

Лабораторная работа №5 «Исследование процесса управляемого лазерного термораскалывания силикатных стекол по криволинейным контурам»

Цель работы: Изучить на эксперименте процесс управляемого лазерного термораскалывания силикатных стекол; определить допустимые режимы обработки при которых реализуется данный процесс.

Материалы и оборудование: Технологический комплекс лазерной обработки материалов, инструментальный микроскоп БМИ-1Ц

Основные понятия по теме

При изготовлении изделий сложной формы из хрупких неметаллических материалов в ряде ситуаций существует необходимость резки по замкнутым криволинейным контурам (примером может служить изготовление заготовок для производства автомобильных зеркал).

Широкое внедрение УЛТ сдерживается вследствие ряда недостатков, являющихся причиной невысокой точности обработки и качества поверхности готовых изделий. Акцентируем внимание на сущности имеющихся проблем и рассмотрим решения, предложенные для их преодоления.

В известных установках для лазерного термораскалывания в силу их конструктивных особенностей при резке по криволинейному контуру (особенно если радиусы кривизны малы) происходит смещение зоны воздействия хладагента относительно траектории лазерного воздействия. Это обуславливает заметные отклонения формируемой микротрещины от линии резки. При резке по криволинейному контуру симметричность распределения термоупругих напряжений, характерная для прямолинейной резки, нарушается по нескольким причинам.

Одной из них является влияние прогретых участков материала, находящихся внутри криволинейного контура, что может приводить к отклонению трещины от линии обработки. Однако более существенной причиной является использование лазерных пучков эллиптического сечения, ориентированного большой осью по касательной к криволинейной траектории движения. При использовании лазерных пучков такой формы сечения обеспечиваются оптимальные условия (по сравнению с пучками кругового сечения) для формирования термоупругих напряжений при прямолинейном термораскалывании. Но при использовании для резки по криволинейному контуру пучков, эллиптическое сечение которых ориентировано по касательной к линии обработки, края пучка не совмещаются с линией реза, поэтому нагрев материала несимметричен. Вследствие несимметричного нагрева трещина отклоняется не только от

заданной линии обработки, но и от направления, перпендикулярного к поверхности материала.

Следствием указанных причин являются снижение точности обработки и ухудшение качества кромок после докальвания лазерных микротрещин при получении конечного изделия, ограниченного замкнутым криволинейным контуром.

При резке по криволинейному контуру в некоторых работах предложено осуществлять нагрев обрабатываемого материала пучками, имеющими на поверхности материала серповидную форму. С применением таких пучков при резке по криволинейным контурам удастся в значительной степени уменьшить отмеченное выше нарушение симметричного распределения термоупругих напряжений относительно линии обработки. Однако серьезным недостатком данного приема являются технические трудности его реализации, обусловленные необходимостью существенного усложнения оптических систем, используемых в соответствующих установках.

Для устранения нежелательных отклонений от направления,

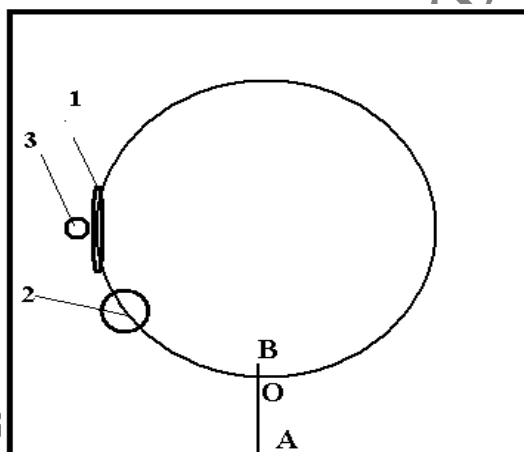


Рисунок 1 – Схема взаимного расположения зон воздействия лазерных пучков и хладагента

перпендикулярного к поверхности, в настоящей работе предложено использовать дополнительный объемный нагрев материала лазерным излучением с длиной волны $\lambda=1,06$ мкм. При этом зону дополнительного нагрева целесообразно (в соответствии с экспериментальными данными) смещать от линии реза (рисунок 1).

