

КОМБИНИРОВАННОЕ ЛАЗЕРНОЕ ТЕРМОРАСКАЛЫВАНИЕ МНОГОСЛОЙНЫХ НЕОДНОРОДНЫХ СТРУКТУР ИЗ СТЕКЛА

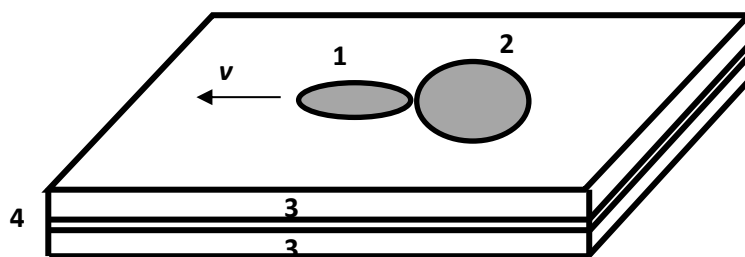
При изготовлении изделий сложной формы из хрупких неметаллических материалов в ряде ситуаций существует необходимость резки по замкнутым криволинейным контурам (примером может служить изготовление заготовок для производства автомобильных зеркал и стекол). Разделение по криволинейным траекториям классическим методом управляемого лазерного термораскалывания, с использованием CO₂-лазера в качестве источника излучения, обусловлено рядом трудностей. Например, для лазерного термораскалывания при резке по криволинейному контуру (особенно если радиусы кривизны малы), происходит смещение зоны воздействия хладагента относительно траектории лазерного воздействия. Это обуславливает заметные отклонения формируемой микротрещины от линии резки. Для устранения этого недостатка была разработана схема установки, отличительной особенностью которой является использование пятикоординатной системы управления [1], а также метода с применением дополнительного объемного нагрева материала лазерным излучением (например, силикатных стекол и алюмооксидной керамики – излучением с длиной волны $\lambda = 1,06$ мкм) [2].

В работах [3]–[9] приведены исследования по получению несквозных каналов в хрупких неметаллических материалах, таких как силикатное и кварцевое стекло, полупроводниковые кристаллы, например арсенид галлия посредством импульсного оптического пробоя поверхности микро-, пико- и фемтосекундными лазерами. При этом образуются каналы диаметром 100–500 мкм.

При разделении стеклоизделий по криволинейным контурам представляется возможным использование серии таких каналов выполненных вдоль контура обработки для инициализации разделяющей трещины и в качестве направляющих при ее развитии по криволинейным траекториям. Ниже выполнены теоретические исследования возможности использования таких каналов в качестве дефектов.

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 [10]–[12].

В соответствии с этим выполнен расчет распределения температурных полей внутри ламинированного стекла (триплекс) при лазерной обработке с использованием эллиптического пучка, а затем по полученным температурным полям в рамках теории термоупругости выполнен расчет полей термоупругих напряжений. Схема процесса представлена на рисунке 1. В качестве образца для моделирования выбрана конструкция из 2 пластин силикатного float-стекла толщиной 3 мм с PVB пленкой толщиной 0,38 мм, размеры пластины 6x6 мм. При этом посередине пластины выполнен сквозной канал диаметром 450 мкм. Свойства стекла и PVB пленки представлены в работах [13]–[19].



1 – зона воздействия CO₂-лазера, 2 – зона воздействия хладагента,
3 – стеклянные пластины, 4 – PVB пленка.

Рисунок 1 – Схема процесса управляемого лазерного термораскалывания ламинированного стекла (триплекс) с использованием эллиптических пучков

На рисунке 2 представлена модель пластины с каналом.

