

Анализ процесса развития трещины в процессе управляемого лазерного термораскалывания силикатных стекол в рамках линейной механики разрушения

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

Разработан алгоритм и выполнено конечно-элементное моделирование процесса развития трещины в силикатных стеклах при управляемом лазерном термораскалывании. Моделирование выполнено в рамках теории термоупругости и линейной механики разрушения. Показано, что зарождение трещины происходит на поверхности материала в области подачи хладагента, при развитии ее на глубину форма фронта трещины имеет характерный прогиб, что и наблюдается на эксперименте. Разработанный алгоритм моделирования можно использовать для оптимизации технологических режимов разделения хрупких неметаллических материалов.

Ключевые слова: лазер, термораскалывание, трещина, механика разрушения.

The algorithm is designed and finite-element modeling of a crack development in silicate glasses is carried out at laser controllable laser thermosplitting. Modelling is carried out within the limits of the thermoelasticity theory and the linear fracture mechanics. It is shown that crack initiation takes place on a surface of a material in the field of coolant feeding, and at its development on depth the form of a crack front has a characteristic bending, as is observed in the experiment. The designed algorithm of modelling can be used for optimization of technological modes of division of fragile nonmetallic materials.

Keywords: laser, thermosplitting, crack, fracture mechanics.

Одним из наиболее эффективных методов высокоточного разделения хрупких неметаллических материалов является управляемое лазерное термораскалывание (УЛТ), отличительная особенность которого заключается в том, что разделение материала на части заданной формы 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 и скорость обработки, безотходность процесса [1], [2]. Ранее в работах [3]–[7] авторами проведено в рамках теории термоупругости моделирование различных видов метода управляемого лазерного термораскалывания хрупких неметаллических материалов. В рамках квазистатической постановки задачи были выполнены расчеты температурных полей и полей упругих напряжений, формируемых в результате реализации различных видов термораскалывания, и определены механизмы формирования и развития разделяющей трещины. Было показано, что в момент воздействия лазерного излучения на поверхности формируется зона значительных по величине сжимающих напряжений, далее в момент воздействия следующего за лазерным пучком хладагента сжимающие напряжения переходят в растягивающие. Инициирование разделяющей трещины происходит в поверхностных слоях материала в зоне растягивающих напряжений, сформированных за счет подачи хладагента. Далее трещина распространяется вглубь материала, в зоне растягивающих напряжений, обусловленных взаимным расположением движущегося лазерного пучка и хладагента.

Такой анализ проводился для однородного материала в рамках теории термоупругости и не учитывал наличие и процесс развития формируемой в процессе обработки микротрещины. Как показано в работе [8], [9], появление микротрещины существенно влияет на распределение полей напряжений в материале, и поэтому моделирование процесса инициализации и развития трещины необходимо проводить не только в рамках теории термоупругости, но и линейной механики разрушения. Однако разработанный в этих публикациях алгоритм моделирования позволяет проводить анализ инициализации и развития трещины только фиксированной глубины.

В данной работе в рамках теорий термоупругости и линейной механики разрушения разработан алгоритм и проведено моделирование инициализации и развития трещины в хрупких неметаллических материалах в объеме образца.

Согласно [10] предположим, что условия разрушения можно представить одним параметром, в качестве которого можно использовать коэффициент интенсивности напряжений K_I . При этом необходимыми условиями роста трещины являются следующие: напряжения в вершине трещины должны быть растягивающими; коэффициент интенсивности напряжений в вершине трещины должен превышать критический коэффициент интенсивности напряжений K_{IC} . С учетом этих условий было выполнено моделирование процесса управляемого лазерного термораскалывания, при котором выполнялись расчеты коэффициента интенсивности K_I в вершине трещины для определения динамики ее развития. Расчеты были выполнены с использованием метода конечных элементов, реализованного в программе ANSYS.