На рисунке 1 позиция 1 соответствует лазерному пучку с длиной волны 10,6 мкм, позиция 2 – зоне воздействия хладагента, позиция 3 – сечению лазерного пучка с длиной волны 1,06 мкм.

Отрезком АВ обозначена линия предварительного надреза на поверхности материала, производимого перпендикулярно касательной к линии реза. Точкой О обозначены начало и конец контура обработки.

Для выяснения особенностей двулучевого термораскалывания хрупких неметаллических материалов по замкнутым криволинейным траекториям было выполнено численное моделирование этого процесса. Результаты моделирования представлены на рисунках 2 – 7. Расчеты были проведены с учетом свойств силикатного стекла для пластины с геометрическими размерами 50×50×4 мм. Радиус окружности, по которой перемещались центры эллиптического сечения пучка и зоны воздействия хладагента, принят равным 17,5 мм. Линейная скорость резки принята равной 15 мм/с. Кроме того, были выбраны следующие значения параметров лазерных пучков: большая ось эллиптического сечения $A = 14 \cdot 10^{-3}$ м, малая ось $B = 2 \cdot 10^{-3}$ м для пучка с длиной волны излучения $\lambda = 0,6$ мкм и мощностью излучения $P = 30$ Вт; радиус пятна излучения YAG-лазера $R = 1 \cdot 10^{-3}$ м и мощность его излучения $P_0 = 40$ Вт.

Расчеты термоупругих полей были выполнены для четырех различных вариантов обработки по криволинейному контуру:

- однолучевая схема управляемого термораскалывания;
- двулучевая схема с использованием пучка CO₂-лазера эллиптического сечения и пучка YAG-лазера кругового сечения;
- двулучевая схема со смещением пучка YAG-лазера на 1 мм в радиальном направлении к геометрическому центру контура обработки;
- двулучевая схема со смещением пучка YAG-лазера на 1 мм в радиальном направлении от геометрического центра контура обработки.

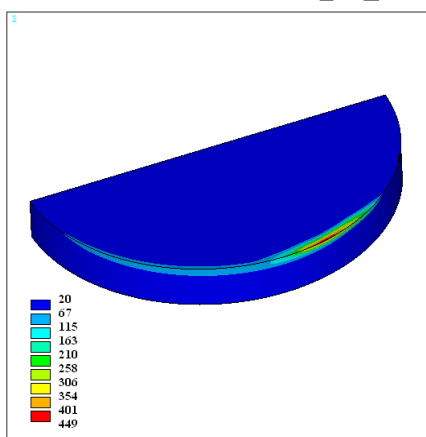


Рисунок 2– Распределение температуры в образце при воздействии лазерного пучка и хладагента, перемещающихся по круговому контуру резки, °С

