

Моделирование процесса двулучевого асимметричного термораскалывания хрупких неметаллических материалов

А. Н. СЕРДЮКОВ, С. В. ШАЛУПАЕВ, Ю. В. НИКИТЮК, А. А. СЕРЕДА

Выполнено конечно-элементное моделирование процесса асимметричного двулучевого лазерного термораскалывания силикатных стекол в рамках теории термоупругости. Показано, что смещение пучка YAG-лазера в сторону от линии обработки обеспечивает асимметричное распределение полей термоупругих напряжений относительно линии обработки, что приводит к формированию наклонной к поверхности материала трещины.

Ключевые слова: лазер, термораскалывание, трещина, асимметрия.

There has been done the finite element modelling of the asymmetric two-beam laser thermosplitting of silicate glass in the frames of thermoelasticity. It is shown that the displacement of YAG-laser beam in the direction of the processing line provides an asymmetric field distribution of thermoelastic stresses relative to the processing line, which leads to the formation of the incline to the surface of the crack material.

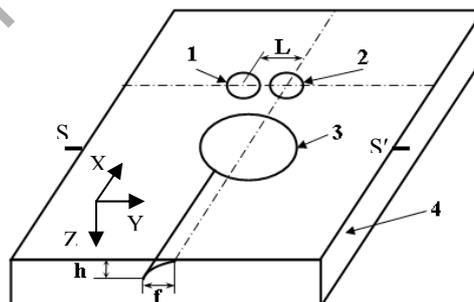
Keywords: laser, thermosplitting, crack, asymmetry.

Введение

Ранее авторами в работе [1] был предложен двулучевой лазерный метод формирования скругленных кромок в стеклоизделиях, схема которого представлена на рисунке 1. Там же приведены экспериментальные исследования данного метода. В соответствии со схемой эксперимента, на поверхность плоскопараллельной стеклянной пластины одновременно воздействует пучок CO₂-лазера с длиной волны $\lambda = 10.6$ мкм, пучок YAG-лазера с длиной волны $\lambda = 1.06$ мкм и хладагент в виде мелкодисперсной воздушно-водяной смеси с поперечными сечениями в виде круга. При этом пучок CO₂-лазера и хладагент на поверхности обрабатываемой пластины располагаются на линии обработки, а центр пучка YAG-лазера смещается относительно центра пучка CO₂-лазера перпендикулярно линии обработки на расстояние L. Оба лазера работают в непрерывном режиме.

Было показано, что зарождение трещины происходит на поверхности обрабатываемого материала в области подачи хладагента на линии воздействия пучка CO₂-лазера. Далее трещина распространяется вглубь материала, отклоняясь в сторону линии воздействия пучка YAG-лазера, и на различной для каждого режима обработки глубине прекращает свое развитие. Общий вид профиля торцов разделенного образца представлен на рисунке 2. При этом на торце одной части разделенного образца образуется фаска, а на торце другой части – выступ.

В данной работе для выяснения механизма формирования скругленных кромок выполнено моделирование процесса двулучевого асимметричного лазерного термораскалывания.



1 – YAG-лазер; 2 – CO₂-лазер; 3 – хладагент; 4 – стеклянная пластина

Рисунок 1 – Схема расположения лазерных пучков и хладагента

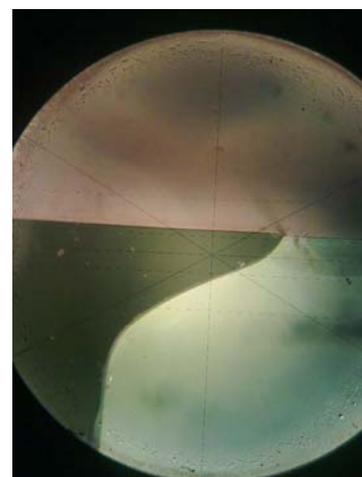


Рисунок 2 – Профиль торца разделенного образца

1 Постановка задачи

Моделирование процессов лазерного термораскалывания основано на использовании средств термо-прочностного анализа, применимых для проведения прочностного анализа на основе результатов решения задачи теплопроводности. При этом тепловой и прочностной анализ выполняются последовательно друг за другом, что соответствует методике решения несвязанной задачи термоупругости в квазистатической постановке.

В соответствии с этим, на первом этапе конечно-элементного моделирования процесса двулучевого асимметричного лазерного термораскалывания выполнен расчет распределения температурных полей внутри образца, а затем по полученным температурным полям выполнен расчет полей термоупругих напряжений.

Пучок CO_2 -лазера, энергия которого поглощается в тонком поверхностном слое материала, моделируется как круглый поверхностный тепловой источник диаметром 3 мм с мощностью 20 Вт. Пучок YAG-лазера, энергия которого поглощается в объеме образца, моделируется как цилиндрический объемный тепловой источник диаметром 2 мм с мощностью 80 Вт, распределение интенсивности которого по глубине подчиняется закону Ламберта-Бугера-Бера. Коэффициент поглощения был рассчитан из экспериментальных данных по замерам мощности излучения до попадания на поверхность пластины и после прохождения пластин заданной толщины, выполненных при помощи измерителя мощности ИМО-2М. Было получено, что коэффициент поглощения равен $86.0 \pm 1 \text{ м}^{-1}$.

