

ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА И ТЕХНИКА

УДК 621.791.78

ЛАЗЕРНОЕ ТЕРМОРАСКАЛЫВАНИЕ ХРУПКИХ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ПО ЗАМКНУТЫМ КРИВОЛИНЕЙНЫМ КОНТУРАМ

© 2008 г. С. В. Шалупаев, канд. физ.-мат. наук; Ю. В. Никитюк; А. А. Серeda

Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины, г. Гомель, Республика Беларусь

E-mail: shalupaev@gsu.unibel.by, nikitjuk@gsu.unibel.by, sereda@gsu.unibel.by

В работе приведены результаты анализа процессов лазерного термораскалывания хрупких неметаллических материалов по замкнутым криволинейным контурам. Описаны разработанные авторами технические приемы, обеспечивающие качественное улучшение технологии, существующей в настоящее время. Выполнен расчет термоупругих полей, формируемых в обрабатываемом материале в результате его обработки по круговому контуру.

Коды OCIS: 350.3390.

Поступила в редакцию 22.05.2007.

Постоянное повышение требований к качеству прецизионных изделий, связанное с миниатюризацией современного оборудования, вызывает необходимость разработки новых лазерных методов высокоточного разделения хрупких неметаллических материалов и увеличения эффективности уже существующих технологий лазерного термораскалывания.

Первые сообщения по данной тематике датируются концом 70-х годов [1]. Широкое распространение методы лазерного термораскалывания хрупких неметаллических материалов получили в 80-е годы [2, 3].

В настоящее время одним из наиболее эффективных методов высокоточного 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 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 [4, 5].

В ряде случаев для получения изделий соответствующей формы возникает необходимость резки хрупких неметаллических материалов по замкнутым криволинейным контурам (примером может служить изготовление заготовок для производства автомобильных зеркал). При этом известна возможность применения для этих целей управляемого лазерного термораскалывания (УЛТ) [4].

Анализ работ по данной тематике и собственные исследования показали наличие у технологии УЛТ целого ряда существенных недостатков, являющихся причиной низкой точности обработки и низкого качества окончательных изделий. 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 либо 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 5-координатной системы управления. Результат, достигаемый при использовании данной установки, заключается в устранении отклонений зоны воздействия хладагента от линии движения лазерного пучка во время обработки за счет независимого перемещения форсунки подачи хладагента [6].

Необходимо отметить, что описанное выше техническое решение является необходимым, но не достаточным условием для уменьшения отклонений разделяющей микротрещины от линии обработки. Дело в том, что в случае резки по криволинейному контуру симметрия термоупругих напряжений, ха-

ракетная 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 [4]. Однако более существенной причиной является использование лазерных пучков эллиптической формы, ориентированных по касательной к криволинейной траектории движения. Использование такой формы лазерных пучков (см., например, [4]) обеспечивает оптимальные (по сравнению с пучками круглой формы) условия для формирования термоупругих напряжений при реализации прямолинейного термораскалывания. Использование эллиптических пучков для резки по криволинейному контуру при их ориентации по касательной к линии обработки приводит к тому, что края пучка не совмещаются с линией реза, что вызывает несимметричный нагрев материала. Такой несимметричный нагрев определяет отклонение трещины 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.

Для устранения нежелательных отклонений микротрещины 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 (см. рис. 1).

На рис. 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 AB обозначен предварительный надрез на поверхности материала, наносимый перпендикулярно касательной к линии реза. Точкой O обозначено начало контура обработки.

Для выяснения особенностей двухлучевой схемы термораскалывания хрупких неметаллических материалов по замкнутым криволинейным траекториям было выполнено конечно-элементное моделирование этого процесса [7], результаты которого приведены ниже (см. рис. 2–4).

При расчетах полагали, что плотность стекла ρ_0 постоянна и равна 2450 кг/м^3 . Модуль упругости, коэффициент Пуассона и коэффициент температур-

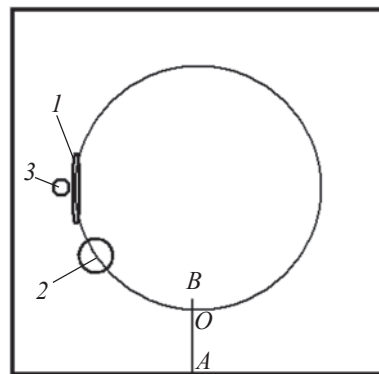


Рис. 1. Схема взаимного расположения зон воздействия лазерных пучков и хладагента. (Пояснения см. в тексте.)

ного расширения принимались равными соответственно $E = 68 \text{ ГПа}$, $\nu = 0,221$, $\alpha_T = 89 \times 10^{-7} (1/^\circ\text{C})$. Были учтены зависимости коэффициентов теплопроводности и удельной теплоемкости от температуры. В соответствии с [8, 9] при расчетах считалось, что теплопроводность стекла с повышением температуры от нормальной до температуры стеклования увеличивается примерно в 2 раза, а удельная теплоемкость примерно в 1,5 раза. Принималось, что используемые параметры подачи воздушно-водяной смеси обеспечат охлаждение поверхности стекла с коэффициентом теплоотдачи, равным $6800 \text{ Вт/м}^2\text{K}$ [10].

