

(039)

Министерство образования Республики Беларусь

**Учреждение образования
«Гомельский государственный университет
имени Франциска Скорины»**

Шалупаев С. В., Никитюк Ю. В.

**Термоупругие поля, формируемые в хрупких
неметаллических материалах при лазерном
термораскалывании**

Препринт №4

Гомель 2007

УДК 620.18:621.7:624.142
ББК 34.432.5:34.558:34.588
Ш 186

Рецензенты:

Г. С. Митюрин – проректор по научной работе учреждения образования «Белорусский торгово-экономический университет», профессор, доктор физико-математических наук; кафедра радиофизики и электроники учреждения образования «Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины»

Рекомендовано к изданию научно-методическим советом учреждения образования «Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины»

Шалупаев, С. В.

Ш 186

Термоупругие поля, формируемые в хрупких неметаллических материалах при лазерном термораскалывании / С. В. Шалупаев, Ю. В. Никитюк. – Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины 2007. – 44 с. – (Препринт / Министерство образования РБ, Гомельский гос. ун-т им. Ф. Скорины; №4).

В работе рассмотрены закономерности формирования термоупругих полей при разделении хрупких неметаллических материалов по замкнутым криволинейным контурам методом лазерного термораскалывания на примере силикатных стекол. Отдельно рассмотрены особенности процесса формирования разделяющих микротрещин при совместном воздействии на поверхность материала лазерного излучения, хладагента и потока горячего воздуха.

2020

УДК 620.18:621.7:624.142
ББК 34.432.5:34.558:34.588

© Шалупаев С. В., Никитюк Ю. В., 2007
© УО «ГГУ им. Ф. Скорины», 2007

Содержание

Введение	4
1 Исследование условий, обеспечивающих эффективность лазерного термораскалывания по замкнутым криволинейным траекториям	6
2 Исследование процессов лазерного разделения хрупких неметаллических материалов трубчатой формы	17
3 Особенности процесса лазерного термораскалывания при дополнительном воздействии на поверхность материала потока горячего воздуха	30
Заключение	30
Библиографический список	42

Введение

В настоящее время одним из наиболее эффективных методов высокоточного разделения хрупких неметаллических материалов является управляемое лазерное термораскалывание (УЛТ), отличительной особенностью которого является разделение материала вследствие образования микротрещины, формируемой в результате поверхностного нагрева материала лазерным излучением и последующего охлаждения зоны нагрева хладагентом. К основным преимуществам управляемого лазерного термораскалывания относятся: высокая точность разделения, высокая скорость обработки, безотходность и повышенная прочность получаемых изделий.

Однако для технологических процессов лазерного разделения хрупких неметаллических материалов, основанных на использовании управляемого лазерного термораскалывания, характерен ряд особенностей, затрудняющих их широкое промышленное внедрение.

Так, использование технологии управляемого лазерного термораскалывания для размерной обработки хрупких неметаллических материалов по замкнутым криволинейным контурам (в том числе при резке трубок), характеризуется рядом существенных недостатков, являющихся причиной низкой точности обработки и качества окончательных изделий. При этом способы устранения данных недостатков не выяснены до конца и требуют дополнительных исследований.

Еще одной из особенностей применения УЛТ при обработке хрупких неметаллических материалов является низкая стабильность процесса развития микротрещины, обусловленная существенным влиянием вещества хладагента, попадающего в зону лазерного воздействия, на теплофизические условия в ней. Данное обстоятельство является одной из основных причин нежелательных срывов процесса развития разделяющей микротрещины.

Необходимо отметить, что известные математические модели процессов лазерного термораскалывания построены в виде аналитических решений уравнений термоупругости. В результате анализа этих решений в двумерной постановке установлена динамика формирования термоупругих полей и выявлен ряд закономерностей перечисленных выше процессов термораскалывания [1].

Однако на основании существующих моделей, полученных в результате решения линейного дифференциального уравнения теплопроводности, без учета температурной зависимости значений теплофизических коэффициентов, нельзя уверенно прогнозировать технологические параметры режимов обработки.

Кроме этого для расчета значений температур, формируемых в точках хрупких неметаллических материалов при лазерном термораскалывании, использование известных решений в большинстве случаев требует применения численного интегрирования, что так же сопряжено с ухудшением точности результатов из-за вычислительных погрешностей.

Существенным недостатком известных моделей процессов лазерного термораскалывания, является, то, что решения задач о нахождении компонентов тензоров напряжений объемных образцов выполнены в двухмерной постановке, что так же приводит к снижению точности расчетов и значительно усложняет анализ реального пространственного распределения полей напряжений.

В связи с этим разработка новых эффективных схем процессов высокоточного разделения хрупких неметаллических материалов методами лазерного термораскалывания, на основании численного трехмерного моделирования, с целью обеспечения качественного улучшения технологических характеристик является актуальной проблемой и имеет не только научное, но и практическое значение.

1 Исследование условий, обеспечивающих эффективность лазерного термораскалывания по замкнутым криволинейным траекториям

В ряде случаев возникает необходимость резки хрупких неметаллических материалов по замкнутым криволинейным контурам для получения изделий соответствующей формы (примером может служить изготовление заготовок для производства автомобильных зеркал). При этом известна возможность применения для этих целей управляемого лазерного термораскалывания [2-3].

Анализ работ по данной тематике и собственные исследования показали наличие у технологии УЛТ целого ряда существенных недостатков. Остановимся на сущности возникающих трудностей и рассмотрим разработанные решения, обеспечивающие их преодоление.

В первую очередь обратим внимание, на то, что использование известных установок лазерного термораскалывания в случае нанесения микротрещины по криволинейному контуру в силу их конструктивных особенностей приводит к смещению зоны подачи хладагента относительно траектории разделения, что вызывает появление заметных отклонений формируемой микротрещины от линии воздействия лазерного излучения либо прекращение резки. Данное обстоятельство особенно четко проявляется при работе на малых радиусах сложных линий обработки.

Для устранения этого недостатка была разработана схема установки, отличительной особенностью которой является использование пяти координатной системы управления. Результат, достигаемый при использовании данной установки, заключается в устранении отклонений зоны воздействия хладагента от линии воздействия лазерного излучения во время обработки, за счет независимого перемещения форсунки подачи хладагента [2].

Необходимо отметить, что описанное выше техническое решение является необходимым, но недостаточным условием для уменьшения отклонений разделяющей микротрещины от линии обработки. Дело в том, что в случае резки по криволинейному контуру симметрия термоупругих напряжений, характерная для прямолинейной резки, нарушается еще по нескольким причинам.

Одной из них является влияние уже прогретых участков материала, находящихся внутри криволинейного контура, что может приводить к отклонению трещины от линии обработки [3]. Однако более существенной причиной является использование лазерных пучков эллиптической формы ориентированных по касательной к криволинейной траектории движения. Использование такой формы лазерных пучков (см. например [3]), обеспечивает оптимальные условия для формирования термоупругих напряжений при реализации прямолинейного термораскалывания (в сравнении с пучками круглой формы). Но использование эллиптических пучков при резке по криволинейному контуру вследствие их ориентации по касательной к линии обработки, приводит к тому, что края пучка не совмещаются с линией реза, и тем самым определяют несимметричный нагрев материала. Такой несимметричный нагрев так же приводит к отклонению трещины и от заданной линии обработки и от направления перпендикулярного к поверхности материала.

Следствием вышеуказанных обстоятельств являются понижение точности обработки и ухудшение качества кромок после докалывания лазерных микротрещин при получении конечного изделия.

