003 - 0,037)$  м/с;
- толщина откалываемой пластины в зависимости от выбранного из данных диапазонов режимов термораскалывания изменяется от  $0,9 - 2,5 \cdot 10^{-3}$  м.

Основное ограничение в производительности процесса – скорость термораскалывания минимальна  $(0,003$  м/с) в случае необходимости получения максимальной толщины откалываемой пластины  $(2,5 \cdot 10^{-3}$  м).

### 4.3 Оптимизация процесса параллельного термораскалывания стекла с одновременным использованием лазерных излучений с длинами волн 10,6 мкм и 1,06 мкм

Ограничением использования данного метода лазерного термораскалывания параллельно поверхности является ограничение глубины залегания трещины  $(2,5$  мм). Поэтому проведены исследования по влиянию на режимы термораскалывания одновременного воздействия лазерного излучения с длинами волн 1,06 и 10,6 мкм. С целью увеличения глубины трещины в объеме стекла при постоянной скорости процесса (достигнутые при термораскалывании излучением лазера с длиной волны 10,6 мкм) проведены следующие экспериментальные исследования.

Выбран следующий режим термораскалывания боросиликатного стекла толщиной 5 мм излучением CO<sub>2</sub>-лазера:

- плотность мощности  $3,24 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>,
- скорость относительного перемещения 5 мм/с,
- форма пучка эллиптическая,
- пучок с размерами  $A = 7,48 \cdot 10^{-3}$  м,  $B = 1,68 \cdot 10^{-3}$  м, ориентированный малой полуосью по направлению движения.

Максимальную глубину трещины определяли при достижении перегрева стекла, о чем свидетельствовали характерные признаки: на поверхности образовывалась сеть мелких трещин. После чего добивались уменьшением скорости их исчезновения. Получено, что максимальная глубина составляет 0,97 мм при скорости относительного перемещения 5 мм/с.

Центр пучка  $\text{CO}_2$ -лазера совместили с излучением YAG-лазера (рисунок 4.13). Излучение с длиной волны 1,06 мкм поглощается в объеме стекла по закону Бугера-Ламберта, в отличие от излучения с длиной волны 10,6 мкм, где поглощение носит поверхностный характер. При заданных характеристиках сфокусированного излучения  $\text{CO}_2$ -лазера (3,24 Вт/мм<sup>2</sup>) диапазон изменения плотности мощности YAG лазера составил (3,69 – 48,14) · 10<sup>6</sup> Вт/м<sup>2</sup> без перегрева поверхности стекла.

Установлено, что глубина залегания трещины параллельной поверхности при совмещении двух лазерных пучков и постоянной скорости процесса увеличилась по сравнению с исходным значением. Одновременно с ростом глубины трещины наблюдается рост ширины трещины, параллельной поверхности (рисунок 4.13). Получены данные, приведенные в таблице 4.1.

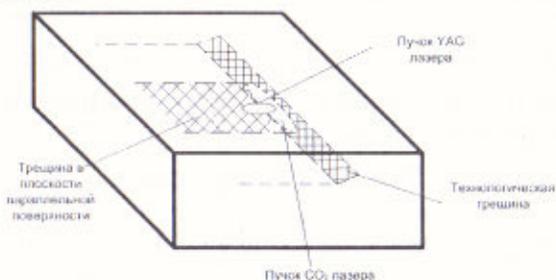


Рисунок 4.13 – Схема расположения пучков YAG и  $\text{CO}_2$ -лазеров при двухлучевом термораскалывании

Таблица 4.1 – Результаты эксперимента

$q \cdot 10^{-6}, \text{Вт/м}^2$	$l \cdot 10^{-3}, \text{м}$	$h \cdot 10^{-3}, \text{м}$
3,69	8,76	0,975
7,4	8,85	1,03
11,1	9,13	1,13
14,81	9,47	1,35
18,51	9,75	1,53
25,92	10,18	1,86
33,33	10,46	1,98
40,74	10,68	2,18
48,14	10,89	2,29

По полученным данным были построены зависимости, представленные на рисунке 4.14.

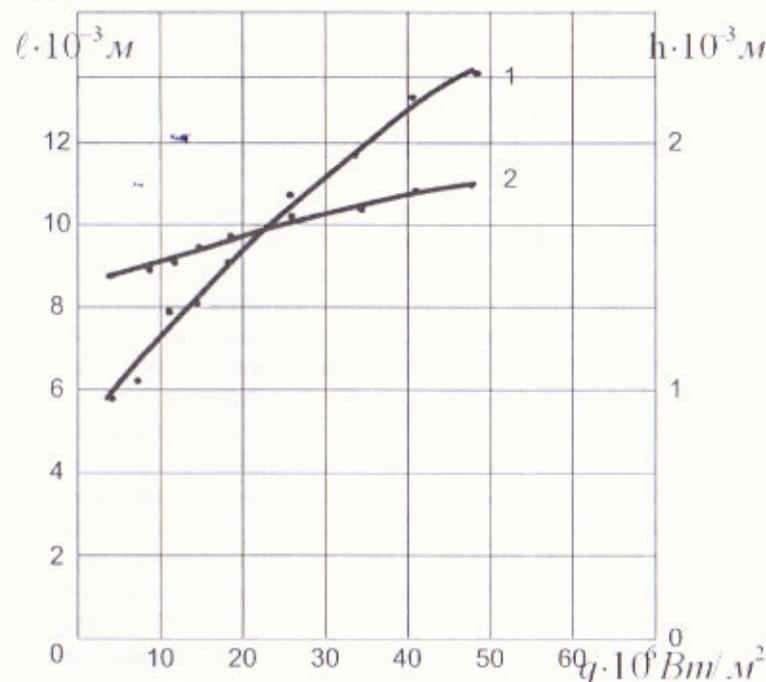


Рисунок 4.14 – Зависимость глубины (1) и ширины (2) трещины параллельной поверхности от плотности мощности излучения

Таким образом, установлено что, одновременное применение лазерного излучения ИК диапазона с приведенными выше характеристиками позволяет расширить возможности известного способа термораскалывания стекла в плоскости параллельной поверхности. Следует ожидать значительное повышение производительности процесса за счет увеличения скорости при заданной толщине откалываемой пластины. Из приведенных зависимостей видно, что второй источник излучения с длиной волны  $\lambda=1,06$  мкм, позволяет практически в 2 раза увеличить глубину трещины параллельную поверхность.

#### 4.4 Особенности формирования металлических пленок на кварцевой подложке при лазерном воздействии

При создании металлических слоев устройств микроэлектроники актуальной является проблема обеспечения максимальной прочности адгезионного соединения металлической пленки с кварцевой подложкой. Например, прочность соединения металл-кварц, получаемых вакуумным напылением, не превышает  $106 \text{ Н/м}^2$ , отрыв пленок зачастую происходит строго по границе раздела. Невысокие значения прочности в указанной системе объясняются тем, что изобарно-изотермический потенциал химических реакций меди (как, впрочем, многих других металлов) с кварцем положителен. Одним из эффективных методов увеличения прочности адгезионного соединения металлическая пленка-кварцевая подложка является предварительное нанесение на кварцевую подложку подслоя из материала, имеющего высокую прочность соединения одновременно с металлом и кварцем. Однако, это зачастую существенно снижает функциональные параметры микроэлектронных устройств.

Разработан метод повышения прочности адгезионного соединения металлических пленок Cu, Mo, Ni с кварцевой подложкой, лишенный указанных недостатков. Металлическую пленку термически напыляют в кислородосодержащей среде (парциальное давление кислорода  $P = 5 \cdot 10^{-2} - 7 \cdot 10^{-5} \text{ Па}$ ) на нагретую до температуры  $T = 420 - 870 \text{ К}$  кварцевую подложку в течение времени  $t = 90 - 480 \text{ с}$ . В процессе напыления пленку обрабатывают со стороны подложки лазерным излучением с длиной волны  $1,06 \text{ мкм}$ , плотностью мощности  $P = 3 \cdot 10^4 - 2 \cdot 10^6 \text{ Вт/см}^2$ , длительностью импульсов  $\tau = 10^{-8} - 1,8 \cdot 10^{-4} \text{ с}$  и частотой их следования  $f = 1 - 20 \text{ Гц}$ . При этом получали пленки толщиной от  $0,25 \text{ мкм}$  до  $2 \text{ мкм}$ .

Проведены измерения прочности адгезионного соединения металлических пленок Cu, Mo, Ni, полученных по указанной выше методике, исследован химический состав пленок с помощью масс-спектропии вторичных ионов (масс-спектрометр MC-7201), изучена топография поверхности поперечного скола системы пленка-подложка с помощью электронного микроскопа JSM-SOA.

Технологические режимы получения пленок и значения прочности адгезионного соединения приведены в таблице 4.2.

Для проведения сравнительных испытаний получены пленки металлов в соответствии с приведенной выше методикой, но без лазерного отжига. Результаты показали, что воздействие лазерного излучения на металлические пленки через прозрачную диэлектрическую подложку приводит к увеличению прочности сцепления с подложкой

более чем в пять раз. Наблюдаемая высокая адгезия может быть объяснена лишь с учетом химического взаимодействия между атомами металла и подложки.

Таблица 4.2 – Технологические режимы получения пленок и значения прочности адгезионного соединения

Металл	Режим получения пленки						Прочность адгезионного соединения, $\text{Н/м}^2$
	Плотность мощности $P, \text{Вт/см}^2$	Длительность импульса $\tau, \text{с}$	Частота следования $f, \text{Гц}$	Температура подложки, $T, \text{К}$	Время обработки $t, \text{с}$	Парциальное давление $\text{O}_2, \text{Па}$	
Cu	$3 \cdot 10^4$	$10^{-8}$	1	420	90	$7 \cdot 10^{-5}$	$4,0 \cdot 10^7$ $6,2 \cdot 10^7$ $4,2 \cdot 10^7$
Mo	$6 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^{-8}$	5	610	110	$8 \cdot 10^{-4}$	$5,4 \cdot 10^7$ $6,8 \cdot 10^7$ $5,6 \cdot 10^7$
Ni	2,6	$1,8 \cdot 10^{-4}$	20	870	480	$5 \cdot 10^{-2}$	$4,4 \cdot 10^7$ $6,3 \cdot 10^7$ $5,0 \cdot 10^7$

Полученные экспериментальные данные ожеспектрометрии свидетельствуют о глубокой (до  $500 \text{ \AA}$ ) диффузии атомов металла в подложку. При этом на границе металл-диэлектрик под действием лазерного излучения создается переходной слой, обладающий высокой механической прочностью. В пределах этого переходного слоя происходит взаимодействие атомов металла с атомами кислорода подложки, образуя окислы. Оценки энергии такого химического взаимодействия дали значения  $-15 \cdot 10^7 \text{ эрг/см}^2$ , что удовлетворительно коррелирует с наблюдаемой величиной адгезионной прочности облученных пленок.

С целью установления причины превосходства пленок, полученных предложенным методом, проведен масс-спектральный анализ состава пленок по толщине. Основными составляющими компонентами, как следует из масс-спектрометрических измерений, наряду с атомами Cu, Ni, Mo (для рассматриваемых металлов) являются окислы  $\text{Cu}_2$ ,  $\text{CuO}$ ,  $\text{MoO}$ ,  $\text{NiO}$ . Поэтому на величину адгезионной прочности соединения влияет химическое взаимодействие атомов, содержащихся в граничащем слое

пленки с подложкой, по схеме – Si – O – Me, что в соответствии с механизмом химической адсорбции приводит к увеличению прочности адгезионного соединения.

Таким образом, в ходе лазерного облучения (при этом существенными являются все указанные параметры лазерной обработки, пределы которых установлены нами эмпирически) металл диффундирует вглубь подложки с образованием прочного промежуточного слоя, ответственного за высокие значения прочности адгезионного соединения. Предполагается также, что определенный вклад в упрочнение адгезионного соединения металл-кварц вносит испарение металла пленки в подложку, вызываемое импульсным излучением лазера с указанной плотностью мощности. Обнаружено, что облучение металлической пленки (в частности, медной) лазерным пучком наряду с положительным эффектом упрочнения может вызывать образование периодической структуры по глубине подложки.

Таким образом, структура медных пленок, формирующихся на кварце в кислородосодержащей среде при воздействии мощного короткоимпульсного излучения, обладает существенными особенностями, обуславливающими высокие эксплуатационные параметры.

#### 4.5 Получение прозрачных токопроводящих покрытий реактивным лазерным напылением

Напыление прозрачных токопроводящих покрытий производили на установке УВН-73П-2, оснащенной CO<sub>2</sub>-лазерами для испарения и контроля толщины наносимого слоя. Мощность непрерывного CO<sub>2</sub>-лазера ЛГН-703 ( $\lambda = 10,6$  мкм) составляла 40 Вт. Контроль толщины проводился ротометрическим способом с использованием серийного лазера ЛГН-109 ( $\lambda = 632,8$  нм). В качестве материала подложки использовали стекло для фотографических пластинок. Мишенями для испарения служили таблетки диаметром 15 мм из порошков In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и Sn, спрессованные под давлением 40 кН/см<sup>2</sup>. Для исследований были изготовлены таблетки с примесью Sn в количестве 5, 7, 9 и 15 ат.%. Физико-химические свойства покрытий изучались методом масс-спектрометрии (масс-спектрометр МХ-1303), спектроскопии в УФ и видимой областях спектра («Spekord-M40»). Удельное поверхностное сопротивление измерялось с помощью четырехзондового метода.

Подготовительные операции и напыление прозрачных токопроводящих пленок осуществляли следующим образом. В течение 30 мин при остаточном давлении 10<sup>-2</sup> – 10<sup>-3</sup> мм рт.ст. проводилась очистка подложек в плазме тлеющего разряда. При остаточном предельном давлении около

5·10<sup>-7</sup> мм рт.ст. в рабочий объем камеры напускался газ. Испарение проводили излучением CO<sub>2</sub>-лазера ЛГН-703 при парциальном давлении 10<sup>-2</sup> – 10<sup>-4</sup> мм рт.ст. в среде ионизированного кислорода.

Высоковольтный источник питания ВС-23 позволяет осуществлять ионизацию рабочих газов при достаточно высоком парциальном давлении при напряжениях до 10 кВ и токах до 300 мкА. Как показал эксперимент, применение плазмы тлеющего разряда при ионизации кислорода оправдано в случае получения стехиометрически совершенных пленок In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:Sn.

Исследовалась стехиометрия пленок In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:Sn, имеющих процентное содержание олова 5, 7, 9, 15 ат.% и зависимость основных параметров от наличия легирующей добавки, газовой среды и ее ионизации в плазме тлеющего разряда.

Толщина исследуемых слоев составляла 150 нм. Наиболее совершенными по стехиометрическому составу являются пленки, наносимые в среде ионизированного кислорода. Отсутствие ионов O<sub>2</sub> приводит к неполному окислению металлов. Вследствие протекания процессов диссоциации наряду с оксидами присутствуют In и Sn в чистом виде. Такой фазовый состав получаемых покрытий снижает свето-пропускание (менее 80%). Испарение мишеней In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:Sn в среде кислорода приводит к частичному окислению индия до полного окисла, но при этом интенсивность пика мала по сравнению с пиками In<sup>+</sup>, Sn<sup>+</sup> и SnO<sup>+</sup>, InO<sup>+</sup>. Удельное поверхностное сопротивление составляет около 10<sup>3</sup> Ом при светопротекании, приближающемся к 90%.

Наилучший эффект дает напыление в среде ионизированного кислорода. Стехиометрический состав пленки при таких условиях приближается к однородному и состоит из In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> наряду с незначительным содержанием низших окислов InO<sup>+</sup>, SnO<sup>+</sup>. Пики ионов In<sup>+</sup> и Sn<sup>+</sup> сильно подавлены. Электрооптические характеристики полученных таким способом пленок In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:Sn значительно лучше. Удельное поверхностное сопротивление составляет 200 – 300 Ом, светопротекание пленок толщиной 150 нм 97% на длине волны 540 нм. Типичные спектры пропускания в диапазоне длин волн 400 – 800 нм приведены на рисунке 4.15.

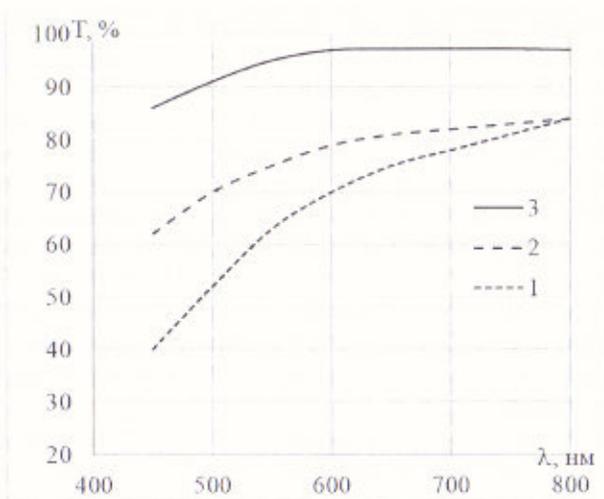


Рисунок 4.15 – Спектры пропускания пленок, напыленных при  $P_{\text{парц}} = 5 \cdot 10^{-2}$  мм рт.ст. без  $O_2$  (1);  $P_{\text{парц}} = 2 \cdot 10^{-2}$  мм рт.ст. в атмосфере  $O_2$  (2);  $P_{\text{парц}} = 2 \cdot 10^{-2}$  мм рт.ст. в атмосфере  $O_2$  и в плазме ( $I = 150$  мкА,  $U = 7$  кВ) (3)

Применение плазмы тлеющего разряда позволяет получать пленки оксидов с хорошей стехиометрией, что обычным лазерным испарением без активации поверхности подложек не всегда удается сделать. Мощность плазмы тлеющего разряда определенным образом влияет на свойства прозрачных токопроводящих пленок. На рисунке 4.16 приведены характерные зависимости удельного поверхностного сопротивления от мощности плазменного разряда. Из приведенной зависимости следует, что существуют оптимальные значения технологических параметров (парциального давления кислорода в камере, величины напряжения и тока разряда плазмы), которые позволяют получать минимальные значения удельного поверхностного сопротивления пленки  $In_2O_3:Sn$ . Температура нагрева подложек составляла  $320^\circ C$ , толщина пленок 150 нм, содержание Sn 5 ат.%, величина светопропускания 95%. Для пленок  $In_2O_3:Sn$  с примесью Sn 7, 9 и 15 ат.% наблюдаются аналогичные закономерности, что и при содержании Sn 5 ат.%.

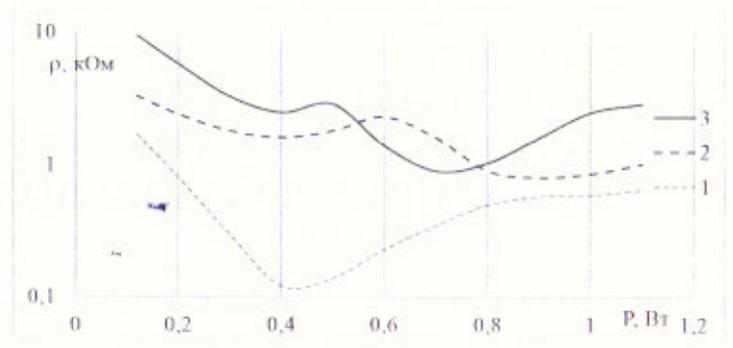


Рисунок 4.16 – Зависимость удельного поверхностного сопротивления от мощности плазменного разряда при парциальном давлении  $O_2$  равном  $2 \cdot 10^{-2}$  Па (1), 0,5 Па (2) и  $3 \cdot 10^{-2}$  Па (3)

Таким образом, методом реактивного напыления с помощью непрерывного  $CO_2$ -лазера возможно получение пленок  $In_2O_3:Sn$  с высоким светопропусканием (более 95%), хорошей стехиометрией и достаточно низким удельным сопротивлением (до 150 Ом). Эти пленки могут быть использованы как прозрачные токопроводящие антистатические покрытия, а также как высокочувствительные фотодетекторы в оптоэлектронных устройствах, в измерительной и отображающей мнемографическую информацию аппаратуре, основанной на применении эффектов в жидких кристаллах и электрохромных материалах.

## ГЛАВА 5. РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ТЕРМОРАСКАЛЫВАНИЯ СТЕКЛЯННЫХ ТРУБОК

Решение ряда задач в обработке стекла связано с серьезными трудностями, т.к. тепловой и механический методы обработки стекла базируются на искусстве рабочих и, нередко, сопровождаются технологией, недостаточно полно обеспеченной с инженерной точки зрения. По этой причине, используемые в промышленности методы обработки стекла в большой степени субъективны, трудно поддаются автоматизации и требуют широкого применения ручного труда. Перспективы открывает использование лазеров. Современный уровень разработки этой техники позволяет использовать их как надежное средство автоматизации технологических процессов, как экономичный инструмент для повышения производительности и эффективности процессов обработки стекла.

### 5.1 Теоретическое и экспериментальное исследование, разработка процессов резки стеклянных трубок в производстве ЭЛТ

Лазерная резка стеклянных трубок методом лазерного термораскалывания имеет перед традиционными способами ряд неоспоримых преимуществ, обеспечивающих ее успешное применение в различных отраслях народного хозяйства. Разделяемые таким методом поверхности получаются более ровными и гладкими, чем при обычных способах резки и напоминают полированные. Края среза получаются достаточно острыми, но соприкосновение с ними не приводит к порезам благодаря отсутствию мелких неровностей, зазубрин и других дефектов. Несмотря на очевидные преимущества, лазерная резка до настоящего времени не нашла широкого применения в производстве электровакуумных приборов.

Наиболее полно процесс термораскалывания трубчатого стекла описан в работах Мачулки [17] и других работах.

С точки зрения наибольшего К.П.Д. процесса термораскалывания стеклянных трубок, наиболее приемлема схема, включающая нагрев вращаю-

щейся трубки лазерным пучком эллиптического сечения с последующим нанесением надреза, который перерастает в кольцевую разделяющую трещину. Экспериментальные исследования [86] показали, что при такой схеме термораскалывания длина эллиптического пучка превышает диаметр трубки и лазерное излучение используется не полностью для нагрева. Это дает основание для одновременного нагрева нескольких вращающихся трубок при непрерывном их перемещении вдоль неподвижного лазерного пучка в плоскости обработки. Схема термораскалывания приведена на рисунке 5.1. С целью расчета и оптимизации режимов лазерного термораскалывания разработана теоретическая модель вышеописанного процесса.