Расчеты проводились для пластины с размерами $50 \times 25 \times 4 \text{ мм}$. 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 $A = 14 \times 10^{-3} \text{ м}$, малая ось $B = 2 \times 10^{-3} \text{ м}$ для пучка с длиной волны излучения $\lambda = 10,6 \text{ мкм}$ и мощностью излучения $P = 30 \text{ Вт}$; радиус пятна излучения YAG-лазера $R = 1 \times 10^{-3} \text{ м}$ и мощность излучения $P_0 = 40 \text{ Вт}$.

Расчеты были выполнены для трех схем различных вариантов обработки по криволинейному контуру:

- обычная однолучевая схема управляемого термораскалывания [4],
- двухлучевая схема со смещением на 1 мм в радиальном направлении к геометрическому центру контура обработки луча YAG-лазера,
- двухлучевая схема со смещением на 1 мм в радиальном направлении от геометрического центра контура обработки луча YAG-лазера.

Отметим, что при выбранных режимах обработки максимальные температуры во всех четырех случаях не превышают допустимого значения, соответ-

ствующего температуре стеклования силикатного стекла.

На рис. 2 представлены зависимости напряжений σ_r , действующих перпендикулярно касательной к линии формирования круговой микротрещины, от радиальной координаты R на различных глубинах в случае УЛТ. Из рассмотрения данного рисунка видно, что для случая 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 в эксперименте.

Представленные на рис. 3 аналогичные зависимости напряжений σ_r , действующих перпендикулярно линии формирования круговой микротрещины, для случая двухлучевой обработки при смещении в радиальном направлении на 1 мм пучка YAG-лазера к центру контура обработки показывают, что использование данных схем размещения пучков обеспечивает заметное увеличение максимальных значений растягивающих напряжений (с 22 МПа при однолучевой схеме, до 33 МПа при использовании 2-й схемы обработки). Однако такое размещение лазерных пучков приводит к еще большей несимметричности распределения полей напряжений.

Анализ представленных на рис. 4 зависимостей напряжений σ_r , действующих перпендикулярно касательной к линии формирования круговой микротрещины, для случая 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. В этом случае сжимающие напряжения слева и справа от линии разделения практически совпадают по своим значениям. Кроме этого, максимальные значения как растягивающих, так и сжимающих напряжений находятся в одной вертикальной плоскости. Именно такая схема расположения лазерных пучков и хладагента в 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

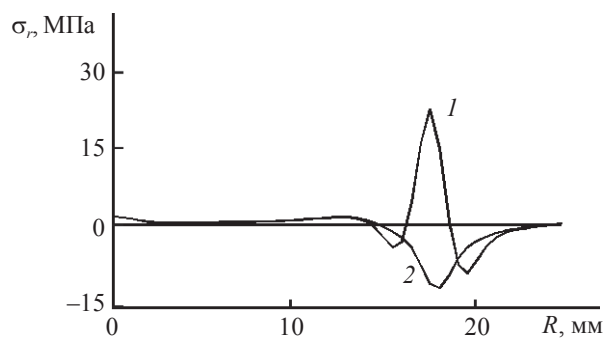


Рис. 2. Зависимости напряжения σ_r от радиальной координаты (однолучевая схема термораскалывания с использованием эллиптического пучка CO_2 -лазера). 1 – $z = 0$, 2 – $z = 0,25$ мм.

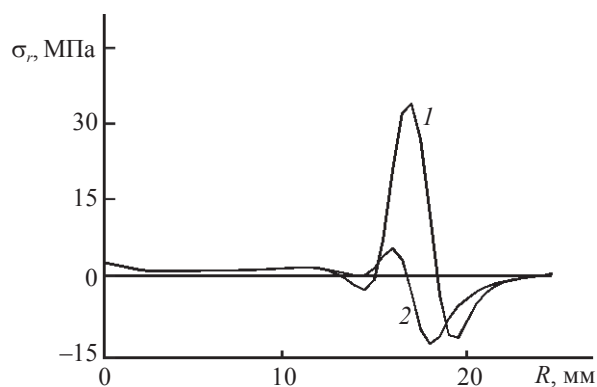


Рис. 3. Зависимости напряжения σ_r от радиальной координаты R (двухлучевая схема со смещением на 1 мм в радиальном направлении к геометрическому центру контура обработки луча YAG-лазера). 1 – $z = 0$, 2 – $z = 0,25$ мм.

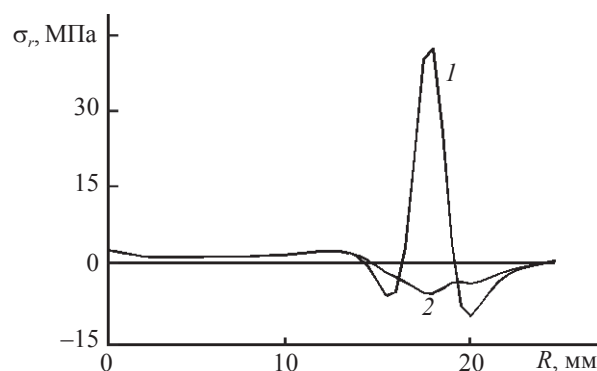


Рис. 4. Зависимости напряжения σ_r от радиальной координаты R (двухлучевая схема со смещением на 1 мм в радиальном направлении от геометрического центра контура обработки луча YAG-лазера). 1 – $z = 0$, 2 – $z = 0,25$ мм.