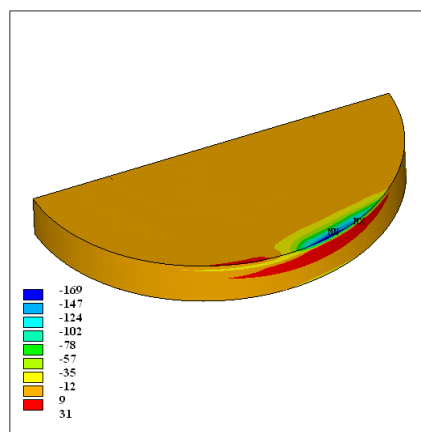
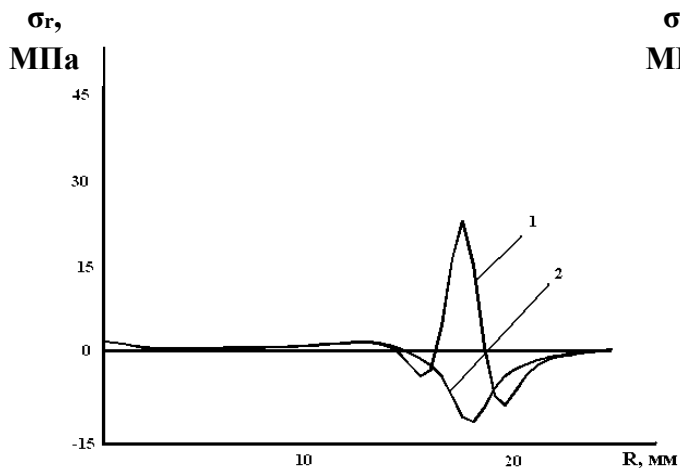
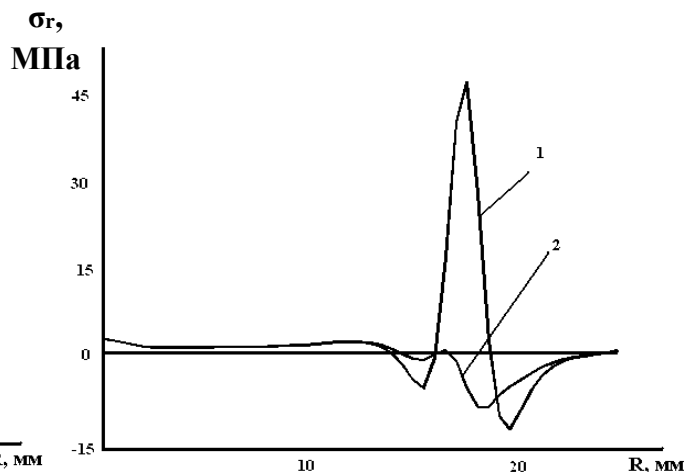


Рисунок 3 – Распределение напряжений σ_r в образце при воздействии лазерного пучка и хладагента, перемещающихся по круговому контуру резки, МПа



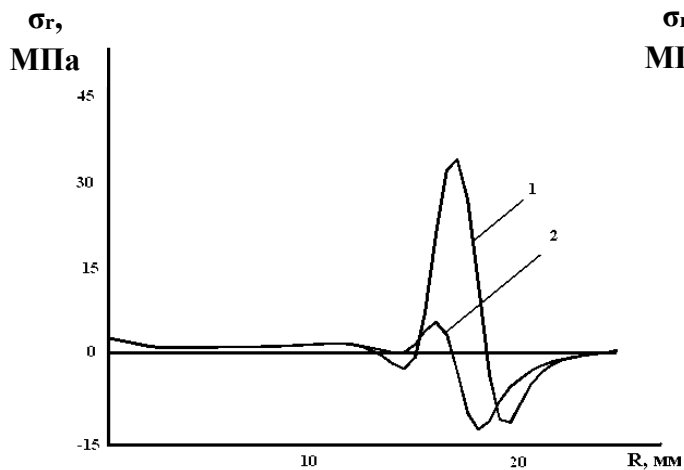
Однолучевая схема управляемого термораскалывания с использованием эллиптического пучка CO₂-лазера:
1 – Z = 0 мм, 2 – Z = 0,25 мм

Рисунок 4 – Зависимость напряжения σ_r от радиальной координаты



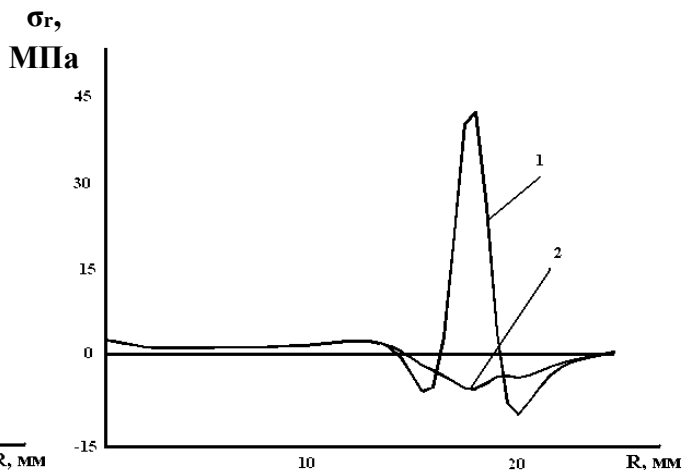
Двулучевая схема обработки с использованием эллиптического сечения пучка CO₂-лазера и кругового пучка YAG-лазера:
1 – Z = 0 мм, 2 – Z = 0,25 мм