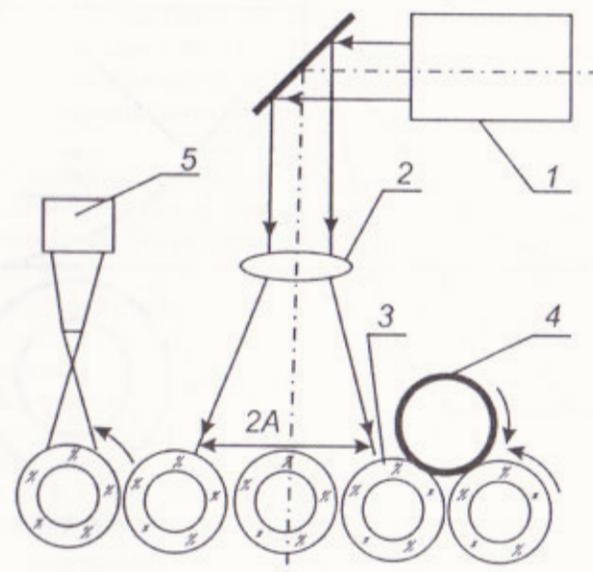


Рисунок 5.1 – Схема термораскалывания стеклянных трубок лазерным эллиптическим пучком

В первую очередь необходимо учесть вращательное движение трубки и динамику ее нагрева в процессе поступательного движения. Лазерный нагрев происходит циклически. За один оборот текущая точка поверхности нагревается в течении полупериода частью интенсивности лазерного пучка. Далее она выходит из зоны лазерного воздействия, нагрев прекращается, температура поверхности снижается в результате отвода тепла за счет теплопроводности. Вследствие поступательного движения рассматриваемая точка приходит в зону нагрева в последующие  $3/2$  пери-

ода  $T$ , где нагрев поверхности осуществляется участком интенсивности лазерного пучка с отличным от первоначального распределением интенсивности. Происходит нагрев остывшей на протяжении  $1/2 T$  поверхности до более высоких температур. Т. к. скорость вращения превосходит скорость поступательного перемещения, необходимо учесть, что, нагрев будет осуществляться перекрывающимися участками интенсивности.

Выберем систему координат так, чтобы ось  $X$  совпала с осью движения пучка, а ось  $Z$  была направлена вглубь материала (рисунок 5.2).

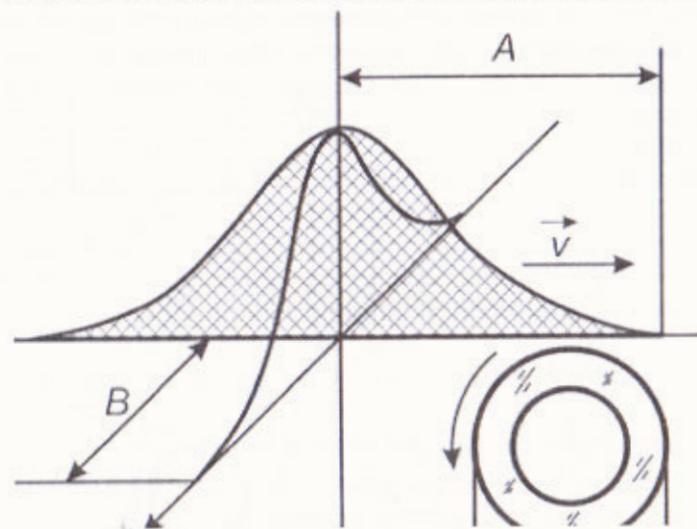


Рисунок 5.2 – Моделирование нагрева вращающейся вокруг своей оси трубки движущимся лазерным пучком с гауссовым распределением интенсивности

Начальную температуру тела будем считать равной нулю. Зададим распределение интенсивности следующим образом:

$$Q(r,t) = P_0 \exp \left\{ - \frac{(x - Vt + R \cos \omega t)^2}{A^2} - \frac{y^2}{B^2} \right\} \delta(z) \quad (5.1)$$

где  $R$  – радиус трубки;

$\omega$  – циклическая частота.

Решение неоднородного уравнения теплопроводности для полубесконечного пространства с адиабатической границей полученное методом функции Грина:

$$T(r,t) = \frac{P_0 \sqrt{a}}{\pi^{3/2} \lambda} \int_0^t dr \exp \left\{ - \frac{(x - V(t-r) + R \cos \omega(t-r))^2}{4ar + A^2} - \frac{y^2}{4ar + B^2} - \frac{z^2}{4ar} \right\} \frac{1}{\sqrt{r(4ar + A^2)(4ar + B^2)}} \quad (5.2)$$

Цикл нагрева с периодом  $T_0$  включает этап нагрева на протяжении  $0,5 T_0$  за счет энергетического вклада части интенсивности лазерного пучка и этап, когда последующее распространение тепла происходит за счет механизма теплопроводности в отсутствие энергетического вклада, т. е. на каждом из промежутков  $[\pi k; \pi + 2\pi k]$ ,  $k \in \mathbb{Z}$  ( $\mathbb{Z}$  – множество целых чисел), где  $\cos \omega(t-r)$  строго убывает, осуществляется энергетический вклад. На каждом из промежутков  $[2\pi k + \pi; 2\pi k + 2\pi]$  он отсутствует. Начальному моменту времени соответствует координата  $x = A + 2R$ , что отвечает условию нагрева поверхности трубки участком интенсивности лазерного пучка  $A - 2R$ .

Процесс раскалывания происходит вследствие локального разогрева трубки по кольцевому периметру. Термоупругие напряжения накапливаются по мере возрастания температуры и раскалывание произойдет в тот момент времени, когда температура противоположной стенки будет отличаться от температуры поверхности на величину равную термостойкости стекла. Скорость нагрева является важным фактором, определяющим появление и величину термоупругих напряжений. Она определяется, с одной стороны, условиями нагрева, а с другой стороны, теплофизическими свойствами материала. Так, например, при медленном нагреве тепло равномерно отводится из зоны обработки, градиент температуры практически линейный, тело расширяется без непреодолимых усилий и напряжения, достаточные для раскалывания не возникают. При быстром нагреве область напряжений локализована у поверхности и величины напряжений недостаточно для раскалывания по всей толщине. Следовательно, градиент температуры должен быть нелинейным и необходимо обеспечить прогрев трубки на всю толщину до перепада по температуре, соответствующего термостойкости стекла. Для качественного термораскалывания температура нагрева не должна превышать температуру стеклования.

Соблюдение данных условий приводит к возникновению в поверхностных слоях напряжений сжатия, которые компенсируются по толщине стенок трубки. В результате возникает усилие стремящееся разорвать трубку вдоль ее оси. Учитывая, что техническая прочность стекла обратно пропорциональна корню квадратному из глубины микротрещины, можно ожидать, что нанесение искусственного надреза на трубке будет

инициировать и ускорит процесс термораскалывания. Такой прием придает закономерный характер статистической величине термостойкости стекла и использован при разработке технологии и установки для термораскалывания стеклянных трубок на кольца для плоской ножки ЭОС.

Эксперимент показывает, что термораскалывание по схеме: нагрев – надрез эффективно до определенного минимального диаметра трубок, ниже которого приходится принимать специальные меры для повышения надежности процесса. Т.к. штенгель ЭОС для цветных кинескопов изготавливается из трубок со сравнительно небольшим диаметром ( $9 \cdot 10^{-3}$  м) и, учитывая, что термостойкость стекла при локальном нагреве в три раза больше, чем при охлаждении [151], следует ожидать повышение производительности и надежности процесса для малых диаметров при использовании схемы, включающей нанесение надреза, нагрев и охлаждение трубок. На рисунке 5.3 приведена зависимость времени термораскалывания от плотности мощности лазерного пучка при постоянной скорости вращения трубок. Она получена на основании экспериментальных данных по термораскалыванию трубок из стекла С93-1 с толщиной стенки  $(1,7 - 2) \cdot 10^{-3}$  м.

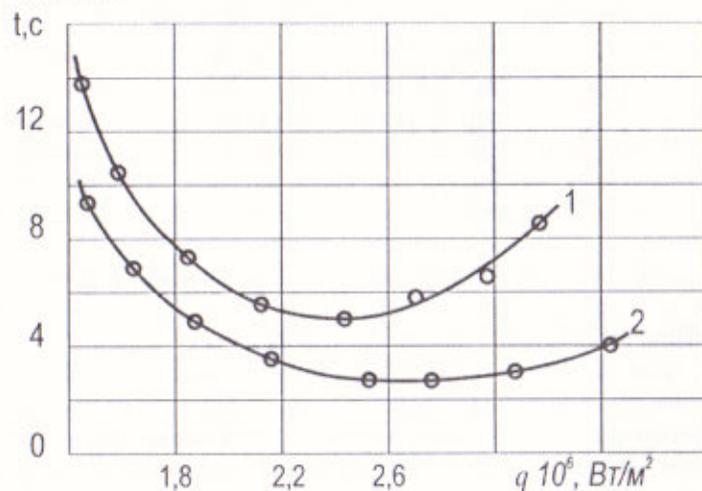


Рисунок 5.3 Зависимость времени термораскалывания стеклянных трубок с диаметром  $2 \cdot 10^{-2}$  м от плотности мощности лазерного пучка

Кривая 1 соответствует термораскалыванию по схеме нагрев – надрез. Кривая 2 – надрез – нагрев – охлаждение. Применение локального охлаждения с помощью воздушно-водяной смеси, позволяет снизить время

термораскалывания на 4–6 секунд. Причем, эта схема дает возможность управляемого развития несквозной трещины, особенности формирования которой соответствуют выявленным ранее закономерностям лазерного управляемого термораскалывания листового стекла на заданную глубину. Помимо плотности мощности, существенное влияние оказывает частота вращения трубок. Установлено, что с увеличением частоты вращения происходит сначала медленное, а затем резкое возрастание времени, необходимого для термораскалывания. Оптимальный диапазон частоты вращения для диаметра  $9 \cdot 10^{-3}$  м при плотности мощности лазерного излучения  $2,6 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup> составляет 0,6 – 2 об/с (рисунок 5.4).

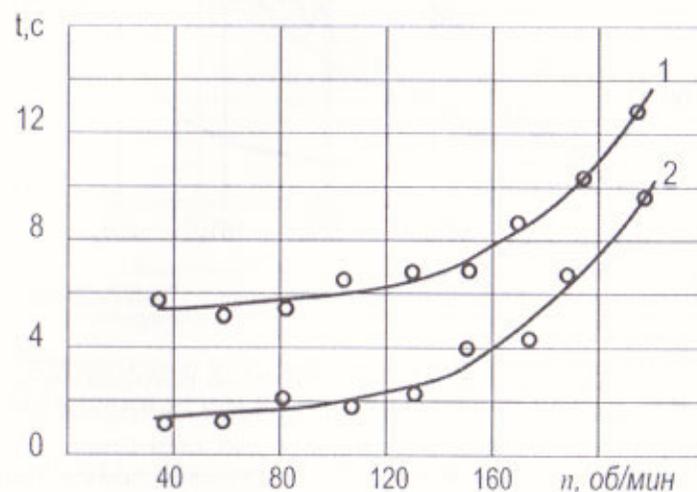


Рисунок 5.4 – Зависимость времени термораскалывания от частоты вращения трубок для схем термораскалывания: 1 – нагрев с нанесением надреза; 2 – надрез, нагрев, охлаждение

Экспериментальные данные хорошо согласуются с теоретическими оценками технологических параметров на основе разработанной модели процесса. Результаты численных расчетов температурного поля для реальных режимов лазерного нагрева вращающихся с частотой 2 об/с (кривая 1) и 3 об/с (кривая 2) трубок приведены на рисунке 5.5.

Лазерный пучок с  $A = 0,1 \cdot 10^{-1}$  м,  $B = 138 = 0,5 \cdot 10^{-3}$  м перемещается со скоростью  $1 \cdot 10^{-2}$  м/с. Увеличение частоты вращения трубки приводит к медленному росту температуры, что в конечном итоге может привести к плавному разогреву трубки.

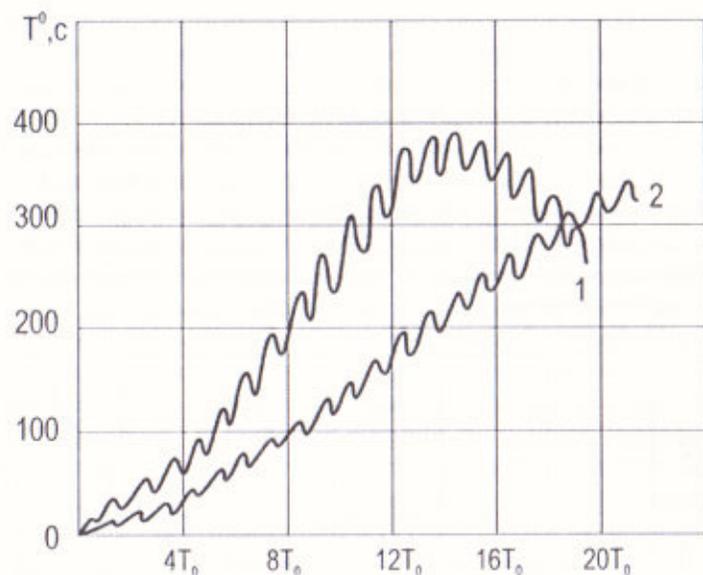


Рисунок 5.5 – Изменение температуры на поверхности при периодическом нагреве вращающейся с частотой (1) – 2 об/с и (2) – 3 об/с трубок

Так как термораскалывание трубок с целью получения колец для плоской ножки ЭОС и штенгеля ЭОС цветных кинескопов целесообразно производить с использованием разных схем резки и, учитывая, что потребность производства в этих стеклодеталях одинакова, необходимо добиться согласования производительности обоих технологических процессов. Экспериментальная проверка показывает, что время термораскалывания трубок диаметром  $2 \cdot 10^{-2}$  м с применением схемы нагрев – надрез (кривая 1 рисунок 5.6) при использовании излучения серийного лазера ИЛГН-709 с мощностью 100 Вт соответствует производительности процесса с применением схемы надрез – нагрев – охлаждение при использовании лазеров ЛГН-703 с мощностью более 40 Вт (кривая 2 рисунок 5.6).

Теоретическое моделирование и экспериментальные исследования процесса термораскалывания стеклянных трубок позволили разработать и внедрить в производство технологические процессы и установки для изготовления стеклянных деталей и регенерации отдельных узлов ЭЛТ [169].

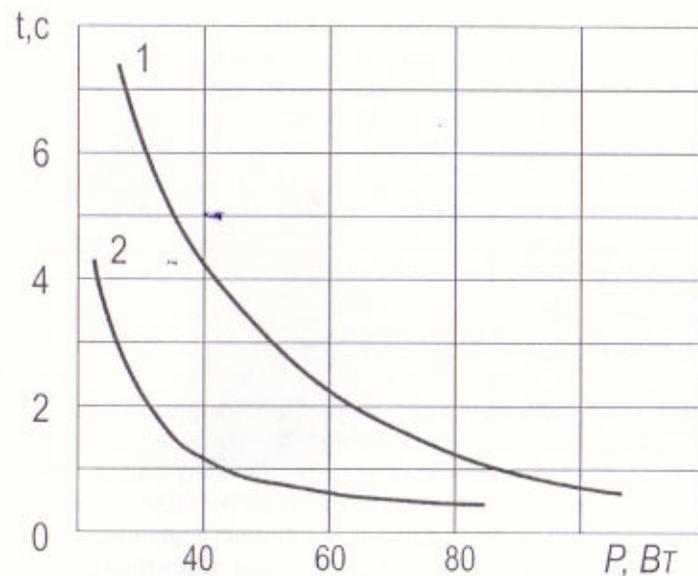


Рисунок 5.6 – Зависимость времени термораскалывания от мощности лазерного излучения для: 1 – диаметр трубок  $2 \cdot 10^{-2}$  м; 2 – диаметр трубок  $9 \cdot 10^{-3}$  м

## 5.2 Разработка и внедрение лазерной технологической установки резки колец для плоской ножки ЭОС

В процессе изготовления ЭОС цветных кинескопов, одной из технологических операций является резка стеклянных трубок на кольца для плоской ножки ЭЛТ. Существующая технология резки основывается на термическом способе резки, причем в качестве источника нагрева используются горючие газы. Такой метод термораскалывания широко известен. Наряду с нагревом стекла по линии разделения, применяется также резкое охлаждение зоны нагрева для увеличения градиента температур, а иногда и предварительное нанесение надреза по линии разделения, уменьшающего механическую прочность и способствующего зарождению трещины. Однако, наиболее перспективным для применения в серийном производстве электровакуумных приборов является метод лазерного термораскалывания, который обеспечивает более высокое качество торцевых поверхностей, точность геометрических параметров изделия, позволяет значительно улучшить культуру производства в условиях вакуумной гигиены и повысить производительность технологических операций более чем в два раза.

Существуют два принципиальных варианта термораскалывания трубчатого стекла с помощью лазерного излучения. В первом случае, лазерный пучок формируется по всему замкнутому контуру разделения с помощью специальных оптических систем, второй, получивший более широкое распространение, заключается в нагреве контура термораскалывания неподвижным лазерным пучком в процессе вращения трубки. Этот вариант реализован в ряде технологических установок [17].

Одним из наиболее существенных недостатков этих способов является необходимость нанесения дефектов на поверхности стекла в зоне термораскалывания. Причем, если дефект, значительно снижающий уровень технической прочности, окажется в стороне от зоны термоупругих напряжений, то в результате его развития в сквозную трещину происходит искривление контура термораскалывания. Кроме того, нанесение дефекта механическим способом до нагрева связано с разрушением поверхностного слоя стекла, изменением шероховатости поверхности. Вследствие этого, происходит увеличение поглощения и, соответственно, доли поглощенной энергии. В зависимости от плотности мощности лазерного пучка это может привести либо к оплавлению дефектной зоны, либо к созданию скачка градиента температур, приводящего в итоге к выколам на поверхности стекла. В обоих случаях эффективность нанесения дефекта намного меньше, чем создание его в напряженной зоне после лазерного нагрева.

В основу разработки установки для резки колец для плоской ножки ЭОС положена следующая схема термораскалывания стеклянных трубок: одновременный нагрев нескольких вращающихся вдоль своей оси трубок при непрерывном их перемещении вдоль большой оси эллиптического неподвижного лазерного пучка, с последующим нанесением зарождающего дефекта (надреза) в области напряжений, созданных лазерным нагревом. Такая схема оптимальна для термораскалывания трубчатого стекла на кольца диаметром  $2,6 \cdot 10^{-2}$  м при толщине стенок  $2 \cdot 10^{-3}$  м.

Данная схема термораскалывания реализована в установке резки стеклянных колец для плоской ножки ЭОС В2.М3.104.012.

В установке для резки колец использован  $\text{CO}_2$ -лазер типа ИЛГН-709 мощностью 90 – 120 Вт. Фокусировка лазерного излучения осуществляется с помощью сферическо-цилиндрической линзы из монокристаллического хлорида натрия. Радиус кривизны сферической поверхности  $R_{\text{сф}}$  составляет  $9 \cdot 10^{-2}$  м, а цилиндрической  $R_{\text{цил}} = 5,2 \cdot 10^{-2}$  м. Такая фокусирующая оптика обеспечивает формирование лазерного пучка на поверхности трубок в виде эллипса с размером большой оси  $(3 - 3,5) \cdot 10^{-2}$  м. Общий вид установки показан на рисунке 5.7.

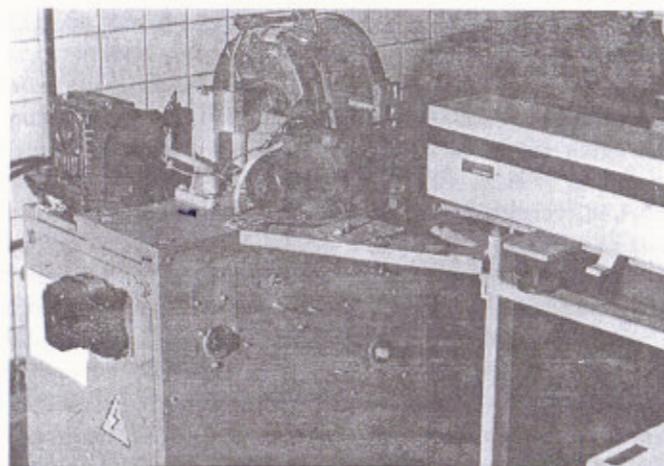


Рисунок 5.7 – Общий вид установки резки колец для плоской ножки ЭОС В2.М3.104.012

Она работает в полуавтоматическом режиме. В состав установки входят: модернизированный механизм подачи трубок от «машины огневой резки стеклянных трубок» Ш2Н995.000.000, механизм нанесения дефекта, лазер ИЛГН-709 с блоком питания, сферическо-цилиндрическая оптическая система. На рисунке 5.8 показана кинематическая схема установки.

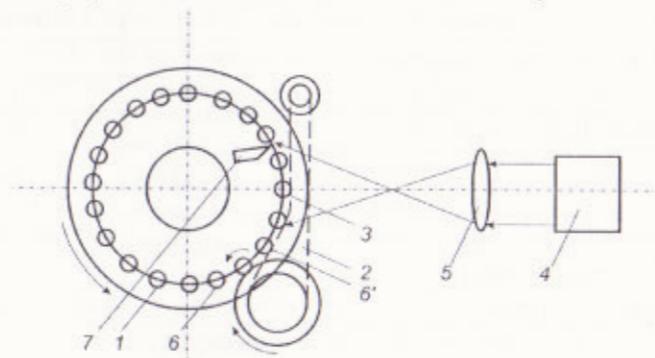


Рисунок 5.8 – Кинематическая схема установки резки колец для плоской ножки ЭОС

Поясним работу установки и основных составляющих узлов. Механизм подачи трубок состоит из вращающегося барабана 1 с отверстиями для загрузки трубок, ремня 2 привода вращения и подачи в зону обработ-

ки трубок. Привод барабана 1 и ремня 2 выполнены на электродвигателях постоянного тока с возможностью независимого изменения скорости вращения обоих составляющих. После загрузки барабана включается питание установки и выводится на рабочий режим лазерный излучатель, устанавливается скорость вращения барабана и трубок относительно лазерного пучка 3. Затем, из хода лучей лазера выводится заслонка-плотитель 4, излучение формируется с помощью фокусирующей оптики 5 в плоскости обработки. Барабан 1 вращается, перемещая трубку 6 в положение 6'. Здесь трубка 6', придя в соприкосновение с ремнем 2, одновременно с вращением вокруг своей оси, подается до упора, задающего размер отрезаемых колец. При дальнейшем перемещении барабана, вращающаяся трубка 6 прогревается по линии реза эллиптическим лазерным пучком и подается к механизму нанесения дефекта 7. Механизм нанесения дефекта выполнен в виде подпружиненного резца. В результате нанесения локального надреза, инициируется образование сквозной разделяющей трещины и кольца падают в специальный накопительный бункер, после заполнения которого направляются на последующие технологические операции.