Отметим, что в работах [5-6] предложено при резке по криволинейному контуру осуществлять нагрев обрабатываемого материала пучками, имеющими на поверхности материала серповидную форму. Применение таких пучков при резке по криволинейным контурам позволяет в значительной степени

избежать указанного выше нарушения симметричного распределения термоупругих напряжений. Однако серьезным недостатком данного приема являются технические трудности, возникающие при его реализации, связанные с необходимостью существенного усложнения оптических систем, используемых в соответствующих установках.

Для устранения нежелательных отклонений от перпендикулярного к поверхности направления в данной работе предложено использование дополнительного воздействия лазерного излучения, обеспечивающего объемный нагрев материала (например, для силикатных стекол и алюмооксидной керамики с длиной волны $\lambda=1,06$ мкм). Причем этот дополнительный нагрев целесообразно (в соответствии с экспериментальными наблюдениями) осуществлять с определенным смещением от линии реза (рисунок 1).

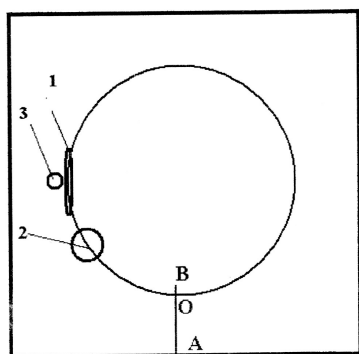


Рисунок 1 - Схема взаимного расположения зон воздействия лазерных пучков и хладагента

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 обозначен предварительный надрез на поверхности материала, наносимый перпендикулярно касательной к линии реза. Точкой О обозначено начало контура обработки.

Для выяснения особенностей двухлучевой схемы термораскалывания хрупких неметаллических материалов по замкнутому криволинейным траекториям было выполнено численное моделирование этого процесса, результаты которого приведены ниже (рисунки 2 – 7). При расчетах полагалось, что плотность стекла постоянна и равна $\rho_0 = 2450 \text{ кг/м}^3$. Модуль упругости, коэффициент Пуассона и коэффициент температурного расширения принимались соответственно равными $E=68 \text{ ГПа}$, $\nu=0,221$, $\alpha_f=89 \cdot 10^{-7} \text{ (}^\circ\text{C)}^{-1}$. Были учтены зависимости коэффициентов теплопроводности и удельной теплоемкости от температуры. В соответствии с [7-9] при расчетах считалось, что теплопроводность стекла с повышением температуры от нормальной до температуры стеклования увеличивается примерно в 2 раза, а удельная теплоемкость увеличивается примерно в 1,5 раза. Принималось, что используемые параметры подачи воздушно – водяной смеси обеспечивает охлаждение поверхности стекла с коэффициентом теплоотдачи равным $6800 \text{ Вт/м}^2\text{K}$ [11]. Расчеты проводились для пластины с геометрическими размерами $50 \times 25 \times 4$ (мм). Радиус перемещения центров эллиптического пучка и хладагента равен 17,5 мм. Линейная скорость резки принималась равной 15 мм/с. Использовались следующие значения параметров лазерных пучков: большая ось $A=14 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, малая ось $B=2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ для пучка с длиной волны излучения $\lambda = 10,6 \text{ мкм}$ и мощностью излучения $P=30 \text{ Вт}$; радиус пятна излучения YAG – лазера $R=1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ и мощностью излучения $P_0 = 40 \text{ Вт}$.



Рисунок 2 - Распределение температуры в образце при воздействии лазерного пучка и хладагента, перемещающихся по круговой траектории, $^{\circ}\text{C}$

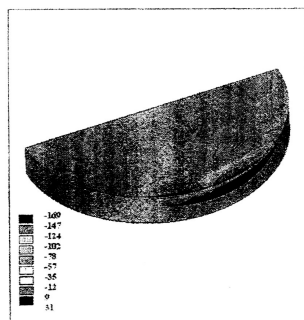
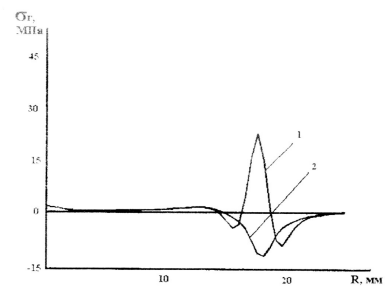
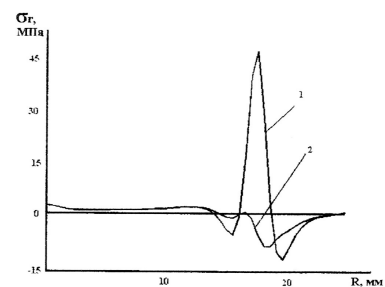


Рисунок 3 - Распределение напряжений σ_r в образце при воздействии лазерного пучка и хладагента, перемещающихся по круговой траектории, МПа



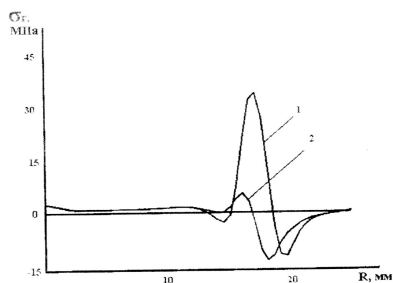
однолучевая схема управляемого термораскалывания с использованием эллиптического пучка CO_2 -лазера: 1- $z = 0$ мм, 2- $z = 0,25$ мм

Рисунок 4 - Зависимость напряжения σ_r от радиальной координаты, МПа



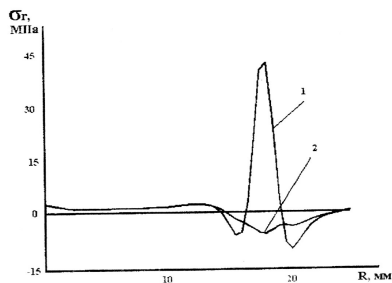
соосная двухлучевая схема с использованием эллиптического пучка CO_2 -лазера и круглого пучка YAG-лазера: 1- $z = 0$ мм, 2- $z = 0,25$ мм

Рисунок 5 - Зависимость напряжения σ_r от радиальной координаты, МПа



двулучевая схема со смещением в радиальном направлении на 1 мм центра пучка YAG – лазера к центру контура обработки:
1 - $z = 0$ мм, 2 - $z = 0.25$ мм

Рисунок 6 - Зависимость напряжения σ_r от радиальной координаты, МПа



двулучевая схема со смещением в радиальном направлении на 1 мм центра пучка YAG – лазера от центра контура обработки:
1 - $z = 0$ мм, 2 - $z = 0.25$ мм

Рисунок 7 - Зависимость напряжения σ_r от радиальной координаты, МПа

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

- обычная однолучевая схема управляемого термораскалывания;
- соосная двулучевая схема с использованием эллиптического пучка CO_2 – лазера и круглого пучка YAG – лазера;
- двулучевая схема со смещением на 1 мм в радиальном направлении к геометрическому центру контура обработки луча YAG – лазера.
- двулучевая схема со смещением на 1 мм в радиальном направлении от геометрического центра контура обработки луча YAG – лазера.

Отметим, что при выбранных режимах обработки максимальные значения температуры во всех четырех случаях не превышают допустимой величины (соответствующей температуры стеклования силикатного стекла).

На рисунках 2 и 3 представлено пространственное распределение температуры и напряжений σ_r , действующих перпендикулярно касательной к линии обработки, в стеклянной пластине для случая однолучевой схемы резки по круговой траектории. Как и следовало ожидать, при применении УЛТ для резки по криволинейному контуру в обрабатываемом материале создается пространственная конфигурация растягивающих напряжений и напряжений сжатия аналогичная случаю прямолинейной резки.