В качестве образца выбрана пластина из силикатного стекла толщиной 4 мм и геометрическими размерами 20x20 мм. При используемых параметрах подачи воздушно-водяной смеси обеспечивается охлаждение поверхности стекла с коэффициентом теплоотдачи, равным $6800 \text{ Вт/м}^2\text{К}$ [2]. Хладагент подается на поверхность в виде мелкодисперсной воздушно-водяной смеси диаметром 5 мм. При этом пучок CO_2 -лазера и хладагент на поверхности обрабатываемой пластины располагали на линии обработки, расстояние между их центрами составляло 4 мм. 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 [3]. Модуль упругости, коэффициент Пуассона и коэффициент температурного расширения полагались соответственно равными $E = 68 \text{ ГПа}$, $\nu = 0.221$, $\alpha = 89 \cdot 10^{-7} (1/^\circ\text{C})$.

Скорость обработки материала v по схеме, представленной на рисунке 1, выбрана равной 10 мм/с. Невысокое значение скорости обработки в расчетах выбрано для удобства графического представления и анализа пространственного распределения полей температур и в дальнейшем – упругих напряжений в стеклянной плоскопараллельной пластине.

Одним из необходимых условий, которое должно соблюдаться при реализации процесса управляемого лазерного термораскалывания силикатных стекол, является то, что температура материала не должна превышать определенное значение, так называемую «температуру стеклования», которая для выбранных нами стекол составляет порядка 780 К. Вследствие того что стекло является аморфным веществом, при превышении данного значения оно перестает быть твердым веществом и теряет упругие свойства.

2 Результаты расчетов

На рисунке 3 представлено распределение температур в фиксированный момент времени вдоль линии, на которой лежат центры лазерных пучков (оси Y) при реализации двулучевого асимметричного лазерного термораскалывания по схеме, представленной на рисунке 1. При этом величина смещения YAG-лазера L выбрана равной 2 мм. Центру пучка CO_2 -лазера соответствует координата $y = 11.5 \text{ мм}$, а центру пучка YAG-лазера – $y = 9.5 \text{ мм}$. Цифрой 1 обозначено распределение температур вдоль оси OY на поверхности материала, цифрой 2 – на глубине $z = 0.4 \text{ мм}$, цифрой 3 – на глубине $z = 0.8 \text{ мм}$, цифрой 4 – на глубине $z = 2 \text{ мм}$.

Как видно из представленных распределений температур, в области воздействия излу-

чения CO_2 -лазера происходит интенсивный локальный нагрев поверхности образца, где и наблюдается максимальное по величине значение температуры в 775 К, что не превышает температуру стеклования. Далее тепловая энергия за счет теплопроводности распространяется вглубь материала. В области воздействия излучения YAG-лазера происходит нагрев образца по всей толщине. При этом величины температур значительно меньше, чем в области воздействия излучения CO_2 -лазера. Необходимо отметить, что, начиная с глубины 0.8 мм от поверхности образца, влияние излучения CO_2 -лазера на распределение температур в образце практически отсутствует, и нагрев материала осуществляется за счет излучения YAG-лазера. Картина распределения температур относительно линии воздействия CO_2 -лазера оказывается несимметричной. Данная асимметрия распределения температур приводит к асимметрии распределения термоупругих напряжений.

На рисунке 4 представлено распределение полей главных термоупругих напряжений σ_1 в фиксированный момент времени вдоль линии SS' (см. рисунок 1), перпендикулярной линии обработки и проходящей через область воздействия хладагента. Цифрой 1 обозначено распределение напряжений вдоль линии на поверхности материала, цифрой 2 – на глубине $z = 0.1$ мм, цифрой 3 – на глубине $z = 0.2$ мм, цифрой 4 – на глубине $z = 0.4$ мм.

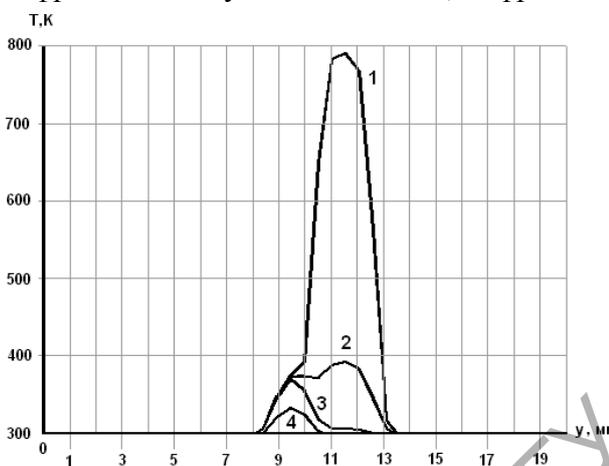


Рисунок 3 – Распределение температур вдоль линии, на которой располагаются центры пучков CO_2 - и YAG-лазеров, К