Технические характеристики технологической установки представлены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Технические характеристики технологической установки резки колец для плоской нажки ЭОС В2.М3.104.012

1.	Длина волны лазерного излучения, мкм	10,6
2.	Мощность лазерного излучения, не менее, Вт	70
3.	Коэффициент пропускания оптики, не менее, %	94
4.	Диаметр разделяемых труб, мм	26
5.	Толщина стенки разделяемых труб, мм	2
6.	Длина заготовки для загрузки, мм	400 – 500
7.	Длина получаемых колец, мм	14 – 15
8.	Точность деления, мм	0,2
10.	Габаритные размеры, мм	3000x1400x1200
11.	Питание установки осуществляется от однофазной сети переменного тока напр. 220 В, частотой 50 Гц	
12.	Потребляемая мощность, кВт	3,5
13.	Для охлаждения лазера необходима проточная вода:	
	-давление воды, кг/с/см <sup>2</sup> г	1 – 2
	-расход воды, л/мин	3 – 5

### 5.3 Разработка и внедрение лазерного технологического модуля для резки и оплавления штенгелей в производстве ЭОС

Технология изготовления штенгелей в производстве ЭОС основывается на механическом способе резки стеклянных трубок с помощью алмазных абразивных кругов. Ряд существенных недостатков такого способа резки, а именно, загрязнение наружной и внутренней поверхности трубки, невысокая точность и качество резки в совокупности с применением ручного труда, трудно поддающегося автоматизации, приводит к необходимости создания нового технологического оборудования базирующегося на методах обработки стекла исключая субъективный подход.

В основу разработки такого оборудования положен способ лазерного термораскалывания стеклянных трубок. Очевидно, что бесконтактность технологического инструмента с поверхностью обработки и резка путем образования разделяющей трещины, исключают загрязнение штенгеля, обеспечивают автоматизацию ряда технологических операций за счет исключения субъективных методов обработки, позволяют значительно улучшить качество и точность резки.

Однако, как отмечается рядом исследователей [92], направленное разрушение стеклянных трубок под действием термоупругих напряжений, возникающих в результате нагрева лазерным излучением, затруднено для малых диаметров и возможно до какого-то минимального диаметра, ниже которого термораскалывание не происходит. Ими было установлено, что при резке термоударом минимальные диаметры составляют для трубок из пирекса –  $2,5 \cdot 10^{-2}$  м, из стекла марок С49-2, С50-1 –  $1,5 \cdot 10^{-2}$  м, стекла С89-6 –  $0,5 \cdot 10^{-2}$  м, С95-1 –  $0,3 \cdot 10^{-2}$  м. Штенгель представляет собой стеклянную трубку диаметром  $9 \cdot 10^{-3}$  м с толщиной боковых стенок порядка  $(1 - 2) \cdot 10^{-3}$  м. При таком соотношении геометрических размеров, как правило прибегают к комбинированным методам, цель которых добиться производительного и надежного термораскалывания за счет снижения уровня технической прочности и увеличения градиента температуры. Авторами [60] предложен комбинированный способ лазерного термораскалывания стеклянных трубок, заключающийся в предварительном нанесении точечного дефекта на линии реза, нагреве линии деления лазерным эллиптическим пучком и резком охлаждении зоны нагрева с помощью хладагента. С локализацией места зарождения трещины появилась возможность осуществления термораскалывания за один оборот

трубки вокруг своей оси. Этот метод был усовершенствован в работе [59] и эффективно использован для резки стеклокапилляров, где для повышения производительности осуществляется нагрев одновременно нескольких трубок лазерным эллиптическим пучком, вытянутым в линию, совпадающую с направлением разделения. Следует отметить, что здесь применяется метод управляемого сквозного термораскалывания. В отличие от схемы положенной в основу разработки установки резки колец для плоской ножки ЭОС, где трещина развивается после лазерного нагрева, в результате нанесения надреза почти мгновенно по всему кольцевому контуру со скоростью близкой к скорости распространения звука в материале, сквозная управляемая трещина следует за лазерным пучком со скоростью относительного перемещения лазерного пучка и стеклянной трубки.

На основе способа термораскалывания стеклянных трубок [59], проведенных исследований и оптимизации технологических параметров термораскалывания, разработана следующая схема для лазерного технологического модуля резки и оплавления штенгелей: нанесение дефектной зоны по периметру трубки, нагрев лазерным излучением вращающихся вдоль своих осей трубок при одновременном их перемещении вдоль неподвижного лазерного пучка с последующим резким локальным охлаждением зоны нагрева. В результате, по периметру трубки образуется несквозная трещина, развивающаяся со скоростью относительного перемещения зоны локального охлаждения по поверхности вращающейся трубки. Окончательно отделение штенгеля проводят докалыванием несквозной кольцевой трещины механическим способом.

Данная схема термораскалывания реализована в установке для резки и оплавления штенгелей В2.М3.104.014 на ОАО «Коралл» г. Гомель.

Общий вид установки показан на рисунке 5.9. В состав установки входят: механизм подачи трубок, устройства нанесения локальной дефектной зоны и охлаждения области нагрева, механизмы докалывания, транспортировки и укладки штенгелей в карусель автомата оплавки штенгелей. Принцип работы установки заключается в следующем: предварительно необходимо загрузить в барабан механизма подачи стеклянных трубок диаметром  $9 \cdot 10^{-3}$  длиной  $1 - 2$  м, дальнейшая загрузка производится по мере необходимости. Затем включают блок питания  $\text{CO}_2$ -лазера, устройство охлаждения области нагрева, состоящего из элементов обеспечивающих стабилизацию параметров воздушно-водяного факела на выходе форсунки. Включается вращение барабана с загруженными трубками, привод вращения трубок, привод транспортера для подачи штенгелей отрезанных трубок) в карусель автомата оплавки штенгелей.

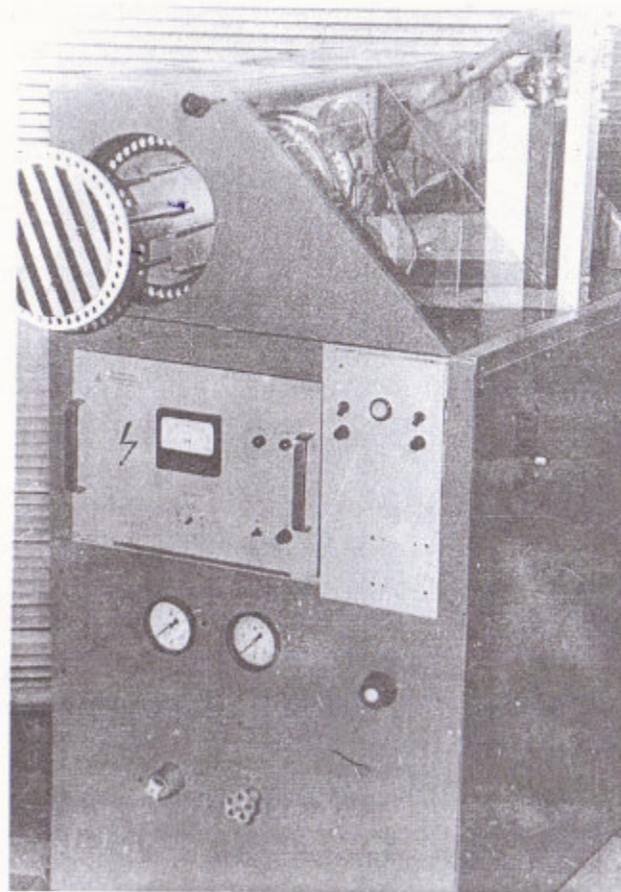


Рисунок 5.9 – Общий вид установки В2.М3.104.014

Кинематическая схема подачи трубок в зону обработки аналогична схеме и принципу действия установки резки колец для плоской ножки ЭОС. В установке использован  $\text{CO}_2$ -лазер типа ИЛП Н-703 мощностью  $30 - 40$  Вт, установленный в вертикальном положении. Лазерное излучение формируется сферическо-цилиндрической оптикой в пучок эллиптического сечения, большая полуось которого составляет в плоскости обработки  $(2,5 - 3) \cdot 10^{-2}$  м. Проходя под лазерным пучком, трубки нагреваются и ниже пучка осуществляется резкое локальное охлаждение зоны нагрева воздушно-водяной смесью, в результате чего происходит образование несквозной разделяющей трещины.

Технические характеристики установки представлены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Основные технические характеристики установки В2.М3.104.014

1.	Длина волны лазерного излучения, мкм	10,6
2.	Мощность лазерного излучения, не менее, Вт	30
3.	Коэффициент пропускания линз, не менее, %	90
4.	Диаметр разделяемых труб, мм	9
5.	Толщина стенки разделяемых труб, мм	2
6.	Длина получаемых штенгелей, мм	86,5
7.	Производительность, не менее, резов/час	600
8.	Точность разделения, мм	0,2
9.	Габаритные размеры, мм	1250 x 850 x 1650
10.	Питание установки осуществляется от однофазной сети переменного тока напр. 220 В, частотой 50 Гц	
11.	Потребляемая мощность, кВт	2
12.	Для охлаждения лазера необходима проточная вода:	
	- давление воды, кгс/см <sup>2</sup>	1 – 2
	- расход воды, л/мин	2 – 3
13.	Давление сжатого воздуха, не менее, кгс/см <sup>2</sup>	2

С целью эффективного использования, та часть лазерного излучения, которая проходит в промежуток между трубками направляется для дополнительного нагрева трубок с помощью отражающего зеркала. Для окончательного отделения штенгеля используется диск с резиновой обкладкой, установленный неподвижно по отношению к перемещению загрузочного барабана, с помощью которого осуществляется докальвание трубок. Отрезанные таким способом штенгеля попадают на ленту транспортера, где ориентируются и поступают на механизм оплавления.

На рисунке 5.10 показаны образцы заготовок кольца и штенгеля, полученные методом лазерного термораскалывания на разработанных установках.

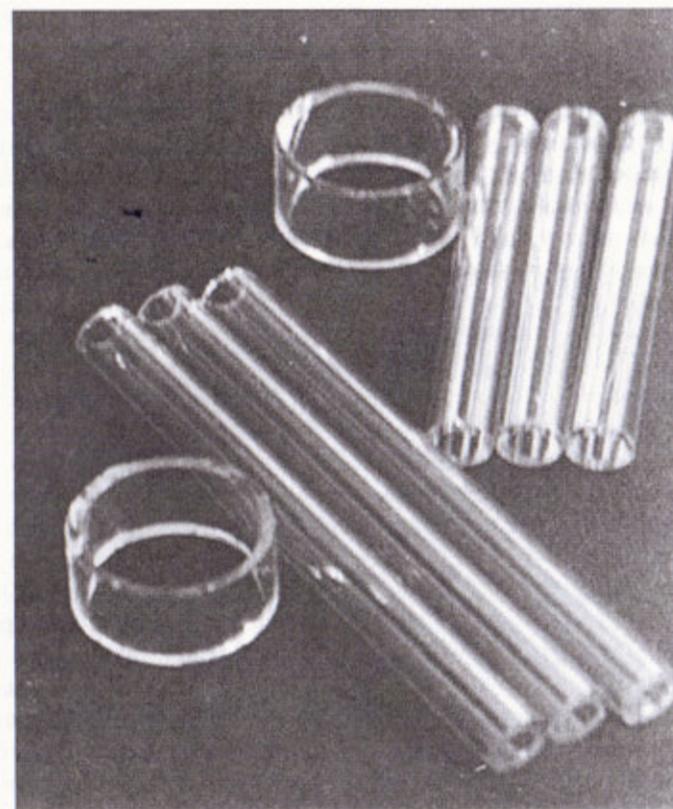


Рисунок 5.10 – Образцы заготовок колец для плоской ножки ЭОС и штенгеля полученные на установках В2.М3.104.012 и В2.М3.104

Внедрение лазерного технологического модуля резки и оплавления штенгелей наряду с приведенными выше преимуществами по сравнению с традиционной технологией, позволило сократить численность рабочего персонала.

#### 5.4 Разработка и внедрение лазерной технологической установки для разгерметизации ЭЛТ

В процессе регенерации ЭЛТ приобретает актуальность вопрос разгерметизации кинескопов с последующей отрезкой горловины. Важно проводить эти операции в одном рабочем цикле, обеспечив при этом

отсутствие остаточных напряжений вдоль линии резки, чистоту и высокое качество реза, исключить попадание посторонних частиц и грязи на экранно-масочный узел.

Существующая технология и устройства для разгерметизации не обеспечивают решение этих вопросов в комплексе. В настоящее время разгерметизация осуществляется путем создания на горловине кинескопа надреза абразивным кругом и дальнейшего отламывания горловины за счет нагрева нихромовой лентой, сверления в горловине кинескопа отверстия или путем механического отламывания штенгеля. Однако, механические способы разгерметизации сопровождаются попаданием посторонних частиц, в основном осколков стекла, в трубку, загрязнении электронно-масочного узла. Низкое качество среза горловины требует дальнейшей обработки и зачастую приводит к окончательному браку. Эти недостатки усложняют процесс регенерации, приводят к низкому проценту выхода годных деталей.

Определенные перспективы открывает применение лазерного излучения. Известны устройства для осуществления разгерметизации ЭЛТ путем прожига отверстия в стенке горловины с помощью импульсного лазерного излучения [93]. Но при этом не обеспечивается отрезка горловины кинескопа и, соответственно, отделение для регенерации ВОС. Наличие больших остаточных напряжений в зоне полученного испарением стекла канала, в ряде случаев приводит к растрескиванию стекла и влияет на качество последующего реза. Метод и устройство предложенные в [94] позволяют одновременно с разгерметизацией производить отрезку горловины ЭЛТ. Но разгерметизация осуществляется за счет натекания воздуха в объем кинескопа через кольцевую трещину, полученную с помощью перемещения лазерного луча по горловине неподвижно установленного кинескопа. Устройство выполнено в виде системы поворотных зеркал, образующих световод, обеспечивающий обегание горловины неподвижного кинескопа лазерным лучом. Недостаток этого способа разгерметизации заложен в низкой производительности процесса натекания кинескопа через кольцевую трещину. Для кинескопа 61ЛК4Ц время полной разгерметизации составляет от 20 до 30 часов, что обуславливает необходимость в строительстве отдельных помещений-накопителей. Следует отметить, что процесс натекания неуправляем и по описанному способу разгерметизации зависит от толщины стенок горловины и режимов термораскалывания. Получение стабильных результатов в этом случае затруднено ввиду необходимости поддержания стабильной окружающей среды. Кроме того, вращающаяся оптическая система со скоростью до 1000 об/мин требует частой отладки, что вызывает дополнительные трудности в эксплуатации этих установок.

Задача повышения качества разгерметизации за счет исключения попадания частиц стекла в объем ЭЛТ и одновременная высококачественная отрезка горловины кинескопа, не требующая дополнительной механической и термической обработки торца горловины, наряду с увеличением производительности процесса разгерметизации ЭЛТ решена на качественно новом уровне [36, 95, 96] и реализована в установке для разгерметизации кинескопов В2.М3.104.013.000.

Общий вид установки показан на рисунке 5.11.

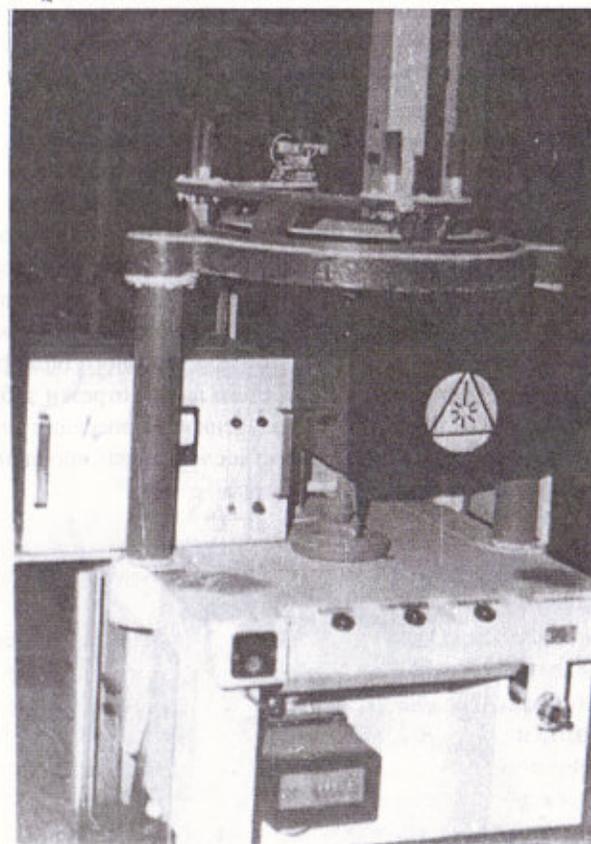


Рисунок 5.11 – Общий вид установки разгерметизации ЭЛТ В2.М3.104.013

Отрезка горловины кинескопа и его разгерметизация осуществляется за один рабочий цикл с помощью излучения  $\text{CO}_2$ -лазера типа ИЛГН-703 мощностью 30 – 40 Вт. Причем важна последовательность операций: в

начале на горловине наносится кольцевая трещина, затем осуществляется прожиг ниже трещины. Благодаря этому, исключается влияние остаточных напряжений в зоне прожига на качество реза и возможное растрескивание от радиальных трещин у канала прожига. Остаточные напряжения отсутствуют и вдоль контура термораскалывания, что обеспечивает качественную приварку тубуса к конусу кинескопа в повторном цикле использования деталей прошедших регенерацию.

Повышение производительности разработанной установки по сравнению с описанной в [94] достигается тем, что оптическая фокусирующая система установки состоит из двух, специальным образом установленных объективов, содержащих оптические элементы, обеспечивающие оптимальные режимы термораскалывания и прожига, которые поочередно, в автоматическом режиме устанавливаются в рабочее положение. Это обеспечивает возможность работы установки в двух разных режимах. В первом случае, разгерметизация ЭЛТ осуществляется путем нанесения на тубусе кольцевой трещины, через которую происходит натекание кинескопа. Однако, как отмечалось выше, процесс натекания очень длителен и выигрыш в скорости термораскалывания за счет оптимизации режимов, сказывается незначительно. Второй вариант разгерметизации, являющийся основным для разработанной установки, заключается в отрезке ЭОС методом лазерного термораскалывания и последующем прожиге отверстия ниже линии отрезки тубуса. Часть горловины кинескопа 61ЛК4Ц с ЭОС полученная на операции регенерации методом лазерного термораскалывания с последующей прошивкой отверстия показана на рисунке 5.12.

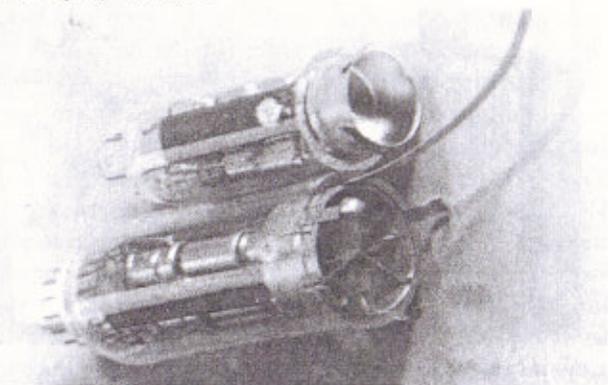


Рисунок 5.12 – Часть горловины кинескопа 61ЛК4Ц с ЭОС полученная на операции регенерации методом лазерного термораскалывания с последующей прошивкой отверстия

Время натекания кинескопа в этом случае определяется диаметром отверстия и его оптимальное значение для кинескопа 61ЛК4Ц составляет 40 – 60 с. В разработанной установке используется эллиптическая форма лазерного пучка для образования кольцевой трещины, что позволило сократить скорость вращения кинескопа до 66 об/мин и, в отличие от ранее разработанных установок, применить вариант с вращающимся кинескопом и неподвижной оптической системой. Этим увеличена надежность работы установки.

На рисунке 5.13 показана структурная схема установки, включающая основные узлы: ОКГ с блоком питания СИТ-24М 1, оптическую фокусирующую систему 2, устройство относительного перемещения лазерного пучка и кинескопа 3, устройство нанесения дефекта 4, электрическую схему питания, управления и индикации технологических операций 5.

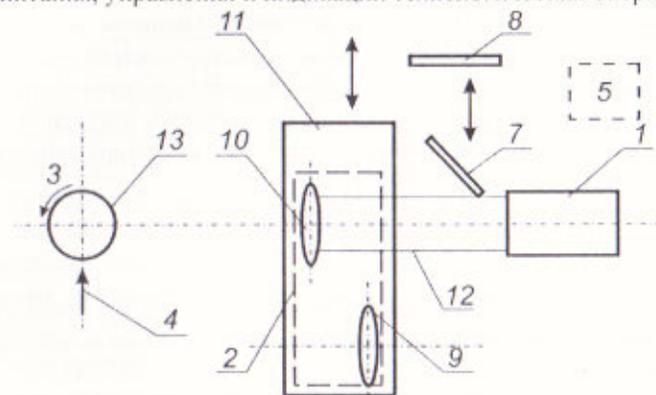


Рисунок 5.13 – Структурная схема установки разгерметизации ЭЛТ

Оптическая система состоит из поворотного зеркала 6, зеркальной заслонки 7 для отвода излучения в поглотитель 8, объективов 9 и 10, установленных на каретке 11. Объективы 9 и 10 содержат соответственно сферическую и сферическо-цилиндрическую оптику, изготовленную из монокристалла NaCl с пропусканием излучения на длине волны 10,6 мкм порядка 98 %. Расстояние между их оптическими осями  $\Lambda$  в направлении хода каретки, определяется величиной хода каретки. Это позволяет поочередно устанавливать оба объектива в рабочее положение, в котором лазерный пучок 12 проходит через соответствующий объектив и фокусируется на поверхности горловины кинескопа 13.

Объектив 10, содержащий цилиндрическо-сферическую оптику с фокусным расстоянием  $F_f$ , устанавливаются в рабочее положение на расстоянии  $L_f$  от поверхности горловины кинескопа. Это обеспечивает фокуси-

ровку лазерного излучения на поверхности горловины в эллиптический пучок, малая полуось которого  $r_1$  равна:

$$r_1 = (L_1 - F_1) r_0 / F_1 \quad (5.3)$$

где  $r_0$  – радиус лазерного пучка до объектива.