Моделирование выполнено для схемы однолучевого управляемого лазерного термораскалывания, представленной на рисунке 1. В качестве материала образца выбрано силикатное стекло вертикальной вытяжки, плотность которого $\rho = 2740 \text{ кг/м}^3$, модуль упругости,

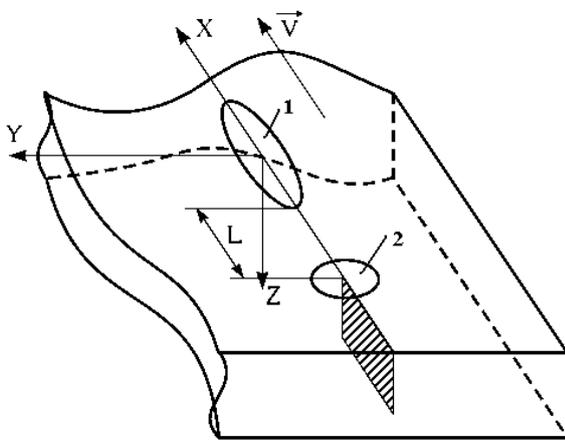


Рисунок 1 – Схема однолучевого управляемого лазерного термораскалывания

коэффициент Пуассона и коэффициент температурного расширения полагались соответственно равными $E = 73.5 \text{ ГПа}$, $\nu = 0.214$, $\alpha_T = 90 \cdot 10^{-7} \text{ (1/}^\circ\text{C)}$. Позицией 1 обозначен пучок CO_2 -лазера с длиной волны 10.6 мкм , энергия которого поглощается в тонком поверхностном слое стекла, позицией 2 – зона воздействия хладагента. Лазерное излучение формируется в пучок с поперечным сечением в виде эллипса с размерами большой и малой осей 7 и 2 мм соответственно. При этом пучок ориентируется большой осью вдоль линии обработки материала (вдоль оси X). Хладагент в виде мелкодисперсной воздушно-водяной смеси формируется на поверхности материала в виде круга радиусом 5 мм и подается непосредственно за лазерным пучком.

В качестве образца выбрана пластина толщиной 3 мм и геометрическими размерами $20 \times 30 \text{ мм}$. Поскольку воздействие лазерного пучка осуществляется вдоль оси X ровно посередине образца, то распределение температур и упругих напряжений относительно данной плоскости будет симметрично, поэтому моделирование было выполнено для половины образца, при этом учитывалось, что перемещения узлов, не принадлежащих трещине, в направлении оси Y в плоскости симметрии должны быть ограничены.

При моделировании была выбрана следующая последовательность действий. На первом шаге решения выполняется геометрическое построение поверхности образца размером $20 \times 15 \text{ мм}$, который разбивается на конечные элементы. При этом, как показано на рисунке 2, на краю образца вдоль линии инициализации и развития трещины выполняется построение нескольких областей (на рисунке показано четыре области), в центре которых формируются изопараметрические элементы, необходимые для моделирования вершины и фронта трещины. Далее данная поверхность выдавливается вдоль оси Z на величину равную толщине образца. При этом величину и пропорции разбиения вдоль оси Z можно варьировать. В результате вдоль оси Z формируются узлы, окруженные изопараметрическими элементами, которые могут быть использованы в дальнейшем как точки фронта развивающейся трещины. Лазерный пучок моделируется как поверхностный тепловой источник заданной мощности, а в области подачи хладагента осуществляется теплоотдача с коэффициентом равным $6800 \text{ Вт/м}^2\text{K}$ [11]. При этом движение пучка осуществляется дискретно, с постоянным смещением на каждом шаге решения с заданной скоростью. После разбиения образца выполняется рас-

чет температурных полей в образце при воздействии на него лазерного пучка и хладагента, при этом значения температур в каждом узле образца записываются в отдельный файл для использования на следующем шаге решения.

