

УДК 621.37/39:621.9.048.7

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДВУЛУЧЕВОГО ЛАЗЕРНОГО
ТЕРМОРАСКАЛЫВАНИЯ СИЛИКАТНЫХ СТЕКОЛ В РАМКАХ
ЛИНЕЙНОЙ МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ**

С.В. Шалупаев, А.Н. Сердюков, Ю.В. Никитюк, А.А. Серед

Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины, Гомель

**MODELLING OF THE PROCESS OF THE TWO-BEAM LASER
THERMOSPLITTING OF SILICATE GLASSES WITHIN THE LIMITS
OF THE LINEAR FRACTURE MECHANICS**

S.V. Shalupaev, A.N. Serdykov, Yu.V. Nikitjuk, A.A. Sereda

F. Scorina Gomel State University, Gomel

В рамках теорий термоупругости и линейной механики разрушения на основе разработанного алгоритма выполнено конечно-элементное моделирование процесса развития лазерно-индуцированной трещины в силикатных стеклах при двухлучевом лазерном управляемом термораскалывании. Показано, что зарождение трещины происходит на поверхности материала в области подачи хладагента и при развитии ее в глубину форма трещины имеет характерный прогиб, что подтверждается результатами экспериментальных исследований.

Ключевые слова: трещина, лазерное раскалывание, механика разрушения.

Within the limits of the theories of thermoelasticity and linear fracture mechanics finite-element modelling of the laser-induced crack extension in silicate glasses at two-beam laser controllable thermosplitting is executed on the basis of the developed algorithm. It is shown that crack initiation takes place on a surface of material in the zone of a coolant feeding and at its extension in the depth the flaw shape has the characteristic deflection, which is verified by the results of experimental researches.

Keywords: crack, laser splitting, fracture mechanics.

Введение

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 высокие точность разделения и скорость обработки, безотходность процесса [1], [2]. Ранее в работах [3]–[7] 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 результате воздействия излучения CO₂-лазера с длиной волны 10,6 мкм, энергия которого поглощается в тонком поверхностном слое силикатных стекол, на поверхности

формируется зона значительных по величине сжимающих напряжений, далее в момент воздействия следующего за лазерным пучком хладагента сжимающие напряжения переходят в растягивающие. Иницирование разделяющей трещины происходит в поверхностных слоях материала в зоне растягивающих напряжений, сформированных за счет подачи хладагента. Развитие трещины вглубь материала происходит в зоне растягивающих напряжений, обусловленных взаимным расположением движущегося лазерного пучка и хладагента.

Как было показано в работе [4], дополнительное воздействие YAG-лазера с длиной волны 1,06 мкм, энергия которого поглощается в объеме материала, приводит к увеличению глубины трещины и повышению стабильности ее зарождения.

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 на поверхности материала при фиксированной глубине трещины.

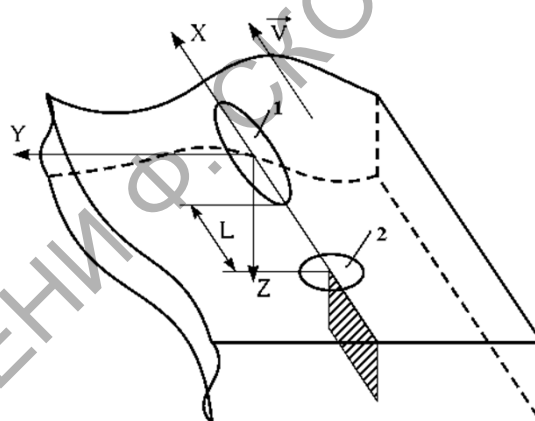
В работе [10] в рамках теорий термоупругости и линейной механики разрушения разработан алгоритм и проведено моделирование инициализации и развития трещины в хрупких неметаллических материалах в объеме образца. Однако в данной работе моделирование выполнено для процесса однолучевого лазерного термораскалывания с использованием в качестве источника излучения CO₂-лазера. Положительные результаты, полученные при исследовании двулучевых способов разделения хрупких неметаллических материалов в работах [3]–[6], [11], делают актуальной задачу разработки алгоритма и моделирования в рамках теорий термоупругости и линейной механики разрушения процесса двулучевого управляемого лазерного термораскалывания.