Объектив 9, содержащий сферическую оптику с фокусным расстоянием  $F_2$  устанавливается в рабочее положение на расстоянии  $L_2$  от поверхности горловины кинескопа. Он фокусирует на поверхности горловины лазерное излучение в круглый пучок радиусом  $r_2$ :

$$r_2 = (L_2 - F_2) r_0 / F_2 \quad (5.4)$$

Вдоль оси вращения кинескопа объективы смещены на  $a$  величину равную сумме смещений оси объектива 10 вверх от оси лазерного пучка  $a_1$  и оси объектива 9 вниз от оси  $a_2$ . По законам геометрической оптики, без учета aberrаций и расходимости пучка лазерного излучения, смещение оси объектива 10 на величину  $a_1$  приводит к смещению центра пучка на поверхности горловины на величину  $b_1$ :

$$b_1 = L_1 a_1 / F_1 \quad (5.5)$$

Центр пучка на поверхности горловины, полученный после прохождения пучком объектива 9 смещается в противоположном направлении на величину  $b_2$ :

$$b_2 = L_2 a_2 / F_2 \quad (5.6)$$

Минимальная величина  $a$  выбирается из условий отсутствия перекрытия зон термического воздействия лазерных пучков на горловине кинескопа, которое с учетом предыдущих выражений запишется в следующем виде:

$$L_1 a_1 / F_1 + L_2 a_2 / F_2 \geq (-L_1 / F_1 + L_2 / F_2 - r) r_0 \quad (5.7)$$

Нарушение последнего условия приводит к перекрытию зон термического воздействия, в результате чего происходит растрескивание стекла, ухудшение качества термораскалывания и попадание частиц стекла внутрь кинескопа.

В разработанной установке для разгерметизации кинескопов 61ЛК4Ц объектив 10 содержит комбинированную сферическо-цилиндрическую

оптику с радиусом кривизны  $R_{\text{мин}} = 5,2 \cdot 10^{-2}$  м и радиусом кривизны сферической поверхности  $R_{\text{сф}} = 9,2 \cdot 10^{-2}$  м. Объектив 9 выполнен в виде двояковыпуклой сферической линзы с фокусным расстоянием 0,16 м. Суммарное смещение между оптическими осями объективов вдоль оси вращения кинескопа составляет  $8 \cdot 10^{-3}$  м. Это обеспечивает смещение центров пучков, получаемых поочередно на поверхности горловины кинескопа. Ход каретки составляет  $4 \cdot 10^{-2}$  м. Время натекания кинескопа 61ЛК4Ц, включая полную разгерметизацию составляет 1 – 1,5 мин.

Установка предназначена для работы в полуавтоматическом режиме. При оснащении ее роботом-манипулятором для загрузки и выгрузки кинескопов осуществима полная автоматизация эксплуатации [170].

Таблица 5.3 – Основные технические характеристики установки разгерметизации ЭЛТ В2.М3.104.013.000

1	Длина волны лазерного излучения, мкм	10,6
2	Мощность лазерного излучения, не менее, Вт	30
3	Коэффициент пропускания оптической системы, не менее, %	90
4	Скорость вращения кинескопа, об/мин	66
5	Время образования сквозной кольцевой разделяющей трещины, с	10
6	Время натекания кинескопа 61ЛК4Ц через кольцевую трещину, час	20 – 30
7	Время прожига отверстия, с	4 – 5
8	Время натекания кинескопа 63ЛК4Ц после прожига отверстия, с	40 – 60
9	Габаритные размеры, мм	1000 x 1150 x 2800
10	Питание установки осуществляется от трехфазной четырехпроводной сети переменного тока напряжением 220/380 В, частотой 50 Гц	
11	Потребляемая мощность, кВт	1,5
12	Давление сжатого воздуха, не менее, кгс/см <sup>2</sup>	4
13	Для охлаждения лазера необходима проточная вода:	
	-давление воды, кгс/см <sup>2</sup>	1 – 2
	-расход воды, л/мин	1 – 3

Применение данной установки для разгерметизации кинескопов позволило обеспечить преимущества по сравнению с лучшими из известных отечественных и зарубежных аналогов, установкой вскрытия ЭЛТ СУМ 2.329.003 (базовый объект сравнения): сократить время натекания кинескопов более чем в 100 раз; осуществлять натекание в любой среде; исключить дополнительные операции по доводке торца горловины; повысить процент выхода годных изделий на операции разгерметизации за счет повышения надежности и стабильности процесса.

## ГЛАВА 6. ИССЛЕДОВАНИЕ, РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ЛАЗЕРНОГО ТЕРМОУПРОЧНЕНИЯ СТЕКЛОФОРМУЮЩЕГО ПРЕССИНСТРУМЕНТА

### 6.1 Исследование процесса термоупрочнения пуансонов для прессования экранов ЭЛТ

При изготовлении экранов ЭЛТ важным условием является получение однородного микрорельефа на внутренней поверхности прессованного экрана, обеспечивающего хорошее сцепление люминофорного покрытия со стеклом и обладающего способностью диффузного рассеивания.

В настоящее время микрорельеф (матировку) на поверхности прессинструмента получают путем дробеструйной или гидроабразивной обработки. Процесс создания микрорельефа заключается в том, что предварительно зачищенная рабочая поверхность прессинструмента подвергается воздействию твердых частиц (чугунная дробь или абразив), которые разгоняются в скоростных воздушных потоках, создаваемых перепадом давления на входе и выходе специальных форсунок. Соударяясь с поверхностью металла, твердые частицы образуют на нем микрорельеф, состоящий из хаотически расположенных лунок. Высота неровностей микрорельефа зависит от размеров частиц, их кинетической энергии и твердости, а также от физических характеристик материала прессинструмента. Так поверхность стальных пуансонов для прессования экранов цветных кинескопов 61ЛК4Ц подвергают дробеструйной обработке потоком чугунной дроби с диаметром  $(3 - 4) \cdot 10^{-4}$  м, что дает возможность получить матированную поверхность с высотой микрорельефа 10 - 15 мкм. На рисунке 6.1 представлены профилограммы рельефа поверхности, полученные на поверхности стальных пластин при использовании чугунной дроби и абразива КЗ-10 и М-40.

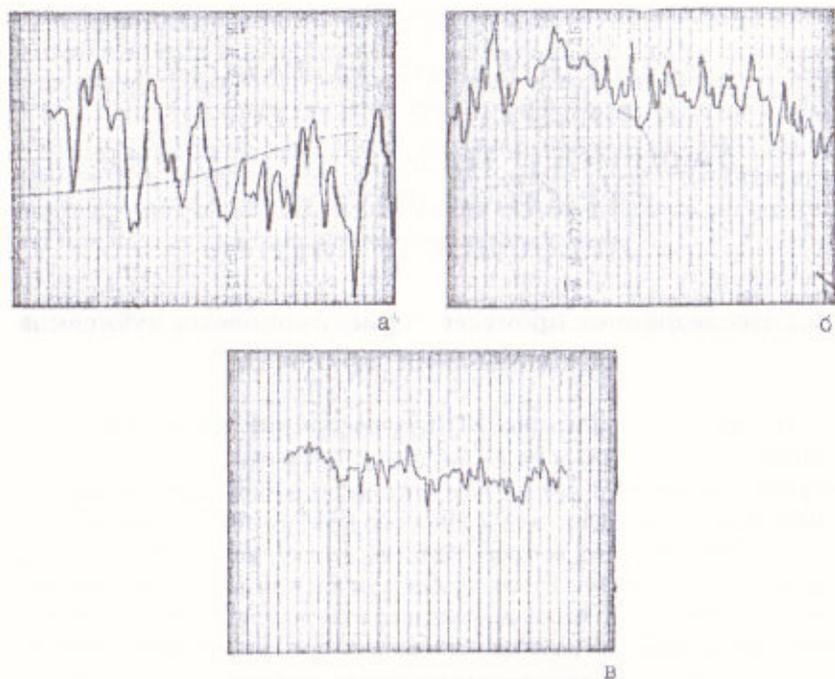


Рисунок 6.1 – Микрорельеф матированной поверхности стали 40X13: а - чу-  
гунной дробью диаметром  $(0,3 - 0,4) \cdot 10^{-3}$  м; б - абразивом К3-10; в - абразивом  
М-40

В процессе эксплуатации пуансона, при формировании экрана, его матированная поверхность вступает в контакт с горячей каплей стекла. При этом микрорельеф подвергается механическим нагрузкам (растекание капли стекломассы под давлением пуансона) и коррозионному воздействию (выдержка пуансона при формировании экрана в горячем стекле). Возрастающие требования к качеству цветных кинескопов, в частности, к таким его параметрам как яркость и разрешающая способность, требует уменьшения размеров микрорельефа. Это сопряжено с технологическими трудностями, которые состоят в резком уменьшении износостойкости инструмента с уменьшением высоты неровности микрорельефа. Из практики известно, что прессинструмент с рабочей поверхности 2 – 4 мкм служит в 4 – 6 раз меньше, чем с 10 – 15 мкм. Связано это с изменением микрорельефа и его геометрических размеров. В случае применения чу-  
гунной дроби образование микрорельефа происходит преимущественно по механизму пластического деформирования поверхности. При приме-

нении абразива необходимо учитывать значительный абразивный износ материала, микрорельеф поверхности характеризуется наличием острых кромок и пиков.

Таким образом, при уменьшении высоты неровностей микрорельефа, необходимо повысить износостойкость рабочей поверхности прессинструмента. Кроме того, не теряет актуальности проблема повышения износостойкости прессинструмента с микрорельефом матированной поверхности, отвечающим существующим требованиям.

Один из путей решения этой проблемы лежит в разработке новых методов упрочняющей технологии, среди разнообразия которых ведущая роль принадлежит лазерному термоупрочнению с использованием непрерывных источников средней и высокой мощности. Улучшение эксплуатационных свойств под воздействием лазерного излучения связано с изменением структурного состояния материала [171–173]. Под воздействием лазерного излучения образуется мелкодисперсионный мартенсит и структуры, обеспечивающие возрастание твердости и прочности. Микротвердость мартенсита линейно возрастает при содержании углерода до 0,6 мас.% и практически не зависит от увеличения его количества в стали. Помимо мартенсита в стали содержатся те же фазы и структуры, что и при обычной закалке: цементит (карбиды), остаточный аустенит. Особенности формирования этих структур при лазерной закалке связаны со скоростью и температурой нагрева исходной структуры стали и определяются степенью завершенности процесса аустенизации в стадии нагрева, поскольку последующее охлаждение фиксирует пройденные стадии [174–178].

Для стали 40X13 наиболее рациональными являются высокие скорости обработки. При увеличении скорости относительного перемещения лазерного пучка и стеклоформирующего прессинструмента до  $(80 - 100) \cdot 10^3$  м/с происходит смещение аустенитной области к поверхности или полное ее устранение [179]. Микротвердость по глубине зоны лазерного влияния колеблется в пределах 300 – 1200 кгс/мм<sup>2</sup>. Высокие значения обусловлены большой насыщенностью зоны оплавления мартенситом, низкие – формированием структуры с повышенным содержанием аустенита (рисунок 6.2). В зоне оплавления остаточный аустенит составляет до 33% и увеличивается на границе сплавления до 39%. Наличие остаточного аустенита служит предпосылкой для ухудшения коррозионных свойств стали. Вместе с тем, образование аустенита связано с полным или частичным растворением карбидов, происходит повышение концентрации хрома в поверхностных слоях и более однородное его распределение в твердом растворе. Тем самым достигается улучшение однородности фазового

состава стали и увеличивается стойкость межкристаллитной коррозии. Учитывая, что повышенная концентрационная неоднородность и дефектность структуры наиболее ярко выражены при повышенных значениях микротвердости, целесообразно лазерную термообработку проводить без оплавления поверхности.

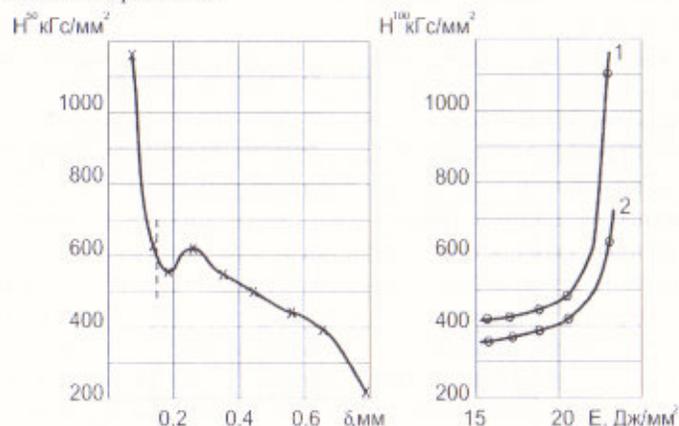


Рисунок 6.2 – Распределение микротвердости по глубине упроченного слоя стали 40X13 и зависимость микротвердости от удельной энергии при термоупрочнении лазерным пучком с диаметром  $0,25 \cdot 10^{-3}$  м при скорости перемещения  $2 \cdot 10^2$  м/с: 1 – максимальные значения микротвердости в зонах упрочнения; 2 – усредненные значения микротвердости в зонах закалки и отпуска

Исследования по возможности лазерного упрочнения стали 30X13 и 40X13 показали, что микротвердость материала может быть увеличена до 440 – 500  $\text{kgf/mm}^2$  без оплавления матированной поверхности. Однако, при сканировании поверхности образуются чередующиеся полосы зон упрочнения и отпуска. Традиционные способы повышения равномерности распределения микротвердости за счет сканирования поверхности лазерным пучком с перекрытием составляющим 0,3 – 0,4 от диаметра лазерного пучка хотя и позволяет уменьшить различия между зонами упрочнения и отпуска, но не обеспечивают получение однородной матированной поверхности на стеклоформирующем прессинструменте. Дело в том, что величина микрорельефа на участках упрочнения и отпуска отличается в 1,5 – 2 раза. На рисунке 6.3 представлено изменение микрорельефа поверхности в зонах закалки и отпуска (кривые 2 и 1 соответственно).  $R_z$  матированной поверхности составляет 10 – 15  $\mu\text{m}$  при микротвердости 250 – 300  $\text{kgf/mm}^2$  в то время, как в зоне лазерной закалки с оплавлением поверхности при микротвердости 1000 – 1200  $\text{kgf/mm}^2$  микрорельеф

матировки колеблется в пределах 4 – 5  $\mu\text{m}$ . Поэтому экспериментальные исследования по отысканию закономерностей термоупрочнения крупногабаритного прессинструмента с повышенными требованиями к однородности микрорельефа приобретают актуальность.



Рисунок 6.3 – Изменение микрорельефа поверхности в зонах высокотемпературного отпуска (1) и закалки (2) после дробеструйной обработки стали 40X13

Установлено, что характер процесса определяется величиной критической плотности мощности лазерного излучения, которая для стали 40X13 составляет  $(240 - 250) \cdot 10^6$   $\text{Вт/м}^2$ . Интервал плотности мощности необходимой для термоупрочнения без оплавления –  $(150 - 240) \cdot 10^6$   $\text{Вт/м}^2$  при скорости относительного перемещения лазерного пучка и стекла  $(20 - 40) \cdot 10^2$  м/с. Параметры лазерной обработки, такие, как скорость перемещения  $V$ , мощность  $P$ , целесообразно объединить с учетом шага сканирования  $h_T$  и характеризовать величиной удельной энергии, которую определим следующим выражением:

$$E = P / (h_T V) \quad (6.1)$$

Увеличение удельной энергии в интервале значений  $(15 - 20) \cdot 10^6$   $\text{Дж/м}^2$  при постоянной скорости сканирования и стационарном шаге термообработки приводит к линейному росту микротвердости в зонах лазерного влияния. Величина максимальных значений микротвердости отличается от усредненного на 50 – 100  $\text{kgf/mm}^2$ , в то время, как для удельной энергии  $(21 - 24) \cdot 10^6$   $\text{Дж/м}^2$  происходит резкое увеличение значений максимальной микротвердости, обусловленное появлением областей оплавления поверхностного слоя стали в местах повторного нагрева. Различие между усредненной и максимальным значением микротвердости достигают 500 – 600  $\text{kgf/mm}^2$  (рисунок 6.2). Экспериментальная проверка показывает, что флуктуация микротвердости в пределах 50 – 100  $\text{kgf/mm}^2$  существенно не сказывается на однородности микрорельефа в зонах закалки

и отпуска. Отличия составляют 0,5 – 1,0 мкм по  $R_z$ , что укладывается в пределы технологического допуска, в то время, как при  $(21 - 24) \cdot 10^6 \text{ Дж/м}^2$  величина  $R_z$  в зонах закалки и отпуска отличается в 1,5 – 2 раза.

Условия, при которых различия в структурных изменениях и микротвердости зон закалки и высокотемпературного отпуска наименьшим образом влияют на однородность микрорельефа матированной поверхности достигаются путем согласования параметров лазерной и механической обработки. Экспериментально установлено, что шаг сканирования связан с высотой неровностей микрорельефа и зависит от диаметра (фракции) твердых частиц. Исходя из того, что диаметр твердых частиц значительно больше высоты неровностей микрорельефа, следует, что необходимо создать распределение микротвердости в поверхностном слое такое, чтобы при попадании твердой частицы в зону высокотемпературного отпуска закаленные соседние участки не дали ей образовать углубление, значительно отличающееся от углублений на закаленных участках, т.е. однородность микрорельефа достигается с помощью уменьшения линейного размера зон высокотемпературного отпуска за счет соответствующего выбора шага сканирования, который согласуется с диаметром твердых частиц.

На рисунке 6.4 представлена схема распределения зон упрочнения и высокотемпературного отпуска в сечении, перпендикулярном плоской обработке, где 1 – исходный материал, 2 – зона закалки, 3 – зона высокотемпературного отпуска, 4 – схематически показаны твердые частицы и соотношение их диаметра к глубине лунок, образующиеся при соударении с поверхностью. Шаг сканирования обозначен как расстояние между центральными осями дорожек сканирования поверхности прессинструмента лазерным излучением. Экспериментально установлено, что шаг сканирования определяет расположение и линейные размеры зон 2, 3.

На расстоянии  $h_T$  между осями соседних дорожек располагается одна зона пониженной микротвердости, линейные размеры зон 2, 3 уменьшаются с уменьшением шага сканирования, оптимальный интервал которого определяется из неравенства:

$$2\sqrt{\Delta h(d - \Delta h)} \leq hT \leq 4\sqrt{\Delta h(d - \Delta h)} \quad (6.2),$$

где  $\Delta h$  – глубина лунки на поверхности прессинструмента [107].

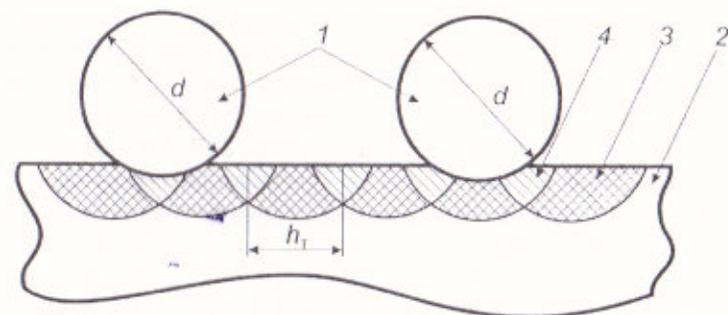


Рисунок 6.4 – Схема образования матированной поверхности пуансона с помощью твердых частиц (1), расположение структуры основного материала (2), зона закалки (3) и отпуска (4)

Для выполнения неравенства (6.2) важно соблюдать условия лазерной обработки, специфика которых связана со сканированием поверхности и различием физических характеристик стали в зонах 2, 3. Исследования показывают, что шаг сканирования оказывает существенное влияние на распределение микротвердости (рисунке 6.5). Так, для диаметра лазерного пучка  $0,25 \cdot 10^{-3}$  м изменение шага сканирования от  $0,4 \cdot 10^{-3}$  м до  $0,5 \cdot 10^{-3}$  м приводит к сближению значений микротвердости в зонах закалки и отпуска. Усредненное значение микротвердости возрастает при уменьшении шага сканирования. Однако, существует значение шага, когда дальнейшее его уменьшение приводит к возрастанию микротвердости за счет появления в местах многократного перекрытия оплавленных участков поверхности. Для режимов лазерного упрочнения при постоянной мощности излучения зависимость микротвердости от шага термообработки приведена на рисунке 6.5а.

Результаты исследования показывают, что однородность микрорельефа сохраняется во всех случаях, когда шаг термообработки лежит в пределах (6.2). В таблице 6.1 приведены значения основных параметров матированной поверхности прессинструмента обработанного лазерным квазинепрерывным излучением с длиной волны 1,06 мкм. Однородность микрорельефа оценивали путем сравнения величины в зонах отпуска и закалки. Образцы из стали 40Х13 сканировали лазерным излучением с шагом соответствующим приведенным в таблице 6.2, после этого производили дробеструйную обработку чугушной дробью (таблица 6.2, пункты 1–5) и абразивом КЗ-10 (таблица 6.2, пункты 6–9). При дробеструйной обработке потоком чугушной дроби применялось многократное ее использование, при обработке абразивом – одноразовое. Путем кратковре-

менного травления водным раствором на поверхности выявлялись зоны закалки и отпуска, после чего на них производили измерения параметров микрорельефа и микротвердости. Установлено, что однородность микрорельефа сохраняется в тех случаях, когда шаг термообработки удовлетворяет соотношению (6.2) (таблица 6.2, пункты 2, 3, 7, 8). На основании исследований (таблица 6.2, пункты 1–5) выбраны оптимальные режимы термоупрочнения и проведены производственные испытания пуансонов прессования экранов ЭЛТ.