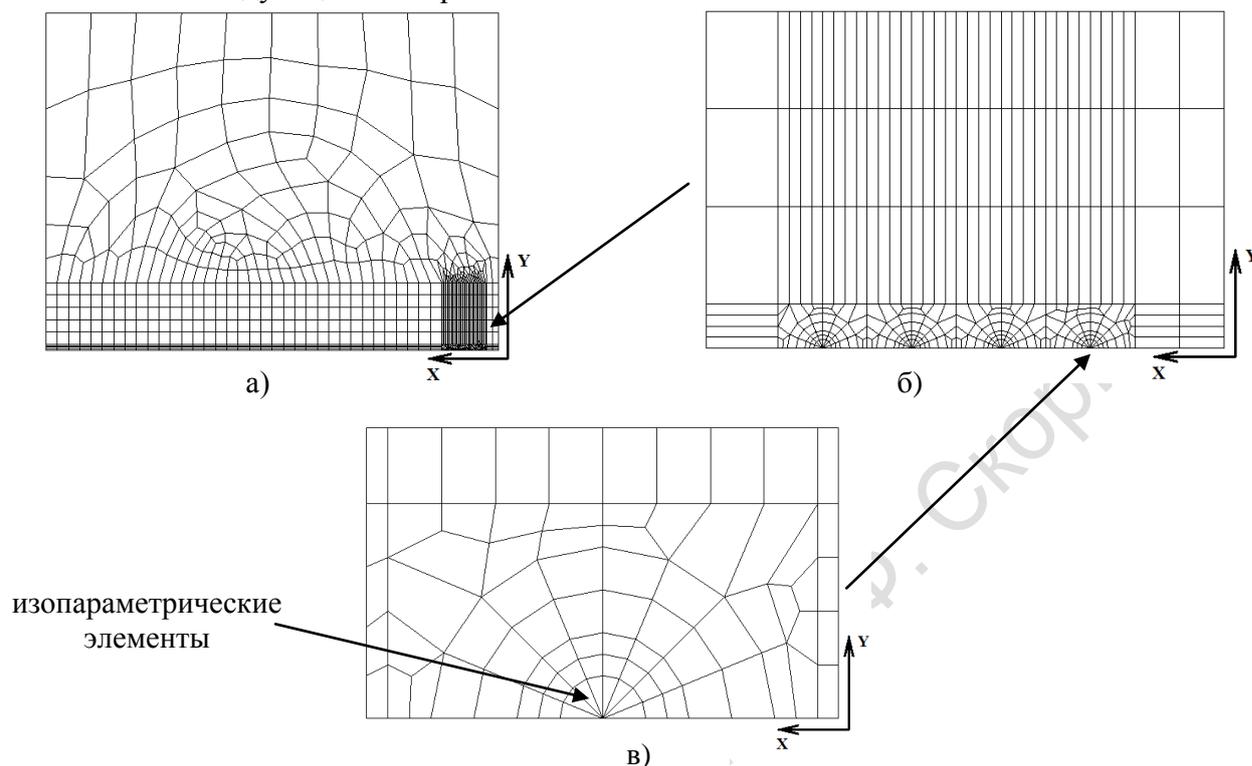


Рисунок 2 – Образец с нанесенной конечно-элементной сеткой:

а) общий вид модели в плоскости XY;

б) и в) увеличенная область с изопараметрическими элементами

На втором шаге решения заново осуществляется построение модели и считываются значения температур из первого шага решения как начальные условия для второго шага решения. Осуществляется смещение положения лазерного пучка и хладагента вдоль оси X и выполняется расчет температурных полей в образце с записью новых значений температур в отдельный файл для следующего шага решения. Далее решается структурная задача. Выбираем размер начальной трещины на краю образца длиной вдоль оси X равной 0.75 мм (от правого края образца до вершины первой области изопараметрических элементов) и глубиной вдоль оси Z равной 0.8 мм. Вследствие симметрии образца ограничиваем перемещения узлов, не принадлежащих трещине, в направлении оси Y в плоскости симметрии $Y = 0$. Координаты узлов, принадлежащих трещине, записываем в отдельный файл для последующих шагов решения. Выполняется расчет полей упругих напряжений в квазистатической постановке. По полученным распределениям упругих напряжений в образце производится пересчет коэффициентов интенсивности напряжений K_I в точках фронта трещины на различных глубинах. Значения коэффициентов интенсивности напряжений, температур и напряжений в вершинах трещины записываем в отдельный файл для последующих шагов решения задачи.