Рисунок 5 – Зависимость напряжения σ_r от радиальной координаты



Двулучевая схема обработки со смещением центра сечения пучка YAG-лазера в радиальном направлении на 1 мм к центру контура обработки:
1 – Z = 0 мм, 2 – Z = 0,25 мм

Рисунок 6 – Зависимость напряжения σ_r от радиальной координаты



Двулучевая схема обработки со смещением центра сечения пучка YAG-лазера в радиальном направлении на 1 мм от центра контура обработки:
1 – Z = 0 мм, 2 – Z = 0,25 мм

Рисунок 7 – Зависимость напряжения σ_r от радиальной координаты

На рисунках 2 и 3 представлено пространственное распределение температуры и напряжений σ_r , действующих перпендикулярно касательной к линии обработки, в стеклянной пластине при однолучевой резке по круговой траектории. При применении УЛТ для резки по криволинейному контуру в обрабатываемом материале создается пространственная конфигурация растягивающих напряжений и напряжений сжатия, аналогичная той, которая имеет место при прямолинейной резке.

Анализируя особенности резки по криволинейной траектории, необходимо учитывать, что распределением сжимающих напряжений в объеме образца, как и при прямолинейной резке, определяется форма и глубина развития микротрещины, инициализация и развитие которой происходит в зоне растягивающих напряжений, сформированных в области подачи хладагента.

На рисунке 4 представлены зависимости напряжений σ_r , действующих перпендикулярно касательной к линии резки на различных глубинах, от радиальной координаты при УЛТ. Видно, что для однолучевой обработки характерно несимметричное распределение напряжений σ_r относительно линии разделения. Причиной этого является упомянутая выше асимметричность нагрева материала относительно линии разделения, обусловленная использованием лазерного пучка эллиптического сечения, которое ориентировано вдоль касательной к криволинейному контуру обработки. Анализируя представленные зависимости напряжений σ_r , можно сделать вывод о том, что использование данного технологического режима должно сопровождаться отклонением разделяющей микротрещины от вертикального направления, что и наблюдается в эксперименте.

На рисунках 5 и 6 представлены аналогичные зависимости напряжений $\sigma_r(r)$, характерные для двухлучевой обработки (при совмещении траектории пучка CO_2 -лазера и пучка YAG-лазера — рисунок 5; при смещении в радиальном направлении центра сечения пучка YAG-лазера на 1 мм от края к центру контура обработки — рисунок 6). При использовании данных вариантов размещения пучков обеспечивается заметное увеличение максимальных значений растягивающих напряжений (с 22 МПа при однолучевой схеме обработки до 47 МПа и 33 МПа соответственно при использовании второй и третьей схемы обработки). Однако такое размещение лазерных пучков обуславливает еще большую несимметричность распределения полей напряжений, что особенно ярко выражено при использовании схемы со смещением пучка YAG-лазера в радиальном направлении к геометрическому центру контура обработки. На рисунке 7 представлены зависимости напряжений $\sigma_r(r)$, действующих перпендикулярно линии формирования круговой микротрещины при двухлучевой обработке со смещением пучка YAG-лазера от центра контура обработки. Анализируя эти зависимости, можно сделать вывод о целесообразности такого размещения пучков для устранения отклонений

микротрещины от вертикального направления (именно по этой схеме в эксперименте получены наилучшие результаты).

Анализ распределения термоупругих полей показал, что с использованием дополнительного воздействия лазерного излучения с длиной волны 1,06 мкм удастся внести существенные изменения в пространственное расположение зоны сжимающих напряжений и создать предпосылки для формирования пространственной конфигурации напряжений сжатия, при которой компенсируется их асимметрия.

Таким образом, при дополнительном воздействии лазерного излучения с длиной волны, соответствующей объемному поглощению материала, возможно устранение отклонения наносимой микротрещины от плоскости, перпендикулярной к поверхности материала.