Для анализа особенностей в процессе резки по криволинейной траектории необходимо учитывать, что распределение сжимающих напряжений, в объеме образца определяет форму и глубину 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 формирования круговой микротрещины, от радиальной координаты на различных глубинах в случае УЛТ. Из рассмотрения данного рисунка видно, что для однолучевой обработки характерно несимметричное распределение напряжений σ_r относительно линии разделения. Причиной этого является упомянутая выше асимметрия нагрева материала, относительно линии разделения, обусловленная использованием эллиптического лазерного пучка, ориентированного по касательной к криволинейному контуру. Анализ представленных зависимостей напряжений σ_r позволяет сделать вывод, что использование данного технологического режима приведет к отклонению разделяющей микротрещины от вертикального направления, что и наблюдается на эксперименте.

Представленные на рисунках 5 и 6 аналогичные зависимости напряжений σ_r , действующих перпендикулярно линии формирования круговой микротрещины, для случаев двухлучевой обработки (при соосном размещении эллиптического пучка CO_2 – лазера и круглого пучка YAG – лазера – рисунок 5 и при смещении в радиальном направлении на 1 мм центра пучка YAG – лазера от края к центру контура обработки – рисунок 6) показывают, что использование данных схем размещения пучков обеспечивает заметное увеличение максимальных значений растягивающих напряжений (с 22 МПа при однолучевой схеме, до 47 МПа и 33 МПа при использовании 2-ой и 3-ей схемы обработки). Однако такое размещение лазерных пучков приводит к еще большей несимметричности распределения полей напряжений, что особенно ярко выражено в случае использования схемы со смещением в радиальном направлении пучка YAG – лазера к геометрическому центру контура обработки.

Анализ представленных на рисунке 7 зависимостей напряжений σ_r , действующих перпендикулярно линии формирования круговой микротрещины, для случаев двухлучевой обработки с использованием схемы со смещением пучка YAG – лазера от центра контура обработки, позволяет сделать вывод, о целесообразности такого размещения пучков для устранения отклонений микротрещины от вертикального направления (именно эта схема на эксперименте обеспечивает наилучшие результаты).

Проведенный анализ распределения термоупругих полей позволяет сделать вывод, что использование дополнительного лазерного воздействия с длиной волны 1,06 мкм обеспечивает возможность внесения существенных изменений в пространственное расположение зоны сжимающих напряжений. Вследствие этого создаются предпосылки для создания пространственной конфигурации полей напряжений сжатия, позволяющей скомпенсировать их асимметрию. Таким образом, за счет дополнительного воздействия лазерного излучения с длиной волны соответствующей объемному поглощению материалом возможно устранение отклонения наносимой микротрещины от перпендикулярной к поверхности материала плоскости.

Еще одной проблемой при резке по замкнутому криволинейному контуру является отклонение линии реза от заданной траектории в месте замыкания контура. Здесь на распространение наносимой микротрещины оказывает существенное влияние ее собственный «хвост», вершина которого, как и вершина самой микротрещины является концентратором значительных по величине напряжений. Для решения данной проблемы оказалось целесообразным проводить инициализацию криволинейной замкнутой микротрещины от предварительно нанесенной в радиальном направлении прямолинейной микротрещины.

В этом случае в месте замыкания контура лазерной обработки не происходит формирование дополнительной зоны значительных по величине напряжений у вершины «хвоста» криволинейной микротрещины.

Существенные трудности возникают и при докальвании нанесенных лазерных микротрещин при получении конечного изделия в случае выбора контура обработки в виде замкнутой криволинейной траектории. В ходе проведенных исследований было выяснено, что для качественного окончательного разделения круговой микротрещины 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 термораскалывания, были выполнены расчеты термоупругих полей, формируемых кольцевым источником тепла в обрабатываемом материале. На рисунке 8 представлены результаты расчета температурных полей, а на рисунке 9 представлены результаты расчета радиальных напряжений σ_r , действующих перпендикулярно предварительно нанесенной круговой микротрещине.

Как видно из рассмотрения рисунка 8 при выбранных параметрах воздействия на поверхность изделия кольцевого источника тепла максимальные значения температуры не достигают температуры стеклования, что необходимо для реализации хрупкого механизма докальвания образца.

Анализ зависимости напряжений σ_r , действующих перпендикулярно предварительно нанесенной круговой микротрещине, от радиальной координаты на различных глубинах показывает, что на нагреваемой поверхности в зоне действия кольцевого теплового источника действуют

значительные по величине сжимающие напряжения, величина которых составляет около 150 МПа.

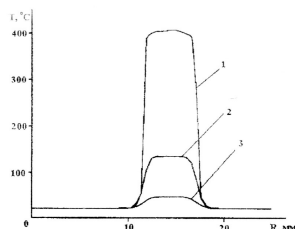
На противоположной поверхности так же находится область сжимающих напряжений, величина которых составляет порядка 50 МПа.

При этом во внутренних слоях материала формируется область растягивающих напряжений, величины которых достаточно для дальнейшего развития уже существующей микротрещины.

Таким образом, использование кольцевого источника тепла, позволяет формировать распределение термоупругих полей в материале, необходимое для окончательного развития круговой микротрещины, нанесенной методом УЛТ.

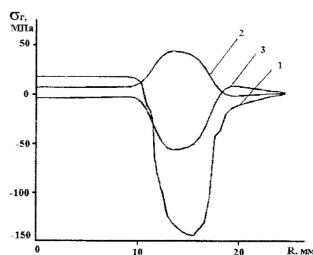
2 Исследование процессов лазерного разделения хрупких неметаллических материалов трубчатой формы

Важной разновидностью лазерного термораскалывания по замкнутым криволинейным траекториям, с точки зрения практического применения, является разделение хрупких неметаллических материалов трубчатой формы. Одни из первых результатов по лазерной резке стеклянных труб методом термораскалывания приведены в работах [7,12], получивших дальнейшее развитие в [13,14]. В [7,13] отмечается, что лазерная резка стеклянных труб методом лазерного термораскалывания имеет перед традиционными способами ряд неоспоримых преимуществ, к которым в первую очередь следует отнести высокое качество получаемых торцевых поверхностей. В [7] отмечается, что существует два принципиально разных способа реализации процесса лазерного термораскалывания. Первый заключается в формировании лазерного луча в радиально сходящийся лучевой диск, что приводит к формированию вдоль контура обработки кольцевого источника тепла.



1 - на нагреваемой поверхности, 2 - в середине пластины,
3 - на стороне с нанесенной микротрещиной

Рисунок 8 - Зависимость температурного поля от радиальной координаты, °C



1 - на нагреваемой поверхности, 2 - в середине пластины,
3 - на стороне с нанесенной микротрещиной

Рисунок 9 - Зависимость напряжения σ_r от радиальной координаты, МПа

При реализации данного способа разделение материала происходит практически мгновенно.

Основным недостатком этой технологии является низкая надежность и повторяемость процесса характерная для однократного воздействия теплового источника. Кроме этого, практическое применение этой технологии затруднено из-за сложности оптической системы.

Сущность второго способа заключается в многократном лазерном воздействии вдоль линии обработки, достигаемого вращением трубки относительно лазерного пучка или наоборот (например, за счет использования системы поворотных зеркал, образующих световод, обеспечивающий перемещение лазерного луча по поверхности трубки [7]).

Однако в большинстве известных работ вследствие более простой технической реализации используется именно вращение трубок относительно лазерного луча (см. например [12, 14]).

Исследования по развитию данной технологии привели к созданию целого ряда ее модификаций, сочетающих в различных комбинациях и последовательностях механическое разрушение и охлаждение дополнительно к лазерному нагреву.

Так, например, в [15] для увеличения эффективности лазерного термораскалывания стеклянных трубок, предлагается, отраженное лазерное излучение вновь направлять в зону обработки при помощи определенным образом расположенного зеркала. В работе [16] для увеличения эффективности резки стеклянных трубок, предложен способ, отличительной особенностью которого является использование одновременного лазерного нагрева нескольких вращающихся трубок.

