

С. В. Шалупаев, Е. Б. Шершнев, Ю. В. Никитюк, А. А. Серeda

ДВУХЛУЧЕВАЯ ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА
ХРУПКИХ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Перспективность использования процессов лазерного термораскалывания для прецизионной обработки стекла и других хрупких неметаллических материалов не вызывает сомнения. В настоящее время разработан целый ряд методов высокоточной лазерной обработки хрупких неметаллических материалов, к которым относятся управляемое лазерное термораскалывание (УЛТ) [1–4], параллельное и асимметричное лазерные термораскалывания [5–9], термораскалывания изделий трубчатой формы [10]. Необходимо отметить, что во всех выше перечисленных случаях в качестве технологического инструмента используется излучение CO_2 -лазера, длина волны которого лежит вне области прозрачности большинства хрупких неметаллических материалов.

Применение для высокоточного разделения хрупких неметаллических материалов (в первую очередь различных стекол) излучения твердотельных лазеров, работающих на длине волны 1.06 мкм, не получило широкого распространения, так как поглощение в образце излучения с этой длиной волны мало, что является причиной неэффективности такой обработки [11].

Наиболее эффективным методом резки хрупких неметаллических материалов является метод УЛТ, основной отличительной особенностью которого является совместное воздействие на поверхность материала лазерного излучения с длиной волны 10.6 мкм и хладагента, подаваемого в зону обработки в виде воздушно-водяной смеси. К преимуществам УЛТ следует отнести высокую точность разделения, его безотходность, высокую скорость и низкую энергоемкость, нулевую ширину реза и повышение примерно в два раза механической прочности получаемых изделий, по сравнению с другими традиционными способами резки. Однако необходимо отметить, что у данной технологии есть недостатки, затрудняющие ее широкое применение. Это небольшая по отношению к толщине материала глубина разделяющей микротрещины при использовании лазерного излучения с длиной волны 10.6 мкм, которое поглощается в поверхностном слое обрабатываемого материала. Таким образом, представляется актуальной задача разработки метода высокоточной обработки хрупких неметаллических материалов, сочетающего основные преимущества процесса УЛТ и обеспечивающего возможность корректировки глубины проникновения разделяющей микротрещины.

В данной работе предложен двухлучевой способ лазерного термораскалывания хрупких неметаллических материалов, сочетающий применение



Рис. 1. Лазерный технологический комплекс
YAG-ЛАЗЕР

Длина волны излучения, мкм	1.064
Энергия в импульсе, Дж	1–30
Длительность импульса излучения, мс	0.5–8
Частота повторения импульсов, Гц	1–300
СО ₂ -лазер	
Длина волны излучения, мкм	106
Средняя мощность излучения, Вт	75
Координатная система	
Максимальное перемещение по осям X, Y, мм	
Максимальная скорость перемещения, мм/с	150
Точность позиционирования, ММ	0.05

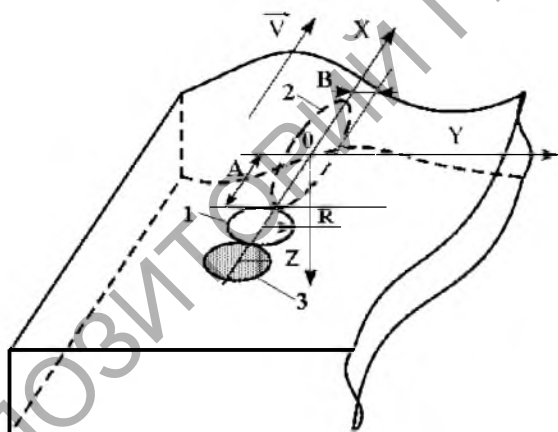


Рис. 2. Схема расположения лазерных пучков и хладагента в плоскости обработки.

В качестве качественного инструмента излучения твердотельного YAG-лазера с длиной волны 10.6 мкм и излучения СО₂-лазера с длиной волны 10.6 мкм.