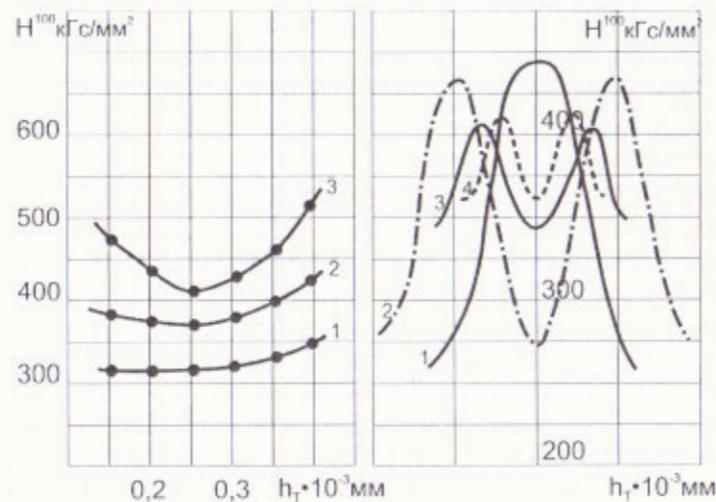


Рисунок 6.5 – Зависимость микротвердости от шага термообработки (а): 1 – 40 Вт; 2 – 60 Вт; 3 – 100 Вт; и зависимость микротвердости на поверхности (б) при одиночном лазерном проходе (1) и при сканировании с шагом: 2 – 0,4 мм; 3 – 0,25 мм; 4 – 0,15 мм

Таблица 6.1 – Результаты производственных испытаний прессинструмента с лазерным упрочнением поверхности

№ п/п	Материал и размеры твердых частиц, $10^{-3}$	Высота неровностей микрорельефа, $10^{-6}$ м	Шаг сканирования, $10^{-3}$ м	Проводимость, $10^{-6}$ м/с	Величина микрорельефа на прессованных экранах через $x_n = (0,03n + h_1)$ где $n = 1 - 6$						Стойкость пуансона, час
					$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	
1		-	-	-	5,8 – 7,5	5,8 – 8,4	5,3 – 7,2	5,0 – 6,2	6,3 – 9,5	5,2 – 6,4	12
2	Чугунная дробь 0,2	9	0,09	1,8	4,5 – 5,2	4,5 – 5,5	4,0 – 5,8	4,2 – 5,4	4,6 – 5,3	4,8 – 5,7	38
3		9	0,17	3,4	3,8 – 4,7	4,2 – 5,1	4,0 – 4,7	4,3 – 5,0	3,9 – 4,8	3,7 – 4,7	40
4		9	0,15	3,0	4,0 – 4,5	3,7 – 4,9	3,5 – 4,5	4,1 – 4,6	3,8 – 4,6	3,4 – 4,7	42

Таблица 6.2 – Основные параметры термупрочнения микрорельефа матированной поверхности пресси́нструмента при лазерной обработке

№ п/п	Материал и размеры твердых частиц, $10^{-3}$	Высота неровностей микрорельефа, $10^{-6}$ м	Шаг скачивания, $10^{-1}$ м	Производительность $10^{-6}$ м/с	Микротвердость и высота неровностей микрорельефа				Исходный материал	
					Зона закалки		Зона отпуска			$H^{100}$ кгс/мм <sup>2</sup>
					$H^{100}$ кгс/мм <sup>2</sup>	$10^{-6}$ м	$H^{100}$ кгс/мм <sup>2</sup>	$10^{-6}$ м		
1			0,05	1,0	300	4,2 – 4,4	240	6,0 – 7,1	-	$10^{-6}$ м
2	Чугунная дробь 0,2 – 0,3	9	0,09	1,8	475	6,2 – 7,3	400	6,3 – 7,5	-	-
3			0,15	3,0	540	6,0 – 6,6	420	6,1 – 6,7	-	-
4			0,17	3,4	545	6,0 – 6,5	430	6,5 – 7,3	-	-
5			0,20	4,0	550	6,2 – 6,4	-	-	200	18 – 19
6			0,04	0,8	320	2,1 – 3,4	259	4,2 – 5,0	-	-
7	Абразив КЗ-10 0,1	6	0,06	1,2	500	3,5 – 4,8	390	3,0 – 4,9	-	-
8			0,12	2,4	540	3 – 4	430	3 – 4,2	-	-
9			0,15	3,0	525	3,5 – 4	-	-	200	5 – 6

Для сравнения износостойкости микрорельефа поверхности, производили матирование его поверхности без лазерной обработки (таблица 6.2, пункт 1) и испытания на технологической линии прессования экранов. Однородность микрорельефа проверялась на готовой продукции. Для этого стеклянный образец ориентировался по направлению сканирования пуансона лазерным излучением, после чего осуществлялось измерение, которые повторяли в направлении перпендикулярном сканированию со смещением на величину  $x_n = 0,03n + h_m$ , где  $n = 1 - 6$ .

Измерения показывают, что однородность микрорельефа при  $h_{\min} \leq h_r \leq h_{\max}$  сохранена. Износостойкость увеличивается в 3 – 3,5 раза.

Помимо рассмотренного выше способа повышения эксплуатационной надежности пресси́нструмента, разработаны другие разновидности лазерной обработки. Проведены эксперименты по гальваническому хромированию матированной поверхности стали 30Х13 и последующей термообработке хромированной поверхности. Выбор хрома в качестве покрытия обусловлен высокой твердостью и жаростойкостью хромовых покрытий. Эксперименты показали, что при толщине покрытия 10 – 20 мкм, профиль хромированной поверхности хорошо повторяет профиль матированной поверхности. Микротвердость покрытия составляет 700 – 740 кгс/мм<sup>2</sup>. После обработки хромированной матированной поверхности лазерным излучением при плотности мощности 250 Вт/мм<sup>2</sup> и скорости перемещения  $2 \cdot 10^{-2}$  м/с микротвердость покрытия возрастает до 880 – 930 кгс/мм<sup>2</sup>. При этом зоны отпуска практически отсутствуют, что можно объяснить другим механизмом увеличения твердости хромового покрытия по сравнению со сталью. Можно предположить, что при лазерной обработке происходит уплотнение покрытия, которое обычно после гальванического нанесения имеет рыхлую структуру.

Однако, проблемы связанные с гальваническим нанесением хрома и его снятием ставят в более выгодное положение экологически чистый процесс лазерной обработки, заключающийся в оплавлении острых пиков матировки и удаления инородных частиц с матированной поверхности. Кроме структурных превращений в материале возможна защита его поверхности с помощью оксидной пленки, толщиной и характеристиками которой можно управлять с помощью параметров лазерного излучения и подачи в зону обработки активных газов.

Динамика процесса изменения параметров микрорельефа в зависимости от мощности лазерного излучения для матированной поверхности, образованной с помощью чугунной дроби и абразивов КЗ-10 и М-40 приведена в таблице 6.3. Применение такого процесса наиболее перспективно для изменения параметров матированной поверхности дисплейных

экранов, т.к. микрорельеф исходной поверхности с  $Ra$  порядка 1,7 – 1,9 мкм изменяет свои параметры, под действием лазерного излучения, практически в два раза.

Промышленная эксплуатация стеклоформирующего прессинструмента к однородным микрорельефом матированной поверхности с повышенной износостойкостью показывает перспективность разработанных технологических процессов. В результате улучшается качество прессованных экранов, уменьшается время необходимое для смены прессинструмента и вывода его на рабочий режим.

Таблица 6.3 – Динамика процесса изменения параметров микрорельефа в зависимости от мощности лазерного излучения для матированной поверхности

	Чугунная дробь 0,2 – 0,4 мм	Абразив КЗ-10	Абразив М-40
$P=0$	$Ra=3,7 - 3,8$ мкм	$Ra=1,7 - 1,9$ мкм	$Ra=0,58 - 0,60$ мкм
$P=55$	$Ra=3,7 - 3,9$ мкм	$Ra=1,7 - 1,8$ мкм	$R_s=0,56 - 0,58$ мкм
$P=61$	$Ra=3,7 - 3,8$ мкм	$Ra=1,6 - 1,7$ мкм	$Ra=0,46 - 0,48$ мкм
$P=70$	$Ra=3,6 - 3,7$ мкм	$Ra=1,2 - 1,3$ мкм	$Ra=0,51 - 0,54$ мкм
$P=81$	$Ra=3,4 - 3,5$ мкм	$Ra=0,9 - 1,1$ мкм	$R_s=0,64 - 0,65$ мкм

## 6.2 Разработка и внедрение технологического процесса и оборудования для термоупрочнения пуансонов, ножей отсечки стекломассы, раскатников

Для разработки технологического процесса лазерного упрочнения пуансонов, ножей отсечки капли стекломассы и раскатников была разработана и изготовлена установка на базе непрерывного  $CO_2$ -лазера «Комета-2» и квазинепрерывного твердотельного лазера ЛТН-103. Схема расположения основных узлов показана на рисунке 6.6. Лазерное излучение 1 установки «Комета-2», попадая на молибденовое зеркало заслонки 3, отклоняется на водоохлаждаемый поглотитель излучения 4. При открытии заслонки, пучок 1 попадает на поворотное зеркало 5, установленное неподвижно на станине вертикально-фрезерного станка с ЧПУ модели 6530-ФЗ-36, и отклоняется вниз. Проходя далее через линзу 6 и плоскопараллельную пластинку 7, установленные на подвижной бабке

станка 8, пучок 1 попадает на деталь 9. Пластика 7 расположена в коаксиальном сопле 10. Сопло 10 и форсунка 11 закреплены на вертикальной бабке станка. Обрабатываемая деталь 9 закрепляется на горизонтальном столе станка 12. Для обработки деталей излучением лазера ЛТН-103 с длиной волны 1,06 мкм, из оптического хода лучей исключаются элементы 3, 4 путем поворота зеркала 5 на  $90^\circ$  по часовой стрелке.

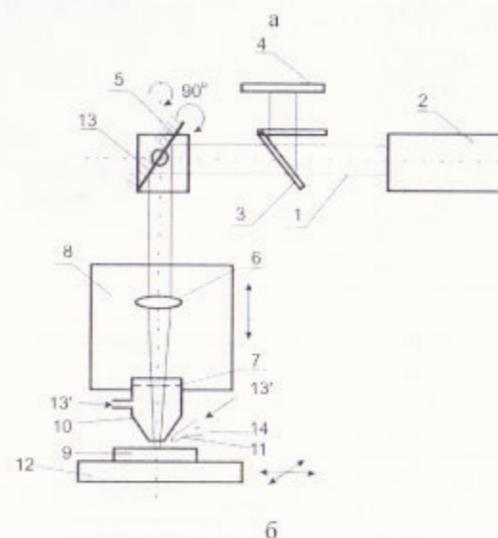
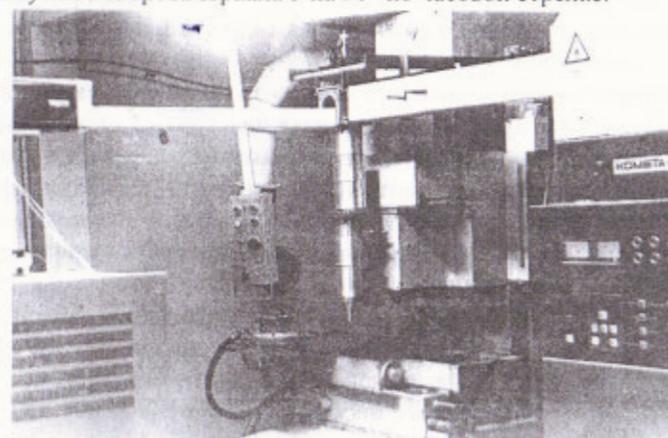


Рисунок 6.6 – Установка для лазерного термоупрочнения ножей, раскатников, пуансонов в производстве ЭЛТ на базе  $CO_2$ -лазера «Комета-2» и ЛТН-103: а – общий вид; б – структурная схема

Установка деталей оптической фокусирующей системы, сопла и форсунки на вертикальной бабке станка с ЧПУ, позволяет обрабатывать детали сложной формы, например сферическую поверхность пуансона для прессования экранов ЭЛТ, с сохранением плотности мощности лазерного излучения на поверхности и расстояния от сопла подачи защитного газа 14 до поверхности детали. Для предварительной настройки системы предусмотрена возможность относительного перемещения линзы, сопла и форсунки.

Для фокусировки излучения на поверхности обработки в пятно круглой формы использовалась линза 6 из NaCl с фокусным расстоянием 0,25 – 0,40 м. Плоскопараллельная пластинка 7 служит для обеспечения нормальной работы сопла и возможности прохождения через него лазерного излучения диапазона 10,6 мкм и 1,06 мкм. Для формирования на поверхности детали пучка эллиптической формы предусмотрена установка вместо 7 цилиндрической линзы с фокусным расстоянием 0,4; 0,6 или 0,8 м.

Для обработки деталей сложной формы была разработана специальная конструкция коаксиального сопла для подачи защитного газа, которая обеспечивает надежную защиту зоны обработки от окисления при изменении расстояния от поверхности от  $1 \cdot 10^{-3}$  м до  $1 \cdot 10^{-2}$  м. Дополнительная форсунка 11 может быть также использована для подачи защитного газа 14 в зону обработки. Кроме того, конструкция форсунки предусматривает возможность подачи в зону обработки распыленной газовой смеси. Это необходимо при обработке тонких деталей и, особенно, острых кромок.

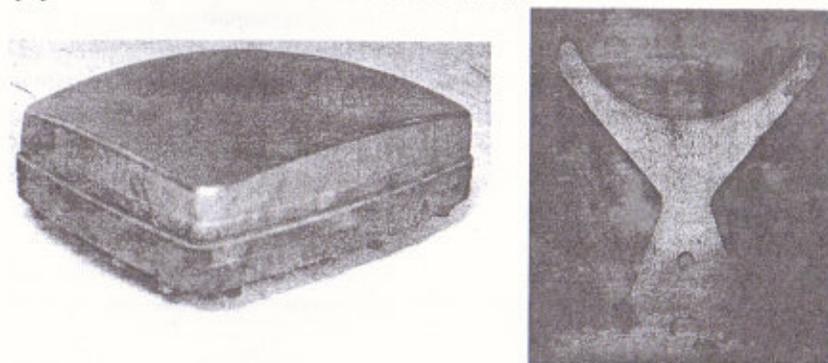
Таблица 6.4 – Основные технические характеристики установки для лазерного термоупрочнения

1. Мощность лазерного излучения, не менее, Вт	
- для длины волны 10,6 мкм	1000
- для длины волны 1,06 мкм	250
2. Максимальная регулируемая скорость перемещений м/мин	1,2
3. Вертикальный ход бабки, мм	300
4. Максимальное перемещение по горизонтали, мм <sup>2</sup>	250 x 550
5. Дискретность шага перемещения, мм	0,01
6. Расход гелия газообразного, не более, л/мин	2
7. Расход газовой смеси, не более, л/мин	5
8. Расход воды в системе охлаждения, не менее, л/мин при давлении, не менее, кПа	100
9. Потребляемая мощность от трехфазной сети переменного тока, не более, кВт	30

Данная установка внедрена для термоупрочнения ножей отсечки капли и раскатников, а также использована для разработки технологии и специализированного оборудования для термоупрочнения пуансонов для прессования экранов ЭЛТ.

Раскатник предназначен для формирования конуса экрана ЭЛТ. Специфика упрочнения заключается в нанесении ребер жесткости на боковую поверхность раскатников в виде лучей от его вершины к основанию. Преимущество данного способа заключается в том, что исключается термообработка всей рабочей поверхности, и в процессе эксплуатации вращающегося раскатника, его геометрические размеры сохраняются за счет повышения микротвердости стали в местах лазерной обработки. Режимы лазерной обработки чугуна достаточно хорошо изучены и не нуждаются в дополнительном исследовании [108].

Ножи для отсечки капли стекломассы ТХМ8.880.027 изготавливаются из вольфрамовой стали Р-18. Микротвердость закаленных обычным способом ножей составляет 350 – 460 кгс/мм<sup>2</sup>. На рисунке 6.7 показана форма ножа для отсечки капли стекломассы.



а

б

Рисунок 6.7 – Технологический инструмент в производстве ЭЛТ с повышенными за счет лазерного термоупрочнения эксплуатационными характеристиками: а – пуансон прессования экранов ЭЛТ, б – нож отсечки капли стекломассы

Относительное движение пучка по поверхности ножа осуществлялось по дугам концентрических окружностей с шагом  $4 \cdot 10^{-3}$  м, так чтобы первый проход был параллелен режущей кромке ножа. Для поддержания относительной ориентации эллиптического пучка и направления движения, на координатном столе станка установлен поворотный стол с приводом от шагового двигателя. Разработанная программа для ЧПУ обе-

спечивает постоянную линейную скорость относительного перемещения лазерного пучка и ножа.

Для увеличения коэффициента поглощения лазерного излучения были опробованы 3 способа: матирование поверхности до  $Rz = 5 - 20$  мкм, нанесение окиси цинка со связкой клеем БФ-2, травление поверхности раствором хлорного железа.

Покрытие окисью цинка обеспечивает достаточно хорошее поглощение излучения, но нанесение равномерной толщины пленки на детали сложной конфигурации затруднено. Кроме того, во время обработки выделяются продукты возгонки клея БФ-2, которые загрязняют оптику. Матирование поверхности с помощью пескоструйного устройства обеспечивает получение равномерной шероховатости поверхности на изделиях разной формы и достаточно большое поглощение излучения. Однако, более простым в технологическом отношении процессом является травление поверхности раствором хлорного железа. Поглощение излучения диапазона 10,6 мкм после травления возрастает примерно в 1,5 – 2 раза в зависимости от материала. Дальнейшие эксперименты по термоупрочнению проводились на образцах, обработанных раствором хлорного железа при скорости перемещения образца  $2 \cdot 10^{-2}$  м/с. Уменьшение скорости нежелательно из-за малой толщины ножей, которая составляет  $(6 - 7) \cdot 10^{-3}$  м.

Проведены эксперименты по лазерной обработке стали P18 в среде защитного газа, который подавался в зону обработки через коаксиальное сопло специальной конструкции. В качестве защитного газа использовался азот (таблица 6.5).

Таблица 6.5 – Микротвердость поверхности стали P18, обработанной в защитной среде (азот) при разных плотностях мощности излучения

Плотность мощности излучения, Вт/мм <sup>2</sup>	220	270	480
Микротвердость, кгс/мм <sup>2</sup>	540 – 860	700 – 860	676 – 780

Как видно из приведенных в таблице 6.5 данных, микротвердость закаленной поверхности возрастает до 640 – 860 кгс/мм<sup>2</sup> в широком диапазоне плотностей мощности излучения. Однако, при плотности мощности излучения 270 Вт/мм<sup>2</sup> начинается плавление поверхности материала, приводящее к возникновению на поверхности неровностей, а значит, детали, термоупрочненные в таком режиме требуют дополнительной обработки.

Обработка ножей в среде азота показала, что на острой режущей кромке, претерпевающей наибольший износ при их работе, наблюдается

перегрев и отпуск материала, что обусловлено плохим теплоотводом от острой кромки. Для улучшения условий теплоотвода применено охлаждение поверхности материала непосредственно вслед за его нагревом с помощью распыления форсункой азотно-водяной смеси. При этом наблюдалось небольшое окисление поверхности. Результаты обработки стали с использованием азотно-водяной смеси приведены в таблице 6.6.

Таблица 6.6 – Микротвердость поверхности стали P18, обработанной с подачей в зону нагрева азотно-водяной смеси при разных плотностях мощности излучения

Плотность мощности излучения, Вт/мм <sup>2</sup>	130	250	510
Микротвердость, кгс/мм <sup>2</sup>	570 – 720	600 – 820	570 – 720

Плавление поверхности в этом случае наблюдается при плотности мощности излучения выше 200 Вт/мм<sup>2</sup>. Присутствие окисления поверхности позволяет увеличить размеры зоны обработки при той же мощности по сравнению с обработкой в защитной среде. Ширина зоны обработки составляет в этом случае  $4 \cdot 10^{-3}$  м, что соответствует производительности процесса термоупрочнения  $4,8 \cdot 10^{-3}$  м<sup>2</sup>/мин.

Устройство перемещения рассмотренной выше технологической установки обеспечивает скорости обработки не превышающий  $2 \cdot 10^{-2}$  м/с, что неприемлемо для обработки крупногабаритного стеклоформирующего прессинструмента. Так пуансон для прессования экранов цветных кинескопов 61JK5Ц обрабатывается с такой скоростью в течении 12 – 14 часов при шаге сканирования  $0,25 \cdot 10^{-3}$  мм. В тоже время, скорость обработки стали 40X13 достигает  $(80 - 10) \cdot 10^{-3}$  м/с.

Вследствие этого, разработана и внедрена в серийное производство специализированная установка для термоупрочнения пуансона, общий вид которой показан на рисунке 6.8., а основные технические характеристики приведены в таблице 6.7. В основу разработки положены исследования процесса термоупрочнения крупногабаритных поверхностей с повышенными требованиями к эксплуатационным параметрам и однородности микрорельефа матированной поверхности.

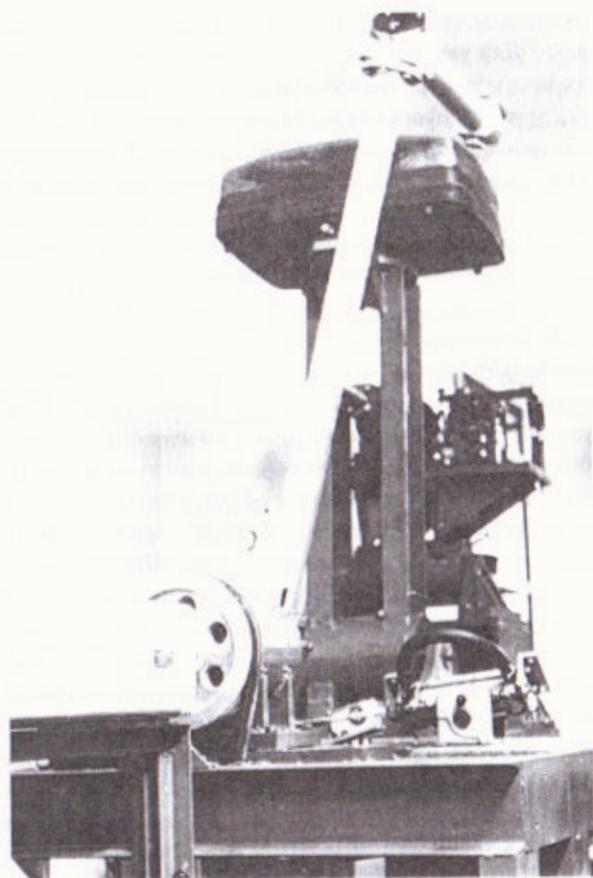


Рисунок 6.8 – Общий вид специализированной лазерной технологической установки термоупрочнения пуансонов для прессования экранов ЭЛТ

Таблица 6.7 – Основные технические характеристики лазерной технологической установки

1	Мощность лазерного излучения, Вт	до 250
2	Длина волны излучения, мкм	1,06
3	Потребляемая мощность от трехфазной сети переменного тока, кВт	18
4	Максимальная скорость обработки, мм/с	до 100
5	Время обработки пуансонов для экранов кинескопа 61М5Ц, не более, час	4
6	Расход воды в системе охлаждения, л/мин	2

Разработанные процессы термоупрочнения стеклоформирующего прес-инструмента и оснастки, а также технологическое оборудование для их осуществления не имеют аналогов.

### 6.3 Исследование, разработка и внедрение процесса лазерного импульсного термоупрочнения литевых прессформ и штампов в производстве корпусов полупроводниковых приборов, модернизация оптической системы установки «Квант – 18»

В данном параграфе рассмотрен один из наиболее перспективных лазерных технологических процессов – контурное моноимпульсное термоупрочнение рабочих кромок прессформ и штампов. Анализ условий работы, форма и геометрические размеры деталей технологического инструмента позволяют в ряде случаев ограничиться моноимпульсной обработкой лазерными пучками специальной геометрии. При этом значительно улучшается качество лазерной закалки вследствие отсутствия неизбежных зон пониженной твердости на рабочих кромках в местах перекрытия пятен закалки при традиционном методе импульсного термоупрочнения, в десятки раз возрастает производительность процесса. Моноимпульсная обработка возможна на основе создания оптических фокусирующих систем, обеспечивающих заданное распределение энергии лазерного импульса по контуру обработки. Необходимое условие – наличие лазерного излучателя, позволяющего по своим техническим параметрам получить энергию импульса достаточную для термоупрочнения контура рабочих кромок детали.