Изучение выше перечисленных работ и собственные эксперименты (исследования процессов лазерного термораскалывания были выполнены на разработанном авторами макете установки [17-18]) позволяют выделить

несколько схем обработки обеспечивающих приемлемые результаты при практическом использовании.

Первая схема предполагает многократный нагрев поверхности трубки, вследствие ее вращения относительно неподвижного лазерного луча.

Вторая схема практически является реализацией УЛТ для обработки трубок. Вдоль линии обработки происходит одновременный лазерный нагрев и охлаждение в течение нескольких оборотов трубки.

Третья схема заключается в сочетании предварительного нагрева контура разделения в течение нескольких оборотов трубки под воздействием лазерного излучения и последующей обработки линии реза при совместном воздействии лазерного излучения и хладагента.

Во всех выше перечисленных случаях разделение хрупких неметаллических материалов трубчатой формы выполняется с использованием излучения CO_2 -лазера с длиной волны 10,6 мкм. Полученные ранее авторами положительные результаты использования двулучевой технологии при разделении методом термораскалывания плоскопараллельных образцов [19-22], создали предпосылки для проведения исследования влияния воздействия дополнительного лазерного излучения с длиной волны 1,06 мкм на процесс лазерного термораскалывания изделий трубчатой формы.

Необходимо отметить, наличие ряда публикаций посвященных разработке способов инженерного расчета режимов лазерного термораскалывания хрупких неметаллических материалов трубчатой формы [7, 13]. Приведенные в этих работах аналитические решения могут быть полезны для проведения оценочных инженерных расчетов и позволяют выявить взаимосвязь между параметрами, оказывающими влияние на процесс термораскалывания изделий трубчатой формы.

Однако эти решения, как и решения, для плоскопараллельных образцов, получены на основе линейного дифференциального уравнения теплопроводности, со средненитегральными теплофизическими коэффициентами, не зависящими от температуры, а решение задач о нахождении компонент тензора напряжений получено в одномерной или в двухмерной постановке.

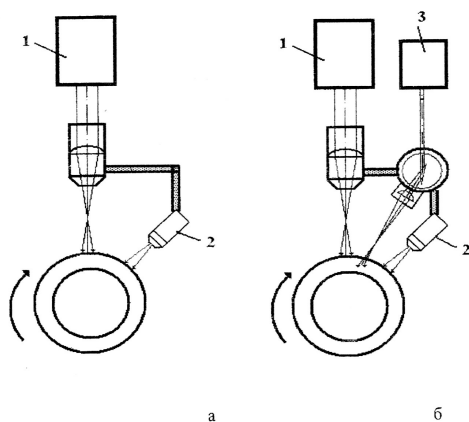
В данной работе проведен сравнительный анализ особенностей процесса лазерного термораскалывания при реализации различных схем обработки для однолучевого и двулучевого способов. Для численного исследования распределения температурных полей и полей температурных напряжений были использованы типичные режимы обработки трубок из стекла С52. Для расчета термоупругих полей, был использован метод конечных элементов реализованный в программе ANSYS.

Так как величины теплофизических свойств стекла в значительной степени зависят от температуры, а при лазерном термораскалывании стеклонизделий трубчатой формы температура меняется в широких пределах, то в расчетах были учтены соответствующие зависимости [9-10]. Модуль упругости, коэффициент Пуассона, коэффициент температурного расширения и плотность полагались равными: $E = 380 \text{ ГПа}$, $\nu = 0,222$, $\alpha_T = 80 \cdot 10^{-7} \text{ (}^\circ\text{C)}^{-1}$, $\rho_0 = 3960 \text{ кг/м}^3$. При выполнении расчетов были использованы следующие параметры лазерных пучков: большая ось $A = 6 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, малая ось $B = 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ для пучка с длиной волны излучения $\lambda = 10,6 \text{ мкм}$ и мощностью излучения $P = 15 \text{ Вт}$; радиус пятна излучения YAG – лазера $R = 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ и мощностью излучения $P_0 = 40 \text{ Вт}$.

Расчеты проводились для трубки с внешним радиусом равным 7 мм, внутренним радиусом равным 6 мм и длиной в осевом направлении 20 мм. Скорость вращения трубки относительно лазерных пучков принималась равной 45

оборотов в минуту. Считалось что, подаваемый хладагент обеспечивает охлаждение поверхности трубки с коэффициентом теплоотдачи равным $8000 \text{ Вт/м}^2\text{К}$ [11].

Моделирование резки трубок осуществлялось для однолучевого способа обработки с использованием CO_2 - лазера (рисунок 10.а) и для двухлучевого, сочетающего воздействие CO_2 - лазера и YAG – лазера (рисунок 10.б).



а) однолучевой, б) двухлучевой;

1 – CO_2 – лазер, 2 – форсунка подачи хладагента, 3 – YAG – лазер

Рисунок 10 - Способы лазерного термораскалывания стеклянных трубок

Для обоих способов были выполнены расчеты зависимости температуры и напряжений, действующих в осевом направлении трубки (вдоль оси Z), от номера оборота для трех различных схем временной последовательности воздействия лазерного излучения и хладагента на обрабатываемое изделие (рисунки 11 – 14).

В соответствии с первой схемой трубка подвергается лазерному нагреву в течение нескольких оборотов.

При моделировании обработки по второй схеме учтено, что в течение нескольких оборотов часть материала трубки нагревается лазерным излучением и одновременно на некотором удалении от зоны лазерного нагрева поверхность трубки охлаждается.

Использование третьей схемы предполагает, что трубка попадает в зону воздействия лазерного излучения, далее после совершения нескольких оборотов, поверхность трубки подвергается воздействию хладагента, причем трубка совершает еще несколько оборотов при одновременном воздействии лазерного пучка и хладагента (таким образом третья схема является последовательным сочетанием первых двух).

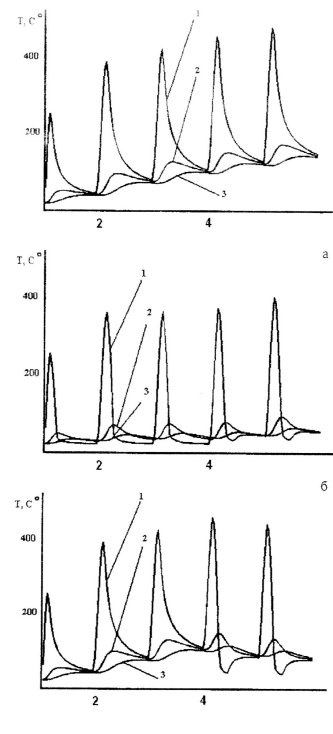
Сравнение представленных на рисунках 11 – 12 расчетных зависимостей температуры в фиксированных точках (1 – на внешней поверхности трубки; 2 – в середине стенки трубки; 3 – на внутренней поверхности трубки) показывает, что использование дополнительного воздействия лазерного излучения с длиной волны $1,06 \text{ мкм}$ не вносит кардинальных изменений в характер этих зависимостей. Можно отметить небольшое увеличение значений максимальных температур в каждой из схем двухлучевой обработки в сравнении с соответствующими схемами однолучевой обработки, которое, как и следовало ожидать, в наибольшей степени проявляется в удаленных от поверхности слоях материала.

Анализ рисунков 11 а и 12 а показывает что, в случае применения первой схемы, обеспечивающей многократный

лазерный нагрев материала трубки, вследствие ее вращения вокруг своей оси относительно неподвижного лазерного пучка (или пучков в случае двухлучевой обработки), температура в каждой точке внешней поверхности обрабатываемого материала периодически резко повышается, под воздействием лазерного излучения и плавно уменьшается, вследствие относительно небольшого значения теплопроводности стекла. При этом наблюдается результирующее среднее повышение температуры стекла.