Экспериментальные исследования были выполнены на созданном авторами лазерном технологическом комплексе [12–13], в состав которого включены модульные конструкции излучателя на YAG и СО₂-лазера, объединенные в оптическую систему сведения и фокусировки излучения. На рис. 1 представлен общий вид разработанного лазерного технологического комплекса. На

рис. 2 приведена схема расположения лазерных пучков и хладагента в плоскости обработки. Позицией 1 отмечен лазерный пучок с длиной волны $\lambda = 1.06$ мкм, позицией 2 – лазерный пучок с длиной волны $\lambda = 10.6$ мкм, позицией 3 отмечено место подачи хладагента.

В качестве образцов для исследования режимов двухлучевого термораскалывания были использованы пластины из листового стекла вертикальной вытяжки толщиной от 0.7 до 6 мм. Термораскалывание стеклянных пластин, в соответствии с приведенной на рис. 2

схемой, выполнялось следующим способом. Обрабатываемое изделие перемещалось с помощью координатного устройства относительно неподвижно расположенных лазерных пучков 1, 2 и форсунки, обеспечивающей подачу хладагента 3, в направлении указанном горизонтальной стрелкой. Лазерный пучок 1, проходя через объем стекла, частично в нем поглощается, что приводит к объемному нагреву образца. Излучение пучка 2, поглощаясь в поверхностном слое, также осуществляет нагрев стеклянной пластины. Далее, нагретая лазерными пучками поверхность подвергается резкому охлаждению, попадая в область подачи хладагента. Таким образом, стеклянную пластину нагревает локальный поверхностный источник тепла в месте воздействия излучения CO₂-лазера и объемный источник, сформированный лазерным излучением с длиной волны 1,06 мкм, распределение интенсивности которого по глубине подчиняется закону Ламберта-Бугера-Бера. Полученные экспериментальные результаты доказывают возможность получения разделяющей микротрещины большей глубины, в случае применения двухлучевой технологии и как следствие обеспечение повышения качества и точности обработки за счет устранения искривлений по линии разделения материала при механическом докальвании образцов.

В соответствии с приведенной выше моделью процесса двухлучевого разделения, было выполнено в квазистатической постановке конечно-элементное решение задачи о распределении термоупругих полей в образце конечной толщины [14–16]. Для определения термоупругих полей, возникающих при лазерном термораскалывании образца, вначале выполнялся расчёт полей температур. Для этого находилось решение вариационной задачи о минимуме функционала $\Phi(T)$, связанного с физическим процессом теплопроводности и обладающего тем свойством, что любая минимизирующая его функция удовлетворяет как исходному дифференциальному уравнению теплопроводности, так и граничным условиям, определяющим воздействие движущихся лазерных пучков при одновременном учете объемного поглощения излучения с длиной волны 1,06 мкм и интенсивной теплоотдачи с поверхности в месте подачи хладагента. При этом для сведения непрерывной вариационной задачи к дискретной, рассматриваемая область разбивалась на конечное число шестигранных элементов второго порядка, внутри каждого из которых распределение температуры представлялось полиномом. Неизвестными в этой части задачи термоупругости являются значения температуры T в узлах, которые определяются для каждого элемента в виде $T = [N^e]\{T\}$, где $[N^e]$ – матрица определяющая зависимость функций формы от координат, а столбец $\{T\}$ – содержит узловые значения функции T .

Как известно, решение конечно элементной задачи о нахождении термоупругих напряжений, формируемых в результате комплексного воздействия лазерного излучения и хладагента на материал, связано с

минимизацией интегральной величины, зависящей от работы напряжений и внешней приложенной нагрузки [17], которая в случае моделирования двухлучевой лазерной обработки определяется расширением материала в зоне воздействия лазерного излучения и сжатием в зоне подачи хладагента. В расчетной программе была применена формулировка метода конечных элементов задачи термоупругости в перемещениях, требующая минимизации потенциальной энергии системы, при этом после определения перемещений выполнялось вычисление компонент тензоров деформаций и напряжений.