1 Алгоритм моделирование процесса управляемого лазерного термораскалывания

Согласно [12] 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} (для силикатного стекла $K_{IC}=0,5 \text{ МПа м}^{1/2}$). С учетом этих условий было выполнено моделирование процесса управляемого лазерного термораскалывания, при котором выполнялись расчеты коэффициента интенсивности напряжений K_I в вершинах лазерноиндуцированной трещины для определения динамики ее развития. Расчеты были выполнены с использованием метода конечных элементов.

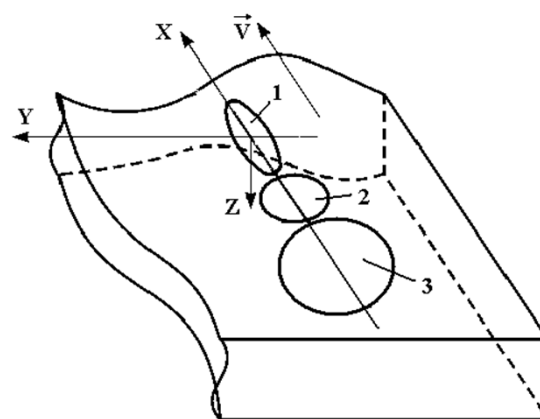
С целью сравнительного анализа моделирование выполнено для схем однолучевого и двулучевого управляемого лазерного термораскалывания, представленных на рисунке 1.1 и рисунке 1.2. В качестве материала образца выбрано силикатное стекло вертикальной вытяжки плотностью $\rho=2740 \text{ кг/м}^3$, модуль упругости, коэффициент Пуассона и коэффициент температурного расширения полагались соответственно равными $E=73,5 \text{ ГПа}$, $\nu=0,214$, $\alpha_m=90 \cdot 10^{-7} (1/^\circ\text{C})$. Излучение CO₂-лазера 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 диаметром 5 мм и подается непосредственно за лазерным пучком. При помощи

измерителя мощности ИМО-2М были выполнены замеры мощности излучения YAG-лазера до попадания на поверхность пластины и после прохождения пластин заданной толщины. Основываясь на том, что поглощение излучения внутри материала происходит по закону Бугера-Ламберта-Бера $I = I_0 \cdot e^{-\alpha z}$, где I_0 – значение интенсивности лазерного излучения до попадания на образец, α – коэффициент экстинкции, z – глубина проникновения излучения, был найден коэффициент экстинкции α , который оказался равным $86,129 \text{ м}^{-1}$.



1 – пучок CO₂-лазера; 2 – хладагент

Рисунок 1.1 – Схема однолучевого управляемого лазерного термораскалывания



1 – пучок CO₂-лазера;

2 – пучок YAG-лазера; 3 – хладагент

Рисунок 1.2 – Схема двулучевого управляемого лазерного термораскалывания

Излучение YAG-лазера моделировалось в виде объемного цилиндрического теплового источника (радиус в поперечном сечении 1 мм) с заданной объемной плотностью мощности. Значение объемной плотности мощности рассчитывается для каждого слоя конечных элементов с использованием закона Бугера-Ламберта-Бера и рассчитанного коэффициента экстинкции.

В качестве образца выбрана пластина толщиной 3 мм и геометрическими размерами 20x30 мм.

Поскольку воздействие лазерного пучка осуществляется вдоль оси X 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 20×15 мм, который разбивался на конечные элементы. При этом, как показано на рисунке 1.3, 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 формируется последовательность изопараметрических элементов, узлы которых могут быть использованы в дальнейшем как точки фронта развивающейся трещины. Излучение CO_2 -лазера моделируется как поверхностный тепловой источник заданной мощности, а YAG-лазера – как объемный источник. В области подачи хладагента

задается теплоотдача с коэффициентом равным $6800 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$. При этом движение пучков осуществляется дискретно, с постоянным смещением на каждом шаге решения с заданной скоростью. После разбиения образца выполняется расчет 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.

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 лазерных пучков 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.