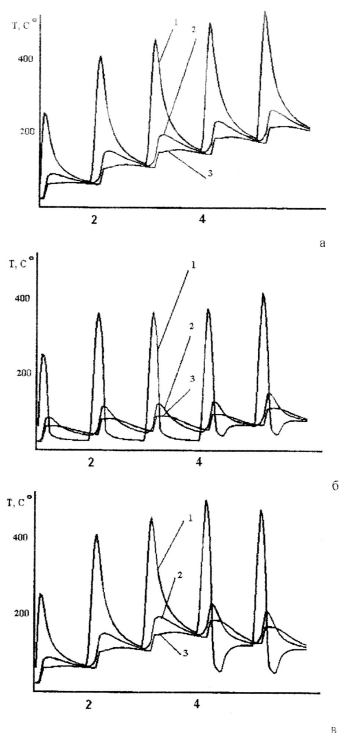
Использование второй схемы (рисунки 11 б и 12 б), являющейся, как отмечалось ранее, по своей сути УЛП, примененным для случая обработки тел имеющих трубчатую форму, приводит к многократному резкому нагреву точек обрабатываемой поверхности, чередующемуся с резким охлаждением, обусловленным воздействием хладагента. При этом практически отсутствует результирующее среднее повышение температуры стекла, таким образом, каждый оборот характеризуется практически одинаковыми изменениями температуры точек трубки.

Зависимости температуры от номера оборота характерные для третьей схемы обработки на первом этапе обработки имеют особенности аналогичные приведенным для первой схемы: температура точек поверхности периодически резко увеличивается, а затем плавно уменьшается, при результирующем среднем повышении температуры. Соответственно второй этап обработки так же имеет зависимости температуры в точках поверхности трубки от номера оборота одинаковые с наблюдаемыми при использовании второй схемы: температура точек поверхности периодически резко увеличивается, а затем резко уменьшается, без результирующего среднего изменения температуры. Описанное выше поведение температуры при использовании третьей схемы, является следствием, того, что эта схема обработки является последовательным сочетанием первых двух.



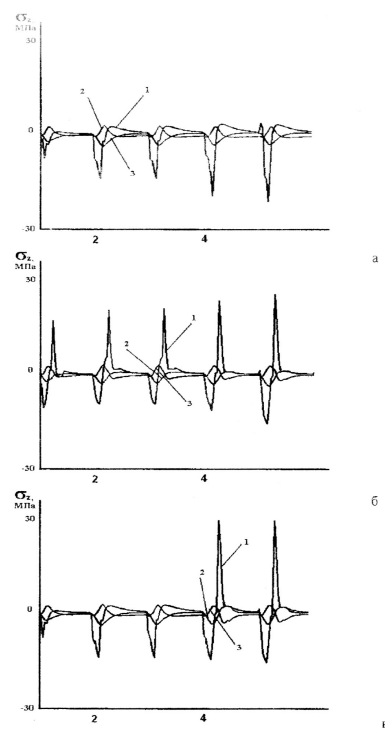
1 – на внешней поверхности трубки; 2 – в середине стенки трубки; 3 – на внутренней поверхности трубки; а) первая схема обработки; б) вторая схема обработки; в) третья схема обработки

Рисунок 11 - Расчетные зависимости температуры в фиксированных точках от номера оборота, °C



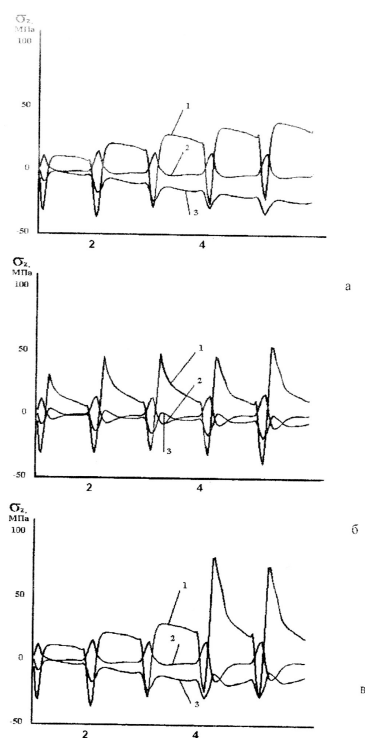
1 – на внешней поверхности трубки; 2 – в середине стенки трубки; 3 – на внутренней поверхности трубки; а) первая схема обработки; б) вторая схема обработки; в) третья схема обработки

Рисунок 12 - Расчетные зависимости температуры в фиксированных точках от номера оборота, $^{\circ}\text{C}$



1 – на внешней поверхности трубки; 2 – в середине стенки трубки; 3 – на внутренней поверхности трубки; а) первая схема обработки; б) вторая схема обработки; в) третья схема обработки

Рисунок 13 - Расчетные зависимости напряжений σ_z в фиксированных точках от номера оборота, МПа



1 – на внешней поверхности трубки; 2 – в середине стенки трубки;
3 – на внутренней поверхности трубки; а) первая схема обработки;
б) вторая схема обработки; в) третья схема обработки

Рисунок 14 - Расчетные зависимости напряжений σ_z в фиксированных точках от номера оборота, МПа

Сравнительный анализ, представленных на рисунках 13 - 14 расчетных зависимостей напряжений, действующих в осевом направлении трубки, от номера оборота, позволяет сделать вывод, что использование дополнительного воздействия лазерного излучения с длиной волны 1,06 мкм, сохраняет одинаковыми основные особенности изменения с течением времени осевых напряжений в фиксированных точках обрабатываемого материала при использовании двухлучевого способа разделения в сравнении с однолучевым. При этом, дополнительное воздействие излучения YAG – лазера приводит к значительному повышению величины, как растягивающих напряжений, так и напряжений сжатия, что обеспечивает увеличение вероятности инициирования и стабильного развития разделяющей микротрещины. Еще одной общей закономерностью для всех полученных расчетных зависимостей является то, что знак напряжения формируемых в стеклянной трубке совпадает на ее внешней и внутренней поверхностях (хотя по величине напряжения на внешней стороне значительно больше), при этом в слоях материала близких к середине стенки трубки, формируются противоположные по знаку напряжения.

Применение первой схемы обработки, использующей многократный лазерный нагрев материала, приводит к последовательному чередованию в точках внешней поверхности трубки осевых напряжений растяжения и сжатия, характеризующему постепенным увеличением значений напряжений растяжения. Такое изменение, напряжений, приводит в итоге к сквозному разделению трубки. Однако, качество такого разделения зачастую недостаточно высоко.

В случае использования второй схемы обработки, на поверхности трубки после первого оборота создаются достаточно большие, для формирования разделяющей микротрещины, растягивающие напряжения. В дальнейшем практически без существенных изменений, в точках обрабатываемой поверхности периодически повторяется смена

осевых напряжений, с растягивающих, в зоне воздействия лазерного излучения, на сжимающие в зоне воздействия хладагента. Использование данной схемы обеспечивает возможность создания сквозной разделяющей микротрещины, особенности, формирования которой в целом соответствуют механизму процесса УЛТ плоскопараллельных образцов. Полученные при использовании данной схемы торцевые поверхности характеризуются высоким качеством, однако недостатком данной технологии является необходимость механического докола, для получения окончательного изделия.

При анализе зависимостей осевых напряжений от номера оборота в случае использования третьей схемы, можно отметить, что, как и в случае анализа температурных зависимостей для этой схемы, характер изменения осевых напряжений на первом этапе обработки совпадает с характером этих изменений в случае применения первой схемы, и соответственно на втором этапе – со случаем применения второй схемы. При этом использование данной схемы обеспечивает возможность получения сквозной трещины, с высоким качеством получаемых поверхностей разделения. Таким образом, на практике наиболее эффективным является применение двухлучевой обработки по схеме использующей предварительный лазерный нагрев обрабатываемого материала в течение нескольких оборотов с последующим формированием разделяющей микротрещины, при совместном воздействием на контур обработки лазерного излучения и хладагента.