Для расчетов полагалось, что плотность стекла постоянна и равна $\rho = 2450 \text{ кг/м}^3$. Были учтены зависимости коэффициентов теплопроводности и удельной теплоемкости от температуры [18–19]. Модуль упругости, коэффициент Пуассона и коэффициент температурного расширения полагались равными $E = 68 \text{ ГПа}$, $\nu = 0.221$, $\alpha = 89 \cdot 10^{-7} \text{ (1/}^\circ\text{C)}$. Расчеты проводились для следующих параметров лазерных пучков: большая ось $A = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, 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 $P_0 = 20 \text{ Вт}$. Расчеты проводились для пластины с геометрическими размерами $20 \times 10 \times 5 \text{ мм}$.

На рис. 3 представлены результаты расчета температурных полей, формируемых в исследуемом образце в результате двухлучевой обработки, а на рис. 4 – распределение напряжений σ_{yy} , действующих перпендикулярно плоскости разделения. Для проведения сравнительного анализа были выполнены расчеты распределения термоупругих полей для случая реализации однолучевого процесса УЛТ (рис. 5, 6) и для случая отдельного воздействия YAG-лазера (рис. 7, 8), при этом для расчетов использовались те же значения технологических параметров, что и для случая двухлучевой обработки.

Основным критерием оптимизации технологических параметров на основании информации о температурных полях является величина максимальных значений температуры в зоне обработки, которая определяет хрупкий механизм разрушения образца. В случае обработки силикатных стекол в качестве верхнего предела допустимых температур служит значение температуры стеклования (для листового стекла вертикальной вытяжки $516 \text{ }^\circ\text{C}$). Как видно из рис. 3, 5, 7 это условие при выбранных параметрах обработки удовлетворяется во всех трех случаях. При этом максимальных значений температура достигает в случае двухлучевого воздействия, а наименьшим значением максимальной температуры характеризуется воздействие на обрабатываемый материал излучения YAG-лазера.