Установка «Квант – 18», предназначенная для импульсной термообработки пятном прямоугольного сечения, с производительностью до 500 мм/мин. Термоупрочнение осуществляется с перекрытием пятен закалки (оптимальная величина коэффициента перекрытия 0,5). Такие выходные параметры, как энергия импульса излучения от 8 до 70 Дж, частота повторения импульсов лазерного излучения в автоматическом режиме от 0,1 до 1,6 Гц дают возможность эффективно использовать данную систему для моноимпульсной термообработки. С этой целью проведена модернизация оптической схемы. Основы в разработке систем для моноимпульсной термообработки положены в работах специалистов Гомельского государственного университета имени Франциска Скорины и производственного объединения «Коралл». По сравнению с известными способами формирования лазерного излучения, такими как проекционный или голографический эти системы лишены значительных потерь энергии и энергетических барьеров при их использовании. Но, эти системы предполагают конструктивно-автономное исполнение, кроме того, сравнительно небольшие ошибки при изготовлении и юстировке отрицательно сказываются на распределении энергии по сечению пучка лазера, что в свою очередь приводит к потере качества термообработки. Избежать этих недостатков и совместить преимущества схем моноимпульсной обработки позволяет разработка систем формирования лазерного излучения, используемых в качестве оптических насадок к оптическим схемам серийных технологических установок.

Оптическая схема лазерной установки «Квант – 18» показана на рисунке 6.9. Она состоит из излучателя, образованного зеркалами 5, 7 резонатора, содержащего четыре активных элемента 6 цилиндрической формы из стекла активированного ионами неодима. Параллельный пучок лазерного излучения на выходе из резонатора, проходя линзу 8, попадает на диафрагму 9, формирующую распределение плотности излучения по сечению лазерного пучка и фокусируется линзой 10 в фокальной плоскости системы образованной элементами 8-11 панкратическим объективом 13. Мнимая фокальная плоскость телеобъектива, образованного элементами 8-10, совмещается с предметной плоскостью панкратического объектива. Телеобъектив и панкратический объектив в совокупности образуют систему с переменным фокусным расстоянием и постоянной задней фокальной плоскостью, которая расположена в плоскости изображений панкратического объектива. Изменяя фокусное расстояние всей системы путем перемещения крайних компонентов объектива 13 относительно среднего, на выходе оптической системы получают круговой пучок с перестраиваемым диаметром. Пластина 14 служит для предо-

хранения линз объектива от загрязнения продуктами испарения. Модернизация данной оптической схемы проведена на основе анализа контура деталей технологического инструмента, подверженных износу. Наиболее приемлемо формирование лазерного пучка по прямоугольному контуру, прямоугольной полосе или кольца.

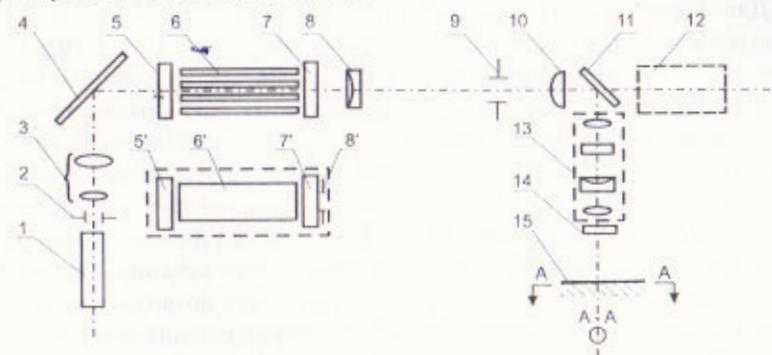


Рисунок 6.9 – Оптическая схема модернизированной лазерной технологической установки «Квант – 18»

Для формирования лазерного пучка по кольцевому контуру на выходе панкратической системы 13 устанавливается аксикон, позволяющий получить в плоскости обработки распределение с нулевой интенсивностью в центре пучка. Система линза – аксикон дает возможность избежать переналадки оптической системы, получать изменение в широких пределах диаметра колец в фокальной плоскости без изменения конструктивных параметров оптических элементов.

Оптическая схема модернизированной установки содержит систему визуализации, в которую входят юстировочный гелий-неоновый лазер 1, диафрагма 2, телескопическая система 3. Ход лучей системы визуализации после поворотного зеркала 4 соответствует оптической схеме и дает возможность точной установки и ориентации деталей перед термообработкой в соответствии с размерами и контуром лазерного пучка в плоскости 15. За поворотным зеркалом 11 расположен фотоприемник 12, который преобразует часть излучения, прошедшего через зеркало в электрический сигнал, что позволяет вести непрерывный контроль за энергией лазерных импульсов.

При термообработке пятном прямоугольной формы излучатель с цилиндрическими активными элементами заменяется на излучатель образованный системой 5-7 с прямоугольным активным элементом. Из хода лучей оптической формирующей системы исключаются элементы 9-10

и вводится прямоугольная диафрагма перед 8. Перестройку прямоугольного пятна осуществляют путем перемещения крайних компонентов объектива 13 относительно среднего на величину  $(8 - 10) \cdot 10^{-3}$  м и вертикальным перемещением всей оптической системы относительно плоскости термообработки 15.

Для формирования лазерного пучка по прямоугольному контуру использована оптическая насадка приведенная на рисунке 6.10, основанная на асферической оптике. Центральная часть лазерного пучка прямоугольного сечения попадает на бипризму 1, где разделяется на два, боковые части лазерного пучка попадают на оптические клинья 2 и разводятся на заданный угол. Основным оптическим элементом насадки является цилиндрическая билинза 3, на которую приходят четыре пучка прямоугольного сечения. В фокальной плоскости билинзы формируется замкнутый контур прямоугольного сечения. Элементы 1, 2 подвижны и независимы друг от друга, что позволяет изменять размеры прямоугольного контура. Для термоупрочнения использована цилиндрическая билинза с фокусным расстоянием 50 мм, бипризма с углом при основании  $11^{\circ}08'$  и оптические клинья с углом  $6^{\circ}56'$ . Для получения в плоскости обработки двух полос, заданных геометрических размеров, исходный пучок разделяют на два с помощью выведения из хода лучей оптических клиньев и увеличения геометрических размеров бипризмы. Расстояние между полосами будет определяться углом при основании бипризмы и фокусным расстоянием билинзы. Для получения в плоскости обработки одной полосы прямоугольного сечения из оптической схемы исключаются элементы 1, 2.

Рассмотренные выше оптические системы модернизированной установки «Квант – 18» использованы для термоупрочнения деталей литейных прессформ и штампов. Применение в излучателе установки элементов ГЛС-9П и ГЛС-59-5 обеспечивает высокую стабильность и равномерное распределение энергии импульса по пятну обработки. Следует отметить более эффективное применение активных элементов ГЛС-59-5 при уровнях накачки 700 – 1000 и 1750 – 2000 В.

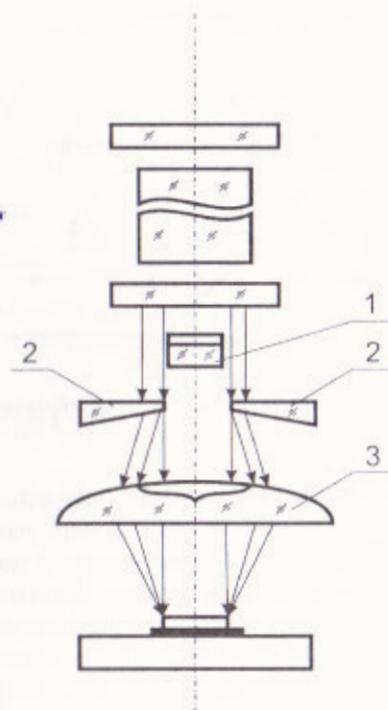


Рисунок 6.10 – Схема оптической насадки для формирования лазерного пучка прямоугольной формы

Конфигурация рабочих поверхностей деталей характеризуется наличием острых кромок и граней, на которых при лазерной закалке, вследствие нарушения симметрии отвода тепла вглубь основной массы материала, происходит значительный рост температуры. Ошибки в выборе режимов закалки приводят к перегреву и оплавлению последних. С целью предотвращения нежелательных эффектов на рабочих кромках деталей технологического инструмента, разработала теоретическая модель процесса закалки, позволяющая производить расчет и оптимизацию режимов лазерной обработки для получения необходимых эксплуатационных свойств стали на основе предварительного расчета температурных полей.

Выберем систему координат так, чтобы ось  $Ox$  проходила через геометрический центр прямоугольного лазерного пучка на поверхности четверть пространства с адиабатическими границами, образованными плоскостями  $XOy$  и  $XOz$  (рисунок 6.11).

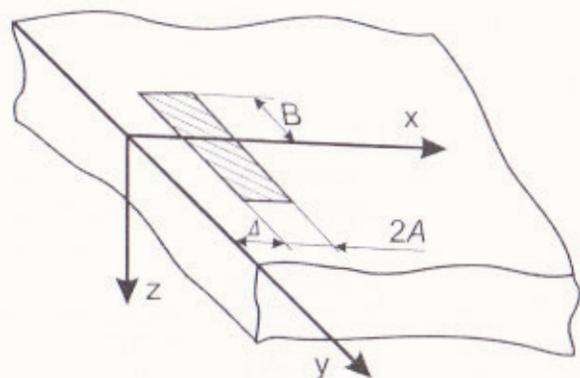


Рисунок 6.11 – Схема моделирования нагрева поверхности с учетом боковой границы

Расстояние от края пучка до боковой границы зададим в приращениях по координате  $X$  к характеристическому размеру малой стороны пучка  $\Lambda$ . Координата центра пучка  $X=2\Lambda$  соответствует расположению пучка на границе боковой поверхности материала. Учитывая, что нагрев поверхности стали осуществляется достаточно длительное время (3 – 7 мс), т.е. разность электронной температуры и температуры кристаллической решетки материала становятся минимальными, тепловые процессы можно характеризовать с позиций классической теории теплопроводности. Кроме того, размеры прогретой области в начальный момент времени определяются глубиной проникновения излучения в материал, сравнимой с длиной волны лазерного излучения. С течением времени глубина прогрева растет за счет теплопроводности. Следовательно, тепловой источник можно считать поверхностным. Так как глубина прогретого слоя, в котором происходят структурные изменения, много меньше размеров деталей, то образец можно считать бесконечно протяженным в положительных направлениях осей  $OX$  и  $OZ$ .

Таким образом, наша задача сводится к определению трехмерного температурного поля в изотропном материале, при нагреве его поверхности излучением ИК-диапазона, из уравнения теплопроводности с учетом высказанных выше предположений. Решение получим используя метод функции Грина. Функция Грина, определяющая граничные условия задачи, построенная методом фиктивных источников, имеет вид:

$$G = \frac{a}{\lambda} \frac{1}{8(\pi a \tau)^{3/2}} \left\{ \exp\left[-\frac{(x-x')^2}{4a\tau}\right] + \exp\left[-\frac{(x-x'')^2}{4a\tau}\right] \right\} \left\{ \exp\left[-\frac{(z-z')^2}{4a\tau}\right] + \exp\left[-\frac{(z+z')^2}{4a\tau}\right] \right\} \exp\left[-\frac{(y-y')^2}{4a\tau}\right] \quad (6.3)$$

Т.к. распределение интенсивности по сечению лазерного пучка наиболее близко описывается функцией Гаусса, зададим тепловой источник с учетом поверхностного поглощения в виде:

$$Q = P_0 \delta(z) \exp\left\{-\frac{(x-A-\Delta)^2}{A^2} - \frac{y^2}{B^2}\right\} \quad (6.4)$$

где  $P_0 = P/\pi AB$  – плотность мощности,  $\delta(z)$  – дельта функция Дирака.

Поле температур, вызываемое лазерным пучком с распределением интенсивности (6.4), определим производя интегрирование по пространственным координатам, в результате чего имеем:

$$T(r, t) = \frac{P_0 \sqrt{a}}{2\pi^{3/2} \lambda} \int_0^t dt' \frac{\exp\left\{-z^2/4a\tau' - y^2/(B^2 + 4a\tau')(J_+ + J_-)\right\}}{\sqrt{(A^2 + 4a\tau')(B^2 + 4a\tau')}} \quad (6.5)$$

где

$$J_{\pm} = \exp\left\{-\frac{[x \pm (A + \Delta)]^2}{A^2 + 4a\tau'}\right\} \operatorname{erfc}\left[\frac{\pm A^2 x - 4a\tau'(A + \Delta)}{2A\sqrt{a\tau'(A^2 + 4a\tau')}}\right]$$

Временной интервал интегрирования в (6.5) определяется длительностью импульса лазерного излучения, с помощью которой осуществляется управление скоростями нагрева, что в свою очередь, оказывает влияние на глубину упрочненного слоя. В рамках данной модели осуществим выбор оптимального значения при заданных параметрах энергии излучения и размерах лазерного пучка. При условии, что геометрия детали не позволяет осуществлять отступление от кромки (случай), расчет тепловых полей дает возможность оптимизировать режим лазерной обработки путем выбора энергии лазерного излучения.

Проведены численные расчеты температурных полей для лазерного пучка с  $\Lambda = 0,75 \cdot 10^{-3}$  м и  $B = 3,85 \cdot 10^{-3}$  м. Длительность импульса в эксперименте составляла  $7 \cdot 10^{-5}$  с. Теплопроводность и температуропроводность материала выбирались равными  $34$  Вт/м·К° и  $0,9 \cdot 10^{-5}$  м²/с со-

ответственно. На рисунке 6.12 приведены результаты такого расчета для предложенной модели (кривая 1) и для известной модели процесса для полубесконечной среды (кривая 2). Анализ зависимости показывает, что температура без учета границы составляет  $460^{\circ}\text{C}$ . Данная температура ниже температуры закалки, в то же время эксперимент показывает, что граница закаленная. Расчет по новой модели дает температуру в этой же точке равную  $844^{\circ}\text{C}$ , что отвечает условиям закалки и хорошо согласуется с экспериментальными данными. Расчеты показывают, что размеры пучка примерно совпадают с размерами зоны термического влияния на сталь. Кроме того, плохие условия теплоотвода на границе приводят к возрастанию температуры не только на границе пучка, но и в его центре.

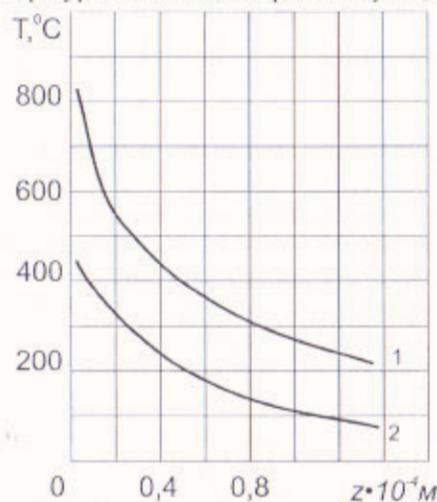


Рисунок 6.12 – Распределение температуры по глубине стали с учетом четвёрть пространства (1) и для полубесконечной среды (2)

Процесс лазерного моноимпульсного термоупрочнения исследован, разработан и внедрен для повышения стойкости штампов изготовления фланца Д4.1711.4031; Д4.1711.4032; штампов калибровки ободка корпуса ИС-74 В2.М5.471.001; штампа-автомата В2.М3.111.000. Для ряда деталей вышеперечисленных штампов удалось избежать сканирования рабочей поверхности пятном прямоугольной формы за счет применения лазерного пучка кольцевого сечения. В ряде случаев применена комбинированная термообработка с применением кольцевого и прямоугольного пучков.

Измерение микротвердости зоны термического влияния и исходной структуры стали осуществлялось на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке на индентор 100, 200 грамм с временем выдержки 5, 8 с. Изменения структуры и свойств стали после лазерной обработки довольно хорошо изучены [121–131]. Проведенные исследования подтвердили основные выводы, а именно: для сталей X12M, P6M5, 9XC область термического влияния по глубине распространения теплового потока состоит из зоны закалки с мартенситно-аустенитной структурой с включением мелких карбидов и остаточным аустенитом. Микротвердость этой зоны составляет 960 – 1005; 840 – 1150; 800 – 970  $\text{кгс}/\text{мм}^2$  для сталей приведенных выше. В предварительно закаленной структуре на оси теплового потока наблюдается зона скоростного высокотемпературного отпуска, микротвердость которой на 50 – 150  $\text{кгс}/\text{мм}^2$  выше исходной. Зависимость микротвердости от плотности энергии лазерного пучка для рассматриваемых сталей приведена на рисунке 6.13.

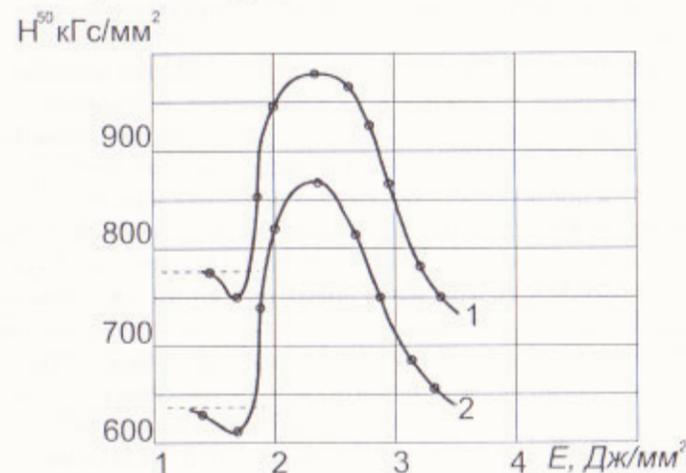


Рисунок 6.13 – Зависимость микротвердости от плотности энергии лазерного пучка для предварительно закаленных сталей: 1 – X12M, 2 – P6M5

При термообработке на воздухе стали X12M лазерным излучением с длительностью импульса 7 мс в интервале плотностей энергии 1,8 – 2,5  $\text{Дж}/\text{мм}^2$ , происходит увеличение микротвердости на 10 – 150  $\text{кгс}/\text{мм}^2$ . Экспериментальным путем установлено, что оптимальная плотность энергии лазерного излучения составляет 1,8 – 2,4  $\text{Дж}/\text{мм}^2$ . При плотности энергии меньшей 1,8  $\text{Дж}/\text{мм}^2$  наблюдается отпуск предварительно закаленной структуры. В этом случае микротвердость по глубине зоны тер-

мического влияния возрастает до исходной, не превышая ее. В интервале плотностей энергии больше  $2,5 \text{ Дж/мм}^2$  происходит оплавление поверхности. Микротвердость оплавленной зоны или несколько ниже исходной или не отличается от нее. По глубине зоны термического влияния она возрастает до  $960 - 1050 \text{ кгс/мм}^2$  с последующим переходом в зону скоростного отпуска.

Ряд деталей штампов работают в условиях значительных динамических нагрузок, что обуславливает повышенный износ рабочих кромок в процессе эксплуатации. По мере износа и затупления рабочих кромок выше перечисленных деталей возрастают ударные нагрузки, в ряде случаев приводящие к поломке деталей. Основным параметром, характеризующим сопротивление образованию трещин и разрушению под действием ударных нагрузок рабочих кромок деталей вязкость стали. Добиться увеличения этой характеристики и, тем самым, исключить поломку деталей позволяет сочетание традиционного метода термической обработки стали и лазерного импульсного термоупрочнения. Вязкость, как прочность, зависит от величины зерна и состояния пограничных слоев стали, количества, размеров и условий распределения карбидов [134–137]. Ее повышение достигается, прежде всего, выбором стали не содержащей избыточных карбидов и предварительной термической закалкой на мелкое зерно с твердостью для 9ХС и Р6М5 в пределах 55 – 60. Предварительная закалка предупреждает смятие рабочих кромок в процессе работы и обеспечивает повышенную вязкость сердцевины материала. Образование с помощью лазерного импульсного излучения поверхностного слоя с повышенной микротвердостью в сочетании с повышенной вязкостью сердцевины позволяет повысить износостойкость деталей штампа в 1,5 раза.

Сравнительные испытания матриц, изготовленных из заэвтектоидной стали 9ХС и вольфрамомолибденовой стали Р6М5 показали, что устойчивость к ударным нагрузкам у стали Р6М5 значительно выше, чем у 9ХС в основном за счет уменьшения и скалывания рабочих кромок.

Процесс лазерного моноимпульсного термоупрочнения исследован, разработан и внедрен для повышения стойкости литевых прессформ Д4.1372.5002; Д4.1872.5004; Д4.1872.5005. Режимы закалки и свойства упрочненных зон материала прессформ, полученные на основе экспериментальных исследований, приведены в таблице 6.8. В результате проведения работы модернизирована оптическая система серийного оборудования: технологической установки «Квант – 18», позволяющая производить термообработку деталей штампов по коль-

цевому контуру, пятом прямоугольной и круглой формы. Отработаны режимы лазерной импульсной закалки деталей штампов и литевых прессформ. Процесс моноимпульсного лазерного термоупрочнения внедрен в производство.