На третьем и дальнейших шагах решения выполняется следующая последовательность действий. Вначале считываем данные о величинах напряжений и коэффициентов интенсивности напряжений в точках фронта трещины из предыдущего шага решения. Далее осуществляем проверку условий выполнения однопараметрического критерия разрушения. Если значение коэффициента интенсивности напряжений в вершине трещины на поверхности превышает критическое значение K_{IC} (для силикатного стекла $K_{IC} = 0.5 \text{ МПа м}^{1/2}$) [8], и при этом напряжения в вершине трещины растягивающие, то координату вершины трещины увеличиваем в направлении движения лазерного пучка на величину равную шагу перемещения так, чтобы она совпала с вершиной соседней области изопараметрических элементов. В

противном случае оставляем координату без изменений. Аналогичные действия выполняем в остальных точках фронта трещины вдоль оси Z . Если координата вдоль оси X вершины трещины на любом слое по глубине образца выходит за границы области изопараметрических элементов (далее, чем вершина четвертой от правого края области изопараметрических элементов), то при построении модели смещаем эту область вдоль оси X на величину равную шагу перемещения. Далее выполняем новую дискретизацию модели и интерполируем распределение температур с предыдущего шага решения на новую конечно-элементную сетку. Моделируем воздействие лазерного пучка и хладагента на поверхность материала. Считываем координаты узлов, принадлежащих трещине, из предыдущего шага решения, добавляем новые узлы с учетом выполненной ранее проверки роста трещины на разных глубинах и пересохраняем их для последующих шагов решения. Ограничиваем перемещения узлов, не принадлежащих трещине, в направлении оси Y и осуществляем расчет упругих напряжений в образце и коэффициентов интенсивности напряжений в вершинах трещины, попадающих в область с изопараметрическими элементами на различных глубинах. Значения коэффициентов интенсивности напряжений, температур и напряжений в вершинах трещины записываем в отдельный файл для последующих шагов решения задачи.

Таким образом, по рассчитанным значениям напряжений и коэффициентов интенсивности напряжений в вершинах трещины на каждом шаге решения, а также по координатам узлов можно определить не только глубину развития, но и форму разделяющей трещины.

В соответствии с предложенным алгоритмом было выполнено моделирование процесса управляемого лазерного термораскалывания в рамках теорий термоупругости и линейной механики разрушения по схеме, представленной на рисунке 1. Скорость обработки выбрана равной 10 мм/с, мощность лазерного пучка 20 Вт. На рисунке 3 представлены расчетные значения коэффициента интенсивности напряжений K_I в вершинах трещины на различных глубинах Z образца от времени t . Кривая 1 соответствует вершине, разделяющей трещины на поверхности образца, кривая 2 – на глубине $Z = 0.15$ мм, кривая 3 – на глубине $Z = 0.25$ мм и кривая 4 – на глубине $Z = 0.6$ мм. На рисунках 4 и 5 представлены расчетные значения упругих напряжений σ_{yy} в вершинах трещины и координат X вершин трещины на тех же глубинах Z образца от времени t .