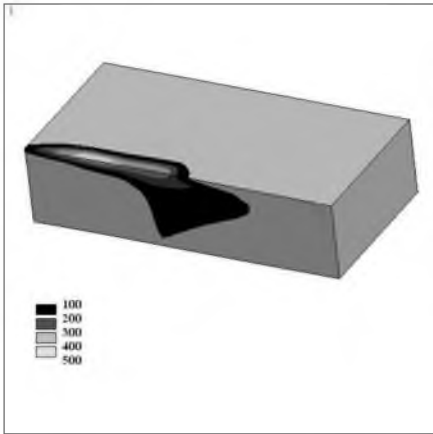


Рис. 3. Распределение температуры, °С

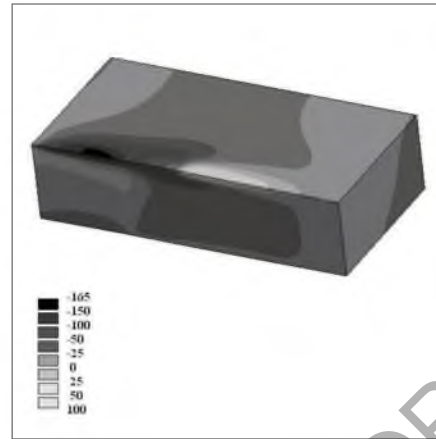


Рис. 4. Распределение напряжений σ_{yy} , МПа

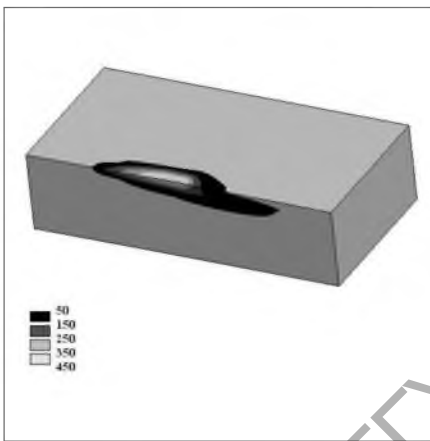


Рис. 5. Распределение температуры, °С

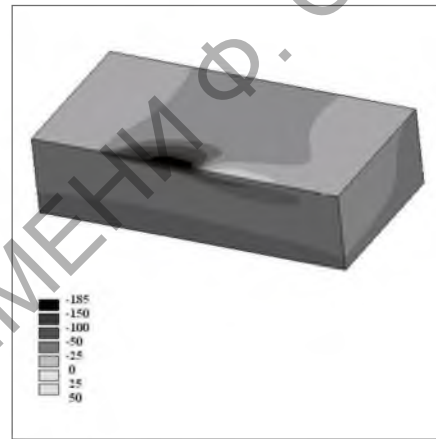


Рис. 6. Распределение напряжений σ_{yy} , МПа

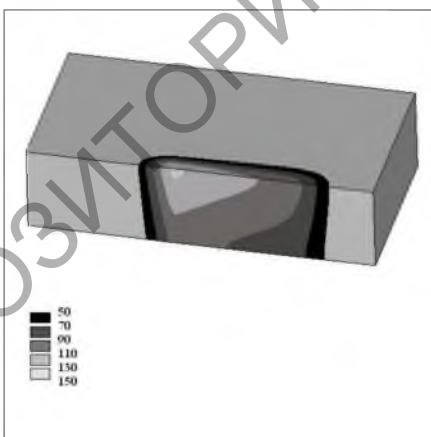


Рис. 7. Распределение температуры, °С

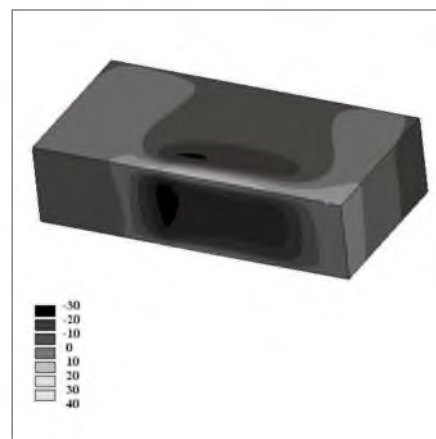


Рис. 8. Распределение напряжений σ_{yy} , МПа

Из сравнительного анализа распределения полей напряжений σ_{yy} приведенных на рис. 4 и 6, следует, что в обоих случаях инициирование разделяющей микротрещины происходит в поверхностных слоях материала от трещиноподобного дефекта микроструктуры в зоне растягивающих напряжений, сформированных за счет подачи хладагента. Далее начальная микротрещина начинает свое движение и распространяется до зоны сжимающих напряжений, сформированных лазерным излучением. После чего нестационарный рост трещины прекращается, и дальнейшее ее движение определяется изменением пространственного распределения зон растягивающих и сжимающих напряжений, обусловленных взаимным перемещением обрабатываемого материала, лазерного излучения и хладагента. Однако в случае двухлучевой обработки область сжимающих напряжений располагается в более глубоких слоях материала. Так как распределение сжимающих напряжений в объеме образца определяет форму и глубину развития микротрещины, инициализация и интенсивное развитие которой происходит в зоне растягивающих напряжений, сформированных в области подачи хладагента, то применение двухлучевой технологии обеспечивает увеличение глубины разделяющей микротрещины, наблюдаемое на эксперименте. Кроме этого необходимо отметить большие по величине значения растягивающих напряжений в случае двухлучевой обработки, что обеспечивает большую стабильность процесса нанесения микротрещины.

Из анализа полей напряжений, формируемых при отдельном воздействии на материал YAG-лазера, следует, что при достаточной плотности мощности излучения, несмотря на слабое поглощение излучения, в материале формируются термоупругие напряжения, величина которых может обеспечить реализацию процесса лазерного термораскалывания. Однако, как видно из рис. 8, пространственное распределение напряжений σ_{yy} приводит к реализации режима сквозного термораскалывания, который имеет ряд существенных недостатков, сужающих возможность его промышленного применения.

Таким образом, разработанная технология двухлучевого термораскалывания хрупких неметаллических материалов, отличающаяся от УЛТ использованием лазера с длиной волны, соответствующей объемному поглощению материала, обеспечивает возможность формирования заданного распределения полей термоупругих напряжений не только в тонком поверхностном слое, но и по всей глубине обрабатываемого материала. Это, в свою очередь, обеспечивает повышение качества и точность обработки, значительно уменьшает отклонения от линии разделения материала за счет увеличения глубины разделяющей микротрещины.