3 Особенности процесса лазерного термораскалывания при дополнительном воздействии на поверхность материала потока горячего воздуха

Как было отмечено во введении, одним из существенных недостатком УЛТ является низкая надежность процесса разделения, в первую очередь при режимах, характеризующихся

малым расстоянием от заднего фронта лазерного пучка до переднего фронта зоны охлаждения.

Анализ процесса УЛТ позволил выявить несколько причин неустойчивости процесса трещинообразования. Одной из них является существенное влияние вещества хладагента, попадающего в зону лазерного воздействия на теплофизические условия в ней, что и обуславливает частые срывы процесса развития разделяющей микротрещины.

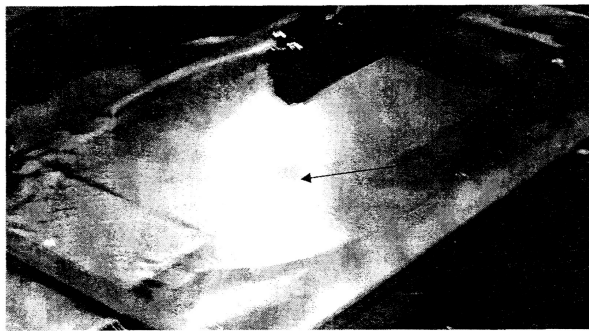
Следствием этого же обстоятельства является то, что УЛТ не обеспечивает надежное разделение в случае необходимости нанесения разделяющих микротрещин на небольшом удалении друг от друга, что существенно при получении миниатюрных изделий.

Обратим внимание, что в соответствии с [11] на поверхности нагретого стекла, при попадании на нее жидкости, образуется пленка пара. При дальнейшем охлаждении стекла толщина пленки уменьшается и стадия пленочного кипения переходит в стадию пузырькового кипения, а затем в стадию конвективного охлаждения. При этом стадия пленочного и пузырькового кипения характеризуются низким коэффициентом теплоотдачи, так как он определяется в основном низкой теплопроводностью пара.

Однако в этой же работе отмечается, что процесс теплообмена при охлаждении поверхности нагретого стекла распыленной жидкостью определяется в первую очередь гидродинамикой обтекания жидкостью хладагента поверхности материала, в ходе которого образуется тонкая жидкостная пленка, которая постоянно обновляется за счет поступающих новых порций хладагента.

При определенных условиях (в первую очередь это достаточно высокая скорость подачи хладагента) жидкость на поверхности не будет успевать подогреться до кипения, и условия теплообмена на поверхности будут определяться в основном скоростью течения жидкости по поверхности.

При этом для больших скоростей движения по поверхности стекла распыленной жидкости характерна высокая степень турбулентности течения, что обеспечивает высокие значения коэффициента теплоотдачи. Немаловажным является то, что и стабильность теплообмена так же зависит от скорости движения жидкости: при малых скоростях режим теплоотдачи характеризуется неустойчивостью, и, наоборот – при больших скоростях процесс теплообмена устойчив, что обеспечивает возможность его регулировки.



стрелкой отмечена зона со стабильным интенсивным охлаждением, которую окружает пленка из жидкости хладагента, формируемая в результате растекания жидкости хладагента по обрабатываемой поверхности

Рисунок 15 - Вид стеклопластины, под воздействием хладагента

Таким образом, важным обстоятельством является то, что при УЛТ, на обрабатываемой поверхности кроме области с эффективным интенсивным охлаждением формируется зона неустойчивого охлаждения, образованная вследствие растекания по обрабатываемой поверхности жидкости хладагента (рисунок 15). При этом предварительное понижение температуры участков материала, нагретых лазерным излучением, зачастую происходит именно в этой зоне и характеризуется неустойчивостью и низкой интенсивностью вследствие недостаточно высоких скоростей движения жидкости.

Данное обстоятельство отрицательно влияет на надежность процесса трещинообразования. Все перечисленные недостатки УЛТ обуславливают в указанных выше случаях низкую эффективность использования этой технологии.

Проведенный комплекс работ показал целесообразность совместного воздействия на поверхность материала лазерного излучения, хладагента и потока горячего воздуха. (Необходимо отметить, что в работе [23] приведен пример сквозного термораскалывания при использовании в качестве технологического инструмента только потока горячего воздуха, однако данная технология характеризуется низкой точностью нанесения разделяющей микротрещины и, не смотря на свою низкую себестоимость, не может конкурировать с УЛТ).

Экспериментальные исследования процессов лазерного термораскалывания при совместном воздействии на обрабатываемый материал лазерного излучения, хладагента и потока горячего воздуха были выполнены на разработанном авторами макете установки.

Схема взаимного расположения зоны воздействия лазерного пучка, зоны охлаждения за счет подачи хладагента и зоны подачи потока горячего воздуха, используемая при проведении экспериментов, приведена на рисунке 16.

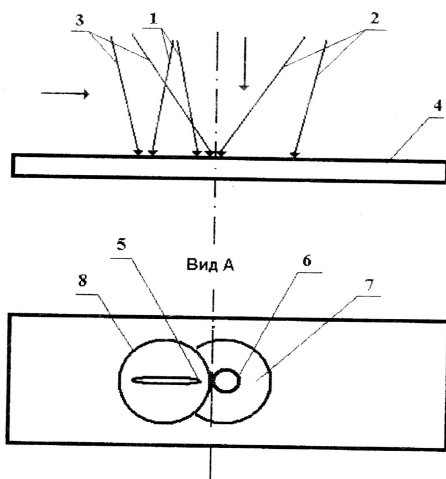


Рисунок 16 - Схема взаимного расположения зоны воздействия лазерного пучка, зоны охлаждения зоны подачи потока горячего воздуха

Позицией 1 отмечен лазерный пучок, 2 – хладагент, 3 – поток горячего воздуха, 4 – обрабатываемое изделие из хрупкого неметаллического материала, 5 – сечение лазерного пучка на плоскости обработки, 6 – зона интенсивного охлаждения за счет подачи хладагента, 7 – пленка из жидкости хладагента, 8 – зона воздействия потока горячего воздуха. Стрелкой отмечено направление перемещения обрабатываемого изделия.

Разделение хрупких неметаллических материалов в соответствии с предложенной схемой обработки осуществляется следующим образом.

Исходная заготовка материала размещается на координатном столе. Далее координатный стол перемещает изделие по линии обработки, относительно лазерного пучка, устройства подачи подогретого воздуха и форсунки.

Излучение лазерного пучка, поглощаясь в поверхностном слое, осуществляет нагрев пластины. Затем в зону, предварительно нагретую лазерным излучением, подается хладагент. При этом лазерное воздействие происходит в зоне потока горячего воздуха, который так же нагревает поверхность обрабатываемого изделия.

Таким образом, стеклянная пластина последовательно нагревается двумя поверхностными источниками тепла в месте воздействия излучения CO_2 -лазера и потока горячего воздуха, а затем охлаждается в зоне воздействия хладагента.

В ходе экспериментов наносились параллельные разделяющие надрезы на расстоянии 5 мм друг от друга в образцах из стекла марки МЗ толщиной 3-5 мм. В работе использовался лазер ИЛГН 802 с длиной волны излучения $\lambda=10,6$ мкм, мощностью излучения которого равнялась 40 - 60 Вт. При разделении стекла лазерное излучение фокусировалось в эллиптические пучки с геометрическими размерами $A \times B$, где большая ось $A = 6 - 12$ мм, а малая ось $B = 0,5 - 2$ мм. Поток воздуха перед подачей в зону обработки нагревался до температуры 200 - 500 °С. Скорость резки образцов составляла 10-30 мм/с.