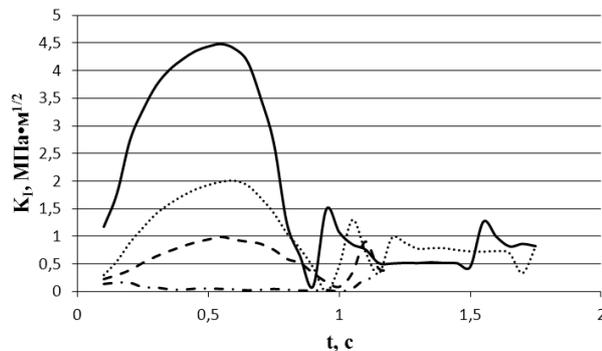


Рисунок 3 – Расчетные значения коэффициента интенсивности напряжений K_I в вершинах трещины

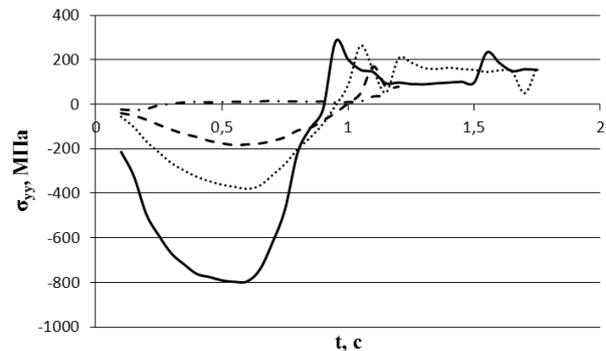


Рисунок 4 – Расчетные значения упругих напряжений σ_{yy} в вершинах трещины

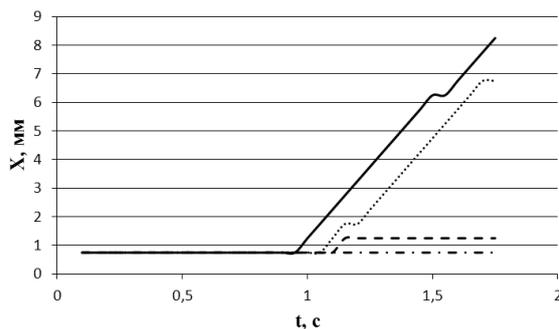


Рисунок 5 – Расчетные значения координат X вершин трещины

В промежуток времени от 0 до 0.65 секунды движения лазерного пучка и хладагента вершина стартовой трещины на поверхности образца подвергается воздействию лазерного излучения, и во всех вершинах стартовой трещины до глубины 0.5 мм формируются значительные по величине сжимающие напряжения. При этом роста трещины не происходит. Далее вершина стартовой трещины на поверхности образца попадает в область воздействия хладагента, происходит резкое охлаждение поверхности материала и напряжения перерастают в растягивающие, и уже в момент времени 0.95 секунды коэффициент интенсивности напряжений в этой вершине становится выше критического значения K_{IC} для силикатного стекла. Трещина на поверхности образца начинает развитие вдоль оси X. В глубинных слоях образца также наблюдается рост по величине растягивающих напряжений и коэффициента интенсивности напряжений в вершинах трещины. Однако этот рост происходит с задержкой во времени по отношению к поверхностному слою материала вследствие того, что нагрев глубинных слоев происходит за счет передачи тепла от поверхностных слоев материала, где происходит поглощение энергии лазерного излучения, вглубь материала с заданным коэффициентом теплопроводности. Величина коэффициента интенсивности напряжений достигает критического значения K_{IC} позже, нежели в поверхностных слоях материала, что приводит к росту трещины в глубинных слоях материала с отставанием вдоль направления развития трещины (вдоль оси X) по отношению к вершине трещины в поверхностном слое.

На рисунке 6 представлены расчетные значения координат X вершин трещины на различных глубинах в образце и проведена сглаживающая кривая профиля развивающейся трещины.

Как видно из представленного рисунка, профиль трещины имеет характерный прогиб. Именно такой профиль наблюдается визуально при разделении силикатных стекол методом управляемого лазерного термораскалывания в соответствии со схемой, приведенной на рисунке 1, что показывает адекватность разработанного алгоритма моделирования. При этом расчетная глубина трещины 0.34 мм оказывается чуть меньше, чем экспериментальное значение 0.39 мм. Это обусловлено как погрешностью самого метода конечных элементов, так и густотой выбранной конечно-элементной сетки.