Таблица 6.8 – Режимы закалки и свойства упрочненных зон материала технологического инструмента

№ п/п	Материал и толщина покрытия $10^{-6}$ м	Режимы термообработки			Микротвердость $H^{100}$ кгс/мм <sup>2</sup>				Глубина Упрочненного слоя $10^{-6}$ м
		Мощность излучения Вт $\cdot 10^3$	Энергия имп. Дж.	Размеры пятна $10^{-3}$	Исходная поверхн.	Исходное покрытие	Термоупрочн. Материал	Термоупр. покрытие	
1	У8	9,8	69	15x2	280 – 340	–	800 – 860	–	100 – 150
2	ХВГ	9,6	69	15x2	300 – 360	–	860 – 920	–	100 – 150
3	У8 предв. закал.	10	69	14x1,5	500 – 600	–	885 – 920	–	100 – 130
4	ХВГ предв. закал.	9,8	69	14x1,5	545 – 1000	–	995 – 1000	–	100 – 130
5	У8	12	69	14x1,5	–	600 – 700	–	920 – 1000	50 – 60
6	ХВГ хром 4-6	11,9	69	14x1,5	–	600 – 700	–	955 – 1000	50 – 60

Таблица 6.9 – Микротвердость образцов по малой стороне прямоугольного пятна

№ п/п	Материал	Толщ. хрома	Размер пятна $10^{-3}$	Энергия имп. Дж.	Микротвердость термообр. поверхн. $H^{100}$ кгс/мм <sup>2</sup> , в интервале $10^{-1}$ м															
					0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
1	ХВГ	2...4	14x1,5	81	545	600	580	640	770	790	730	740	790	710	750	790	780	750	670	620
2	ХВГ	4...6	14x1,5	85	650	570	820	760	890	1000	900	920	1000	960	970	930	980	720	640	740
3	ХВГ	6...8	14x1,5	89	470	565	720	870	955	980	730	900	990	1000	1000	940	1100	390	740	690

## Список литературы

1. Кудрявцева, А. Применение лазерных технологий в электронике / А. Кудрявцева // Современная электроника. – 2010. – № 3. – С. 10–11.
2. Мадаминов, Х. М. Применение лазеров в полупроводниковой технологии / Х. М. Мадаминов, Г. Ф. Каримова // Молодой ученый. – 2017. – № 1 (135). – С. 4–7.
3. Салманов, В. Взаимодействие лазерного излучения с полупроводниками и диэлектриками / Вагиф Салманов. – Германия : LAP Lambert Academic Publishing, 2014. – 276 с.
4. Шмонина, В. Ю. Современное технологическое оборудование для лазерной обработки материалов электронной техники / В. Ю. Шмонина // Электронные системы и технологии : сборник материалов 58-й науч. конф. аспирантов, магистрантов и студ. БГУИР (Минск, 18–22 апр. 2022 г.). – Минск : БГУИР, 2022. – С. 509–512.
5. International Conference on Lasers, Applications, and Technologies 2002: Advanced Lasers and Systems [Electronic resource] / ed.: Guenter Huber, Ivan A. Scherbakov, Vladislav Ya. Panchenko // Proc. SPIE. – 2003. – Vol. 5137. – P. 410. – Mode of access: <https://spie.org/Publications/Proceedings/Volume/5137>. – Date of access: 08.08.2023.
6. International Conference on Lasers, Applications, and Technologies 2002: Laser Processing of Advanced Materials and Laser Microtechnologies [Electronic resource] / ed.: Friedrich H. Dausinger, Vitali I. Konov, Vladimir Yu. Baranov, Vladislav Ya. Panchenko // Proc. SPIE. – 2003. – Vol. 5121. – P. 422. – Mode of access: <https://spie.org/Publications/Proceedings/Volume/5121?SSO=1>. – Date of access: 08.08.2023.
7. Eighth International Conference on Laser and Laser Information Technologies [Electronic resource] / ed.: Vladislav Ya. Panchenko, Nikola V. Sabotinov // Proc. SPIE. – 2004. – Vol. 5449. – P. 496. – Mode of access: <https://spie.org/Publications/Proceedings/Volume/5449>. – Date of access: 08.08.2023.
8. Laser rapid manufacturing of special pattern [Electronic resource] / M. Zhong, Nichel Alloy [et al.] // Proc. SPIE. – 2005. – Vol. 5629. – P. 59–66. – Mode of access: <https://spie.org/Publications/Proceedings/Paper/10.1117/12.571089>. – Date of access: 08.08.2023.
9. Matsuno, K. Development of high-power lasers in the Japanese national project [Electronic resource] / K. Matsuno // Proc. SPIE. – 2003. – Vol. 4831. – P. 90–95. – Mode of access: <https://spie.org/Publications/Proceedings/Paper/10.1117/12.497942>. – Date of access: 08.08.2023.
10. Вейко, В. П. Лазерные микро- и нанотехнологии в микроэлектронике / В. П. Вейко. – Санкт-Петербург : НИУ ИТМО, 2011. – 141 с.

11. Вейко, В. П. Лазерная микрообработка / В. П. Вейко. – Санкт-Петербург : НИУ ИТМО, 2007. – 111 с.
12. Ланин, В. Л. Многофункциональная установка лазерной обработки материалов и изделий микроэлектроники / В. Л. Ланин, Г. Ретюхин, С. Б. Школьник // Производство электроники. – 2018. – № 1. – С. 98–102.
13. Вейко, В. П. Технологические лазеры и лазерное излучение / В. П. Вейко. – Санкт-Петербург : ИТМО, 2007. – 52 с.
14. Салманов, В. Взаимодействие лазерного излучения с полупроводниками и диэлектриками / Вагиф Салманов. – London : LAP Lambert Academic Publishing, 2014. – 276 с.
15. Рыкалин, П. Н. Лазерная обработка материалов / П. Н. Рыкалин, А. А. Углов, А. П. Кокора. – М. : Машиностроение, 1975. – 296 с.
16. Рэди, Дж. Действие мощного лазерного излучения / Дж. Рэди. – М. : Мир, 1974. – 468 с.
17. Мачулка, Г. А. Лазерная обработка стекла / Г. А. Мачулка. – М. : Сов. радио, 1979. – 136 с.
18. Миркин, Л. И. Физические основы обработки материалов лучом лазера / Л. И. Миркин. – М.: Изд-во МГУ, 1975. – 384 с.
19. Ready, J. F. Material Processing – An Overview / J. F. Ready // Proceedings of the IEEE. – 1982. – V. 48, № 6. – P. 533–534.
20. Lax, M. Temperature rise induced by a laser beam / M. Lax // Journal of Applied Physics. – 1977. – V. 48, № 9. – P. 3919–3924.
21. Nissim, Y. I. Temperature distributions produced in semiconductors by a scanning elliptical or circular cw laser beam / Y. I. Nissim, A. Lietoila, R. B. Gold, J. F. Gibbons // Journal of Applied Physics. – 1980. – V. 51, № 1. – P. 274
22. Bechtel, J. H. Heating of solid targets with laser pulses / J. H. Bechtel // Journal of Applied Physics. – 1975. – V. 46, № 4. – P. 1585–1593.
23. Sanders, D. J. Temperature distributions produced by scanning Gaussian laser beams / D. J. Sanders // Appl. Opt. – 1984. – V. 23, № 1. – P. 30–35.
24. Разрушение прозрачных диэлектриков под действием мощного лазерного излучения / Б. М. Ашкинадзе [и др.] // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1966. – № 50(5). – С. 1187–1201.
25. Yamada, M. Laser-Oscillating-Mode Dependence of Temperature Distributions in Laser Annealing of Semiconductors / M. Yamada, H. Ariyoshi, K. Yamamoto, K. Abe // Japanese Journal of Applied Physics. – 1983. – V. 22, № 10. – P.1546–1552.
26. Kawasumi, H. Studies on Surface Hardening with CO<sub>2</sub>-Laser (1st Report) – On the Effects of Rectangular and Modified Rectangular to Laser to Laser Hardening / H. Kawasumi, T. Arai // J. of Japan Soc. of Prec. Engg. – 1981. – V. 47, №. 6. – P. 669–674.

27. Светондущированная резка стекла [Электронный ресурс] / В. В. Бучанов, М. А. Казарян, Э. Н. Муравьев, В. И. Ревенко // Краткие сообщения по физике. ФИАН. – 2017. – № 9. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/svetoindutsirovannaya-rezka-stekla>. – Дата доступа: 23.06.2023.

28. Кондратенко, В. С. Новые эффективные способы лазерной обработки листового стекла / В. С. Кондратенко, А. С. Танасейчук, Е. Б. Шершнев // Электрон. техн. Сер. II. Лазерн. техн. и оптоэлектрон. – 1986. – № 4(40). – С. 38–45.

29. Schlueter, H. Advances in industrial high power lasers [Electronic resource] / H. Schlueter // Proc. SPIE : XV International Symposium on Gas Flow, Chemical Lasers, and High-Power Lasers (23 March 2005). – 2005. – Vol. 5777. – P. 8–15. – Mode of access: <https://spie.org/Publications/Proceedings/Paper/10.1117/12.610958>. – Date of access: 08.08.2023.

30. Matušek, M. Opracování skla laserem / M. Matušek // 1. část Sklář a keramik. – 1984, Č. 5. – S. 125–131.

31. Лазерная установка «Квант-20» для резки стекла / Б. А. Парфенов [и др.] // Электронная техника. Сер. II. Лазерная техника и оптоэлектроника. – 1979. – Вып. 1(7). – С. 11–15.

32. Об эффективности объемного нагрева стекол излучением лазеров инфракрасного диапазона / В. С. Алейников [и др.] // Электронная техника. Сер. II. Лазерная техника и оптоэлектроника. – 1978. – № 1. – С. 107–109.

33. Объемный нагрев стекол излучением инфракрасного диапазона / В. С. Алейников [и др.] // Электронная техника. Сер. II. Электроника СВЧ. 1981. – № 8(332). – С. 47–49.

34. Перспективы внедрения технологии управляемого термораскола стекла излучением лазера на парах стронция / А. Н. Солдатов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Физика. 2013. – Т. 56, № 10. – С. 72–78.

35. Шемелин, В. К. Исследование режимов лазерного управляемого термораскалывания оксидных стекол на основе применения ИК-лазера на парах стронция / В. К. Шемелин, А. В. Чирков, В. К. Сысоев // Автоматизация и современные технологии. – 2011. – № 2. – С. 8–13.

36. 3D Microstructuring of Silicate Glass by Femtosecond Laser Radiation / A. E. Rupasov, P. A. Danilov, M. P. Smaev [et al.] // Optics and Spectroscopy. – 2020. – Vol. 128, № 7. – P. 928–931.

37. Вакс, Е. Д. Практика прецизионной лазерной обработки / Е. Д. Вакс, М. Н. Миленький, Л. Г. Сапрыкин. – Москва : Техносфера, 2013. – 708 с.

38. Увеличение эффективности управляемого лазерного термораскалывания диэлектрических материалов / В. К. Сысоев [и др.] // Оптический журнал. – 2004. – Т. 71, № 2. – С. 65–79.

39. Tsai, C. Laser cutting of thick ceramic substrates by controlled fracture technique / C. Tsai, H. Chen // Journal of materials processing technology. – 2003. – Vol. 136. – P. 166–173.

40. Управляемое гибридное светолазерное термораскалывание стекол / В.К. Сысоев [и др.] // Письма в ЖТФ. – 2007. – Т. 33, Вып. 1. – С. 54–59.

41. Двухлучевое лазерное термораскалывание хрупких неметаллических материалов / С.В. Шалунаев [и др.] // Оптический журнал. – 2005. – Т. 73, № 5. – С. 62–66.

42. Junke, J. Cutting glass substrates with dual-laser beams / J. Junke, W. Xinbing // Optics and Lasers in Engineering. – 2009. – Vol. 47. – P. 860–864.

43. Концепция двухлазерного термораскалывания стеклянных элементов для космических аппаратов / В. К. Сысоев [и др.] // Вестник «ФГУП НПО им. С.А. Лавочкина». – 2011. – № 1. – С. 38–44.

44. Method of and apparatus for severing vitreous bodies. pat. EN 1441114 / Publ. 12.10.72.

45. Динамика формирования полей температурных напряжений в процессе лазерного управляемого термораскалывания / В. А. Емельянов [и др.] // Лазерные новости. – 1995. – № 4. – С. 14–17.

46. Особенности поверхностного трещинообразования при раскрое стекла излучением неодимового лазера / В. С. Каменков [и др.] // Физика и химия обработки материалов. – 1996. – № 3. – С. 51–55.

47. Хлопков, Ю. В. Лазерный раскрой стекла для светофильтров к телевизорам и ПЭВМ / Ю. В. Хлопков // Стекло и керамика. – 1994. – № 7. – С. 33–34.

48. Малов, И. Е. Разработка технологии управляемого термораскалывания листового стекла излучением твердотельного лазера: дис. ...канд. техн. наук: 05.03.07 / И. Е. Малов; Моск. техн. ун-т им. Н. Э. Баумана. – М., 2000. – 185 с.

49. Солинов, В. Лазерная резка стекла / В. Солинов, А. Сирота, В. Чадин // Стронительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2004. – № 5. – С. 50–52.

50. Способ резки пластин хрупких материалов: пат. 000544. Евразийское патентное ведомство, МКИ С 03В 33/00 / А.С. Сирота, В.Ф. Солинов, Е.Ф. Солинов, В.М. Товмасын, В.С. Чадин; заявитель ООО «ЛАЗТЕКС». – № 199900040; заявл. 10.13.98; опубл. 10.28.99 / [Электронный ресурс]. – 2007. – Режим доступа: [www.eapo.org](http://www.eapo.org). – Дата доступа: 19.05.2007.

51. Способ лазерной обработки стекла: пат. 002296 Евразийское патентное ведомство, МКИ С 03В 33/00, В 23К 26/00 А. К. Алиев, А. С. Сирота, В. Ф. Солинов, Е. Ф. Солинов, В. С. Чадин; заявитель ООО “ЛАЗТЕКС”. - №20000026; заявл. 05.17.00; опубл. 02.28.02. / [Электронный ресурс]. – 2007. – Режим доступа: [www.eapo.org](http://www.eapo.org). – Дата доступа: 19.05.2007.

52. Способ резки стекла: пат.004322 Евразийское патентное ведомство, МКИ С 03В 33/00 А. К Алиев, А. С. Сирота, В. Ф. Солинов, Е. Ф. Солинов, В. С. Чадин; заявитель ООО “ЛАЗТЕКС”. - №200100614; заявл. 2001.03.05; опубл. 2002.10.31 / [Электронный ресурс]. – 2007. – Режим доступа: [www.eapo.org](http://www.eapo.org). – Дата доступа: 19.05.2007.

53. Способ резки стекла: пат.004167 Евразийское патентное ведомство, МКИ С 03В 33/09 А. К Алиев, А. С. Сирота, В. Ф. Солинов, Е. Ф. Солинов, В. С. Чадин; заявитель ООО “ЛАЗТЕКС”. - №2001000008; заявл. 2001.03.01; опубл. 2004.02.26 / [Электронный ресурс]. – 2007. – Режим доступа: [www.eapo.org](http://www.eapo.org) – Дата доступа: 19.05.2007.

54. Орлов, И. А. Лазерная резка трубчатых стеклоизделий методом термораскалывания: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.03.07 / И. А. Орлов; Моск. техн. ун-г им. П. Э. Баумана. - М., 1992. - 16 с.

55. Способ резки полых стеклоизделий: пат. 2015118 РФ, МКИ 5 С 03В 33/00 / И. А. Орлов, В. С. Чадин; заявитель И. А. Орлов, В. С. Чадин. - №4942111/33; заявл. 1991.06.17; опубл. 1994.06.30. // Официальный бюллетень «Изобретения, полезные модели» / [Электронный ресурс]. – 2008. – Режим доступа: [www.fips.ru](http://www.fips.ru). – Дата доступа: 27.03.2009.

56. Способ лазерной резки трубчатых заготовок из стекла: пат. 1721995 СССР, МКИ С 03В 33/08 / И. И. Дутка, В. С. Коваленко, Г. Л. Матвиевич; заявитель Львовское конструкторское бюро «Эротрон». - №4700601/33; заявл. 1989.06.20; опубл. 1996.02.27. // Официальный бюллетень «Изобретения, полезные модели» / [Электронный ресурс]. – 2008. – Режим доступа: [www.fips.ru](http://www.fips.ru). – Дата доступа: 27.03.2009.

57. Method and apparatus for cutting through a flat workpiece made of brittle material, especially glass: пат. 5984159 США, МКИ С 03В 33/09 / H. Ostendarp, C. Hermanns, D. Hauer, J. Stein, G. Geissler, R. Steinfartz, B. Hoetzel, A. Blunck; заявитель Schott Glas. - №09/060185; заявл. 04. 14. 98; опубл. 10. 16. 99 / [Electronic resource]. – Mode of access: <http://patft.uspto.gov>. – Date of access: 19.05.2007.

58. Method and device for cutting flat work pieces of a brittle material: пат. 6635848 США, МКИ С 03В 33/09 / D. Hauer, B. Hoetzel, заявитель Schott Glas. - 10/130522; заявл. 09. 20. 02; опубл. 10. 21. 03. / [Electronic resource]. – Mode of access: <http://patft.uspto.gov>. – Date of access: 19.05.2007.

59. Method and device for the separation of flat workpieces made from a brittle material: пат. 6811069 США, МКИ С 03В 33/09 / D. Hauer, B. Hoetzel, заявитель Schott Glas. - 10/149781; заявл. 06. 13. 02; опубл. 11. 02. 04. / [Electronic resource]. - Mode of access: <http://patft.uspto.gov>. - Date of access: 19.05.2007.

60. Method and device for cutting flat work pieces made of a brittle material: пат. 7014082 США, МКИ С 03В 33/09 / D. Hauer, B. Hoetzel, заявитель Schott AG. - № 10/941338; заявл. 09. 15. 04; опубл. 03. 21. 06. / [Electronic resource]. - Mode of access: <http://patft.uspto.gov>. - Date of access: 19.05.2007.

61. Method and apparatus for separating non-metallic substrates utilizing a laser initiated scribe: пат. 6211488 США, МКИ В23К 26/073 / В. Hoekstra, L. Glebov, O. Efimov; заявитель Accudyne Display and Semiconductor Systems Inc. - № 09/240057; заявл. 01. 29. 99; опубл. 04. 03. 01. / [Electronic resource]. - Mode of access: <http://patft.uspto.gov>. - Date of access: 19.05.2007.

62. Method and apparatus for separating non-metallic substrates utilizing a laser initiated scribe: пат. 6211488 США, МКИ В23К 26/073 / В. Hoekstra, L. Glebov, O. Efimov; заявитель Accudyne Display and Semiconductor Systems Inc. - № 09/240057; заявл. 01. 29. 99; опубл. 04. 03. 01. / [Electronic resource]. - Mode of access: <http://patft.uspto.gov>. - Date of access: 19.05.2007.

63. Method and apparatus for separating non-metallic materials: пат. 6660963 США, МКИ В23К 26/073 / В. Hoekstra, R. Flannigan, D. Wegerif; заявитель Applied Photonics Inc. - 10/196658; заявл. 07.16.2002; опубл. 09. 12. 03. // [Electronic resource]. - Mode of access: <http://patft.uspto.gov>. - Date of access: 19.05.2007.

64. Method and apparatus for separating non-metallic materials: пат. 6489588 США, МКИ В23К 26/14 / В. Hoekstra, R. Flannigan, D. Wegerif; заявитель Applied Photonics Inc. - № 09/718453; заявл. 11. 22.00; опубл. 12. 03. 02. / [Electronic resource]. - Mode of access: <http://patft.uspto.gov>. - Date of access: 19.05.2007.

65. Tsai, C. Apply an on-line crack detection technique for laser cutting by controlled fracture / C. Tsai, C. Liou // The international journal of advanced manufacturing technology. - 2001. - Vol. 18. - P. 724-730.

66. Tsai, C. Application of iterative path revision technique for laser cutting with controlled fracture / C. Tsai, H. Chen // Optics and lasers in engineering. - 2004. - Vol. 41. - P. 189-204.

67. Tsai, C. The laser shaping of ceramic by a fracture machining technique, / C. Tsai, H. Chen // The international journal of advanced manufacturing technology. - 2004. - Vol. 23. - P. 342-349.

68. Tsai, C. Laser milling of cavity in ceramic substrate by fracture-machining element technique / C. Tsai, H. Chen // Journal of materials processing technology. – 2003. - Vol. 136. – P. 158-165.

69. Tsai, C. Machining a smooth surface of ceramic material by laser fracture machining technique / C. Tsai, C. Ou // Journal of Materials Processing Technology. – 2004. - Vol. 156. - P. 1797-1804.

70. Bass, M. Laser Materials Processing / M. Bass. – North-Holland Publishing Company, 1983. – 480 p.

71. Chui, G. K. Laser cutting of hot glass / G. K. Chui // American Ceramic Society Bulletin. – 1975. – V. 54, № 5. – P.514–518.

72. Duley, W. W / CO<sub>2</sub> lasers : effects and applications / W. W. Duley. – Academic Press, 1976. – 427 p.

73. Лазеры в технологии / М. Ф. Стельмах [ и др.] ; Под ред. М. Ф. Стельмаха. – М.: Энергия, 1975. – 216 с.

74. Бабенко, В.П. Газолазерная резка материалов / В. П. Бабенко, В. П. Тычинский // Квантовая электроника. – 1972. – № 5. – С. 3–21.

75. Мачулка, Г. А. Резка стекла лазерным лучом / Г. А. Мачулка, В. М. Гурьянов, Л. П. Муратова // Стекло и керамика. – 1972. – № 10. – С. 10–12.

76. Cutting frangible workpieces : pat. EN 1292981 / P. E. Walter, S. M. Don, W. Parakrema. – Publ. 24.01.1969.

77. Коваленко, В. С. Малоотходные процессы резки лучом лазера / В. С. Коваленко, В. В. Романенко, Л. М. Олещук. – Киев: Техніка, 1987. – 112 с.

78. Промышленное применение лазеров / Г. Кёбнер [и др.] ; Под ред. Г. Кёбнера. – М. – 1988. – 278 с.

79. Справочник по лазерам : В 2 т. : Пер. с англ. с изм. и доп. / Под ред. А. М. Прохорова. – М. : Сов. радио, 1978. – Т. 2. – 400 с.

80. Крылов, К. И. Применение лазеров в машиностроении и приборостроении / К. И. Крылов, В. Т. Прокопенко, Л. С. Митрофанов. – Д.: Машиностроение, 1978. – 336 с.

81. Lumley, R.M. Controlled separation of brittle materials used a laser / R. M. Lumley // J. Of the Amer. Cer. Soc. – 1969. – Vol. 48, № 9. – P. 850–854.

82. Cutting glass ribbon : pat. EN1228513. – Publ. 28.05.1968.

83. Вольтер, В. Г. Применение импульсных СО<sub>2</sub>-лазеров / В. Г. Вольтер, А. Н. Свиридов // Оптико-механическая промышленность. – 1973. – № 6. – С. 40–44.

84. Большов, В. Ф. Лазерная технологическая установка для резки профильного стекла / В. Ф. Большов, В. М. Гурьянов, Г. А. Мачулка, Л. П. Муратова // Квантовая электроника. – 1971. – № 6. – С. 84–86.

85. Welner, M. Lasers begin to strike as processing tools / M. Welner, R. Levin // Automation. – 1974. – № 21. – P. 30.

86. Симагава, М. Лазерная обработка материалов / М. Симагава // Кикай-но кэнкю. – 1972. Т.23. – № 12. – С. 1–31.

87. Мачулка, Г. А. Разрушающие напряжения в стекле при лазерном термораскальвании / Г. А. Мачулка // Электронная техника. Сер. 11. Лазерная техника и оптоэлектроника. – 1979. – № 3. – С. 37–48.

88. Кондратенко, В. С. Особенности процесса лазерного управляемого термораскальвания листового стекла по криволинейному контуру / В. С. Кондратенко, А. С. Танасейчук, Е. Б. Шершнев // Электронная техника. Сер. 11. Лазерная техника и оптоэлектроника. – 1986. – № 4(40). С. 46–49.