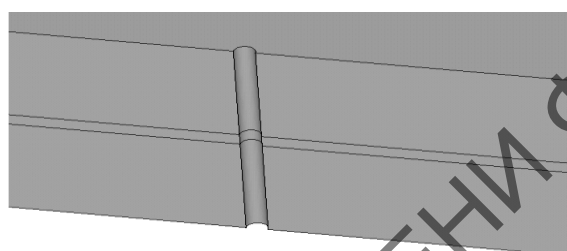


Рисунок 2 – Общий вид модели с отверстием

Пучок CO₂-лазера, энергия которого поглощается в тонком поверхностном слое материала, моделируется как поверхностный тепловой источник, с плотностью мощности теплового источника $0,8 \cdot 10^6$ Вт/м², и с большой и малой полуосями соответственно равными 3 и 1.3 мм. Лазерные пучки и хладагент формируются симметрично с обеих сторон ламинированного стекла (триплекса), поскольку PVB пленка не обладает упругими свойствами и не позволяет образовать сквозную трещину по всей толщине образца. Для окончательного разделения триплекса требуется дополнительное воздействие инфракрасными нагревательными элементами, для размягчения пленки. При используемых параметрах подачи воздушно-водяной смеси обеспечивается охлаждение поверхности стекла с коэффициентом теплоотдачи равным 6800 Вт/м²К [19]. Хладагент подается на поверхность в виде мелкодисперсной воздушно-водяной смеси диаметром 6 мм. При этом пучок CO₂-лазера и хладагент на поверхности обрабатываемой пластины располагали непосредственно друг за другом на линии обработки.

Скорость обработки материала v по схемам, представленным на рисунке 1, выбрана равной 10 мм/с. 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 стекол составляет порядка 780 К. Вследствие того, что стекло является аморфным веществом, при превышении данного значения оно теряет упругие свойства.

На рисунке 3 представлено распределение термоупругих напряжений по толщине материала в фиксированный момент времени вдоль линии на которой лежит центр эллиптического лазерного пучка (оси Y) при реализации двулучевого лазерного термораскалывания пластины триплекса в различные моменты обработки: а) – центр лазерного пучка на расстоянии 2 мм от края, б) – центр лазерного пучка совпадает с центром отверстия, в) – центр хладагента совпадает с центром отверстия, г) – центр лазерного пучка на расстоянии 4 мм от края, д) – центр лазерного пучка на расстоянии 5 мм от края.

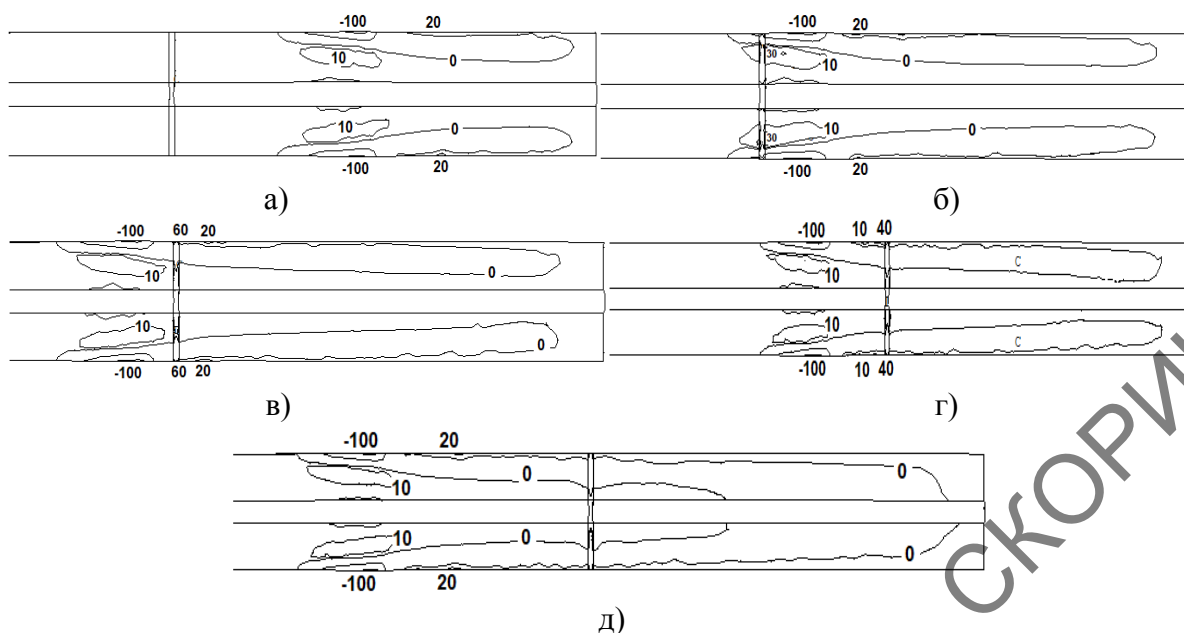


Рисунок 3 – Распределение термоупругих напряжений σ_{yy} (МПа) по толщине ламинированного стекла (триплекс) вдоль линии обработки в процессе двулучевого лазерного термораскалывания пластины триплекса в различные моменты обработки

В области воздействия излучения CO_2 -лазера, происходит интенсивный локальный нагрев поверхности образца. Далее тепловая энергия за счет теплопроводности распространяется вглубь материала. В области воздействия хладагента происходит резкое охлаждение поверхности образца.