Таким образом, разработанный алгоритм моделирования позволяет моделировать процесс управляемого лазерного термораскалывания и, варьируя параметры лазерного пучка и хладагента, скорость обработки, геометрические размеры образца и вид конечно-элементной сетки, получать информацию о профиле и глубине возникающей разделяющей трещины для различных методов лазерного термораскалывания. Полученные данные можно использовать для оптимизации технологических режимов разделения хрупких неметаллических материалов.

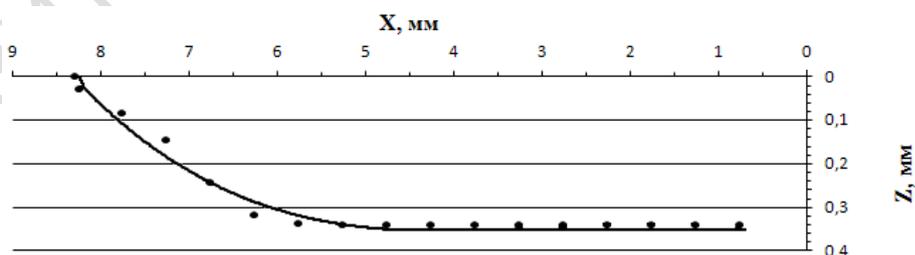


Рисунок 6 – Расчетные значения координат X вершин трещины на различных глубинах в образце

Литература

1. Мачулка, Г.А. Лазерная обработка стекла / Г.А. Мачулка. – М. : Сов. радио, 1979. – 136 с.
2. Кондратенко, В.С. Лазерное управляемое термораскалывание хрупких материалов : курс лекций / В.С. Кондратенко. – М. : МГАПИ, 2004. – 88 с.

3. Шалупаев, С.В. Прецизионная лазерная обработка хрупких неметаллических материалов / С.В. Шалупаев, Е.Б. Шершнеv, Ю.В. Никитюк, А.А. Серeda // Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины. – 2005. – № 3(30). – С. 87–92.
4. Шалупаев, С.В. Двухлучевое лазерное термораскалывание хрупких неметаллических материалов / С.В. Шалупаев, Е.Б. Шершнеv, Ю.В. Никитюк, А.А. Серeda // Оптический журнал. – Т. 73, № 5. – 2006. – С. 62–66.
5. Shalupaev, S. The analysis of laser thermosplitting of materials by using of crescent shape beams / S. Shalupaev, Y. Nikitjuk, A. Sereda : материалы конф. Optical Techniques and Nano-Tools for aterial and Life Sciences (ONT4MLS-2010), Minsk, 15–19 June 2010 ; в 2-х т. Т. 2. – P. 36–43.
6. Shalupaev, S.V. The analysis of laser thermosplitting of materials by using of special geometry beams / V. Shalupaev, M. Aleksiejuk, Y.V. Nikitjuk, A.A. Sereda // Archives of metallurgy and materials. – Vol. 56, Issue 4. – 2011. – P. 1149–1155.
7. Сердюков, А.Н. Моделирование процесса двухлучевого асимметричного термораскалывания хрупких неметаллических материалов / А.Н. Сердюков, С.В. Шалупаев, Ю.В. Никитюк, А.А. Серeda // Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины. – 2011. – № 6(69). – С. 124–127.
8. Shahani, A.R. Simulation of glass cutting with an impinging hot air jet / A.R. Shahani, M. Seyyedian // International journal of solids and structures. – 2004. – Vol. 41, № 5–6. – P. 1313–1329.
9. 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. – Vol. 101. – Krakow, 2008. – P. 275–284.
10. Сиратори, М. Вычислительная механика разрушения : пер. с японск. / М. Сиратори, Т. Миеси, Х. Мацусита. – М. : Мир, 1986. – 334 с.
11. Богуславский, И.А. Высокопрочные закаленные стекла / И.А. Богуславский. – М. : Изд-во литературы по строительству, 1969. – 208 с.