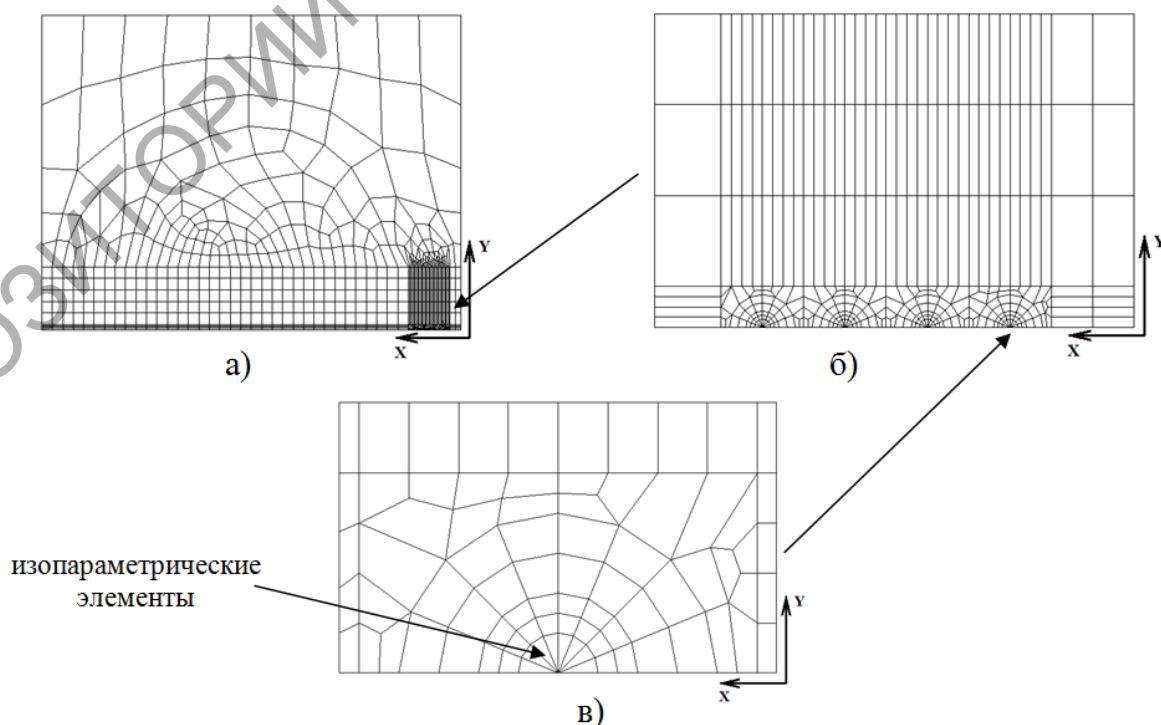


Рисунок 1.3 – Образец с нанесенной конечно-элементной сеткой

а) общий вид модели в плоскости XY , б) и в) увеличенная область с изопараметрическими элементами

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 лазерных пучков 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.

2 Результаты моделирования

В соответствии с предложенным алгоритмом было выполнено моделирование процесса управляемого лазерного термораскалывания в рамках теорий термоупругости и линейной механики разрушения по схеме, представленной на рисунках 1.1 и 1.2. Скорость обработки выбрана равной 20 мм/с, мощность пучка CO_2 -лазера – 20 Вт, YAG-лазера – 140 Вт. На рисунке 2.1 представлены расчетные значения коэффициента интенсивности напряжений K_I в вершинах трещины на различных глубинах Z образца от времени t для случая односторонней обработки. Кривая 1 (сплошная линия) соответствует вершине разделяющей трещины на поверхности образца, кривая 2 (точечная линия) – на глубине $Z=0,08 \text{ мм}$, кривая 3 (штриховая линия) – на глубине $Z=0,15 \text{ мм}$.

На рисунках 2.2 и 2.3 представлены расчетные значения упругих напряжений σ_{yy} в вершинах трещины и координат X вершин трещины на тех же глубинах Z образца от времени t .

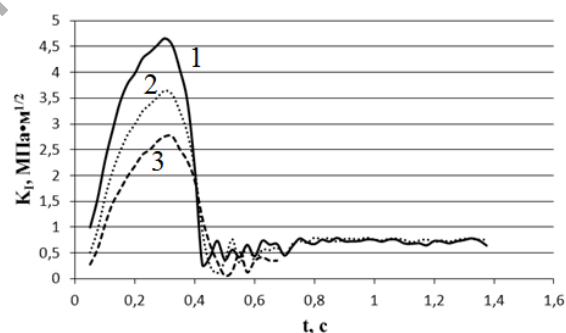


Рисунок 2.1 – Расчетные значения коэффициента интенсивности напряжений K_I в вершинах трещины