Еще одной проблемой при резке по замкнутому криволинейному контуру является отклонение линии реза от заданной траектории в месте ее замыкания. На распространение микротрещины в этой зоне оказывает существенное влияние ее собственный «хвост», в вершине которого, как и в вершине самой микротрещины, концентрируются значительные по величине напряжения.

Для решения данной проблемы оказывается целесообразным проводить инициализацию криволинейной замкнутой микротрещины от предварительно нанесенной в радиальном направлении прямолинейной микротрещины. При этом в месте замыкания контура лазерной обработки не формируется дополнительной зоны значительных по величине напряжений у вершины «хвоста» криволинейной трещины.

Существенные трудности возникают и при докальвании нанесенных лазерных микротрещин при получении конечного изделия если контур обработки представляет собой замкнутую кривую. Для качественного окончательного разделения микротрещины круговой формы целесообразно использовать кратковременный нагрев стеклянной плоскопараллельной пластины кольцевым источником тепла со стороны, противоположной поверхности лазерной обработки.

Для выяснения особенностей процесса термического докальвания круговой микротрещины, полученной в стеклянной плоскопараллельной пластине методом лазерного термораскальвания, были выполнены расчеты термоупругих полей, формируемых кольцевым источником тепла в обрабатываемом материале.

На рисунке 8 представлены результаты расчета температурных полей, а на рисунке 9 – радиальных напряжений σ_r , действующих перпендикулярно предварительно нанесенной круговой микротрещине. Как видно на рисунке 8, при используемых расчетных параметрах максимальная температура не достигает температуры стеклования, что необходимо для реализации хрупкого докальвания образца. Анализируя зависимости напряжений σ_r , действующих на различных глубинах перпендикулярно предварительно нанесенной круговой микротрещине, от радиальной

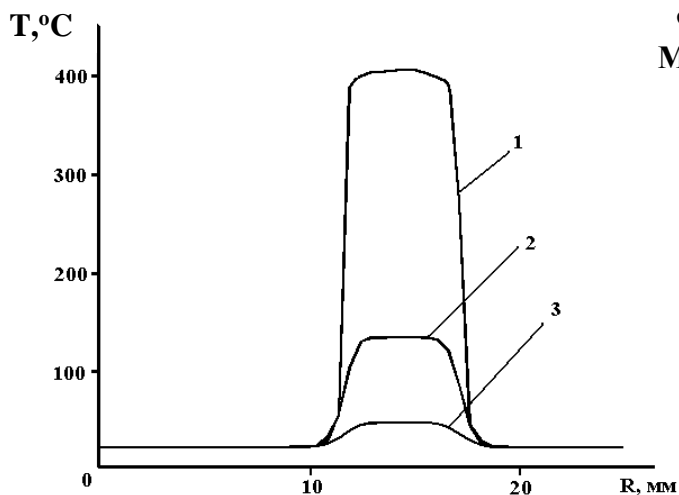
координаты, видим, что на нагреваемой поверхности в зоне действия кольцевого теплового источника действуют значительные по величине сжимающие напряжения, величина которых составляет около 150 МПа. На противоположной поверхности также находится область сжимающих напряжений, величина которых составляет порядка 50 МПа. При этом во внутренних слоях материала формируется область растягивающих напряжений, величины которых достаточна для дальнейшего развития уже существующей микротрещины. Таким образом, при использовании кольцевого источника тепла удастся формировать в материале распределение термоупругих полей, необходимое для окончательного развития круговой микротрещины, нанесенной методом УЛТ.

Меры, предложенные для повышения качества готовых изделий, осуществляются в эксперименте следующим образом. Исходный материал (например, лист стекла) размещают на координатном столе. Включают перемещение стола, производят предварительный надрез на поверхности материала перпендикулярно начальному участку линии реза (целесообразно предварительный надрез выполнять в виде микротрещины, инициированной лазерным излучением). Поверхность материала нагревают вдоль линии реза лазерным излучением с длиной волны 10,6 мкм. Одновременно обеспечивают локальное охлаждение зоны нагрева, подавая хладагент; при этом благодаря конструкции разработанной установки и использованию пятикоординатной системы управления обеспечивается устранение отклонений зоны воздействия хладагента от линии воздействия лазерного излучения во время обработки. Одновременно с лазерным излучением с длиной волны 10,6 мкм на материал дополнительно воздействуют лазерным излучением с длиной волны 1,06 мкм.