Экспериментальные исследования показали, что поток горячего воздуха обеспечивает удаление хладагента находящегося на траектории воздействия лазерного пучка, а так же препятствует проникновению его новых порций в зону воздействия лазерного пучка и удаляет из нее пленку из

жидкости, формируемую в результате растекания хладагента по обрабатываемой поверхности. Тем самым, действие потока горячего воздуха обеспечивает стабилизацию теплофизических условий в зоне лазерного воздействия.

Для выяснения особенностей процесса УП при совместном воздействии на поверхность материала лазерного излучения, хладагента и потока горячего воздуха необходим анализ термоупругих полей, формируемых в обрабатываемом материале при предложенной методике обработки. В соответствии с приведенной выше схемой исследуемого процесса, было выполнено конечно-элементное решение задачи о распределении термоупругих полей в квазистатической постановке. Расчеты были проведены для силикатного стекла, с ранее приведенными свойствами (см. стр. 8).

Были использованы следующие параметры лазерного пучка: большая ось $A=6 \cdot 10^{-3}$ м, малая ось $B=1,4 \cdot 10^{-3}$ м и мощностью излучения $P=40 \text{ Вт}$. Диаметр сопла устройства подачи горячего воздуха $D=3 \text{ мм}$, а расстояние от сопла до обрабатываемой поверхности $Z=10 \text{ мм}$. Температура горячего воздуха равнялась 250°C . Диаметр зоны со стабильным интенсивным охлаждением (с коэффициентом теплоотдачи равным $7000 \text{ Вт/м}^2\text{K}$) принимался равным 3 мм . Расчеты проводились для пластины с геометрическими размерами $24 \times 12 \times 3 \text{ мм}$. Скорость перемещения обрабатываемого изделия относительно лазерных пучков V считалась равной 10 мм/с .

На рисунке 17 представлены результаты расчета температурных полей формируемых в исследуемом образце в результате обработки по схеме приведенной на рисунке 16, а на рисунке 18 соответствующее распределение напряжений σ_{yy} , действующих перпендикулярно плоскости разделения.

Анализ распределения температуры в образце при воздействии на его поверхность лазерного излучения, хладагента и потока горячего воздуха показывает, что кроме

локальной зоны высоких температур (около 500°C) обусловленных воздействием лазерного излучения, на поверхности существует более широкая зона с температурой в диапазоне от 200 до 250°C , появление которой связано с воздействием на обрабатываемую поверхность потока горячего воздуха. Однако, как видно из рассмотрения рисунка 18, использование дополнительного воздействия потока горячего воздуха, не вносит принципиальных отличий в пространственное распределение зон напряжений растяжения и сжатия, что позволяет сделать вывод о реализации в данном случае механизма формирования и развития разделяющей микротрещины аналогичного УЛТ. Для сравнительного анализа, кроме расчетов термоупругих полей формируемых при совместном воздействии на поверхность материала лазерного излучения, хладагента и потока горячего воздуха, были выполнены аналогичные расчеты для случая соответствующего отсутствию воздействия потока горячего газа (с учетом и без учета влияния предварительного охлаждения в зоне растекающегося хладагента). На рисунке 19 представлены зависимости распределений напряжений σ_{yy} , действующих перпендикулярно плоскости разделения, от расстояния до центров лазерных пучков. Данные графики являются аналогом временной развертки полей напряжений σ_{yy} в фиксированных точках образца. Анализ представленных на этом рисунке зависимостей, показывает, что наиболее значительные отличия между режимом обработки с использованием потока горячего воздуха и без него в пространственном распределении формируемых напряжений наблюдаются в поверхностных слоях материала. Эти отличия в первую очередь заключаются в заметном увеличении величины как сжимающих напряжений в зоне воздействия лазерного излучения (-169 МПа и -121 МПа соответственно), так и растягивающих напряжений в зоне воздействия хладагента (59 МПа и 42 МПа соответственно).



Рисунок 17 - Распределение температуры при воздействии на поверхность материала лазерного излучения, хлалагента и потока горячего воздуха. $^{\circ}\text{C}$

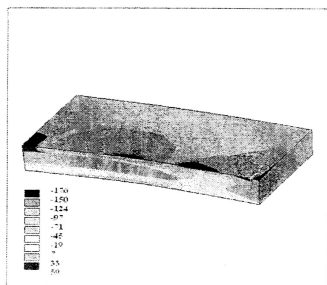
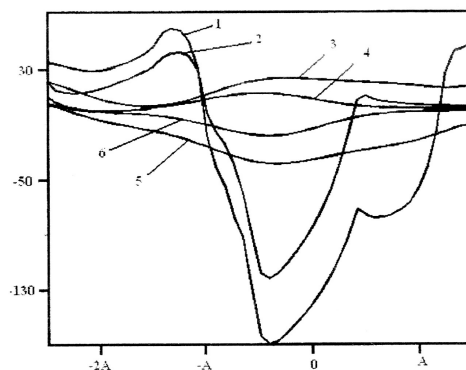


Рисунок 18 - Распределение напряжений σ_{yy} при воздействии на поверхность материала лазерного излучения, хлалагента и потока горячего воздуха. МПа



1 - $Z=0$, 3 - $Z=H/2$, 5 - $Z=-H$ (УЛТ с дополнительным воздействием потока горячего воздуха), 2 - $Z=0$, 4 - $Z=H/2$, 6 - $Z=-H$ (УЛТ без воздействия потока горячего воздуха)

Рисунок 19 - Зависимость напряжений σ_{yy} от расстояния до центра лазерного пучка ($Y=0$ мм), МПа

Такое увеличение величины напряжений объясняется увеличением максимальных температур в зоне обработки с 412 до 509 $^{\circ}\text{C}$. Таким образом, использование дополнительного воздействия потока горячего воздуха обеспечивает стабильность интенсивного охлаждения образца и повышение величины растягивающих напряжений, за счет предварительного нагрева, что в свою очередь повышает устойчивость развития разделяющей микротрещины.

Необходимо отметить, что технический прием, заключающийся в предварительном нагреве траектории лазерного термораскалывания используется, например, в работе [24], однако для этих целей в этой работе применен второй лазер, что, безусловно, экономически нецелесообразно в связи со значительно меньшей стоимостью источников подачи горячего воздуха (так, например, в ходе экспериментальных исследований был использован промышленный фен SKIL 8003).

Кроме этого, обратим внимание на то, что использование потока горячего воздуха, удаляющего пленку растекающегося хладагента, предотвращает нежелательное понижение температуры в зоне не только с не стабильным, но и со значительно менее интенсивным охлаждением. Соответствующие оценочные расчеты, показали, что нежелательное предварительное охлаждение приводит к небольшому (около 7%) уменьшению результирующих напряжений растяжения.

Заключение

Проведенный анализ термоупругих полей, для различных схем обработки силикатных стекол по замкнутым криволинейным траекториям, показал, что использование дополнительного лазерного воздействия с длиной волны 1,06 мкм, обеспечивает возможность внесения существенных изменений в пространственное распределение термоупругих напряжений. В частности существует возможность создания пространственной конфигурации полей напряжений, позволяющей скомпенсировать их асимметрию, возникающую из-за воздействия эллиптического лазерного пучка, ориентированного по касательной к криволинейному контуру обработки. При этом для устранения асимметрии распределения полей напряжений целесообразно использование схемы

двулучевой обработки со смещением пучка YAG – лазера от геометрического центра контура обработки.

Для устранения отклонений микротрещины от контура обработки в месте замыкания контура предложено проводить инициализацию криволинейной замкнутой микротрещины от предварительно нанесенной в радиальном направлении прямолинейной микротрещины. В этом случае в месте замыкания контура лазерной обработки удастся избежать формирования дополнительной зоны значительных по величине напряжений.