Литература

1. Емельянов В. А., Шалупаев С. В., Шершинёв Е. Б. и др. Динамика формирования полей температурных напряжений в процессе лазерного управляемого термораскалывания // Лазерные новости. 1995. С. 14–17.
2. Бокуть Б. В., Кондратенко В. С., Шалупаев С. В. и др. Термоупругие поля в твердых телах при их обработке лазерными пучками специальной геометрии // Мн.: препринт Институт физики АН БССР, 1987. 59 с.
3. Емельянов В. А., Кондратенко В. С., Шалупаев С. В. и др. Анализ особенностей лазерного термораскалывания кварцевого стекла // Электронная техника. Сер. Лазерная техника и оптоэлектроника. 1991. № 3 (59) С. 90–92.
4. Shalupaev S. V., Semchenko A. V., Nikitjuk Y. V. Silica gel glasses after laser radiation // Material Science. 2003. Vol. 21, № 4, P 495–501.
5. Шалупаев С. В., Шершинев Е. Б., Никитюк Ю. В. и др. Лазерное термораскалывание диэлектрических материалов // Ceramics. Polish ceramic bulletin. 2001. Vol. 65. P. 75–83.
6. Shalupaev S. V., Ranachowski J., Serdzyukov A. N. и др. Forming dynamics of temperature stress fields in the process of parallel thermosplitting // Instytut Podstawowych Problemow Techniki Polskiej AN. Warszawa. 1996. P 12–17.
7. Емельянов В. А., Шалупаев С. В., Шершинёв Е. Б. и др. Лазерное параллельное термораскалывание хрупких неметаллических материалов // Лазерные новости. 1996. № 3. С. 91–95.
8. Шалупаев С. В., Шершинев Е. Б., Никитюк Ю. В. Лазерное разделение стекла в плоскости, параллельной поверхности // Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины. 2001. №6 (9). С. 114 – 117.
9. Шалупаев С. В., Шершинев Е. Б., Никитюк Ю. В. Комбинированное лазерное термораскалывание // Лазерная физика и спектроскопия: Материалы IV Междунар. конф. В 2 ч. Ч. 2. Гродно: ГрГУ, 1999. С. 177–179.
10. Шалупаев С. В., Шершинев Е. Б., Никитюк Ю. В. и др. Обработка методом лазерного термораскалывания керамических и стеклянных изделий трубчатой формы // Ceramics. Polish ceramic bulletin. Vol. 79. 2003. P. 115–120.
11. Мачулка Г. А. Лазерная обработка стекла. М.: Сов. радио, 1979. 136 с.
12. Шалупаев С. В., Шершинев Е. Б., Никитюк Ю. В. Лазерная двухлучевая обработка материалов в производстве изделий электронной техники // INTERMATIC-2004: Материалы международной конференции. М.: МИРЭА-ЦНИИ «Электроника», 2004. Ч. 1. С. 133–135.
13. Пат 683 РБ, МПК С 03 В Установка для лазерного термораскалывания хрупких неметаллических материалов / С. В. Шалупаев, Е. Б. Шершинев, Ю. В. Никитюк. Заявка № 20010292; Заявл. 10.12.2001.; Опубл. 30.09.2002.
14. Новацкий В. Теория упругости. М.: Мир, 1975. 872 с.
15. Подстригач Я. С., Ломакин В. А., Коляно Ю. М. Термоупругость тел неоднородной структуры. М.: Наука, 1984. 386 с.
16. Шабров Н. Н. Метод конечных элементов в расчетах деталей тепловых двигателей. Л.: Машиностроение, 1983. 212 с.
17. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. М.: Мир, 1979. 392 с.
18. Кикоин И. К., Аверин В. Г., Аронзон Б. А. Таблицы физических величин: Справочник // Под ред. И. К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976. 1008 с.
19. Охотский А. С., Боровикова Р. П., Нечаева Т. В. и др. Теплопроводность твердых тел: Справочник // Под ред. А. С. Охотского. М.: Энергоатомиздат, 1984. 320 с.