При этом дополнительный нагрев материала осуществляется со смещением от центра контура обработки.

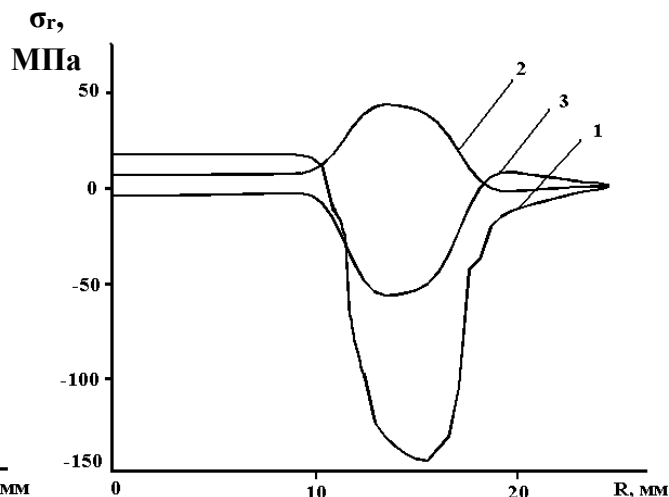
При использовании воздействия смещенного от линии реза лазерного пучка с длиной волны, соответствующей объемному поглощению излучения обрабатываемым материалом, формируется пространственная конфигурация полей напряжений, при которой компенсируется их асимметрия, обусловленная воздействием лазерного пучка эллиптического сечения, ориентированного по касательной к криволинейному контуру обработки.

На завершающем этапе развития микротрещины происходит замыкание линии реза в точке О (рисунок 1); при этом снижается влияние на распространение наносимой микротрещины ее собственного «хвоста», так как «вершина» микротрещины при выбранной схеме обработки стыкуется с предварительно нанесенным надрезом АВ. В этой ситуации в месте замыкания контура лазерной обработки не происходит формирования дополнительной зоны значительных по величине напряжений, вследствие чего достигается значительное уменьшение отклонения развивающейся микротрещины от линии лазерного воздействия в месте замыкания контура обработки.



- 1 – на нагреваемой поверхности;
- 2 – в середине пластины;
- 3 – на поверхности с микротрещиной

Рисунок 8 – Зависимость температуры T от радиальной координаты



- 1 – на нагреваемой поверхности;
- 2 – в середине пластины;
- 3 – на поверхности с микротрещиной

Рисунок 9 – Зависимость напряжения σ_r от радиальной координаты

Далее для окончательного разделения материала по контуру обработки осуществляют нагрев поверхности материала со стороны, противоположной поверхности, на которую воздействуют лазерные пучки, источником тепла, форма внешней границы которого совпадает с формой контура обработки. При этом в обрабатываемом материале формируются термоупругие напряжения, распределение и величина которых оказываются благоприятными для окончательного формирования сквозных разделяющих трещин.

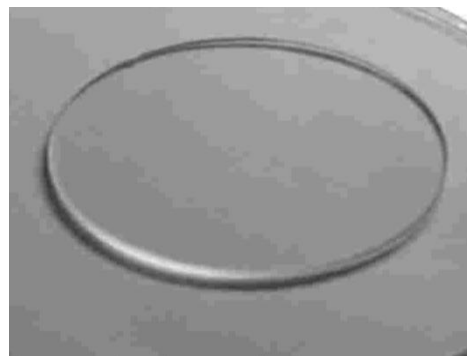


Рисунок 10 – Вид стеклянного образца, полученного при криволинейном термораскалывании

формируются термоупругие напряжения, распределение и величина которых оказываются благоприятными для окончательного формирования сквозных разделяющих трещин.