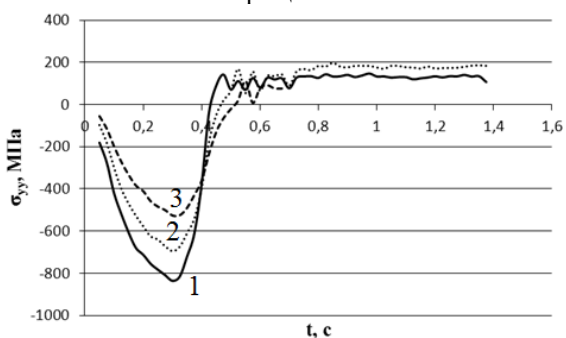


Рисунок 2.2 – Расчетные значения упругих напряжений σ_{yy} в вершинах трещины

В промежуток времени от 0 до 0,425 секунды движения лазерного пучка и хладагента вершина стартовой трещины на поверхности образца подвергается воздействию лазерного излучения и во всех узлах фронта трещины до глубины 0,5 мм формируются значительные по величине сжимающие напряжения. При этом роста трещины

не происходит. Далее вершина трещины попадает в область воздействия хладагента, происходит резкое охлаждение поверхности материала и напряжения становятся растягивающими, и уже в момент времени 0,5 секунды коэффициент интенсивности напряжений в этой вершине достигает критического значения. 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 узлах фронта трещины. Однако увеличение данных параметров 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 вглубь материала. 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.

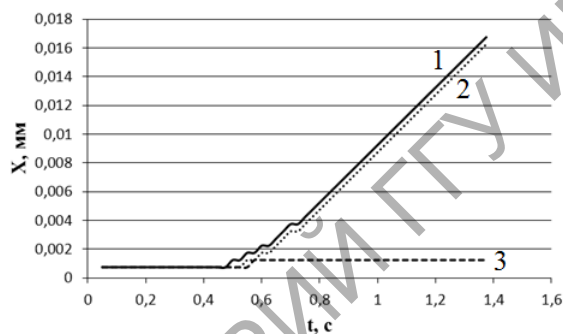


Рисунок 2.3 – Расчетные значения координат X вершин трещины

На рисунке 2.4 представлен расчетный профиль лазерно-индуцированной трещины.

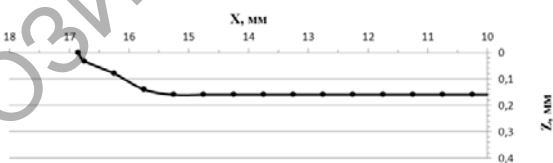


Рисунок 2.4 – Расчетные значения координат X вершин трещины на различных глубинах в образце

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 1.1, что показывает адекватность разработанного алгоритма моделирования. При этом расчетная глубина трещины 0,15 мм оказывается чуть

меньше, чем экспериментальное значение 0,19 мм. Это обусловлено как погрешностью самого метода конечных элементов, так и плотностью выбранной конечно-элементной сетки.

На рисунке 2.5 представлены расчетные значения коэффициента интенсивности напряжений K_I в вершинах трещины на различных глубинах Z образца от времени t для случая двулучевой обработки. Кривая 1 (сплошная линия) соответствует вершине разделяющей трещины на поверхности образца, кривая 2 (точечная линия) – на глубине $Z=0,08$ мм, кривая 3 (штриховая линия) – на глубине $Z=0,25$ мм, кривая 4 (штрих-пунктирная линия) – на глубине $Z=0,4$ мм.

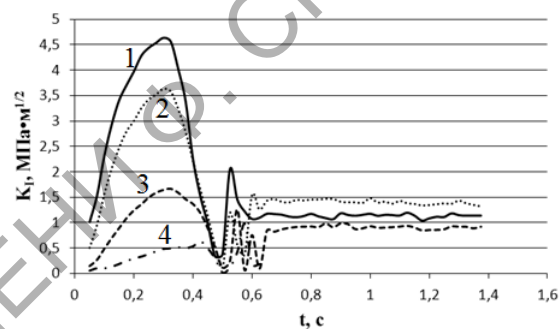


Рисунок 2.5 – Расчетные значения коэффициента интенсивности напряжений K_I в вершинах трещины

На рисунках 2.6 и 2.7 представлены расчетные значения упругих напряжений σ_{yy} в вершинах трещины и координат X вершин трещины на тех же глубинах Z образца от времени t .