Выяснено, что для качественного окончательного разделения в случае круговой микротрещины целесообразно использование кратковременного нагрева обрабатываемой плоскопараллельной пластины кольцевым источником тепла.

Проведены исследования лазерного термораскалывания с использованием различных схем обработки стеклянных изделий трубчатой формы. Показано, что для практического использования целесообразно применение двулучевого способа резки стеклянных трубок по схеме использующей предварительный лазерный нагрев излучением CO₂-лазера и YAG-лазера обрабатываемого материала в течение нескольких оборотов с последующим формированием разделяющей микротрещины при совместном воздействии на контур обработки лазерного излучения и хладагента. В результате применения данной технологии создаются предпосылки для качественного разделения трубчатых стеклоизделий, не требующего принятия мер по окончательному доколу лазерной микротрещины.

Предложена схема УЛТ сочетающая совместное воздействие на поверхность материала лазерного излучения, хладагента и потока горячего воздуха. Такое сочетание обеспечивает значительное повышение стабильности процесса инициализации и развития разделяющей лазерной микротрещины. Указанная выше стабилизация процесса

формирования разделяющей микротрещины в соответствии с результатами численного моделирования, достигается как за счет удаления вещества хладагента из зоны лазерного воздействия, так и за счет предварительного прогрева обрабатываемого материала, что в свою очередь обеспечивает повышение значений растягивающих напряжений в зоне воздействия хладагента.

Библиографический список

1. Шалупаев, С. В. Термоупругие поля, формируемые в твердых телах световыми и звуковыми потоками: дис. ... канд. физ.-мат. наук. - 01.04.05 / С. В. Шалупаев. - Минск, 1987. - 157 с.
2. Установка для лазерной резки хрупких неметаллических материалов: пат. 2164 Респ. Беларусь, С 03В 33/02 / С. В. Шалупаев, Е. Б. Шершнев, Ю. В. Никитюк, А. А. Середа, А. М. Евтухов; заявитель Гом. гос. ун-т им. Ф. Скорины - № 0050085; заявл. 02.21.05; опубл. 09.30.05
3. Способ резки неметаллических материалов: пат. 2024441 Российская федерация, МКИ 5 С03В33/02 / В. С. Кондратенко; заявитель В. С. Кондратенко; заявл. 04.02.92; опубл. 12.15.94
4. Кондратенко, В.С. Особенности процесса лазерного управляемого термораскалывания 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.46-48
5. Способ резки неметаллических материалов и устройство для его осуществления: Международная патентная заявка РСТ/RU94/00276, международная публикация WO 096/20062, МКИ В23К 26/00В; заявитель В. С. Кондратенко; заявл. 23.12.2004; опубл. 04.07.96

6. Method and device for cutting flat work pieces made of a brittle material: pat 7 014 082 США, МКИ С03В 33/09 / Hauer; Dirk , Hoetzel, Berndt; заявитель Schott AG; заявл. 09.15.04; опубл. 03.21.06

7. Мачулка, Г. А. Лазерная обработка стекла / Г. А. Мачулка. - М.: Сов. радио, 1979. - 136 с.

8. Стекло. Справочник / А. А. Аппен [и др.]; под общ. ред. Н. М. Павлушкина. - М.: Стройиздат, 1973. - 487 с.

9. Таблицы физических величин. Справочник/ И. К. Кикоин [и др.]; под общ. ред. И. К. Кикоина. - М.: Атомиздат, 1976.-1008 с.

10. Теплопроводность твердых тел: Справочник / А. С. Охотский [и др.]; под общ. ред. А. С. Охотского. - М.: Энергоатомиздат, 1984.-320 с.

11. Богуславский, И. А. Высокопрочные закаленные стекла / И. А. Богуславский. - М.: Издательство литературы по строительству, 1969.-208 с

12. Борода, В. И. Термораскалывание стеклянных труб с помощью лазерного излучения диапазона 10,6 мкм/ И. В. Борода [и др.] // Электронная промышленность - 1976. - № 1. - С. 74-81

13. Шершнев, Е. Б. Разработка и внедрение новых эффективных процессов в производство стеклоизделий с применением лазерной технологии: дис. канд. техн. наук. 05.17.11 / Е. Б. Шершнев.- М. 1990. - 158 с

14. Кондратенко, В.С. Термораскалывание стеклянных трубок под действием лазерного излучения. Электронная техника/ В. С. Кондратенко, А. С. Танасейчук, Е. Б. Шершнев // Электронная техника. Сер. 11. Лазерная техника и оптоэлектроника.- 1986. - № 4. - С.30-37

15. Способ лазерной резки трубчатых заготовок из стекла: пат. 1721995 СССР, МКИ С03В33/08/ Дутка И.И., Коваленко В.С., Матвишин Г.Л.; заявитель Львовское конструкторское бюро "Эротрон"; заявл. 1989.06.20; опубл. 1996.02.27

16. Способ резки стеклянных трубок: пат. 857025 СССР, МКИ 5 С03В33/06/ В. С. Кондратенко, А. С. Танасейчук; заявитель предприятие П/Я Р-6229; заявл. 1979.12.19; опубл. 1981.08.23

17. Обработка методом лазерного термораскалывания керамических и стеклянных изделий трубчатой формы / С. В. Шалупаев [и др.] // Ceramics. Polish ceramic bulletin - 2003. - Vol. 79. - P 115-120.

18. Установка для лазерной резки трубок из хрупких неметаллических материалов: пат. 2274 Респ. Беларусь, С 03В 33/02/ С. В. Шалупаев, Е. Б. Шершнев, Ю. В. Никитюк, А. А. Середа; заявитель Гом. гос. ун-т им. Ф. Скорины - №и 20050188; заявл. 04.04.05; опубл. 12.30.05

19. Лазерная резка керамических материалов с металлизированной поверхностью / С. В. Шалупаев [и др.] // «Оптический журнал» - 2001. - том 68, № 10. - С. 41- 44.

20. Анализ термоупругих полей, формируемых при лазерном термораскалывании металлокерамических структур / С. В. Шалупаев [и др.] // Металлообработка - 2005. - №2(26) - С 33-36

21. Двулучевая лазерная обработка толстых керамических пластин / С. В. Шалупаев [и др.] // Ceramics. Polish ceramic bulletin - 2005. - Vol. 89. - P 115-120.

22. Двулучевое лазерное термораскалывание хрупких неметаллических материалов / С. В. Шалупаев [и др.] // «Оптический журнал» - 2005. - том 73, № 5. - С. 62- 66.

23. . Simulation of glass cutting with an impinging hot air jet/ A. R Shahani, M. Seyyedian // International Journal of Solids and Structures. - 2004. - Vol. 41. - P 1313-1329

24. Method and apparatus for separating non-metallic materials: пат 6660963 США, МКИ В23К 26/14/ Hoekstra Brian, Flannigan Roger, Wegerif Daniel; заявитель Applied Photonics Inc.; заявл. 07.16.02; опубл. 12.0 9.03

Научное издание

Шалупаев Сергей Викентьевич
Никитюк Юрий Валерьевич

Термоупругие поля, формируемые в хрупких неметаллических материалах, при лазерном термораскалывании

Препринт учреждения образования «Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины».

Лицензия № 02330/0133208 от 30.04.04.

Подписано в печать 10.05.07. Формат 60х84 1/16.

Бумага писчая №1. Гарнитура «Таймс». Усл.п.л. 2,67.

Уч.-изд.л. 2,87. Тираж 20 экз. Заказ № 25

Отпечатано с оригинала-макета на ризографе учреждения образования

«Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины»

Лицензия № 02330/0056611 от 16.02.04.

246019, г. Гомель, ул. Советская, 104