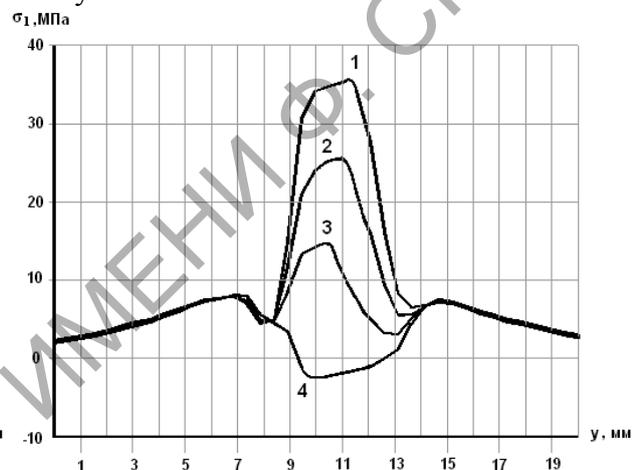


Рисунок 4 – Распределение термоупругих напряжений σ_1 вдоль линии, перпендикулярной линии обработки (ось Y) и проходящей через область действия хладагента, МПа

Из анализа представленного распределения видно, что на поверхности материала в области подачи хладагента, где происходит резкое охлаждение материала, возникает зона сильных растягивающих напряжений. При этом максимум по величине напряжений лежит практически на линии воздействия CO_2 -лазера (координата $y = 11.3$ мм). Вероятность зарождения трещины тем выше, чем выше значения растягивающих напряжений. Следовательно, зарождение и развитие трещины будет происходить там, где максимальны по величине растягивающие напряжения. Поскольку максимальные по величине растягивающие напряжения образуются именно на поверхности образца в области воздействия хладагента, то зарождение трещины происходит на поверхности материала, причем по величине значения главных напряжений σ_1 и напряжений σ_y совпадают, а следовательно, первоначальное развитие трещины будет в направлении, перпендикулярном поверхности материала, что и наблюдается на эксперименте.

Зона растягивающих напряжений, обусловленная действием хладагента, распространяется вглубь материала и ограничена снизу зонами сжимающих напряжений, сформированных лазерными пучками. Эти зоны ограничивают развитие зародившейся трещины вглубь материала.

Как видно из представленных на рисунке 4 зависимостей главных напряжений σ_1 от координаты y , по глубине образца максимумы напряжений смещаются от линии воздействия CO_2 -лазера в сторону линии воздействия YAG-лазера (на глубине $z = 0.35$ мм максимум растягивающих напряжений располагается в точке с координатой $y = 9.7$ мм), энергия излучения

которого поглощается по глубине материала, что и обуславливает его преимущественное влияние в распределении полей напряжений именно в глубоких слоях образца. При этом величина максимальных значений напряжений в глубине образца меньше, чем максимумы напряжений на поверхности. Таким образом, зарождение разделяющей трещины происходит на поверхности образца в области воздействия CO_2 -лазера. Далее, по мере ее развития вглубь материала, она отклоняется в сторону линии воздействия YAG-лазера и, достигнув зоны сжимающих напряжений, прекращает свое развитие. Величина отклонения трещины определяется величиной относительного смещения лазерных пучков L. Если отметить точки вдоль линий SS' на разных глубинах, в которых значение растягивающих напряжений максимальны, то можно получить форму наклонной трещины, представленной на рисунке 5, которая хорошо согласуется с экспериментальной.

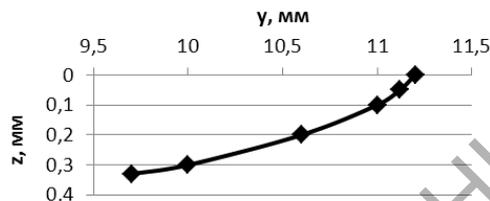


Рисунок 5 – Расчетная форма трещины

Следует отметить, что расчетная глубина трещины несколько отличается от экспериментальных значений. Для более точной количественной оценки необходимо выполнять анализ данного технологического процесса в рамках линейной механики разрушений [4], так как наличие микротрещины существенным образом влияет на распределение полей напряжений. Однако приведенная модель позволяет определить и оценить механизм формирования наклонной трещины.

Литература

- 1 Шалупаев, С.В. Двулучевой лазерный метод формирования скругленных кромок в стеклоизделиях / С.В. Шалупаев, Ю.В. Никитюк, А.А. Середя, В.В. Свиридова // Гомельский научный семинар по теоретической физике, посвященный 100-летию со дня рождения Ф.И. Федорова. – Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины, 2011. – С. 255–261.
- 2 Коваленко, Л.Д. Основы термоупругости / Л.Д. Коваленко. – Киев: Наукова думка, 1970. – 307 с.
- 3 Кикоин, И.К. Таблицы физических величин: справочник / И.К. Кикоин, В.Г. Аверин, Б.А. Аронзон. – М.: Атомиздат, 1976. – 1008 с.
- 4 Shalupaev, S.V. Analysis of laser thermosplitting processes within the framework of the linear fracture mechanics / S.V. Shalupaev, M. Aleksiejuk, Y.V. Nikitjuk, A.A. Sereda // *Ceramics. Polish ceramic bulletin.* – 2008. – Vol. 101. – P. 275–284.