89. Burghardt, W. Warmetef modeile bef der laser materials earbdlung / W Burghardt, G. Zscerfe // Feingerdt technik. – 1976. – № 25. – P. 204.

90. Paek, U. Thermal analysis of laser drilling processes / U. Paek, F. Gagliano // Journal of Quantum Electronics. – 1971. – Vol.7, № 6. – P. 277.

91. Кондратенко, В. С. Термораскальвание стеклянных трубок под действием лазерного излучения / В. С. Кондратенко, А. С. Танасейчук, Е. Б. Шершнев // Электронная техника. Сер. 11. Лазерная техника и оптоэлектроника. – 1986. – № 4(40). – С. 30–37.

92. Рыкалин, Н. Н. Расчеты тепловых процессов при сварке : учеб. пособие для машиностроит. Вузов / Н. Н. Рыкалин. – М.: Машгиз, 1951. – 296 с.

93. Schmidt, T., Müller, H., Wächter, S., Bliedtner, J., Hildebrand, J.: Quarzglasschweißen mit CO<sub>2</sub>-Laser. In: In: Konferenz-Einzelbericht: DVS-Berichte Band 267 (2010). – P. 104–109.

94. Hildebrand, J., Göbel, M., Wittor, B., Werner, F.: Schweißen und Schneiden von Glas mittels Laserstrahl – Potenzial der numerischen Simulation. In: Tagungsband: SYSWELD Forum, Weimar 2009. – P. 115–129.

95. Göbel, M., Hildebrand, J., Werner, F.: Advantages of FE-simulation for the development of a welding procedure for quartz glass. In: Glass performance days, Tampere, Finland, 2007. – P. 733–737.

96. Борисовский, В. Е. Развитие теории и разработка комплекса технологий и оборудования для лазерной обработки кварцевого стекла: дис. докт. техн. наук : 05.11.14 / В. Е. Борисовский; МГУПИ. – М., 2011. – 182 с.

97. Гиндин, П. Д. Математическая модель термораскальвания хрупких анизотропных материалов // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2010. – № 1. – С. 27–29.

98. Наумов, А. С. Разработка технологии разделения приборных пластин на кристаллы: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.11.14 / С. Наумов; МГУПИ. – М., 2007. – 20 с.

99. Сердюков, А. Особенности управляемого лазерного термораскалывания кристаллического кремния / А. Н. Сердюков, С. В. Шалупаев, Ю. В. Никитюк // Кристаллография. – 2010. – Т. 55. – № 6. – С. 992–996.

100. Гиндин, П. Д. Разработка новых технологий и оборудования на основе метода лазерного управляемого термораскалывания для обработки деталей приборостроения, микро - и оптоэлектроники : дис. ... д-ра техн. – наук : 05.11.14 / П. Д. Гиндин. – М., МГУПИ, 2009. – 274 с.

101. Heyliger, P. Elastic. constants of natural quartz / P. Heyliger, H. Ledbetter, S. Kim // J. Acoust. Soc. Am. – 2003. – Vol. – 114, №2. P.644–650.

102. Григорьянц, А. Г. Гибридные технологии лазерной сварки : учебное пособие / А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов, А. М. Чирков. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. – 52 с.

103. Большепаяев, О. Ю. Исследование и разработка технологического процесса лазерной полировки стекломатериалов в приборостроении и электронной технике: дис. ... канд. техн. наук: 05.27.06 / О. Ю. Большепаяев. – М., МГАПИ, 1999. – 205 с.

104. Многопрофильная лазерная технология обработки кварцевого стекла / В. К. Сысоев // Электронный научный журнал «Исследовано в России» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2003/053.pdf>. – Дата доступа : 25.01.2009.

105. Sysoev, V. K. Laser etching and polishing of quartz tubes / V. K. Sysoev // Glass and Ceramics. – 2003 – Vol. 60. – P.106–107.

106. Hildebrand, J. Laser Beam Polishing of Quartz Glass Surfaces / J. Hildebrand, K Hecht, J. Bliedner, H. Müller // Physics Procedia. – 2011. – № 12. – P. 452–461.

107. Hildebrand, J. Advanced analysis of laser beam polishing of quartz glass surfaces / J. Hildebrand, K Hecht, J. Bliedner, H. Müller // Physics Procedia. – 2012. – № 39. – P. 277–285.

108. Хлызов, В. А. Разработка системы управления и автоматизация технологического процесса лазерного управляемого термораскалывания на промышленных установках: дис. ... канд. техн. наук: 05.11.14 / В. А. Хлызов. – М., МГУПИ, 2012. – 149 с.

109. Программа управления для промышленных установок лазерного управляемого термораскалывания / П. Д. Гиндин [и др.] // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2012. – № 3(132). – С. 44–47.

110. Бокарев, В. Контактная литография в нанотехнологии / В. Бокарев, Е. Горнев // Наноиндустрия. – 2010. – № 5. – С. 22–25.

111. Аваков, С. / Оптико-механические комплексы для бездефектного изготовления фотошаблонов 0,35 мкм и 90 нм // С. Аваков, В. Овчинников, С. Карнович, Е. Титко, Г. Трапашко // Фотоника. – 2007. – № 6. – С.35–39.

112. Иванов, Г.А. Технология производства и свойства кварцевых оптических волокон: учеб. пособие / Г. А. Иванов, В. П. Первадчук. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2011. – 171 с.

113. Григорьянц, А. Г. Методы поверхностной лазерной обработки / А. Г. Григорьянц, А. Н. Сафонов. – 3-е изд. стереотип. – Москва ; Берлин : Директ-Медиа, 2021. – 191 с.

114. Лисовский, А. Л. Лазерное упрочнение штампового инструмента [Электронный ресурс] / А. Л. Лисовский, И. В. Плетенев // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2008. – № 3. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/lazernoe-uprochnenie-shtampovogo-instrumenta>. – Дата доступа: 27.06.2023.

115. Морозов, В. В. Эмпирические модели лазерного упрочнения рабочих кромок деталей формовых комплексов стеклоформирующих машин / В. В. Морозов, А. П. Шлегель, А. В. Аборкин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2011. – № 2 (286). – С. 79–83.

116. Яшкова, С. С. Лазерное поверхностное упрочнение [Электронный ресурс] / С. С. Яшкова // Молодой ученый. – 2017. – № 1 (135). – С. 99–101. – Режим доступа: <https://moluch.ru/archive/135/37955/>. – Дата доступа: 27.06.2023.

117. Установка для лазерного термораскалывания хрупких неметаллических материалов : полез. модель ВУ 683. / С. В. Шалунаев, Е. Б. Шершнев, Ю. В. Никитюк. – Оpubл. 30.09.2002.

118. Виды брака в производстве стекла / [Х. Бах, Ф. Г. К. Баукке, Р. Брюкнер и др.] ; под ред. Г. Иебсена-Марведеля, Р. Брюкнера ; Сокр. пер. с нем. Л. Г. Байбург [и др.] ; под ред. П. Н. Рохлина. - Москва : Стройиздат, 1986. – 647.

119. Установка для обогащения жильного кварца : полез. модель ВУ 5147 / Е. Б. Шершнев, С. И. Соколов, А. С. Побыяха. – Оpubл. 30.04.2009.

120. Шершнев, Е. Б. Моделирование двухлучевой лазерной сепарации кварцевого сырья / Е. Б. Шершнев, Ю. В. Никитюк, С. И. Соколов // Известия ГТУ им. Ф.Скорины. – 2013. – №6. – С. 216–220.

121. Корицкий, Ю.В. Справочник по электротехническим материалам / Ю.В. Корицкий, В.В. Насынков, Б.М. Тареев. – Л.: Энергоатомиздат. 1988. – Т.3. – 728 с.

122. Шабров, Н. П. Метод конечных элементов в расчетах деталей тепловых двигателей / Н. П. Шабров. – Л.: Машиностроение, 1983. – 212 с.
123. Григорьянц, А. Г. Лазерная техника и технология: в 7 кн.: учеб. пособие для вузов / А. Г. Григорьянц, А. А. Соколов; под ред. А. Г. Григорьянца. Кн. 4: Лазерная обработка неметаллических материалов. – М.: Высш. шк., 1988. – 191 с.
124. Емельянов, В. А. Двухлучевая лазерная очистка кварцевого сырья / В. А. Емельянов, Е. Б. Шершнев, С. И. Соколов // Доклады БГУИР. – 2021. – Т.19, №3. – С. 40–48.
125. Способ обогащения кварцевой крутки : пат. ВУ 21228 / Е. Б. Шершнев, С. И. Соколов, Ю. В. Никитюк. – Опубл. 30.08.2017.
126. Емельянов, В. А. Оптимизация лазерной полировки кварцевого стекла с использованием метода планирования вычислительных экспериментов / В. А. Емельянов, Е. Б. Шершнев, Ю. В. Никитюк, С. И. Соколов, И. Ю. Лушев // Проблемы физики, математики и техники. – 2022. – № 2(51). – С. 26–30.
127. Шершнев, Е. Б. Моделирование, эксперимент и оборудование для лазерного термораскалывания кварцевого стекла / Е. Б. Шершнев, В. В. Свиридова, С. И. Соколов // Материалы. Технологии. Инструменты. – 2008. – Т.13, № 1. – С. 12–16.
128. Карслоу, Г. Теплопроводность твердых тел / Г. Карслоу, Д. Егер. – М.: Наука, 1964. – 487 с.
129. Шершнев, Е. Б. Математическое моделирование процессов лазерного управляемого термораскалывания листового стекла / Е. Б. Шершнев, С. В. Шалупаев, С. И. Соколов // Известия ГГУ им. Ф.Скорины. – 2009. – №4. – Ч.2. – С. 204–212.
130. Паркус, Г. Неуставившиеся температурные напряжения / Г. Паркус. – М.: Физматгиз, 1963. – 252 с.
131. Боли, Б. Теория температурных напряжений / Б. Боли, Дж. Уэйнер. – М.: Мир, 1964. – 517 с.
132. Коваленко, Л. Д. Основы термоупругости / Л. Д. Коваленко. – Киев: Наукова думка, 1970. – 307 с.
133. Новацкий, В. Теория упругости / В. Новацкий. – М.: Мир, 1975. – 806 с.
134. Моделирование температурного поля и расчет механических напряжений при двухлучевом лазерном управляемом термораскалывании кварцевого стекла / В. А. Емельянов, Е. Б. Шершнев, С. И. Соколов, А. Н. Купо // Доклады БГУИР. – 2021. – Т.19, № 7. – С. 80–88.
135. Морозов, Е. М. ANSYS в руках инженера: Механика разрушения / Е. М. Морозов, А. Ю. Муїземпек, А. С. Падский. – М. ЛЕНАІЦД, 2008. – 456 с.

136. Партон, В. З. Механика разрушения: от теории к практике / В. З. Партон. – М.: Наука, 1990. – 240 с.

137. Shahani, A. R. Simulation of glass cutting with an impinging hot air jet / A. R. Shahani, M. Seyedian // International journal of solids and structures. – 2004. – Vol. 41, № 5–6. – P. 1313–1329.

138. Моделирование процесса лазерного термораскалывания кварцевого стекла в рамках линейной механики разрушения / А. Н. Сердюков, Е. Б. Шершневу, Ю. В. Никитюк, С. И. Соколов // Лазерная физика и оптические технологии: материалы IX междунар. науч. конф. (Гродно, 30 мая – 2 июня 2012 г.). В 2 ч. Ч. 2 / НАН Беларуси [и др.]; редкол.: С. А. Маскевич (гл. ред.), С. С. Алуфрик (зам. гл. ред.) [и др.]. – Гродно : ГрГУ, 2012. – С. 191–194.

139. Шершневу, Е. Б. Особенности лазерного термораскалывания кварцевого стекла / Е.Б. Шершневу, Ю.В. Никитюк, С.И. Соколов // Проблемы физики, математики и техники. – 2013. – № 3. – С. 39–44.

140. Shalupaev, S.V. Analysis of laser thermosplitting processes within the framework of the linear fracture mechanics / S.V. Shalupaev, M. Aleksiejuk, Y.V. Nikitjuk, A.A. Sereda // CERAMICS. POLISH CERAMIC BULLETIN. – 2008. – Vol.101. – P. 275–284.

141. Богуславский, И. А. Высокопрочные закаленные стекла / И. А. Богуславский. – М.: Издательство литературы по строительству, 1969. – 208 с.

142. Лазерное управляемое термораскалывание кристаллического кварца / Е. Б. Шершневу, Ю. В. Никитюк, В. Ф. Шолох, С. И. Соколов // «Гомельский научный семинар по теоретической физике, посвященный 100-летию со дня рождения Ф. И. Федорова», 20–22 июня 2011 г.: [материалы] / редкол.: А. В. Рогачев (гл. ред.) [и др.]. – Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины, 2011. – С. 261–265.

143. Блистанов, А. А. / А. А. Блистанов, В. С. Бондаренко, В. В. Чкалова. – М.: Наука, 1982. – 632 с.

144. Особенности управляемого лазерного термораскалывания кристаллического кварца / А. Н. Сердюков, Е. Б. Шершневу, Ю. В. Никитюк, С. И. Соколов, В. Ф. Шолох // Кристаллография. – 2012. – Т.57, №6. – С. 879–885.

145. Шершневу, Е. Б. Особенности лазерного раскалывания кристаллического кварца АГ- и ВТ-срезов / Е. Б. Шершневу, Ю. В. Никитюк, С. И. Соколов // Известия ГГУ им. Ф.Скорины. – 2014. – №6. – С. 220–224.

146. Kestler, W. О подборе кварцевых резонаторов / W. Kestler, W. Jung, J. Bryant // Основы схемотехники. – 2001. – №5. – С.19.

147. Смагин, А.Г. Пьезоэлектричество кварца и кварцевые резонаторы / А.Г. Смагин, М.И. Ярославский. – М.: Энергия, 1970. – 488 с.

148. Глюкман, Л. И. Пьезоэлектрические кварцевые резонаторы. - 3-е изд., перераб. и доп. / Л. И. Глюкман. – М.: Радио и связь, 1981. – 232 с.

149. Конечный элементный анализ процесса лазерного термораскалывания кристаллического кварца / А. Н. Сердюков, Е. Б. Шершнев, Ю. В. Никитюк, С. И. Соколов, В. Ф. Шолох // III Международная научная конференция «Проблемы взаимодействия излучения с веществом», посвященная 85-летию со дня рождения Б. В. Бокутя, 9–11 ноября 2011 г.: [материалы] в 2 частях. Ч. 2 / редкол.: А. В. Рогачев (гл. ред.) [и др.]. – Гомель: ГТУ им. Ф. Скорины, 2011. – С. 124–128.

150. Установка для лазерного термораскалывания хрупких неметаллических материалов : полез. модель ВУ 4625 / Е. Б. Шершнев, С. И. Соколов, А. С. Побыха. – Оpubл. 30.08.2008.

151. Бартецев, Г. М. Сверхпрочные и высокопрочные неорганические стекла / Г. М. Бартецев. – М.: Стройиздат, 1974. – С. 240.

152. Повышение эффективности лазерного управляемого термораскалывания силикатных стекол / Е. Б. Шершнев, Ю. В. Никитюк, С. И. Соколов, А. Е. Шершнев // Научный семинар по оптике и теоретической физике, посвященный 70-летию со дня рождения А. Н. Сердюкова : научный семинар по оптике и теоретической физике, посвященный 70-летию со дня рождения А. Н. Сердюкова, 21 мая 2014 г.: [материалы] / редкол.: А. В. Рогачев [и др.]. – Гомель: ГТУ им. Ф. Скорины, 2014. – С. 251–253.

153. Установка для двухлучевой лазерной полировки изделий из хрупких неметаллических материалов : полез. модель ВУ 12062 / Е. Б. Шершнев, С. И. Соколов, Ю. В. Никитюк. – Оpubл. 30.08.2018.

154. Способ разделения резкой кристаллического кварца под действием термоупругих напряжений : пат. ВУ 16478 / Е. Б. Шершнев, С. И. Соколов, Ю. В. Никитюк, В. Ф. Шолох. – Оpubл. 30.10.2012.

155. Способ разделения резкой кристаллического кварца под действием термоупругих напряжений : пат. RU 2478083 / Е. Б. Шершнев, С. И. Соколов, Ю. В. Никитюк, В. Ф. Шолох. – Оpubл. 27.03.2013.

156. Исследование процесса лазерной полировки кварцевого стекла / Е. Б. Шершнев, Ю. В. Никитюк, С. И. Соколов, А. Е. Шершнев // Проблемы физики, математики и техники. – 2015. – №4. – С. 45–49.

157. Численное моделирование лазерной полировки кварцевого стекла с использованием метода планирования вычислительных экспериментов / В. А. Емельянов, Е. Б. Шершнев, Ю. В. Никитюк, С. И.

Соколов // Конференция, посвященная 110-летию со дня рождения Ф. И. Федорова, 25 июня 2021 г.: [материалы]. – Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины, 2021. – С. 317–320.

158. Gill, P. E. Practical Optimization / P. E. Gill, W. Moray, M. H. Wright. – London: Academic, 1981. – 401 p.

159. Оптимизация лазерной полировки кварцевого стекла с использованием метода планирования вычислительных экспериментов / В. А. Емельянов [и др.] // Проблемы физики, математики и техники. Сер.: Физика. – 2022. – № 2 (51). – С. 26–30.

160. Установка для двухлучевой лазерной полировки изделий из хрупких неметаллических материалов : полез. модель ВУ 12062 / Е. Б. Шершнев, С. И. Соколов, Ю. В. Никитюк. – Опубл. 30.08.2018.

161. Исследование лазерного макро- и микро-формообразования хрупких неметаллических материалов методом полного факторного эксперимента / Е. Б. Шершнев, Ю. В. Никитюк, С. И. Соколов, А. Е. Шершнев // Проблемы взаимодействия излучения с веществом [Электронный ресурс] : IV Республиканская научная конференция, посвященная 90-летию со дня рождения Б. В. Бокутя (Гомель, 9–11 ноября 2016 г.) : материалы : в 2 ч. Ч. 2. – Электрон. дан. – Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины, 2016. – С. 193–196.

162. Емельянов, В. А. Оптимизация лазерной полировки кварцевого стекла с использованием метода планирования вычислительных экспериментов / В. А. Емельянов, Е. Б. Шершнев, Ю. В. Никитюк, С. И. Соколов, И. Ю. Аушев // Проблемы физики, математики и техники. – 2022. – № 2(51). – С. 26–30.

163. Глаголев, С. П. Кварцевое стекло. Его свойства, производство и применение / С. П. Глаголев. – М.: ОНТИ, 1934. – 214 с.

164. Навлов, В. П. Стеклянная аппаратура для производства чистых веществ / В. П. Навлов, М. П. Макевини. – М.: Машиностроение, 1972. – 332 с.

165. Распределение температурных полей при двухлучевой сварке кварцевого стекла / Е. Б. Шершнев, Ю. В. Никитюк, С. И. Соколов, А. Е. Шершнев // Известия ГГУ им. Ф. Скорины. – 2012. – № 4. – С. 105–109.

166. Установка для двухлучевой лазерной сварки кварцевого стекла: полез. модель ВУ 9962 / Е. Б. Шершнев, С. И. Соколов, Ю. В. Никитюк. – Опубл. 28.02.2014.

167. Оптимизация параметров лазерной двухлучевой сварки кварцевого стекла с использованием метода планирования вычислительных экспериментов / В. А. Емельянов [и др.] // Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины. Сер.: Естественные науки. – 2022. – № 6 (135). – С. 118–123.

168. Прочность стеклоизделий при различных способах лазерной обработки кромок / В. С. Кондратенко, В. Ф. Солипов, А. С. Танасейчук, Е. Б. Шершнев. // Электрон. пром. – 1988. – № 1. – С.30–31.

169. Обработка методом лазерного термораскалывания керамических и стеклянных изделий трубчатой формы / С. В. Шалупаев, Е. Б. Шершнев, Ю. В. Никитюк, В. Н. Мышковец, А. В. Максименко // *Ceramics Polish ceramic bulletin*. – 2003. – V. 79. – P. 115–120.

170. Установка для лазерной резки трубок из хрупких неметаллических материалов : полз. модель ВУ 2274 / С. В. Шалупаев, Е. Б. Шершнев, Ю. В. Никитюк, А. А. Середа. – Опул. 12.30.05.

171. Действие излучения большой мощности на металлы / С. И. Анисимов, Я. А. Имас, Г. С. Романов, Ю. В. Ходыко. – Изд-во «Наука», Гл. ред. физико-математической литературы. – 1970. – 272 с.

172. Белайниц, В. А. Структура и твердость поверхностных слоев стали после обработки лучом лазера / В. А. Белайниц // Физ. и хим. обр. матер. – 1967. – № 2. – С. 14–16.

173. Бреховский, В. Ш. О поверхностной локальной закалке сталей излучением ОКГ / В. Ш. Бреховский // Физ. и хим. обр. матер. – 1968. – № 4. – С. 25–28.

174. Ерузалимский, А. Н. Структурные изменения вещества при световых импульсах ОКГ / А. Н. Ерузалимский // Физ. и хим. обр. матер. – 1968. – № 4. – С. 29–31.

175. Кайорский, Л. И. Воздействие импульса лазера с модулированной добротностью на сталь / Л. И. Кайорский // Физ. и хим. обр. матер. – 1968. – № 1. – С. 57–59.

176. Миркин, Л. И. Физические основы обработки материалов лучами лазеров / Л. И. Миркин. – М.: Издательство МГУ, 1975. – 128 с.

177. Коваленко, В. С. Лазерное и электроэрозионное упрочнение материалов / В. С. Коваленко. – М.: Наука, 1986. – 276 с.

178. Буравлев, Ю. М. Некоторые особенности преобразования структуры сталей под воздействием лазерного излучения / Ю. М. Буравлев [и др.] // Физ. и хим. обр. матер. – 1974. – № 3. – С. 13–17.

179. Григорьянц, А. Г. Основы лазерного термоупрочнения сплавов / А. Г. Григорьянц, А. П. Сафонов. – М.: Высшая школа, 1988. – 156 с.

*Научное издание*

**Шершнев Евгений Борисович**  
**Соколов Сергей Иванович**  
**Емельянов Виктор Андреевич**

**ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ  
И ОБОРУДОВАНИЕ В ЭЛЕКТРОНИКЕ**



Подписано в печать 27.10.2023. Формат бумаги 62x86/16. Бумага офсетная.  
Печать офсетная. Усл. печ. л. 12,25. Уч.-изд. л. 12,22.  
Тираж 300 экз. Заказ 3007

Издатель и полиграфическое исполнение УП «Интегралполиграф».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя,  
изготовителя, распространителя печатных изданий  
№ 1/96 от 25.11.2013. № 2/15 от 21.11.2013.  
Ул. Корженевского, 16, 220108, г. Минск.  
Тел.: (+375 17) 212-29-51, 212-29-32