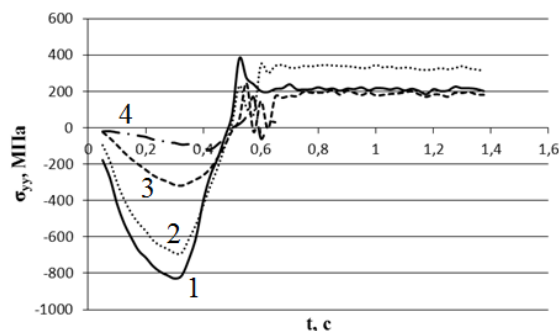


Рисунок 2.6 – Расчетные значения упругих напряжений σ_{yy} в вершинах трещины

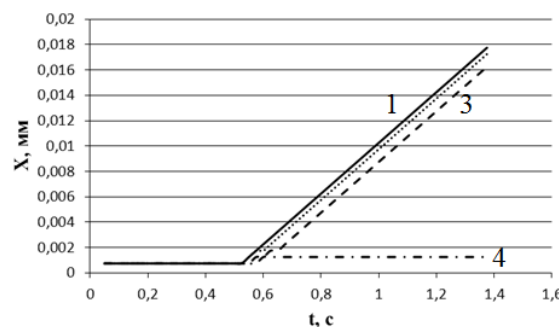


Рисунок 2.7 – Расчетные значения координат X вершин трещины

Как видно из представленных на рисунке расчетных данных, область растягивающих напряжений, формируемых в области воздействия хладагента, вследствие объемного прогрева располагается в более глубоких слоях материала, что приводит к развитию трещины на большую, нежели в случае однолучевой обработки, глубину.

На рисунке 2.8 представлен расчетный профиль разделяющей трещины, образующейся в процессе двухлучевого лазерного термораскалывания.

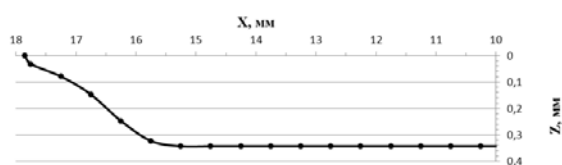


Рисунок 2.8 – Расчетные значения координат X вершин трещины на различных глубинах в образце

Как показывают результаты моделирования, расчетная глубина трещины составляет 0,34 мм, что почти в два раза выше, нежели в случае однолучевой обработки. Двукратное увеличение глубины трещины наблюдается на эксперименте.

Заключение

Таким образом, разработанный алгоритм моделирования позволяет моделировать процесс управляемого лазерного термораскалывания и, варьируя параметры лазерных пучков 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.

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. Лазерный двухлучевой метод обработки высокопрочных керамических материалов / С.В. Шалупаев [и др.] // Ceramics. Polish ceramic bulletin – 2005. – Vol. 89. – P. 44–49.

4. Двухлучевое лазерное термораскалывание хрупких неметаллических материалов / С.В. Шалупаев [и др.] // Оптический журнал. – 2006. – Т. 73, № 5. – С. 62–66.

5. The analysis of laser thermosplitting of materials by using of special geometry beams / S.V. Shalupaev [et. al.] // Archives of metallurgy and materials. – 2011. – Vol. 56, Issue 4. – P. 1149–1155.

6. Моделирование процесса двухлучевого асимметричного термораскалывания хрупких неметаллических материалов / А.Н. Сердюков [и др.] // Известия Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины. – 2011. – № 6 (69). – С. 124–127.

7. Сердюков, А.Н. Особенности управляемого лазерного термораскалывания кристаллического кремния / А.Н. Сердюков, С.В. Шалупаев, Ю.В. Никитюк // Кристаллография. – 2010. – Т. 55, № 6. – С. 1180–1184.

8. Shahani, A.R. Simulation of glass cutting with an impinging hot air jet / A.R. Shahani, M. Sevedian // International journal of solids and structures. – 2004. – Vol. 41, № 5–6. – P. 1313–1329.

9. Analysis of laser thermosplitting processes within the framework of the linear fracture mechanics / S.V. Shalupaev [et al.] // Ceramics. Polish Ceramic Bulletin. – 2008. – Vol. 101. – P. 275–284.

10. Шалупаев, С.В. Анализ процесса развития трещины в процессе управляемого лазерного термораскалывания силикатных стекол в рамках линейной механики разрушения / С.В. Шалупаев, Ю.В. Никитюк, А.А. Серета // Известия Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины. – 2012. – № 6 (75). – С. 99–104.

11. Концепция двухлазерного термораскалывания стеклянных элементов для космических аппаратов / В.К. Сысоев [и др.] // Вестник «ФГУП НПО им. С.А. Лавочкина». – 2011. – № 1. – С. 38–44.

12. Сиратори, М. Вычислительная механика разрушения : пер. с японского / М. Сиратори, Т. Мисе, Х. Мацусита. – М. : Мир, 1986. – 334 с.

Поступила в редакцию 06.04.13.