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 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 напряжений у вершины “хвоста” криволинейной микротрещины.

Кроме того, возникают существенные трудности при докалывании нанесенных лазерных микротрещин при получении конечного изделия в случае выбора контура обработки в виде замкнутой криволинейной траектории. В ходе проведенных исследований было определено, 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 докалывания круговой микротрещины, полученной в стеклянной плоскопараллельной пластине методом лазерного термораскалывания, были выполнены расчеты термоупругих полей, формируемых кольцевым источником тепла в обрабатываемом материале. На рис. 5 представлены результаты расчета радиальных напряжений σ_r , действующих перпендикулярно предварительно нанесенной круговой микротрещине. Анализ зависимостей напряжений σ_r от радиальной координаты на различных глубинах показывает, что на нагреваемой поверхности в зоне действия кольцевого теплового источника действуют значительные (около 150 МПа) сжимающие напряжения. На противоположной поверх-

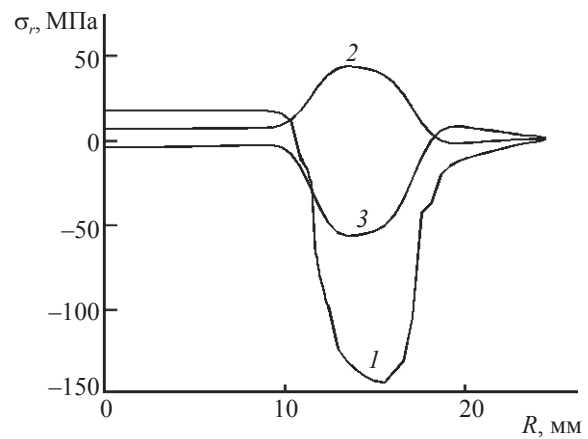


Рис. 5. Зависимости напряжения σ_r от радиальной координаты. 1 – на нагреваемой поверхности ($z = 0$), 2 – в середине пластины ($z = 1$ мм), 3 – на стороне с нанесенной микротрещиной ($z = 2$ мм).

ности находится также область сжимающих напряжений порядка 50 МПа.

При этом во внутренних слоях материала формируется область растягивающих напряжений, значений 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.

Заключение

В ходе проведенных исследований выявлены условия лазерного термораскалывания хрупких неметаллических материалов по криволинейным траекториям, выполнение которых обеспечивает устранение отклонения формируемой микротрещины от линии обработки:

- точное совмещение положения зоны воздействия хладагента на поверхность материала с линией воздействия лазерного излучения;
- использование дополнительного объемного лазерного нагрева материала, выполняемого со смещением от линии реза в радиальном направлении от центра к краю контура обработки;
- нанесение на поверхность материала предварительного надреза, перпендикулярного к контуру обработки;
- применение кратковременного интенсивного нагрева источником тепла, имеющим форму контура обработки, для докола лазерно-индуцированной микротрещины.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Lumley R.M.* Controlled separation of brittle materials using a laser // *Am. Ceram. Soc. Bull.* 1969. V. 48. P. 850–854.
2. *Мачулка Г.А.* Лазерная обработка стекла. М.: Сов. радио, 1979. 136 с.
3. *Бокуть Б.В., Кондратенко В.С., Шалунаев С.В. и др.* Термоупругие поля в твердых телах при их обработке лазерными пучками специальной геометрии // Минск: Препринт Институт физики АН БССР, 1987. 59 с.
4. *Кондратенко В.С.* Способ резки неметаллических материалов // Патент России. № 2024441.1994.
5. *Шалунаев С.В., Шершнев Е.Б., Сердюков А.Н., Никитюк Ю.В.* Лазерное термораскалывание диэлектрических материалов // *CERAMICS. POLISH CERAMIC BULLETIN.* Krakow. 2001. V. 65. P. 75–83.
6. *Шалунаев С.В., Шершнев Е.Б., Никитюк Ю.В., Середя А.А.* Установка для лазерного термораскалывания хрупких неметаллических материалов // Патент Республики Беларусь № 2164. 2005.
7. *Шабров Н.Н.* Метод конечных элементов в расчетах деталей тепловых двигателей. Л.: Машиностроение, 1983. 212 с.
8. *Кикоин И.К., Аверин В.Г., Аронзон Б.А.* Таблицы физических величин: Справочник / Под ред. Кикоина И.К. М.: Атомиздат, 1976. 1008 с.
9. *Стекло.* Справочник / Под ред. Павлушкина Н.М. М.: Стройиздат, 1973. 487 с.
10. *Богуславский И.А.* Высокопрочные закаленные стекла. М.: Изд. лит. по строительству, 1969. 208 с.