Ход работы

Включение и настройка установки:

1. Открыть вентиль системы подачи охлаждения лазера.
2. Включить на распределительном щитке подачу питания на установку.
3. Поворотом тумблера «Сеть» располагающемся в шкафу управления в положение «ON» включить установку.
4. Перевести тумблер «Устройство охлаждения» в положение «ВКЛ». При этом активируется система подачи сжатого воздуха на форсунку и в систему обдува линз.
5. Включить стойку числового программного управления (ЧПУ) координатным столом поворотом тумблера на боковой панели стойки ЧПУ в положение «ON».
6. Подать питание на шаговые двигатели управления перемещения координатного стола, нажав кнопку «Станок ВКЛ».
7. Для вывода координатного стола в нулевое положение нажать кнопки «-x», «-y», «-z» и дождаться прекращения движения механических частей координатного стола.

Настройка СО₂-лазера:

1. Включить подачу питания СО₂-лазера переключением сетевого тумблера «I/O» на блоке «ИПЛ-3» в положение «ВКЛ». Нажать кнопку «Пуск».
2. Установить сферическую линзу в систему фокусировки излучения. Перемещая линзу в вертикальной плоскости при помощи системы фокусировки излучения, добиться размеров кругового лазерного пучка на поверхности образца диаметром 2 мм.

Настройка YAG-лазера:

1. Перевести тумблер «Подача питания» в положение «ВКЛ».
2. На панели блока питания твердотельного лазера подать питание на силовую часть блока нажатием кнопки «ВКЛ» с подписью «Силовая»
3. Нажать кнопку «Пуск»
4. Повернуть рукоятку «Ток» против часовой стрелки до упора. Нажать кнопку «Поджиг» и по индикатору тока в системе оптической накачки определить произошел поджиг ламп накачки или нет: если стрелка на индикаторе занимает устойчивое положение на шкале индикатора оптической накачки от нуля, то поджиг ламп накачки осуществлен и лазер перешел в режим генерации; если стрелка индикатора после нажатия кнопки «Поджиг» остается в нулевом положении, то необходимо рукоятку «Ток» повернуть на небольшой угол по часовой стрелке, нажать кнопку «Поджиг» и по положению стрелки индикатора определить произошел ли поджиг ламп накачки.

5. Вращая регулировочный винт, перемещаем линзу в вертикальной плоскости до тех пор, пока диаметр пучка на поверхности материала не станет равным 2 мм.

Экспериментальные исследования:

1. Установить в оптический канал системы фокусировки излучения CO₂-лазера сферическую линзу. Вращая регулировочные винты, переместить оптический канал с установленной линзой вдоль вертикальной линии так, чтобы диаметр пучка на поверхности пластины стал равен 2 мм.

2. Вращая регулировочные винты оптической системы фокусировки YAG-лазера, переместить оптический канал с установленной линзой вдоль вертикальной линии так, чтобы диаметр пучка на поверхности пластины стал равен 2 мм.

3. Вращая регулировочные винты оптических систем фокусировки излучения обоих лазеров и системы подачи хладагента добиться взаимного расположения лазерных пучков и хладагента в соответствии со схемой, представленной на рисунке 1. Расстояние между центрами пучка CO₂-лазера и хладагента должно быть равно 6 мм, а между центрами пучков CO₂-лазера и YAG-лазера 2 мм. При этом центр пучка YAG-лазера должен располагаться на линии обработки CO₂-лазером.

4. На стойке ЧПУ создать командный файл KRIVOL.mpf следующего содержания:

```
G94
G64
G1A90F800
G1X457Y130F800
M48M42M44M50
G1X1X457Y195F240
G1X457Y210M51
G1X417Y215M53M45M51M49F800
G1A-40F600
G64G1A-5M44M48M40
G64G1A359M50
G1A380M51M47
G1A400M45M49
R2=45
R1=0
МЕТКА:R1=R1+1
R3=450-(R2*R1)
G1A=R3F800
G1X457Y130F240
G1X457Y186M50M44M48
G1X457Y190M51
G1X457Y200M45M49
IF R1<=6 ГОТОВ МЕТКА
```

G1X800Y216M51M45M49F800

M30

Создать ещё один файл с названием "KRIV_DOK.mpf" следующего содержания:

G94

G64

G1X417Y215F800

G1A-40F600

G64G1A-5M40

G64G1A359M51M47

G1A400M45M49

G1X800Y216F800

M30

5. Вращая рукоятку “Ток лазера” на блоке питания СО₂-лазера ИПЛ-3, установить значение силы тока 34 мкА. Вращая рукоятку “Ток” на блоке питания YAG-лазера БП-10-40, установить значение силы тока 28 А. Запустить файл KRIVOL.mpf на выполнение. В процессе выполнения программы наблюдать образование несквозной трещины у поверхности стеклянной пластины в результате воздействия СО₂-лазера и хладагента. При этом траектория образования трещины должна быть в виде окружности диаметром 44 мм. Дождаться окончания выполнения программы.

6. Выполнить докальвание образца с использованием повторного воздействия излучения СО₂-лазера по контуру образовавшейся несквозной трещины. Для этого установить силу тока на блоке питания ИПЛ-3 равную 28 мкА. Запустить на выполнение файл KRIV_DOK.mpf. В процессе выполнения программы наблюдать образование сквозной разделяющей трещины, инициализация которой происходит от нанесенной несквозной трещины. Дождаться окончания выполнения программы. Отделить вырезанный круг и пронумеровать его.

7. Получить образец с несквозной трещиной, выполнив действия по пункту 5. Выполнить докальвание образца путём нагрева поверхности пластины, противоположной обработанной. При этом область прогрева должна совпадать с контуром нанесенной несквозной трещины. Для этого на нагревательную плитку положить металлическое кольцо, внутренний диаметр которого равен диаметру контура с нанесенной несквозной трещиной. На металлическое кольцо поместить пластинку с нанесёнными трещинами так, чтобы контур трещины совпал с внутренней стороной кольца. Наблюдать образование сквозной разделяющей трещины, инициализация которой происходит от нанесённой несквозной трещины. Полученный образец пронумеровать.

8. Провести исследования двулучевого лазерного термораскалывания силикатных стёкол по криволинейным контурам с использованием излучения СО₂-лазера и YAG-лазера. Для включения YAG-лазера в процессе нанесения несквозной трещины необходимо внести следующие изменения в файл

KRIVOL.mpf : заменить строку "G64G1A359M50" на строку "G64G1A359M50M46".

Нанести несквозную трещину по криволинейному контуру, выполнив действия в соответствии с пунктом 5.

9. Выполнить докальвание образца с использованием повторного воздействия излучения YAG-лазера по контуру образовавшейся несквозной трещины. Для этого необходима в файле KRIV_DOK.mpf внести следующие изменения: заменить строку "G64G1A359M50" на строку "G64G1A359M46".

Запустить на выполнение файл KRIV_DOK.mpf. В процессе выполнения программы пронаблюдать образование сквозной разделяющей трещины, инициализация которой происходит от нанесенной несквозной трещины. Дождаться окончания выполнения программы. Отделить вырезанный круг и пронумеровать его.

10. Получить образец с несквозной трещиной, выполнив действия по пункту 8. Произвести докальвание образца с использованием нагревательной плитки, выполнив последовательность действий, описанных в пункте 7. Полученный образец пронумеровать.

11. Вращая регулировочные винты системы оптической фокусировки излучения YAG-лазера, сместить пучок вдоль линии, перпендикулярной к контуру обработки. Провести исследования зависимости формы и размера трещины, выполнив последовательность действий по пунктам 8–10 для следующих значений смещения YAG-лазера : ± 1 мм; ± 2 мм.

12. Провести измерения глубины и отклонения трещины в полученных образцах. Результаты измерений занести в таблицу 1.

Таблица 1 – Результаты измерений

Режим обработки	Двухлучевая обработка					Однлучевая обработка (с использованием CO ₂ -лазера)
	Величина смещения YAG-лазера, мм					
	-2	-1	0	1	2	
Глубина несквозной трещины						
Отклонение сквозной трещины						

Требования к оформлению отчета по лабораторной работе

Отчёт должен содержать

1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Таблица с результатами экспериментальных исследований.
4. Выводы.

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМ. Ф. СКОРИНЫ