Максимальные значения температур во все рассмотренные моменты времени не превышает температуры стеклования и составляет 709 К для варианта а), 721 К для варианта б), 716 К для варианта в), 716 К для варианта г), 700 К для варианта д).

Из анализа представленных на рисунке 4 распределений 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 на линии воздействия CO_2 -лазера и хладагента. Зарождение трещины происходит на поверхности материала. Величины максимальных растягивающих напряжений для рассмотренных выше вариантов составляют: 20,6 МПа для варианта а), 35,9 МПа для варианта б), 63,6 МПа для варианта в), 45,0 МПа для варианта г), 20,6 МПа для варианта д).

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.

Следует отметить, что в момент, когда центр лазерного пучка совпадает с центром отверстия, максимальные величины растягивающих напряжений в зоне под лазерным пучком становятся больше, чем в зонах обусловленной воздействием хладагента, что может привести к инициализации трещины от образовавшегося канала в пластине. Однако далее происходит резкое увеличение величины растягивающих напряжений на поверхности материала в окрестности отверстия, значительно превышающие предел прочности стекла на разрыв, что создает условия для стабильного зарождения разделяющей трещины от каналов, полученных посредством импульсного оптического пробоя поверхности микро-, пико- и фемтосекундными лазерами.

Список использованных источников

1 Установка для лазерной резки хрупких неметаллических материалов : патент № 2164 РБ. / С. В. Шалупаев, Е. Б. Шершнева, Ю. В. Никитюк, А. А. Середа, А. Евтухов. – МКИ7 С 03В 33/02. – Заявка и 20050085, заявлено 2005.04.22. – Опубликовано 30.09. 2005.

2 Лазерное термораскалывание хрупких неметаллических материалов по замкнутым криволинейным контурам / С. В. Шалупаев, Ю. В. Никитюк, А. А. Середа // Оптический журнал. – 2008. – Т. 75, № 2. – С. 11–15.

3 Эффект затягивания излучения CO₂-лазера в узкий канал при обработке металлов комбинированным лазерным излучением / А. В. Федин [и др.] // Изв. РАН. Сер. физ. – 1999. – 63, № 10. – С. 2053–2058.

4 Какорин, С. А. Особенности фотовозбуждения и распределения температуры в полупроводнике при встречном двухчастотном воздействии / С. А. Какорин, В. Л. Комолов, М. Н. Либенсон // Письма в ЖТФ. – 1982. – Т. 8, вып. 9. – С. 513–517.

5 Комолов, В. Л. Разогрев и лазерное разрушение полупроводников / В. Л. Комолов, М. Н. Либенсон, Г. Д. Шандыбина // Известия АН СССР, серия физическая. – 1985. – Т.46, №6. – С. 1103–1110.

6 Оптический пробой арсенида галлия при импульсном двухчастотном воздействии / А. М. Бонч-Бруевич [и др.] // Письма в ЖТФ. – 1982. – Т. 8, вып. 8. – С. 507–510.

7 Гагарин, А. П. Исследование крупномасштабного воздействия лазерного излучения на металлы и стекла: автореф. дис. ...д-р. физ.-мат. наук: 05.27.03 / А. П. Гагарин. – Москва, 1999. – 40 с.

8 Кононенко, В. В. Модификация кварцевого стекла лазерными импульсами фемтосекундной длительности / В. В. Кононенко, В. П. Папинин, М. С. Комленок, В. И. Конов // Компьютерная оптика. – Т. 33, №3. – 2009. – С. 254–259.

9 Сергеев, М. С. Исследование крупномасштабного воздействия лазерного излучения на металлы и стекла: дис. ...канд. техн. наук: 01.04.05 / М. С. Сергеев. – Санкт-Петербург, 2016. – 131 с.

10 Шабров, Н. Н. Метод конечных элементов в расчетах деталей тепловых двигателей / Н. Н. Шабров. – Ленинград : Машиностроение, 1983. – 212 с.

11 Карзов, Г. П. Физико – механическое моделирование процессов разрушения / Г. П. Карзов, Б. З. Марголин, В. А. Шевцова. – Санкт-Петербург : Политехника, 1993. – 391 с.

12 Коваленко, Л. Д. Основы термоупругости / Л. Д. Коваленко. – Киев: Наукова думка, 1970. – 307 с.

13 AGS. Technical Data Sheet - Planibel [Электронный ресурс] / Официальный сайт AGS Glass UK Ltd. – Режим доступа : <https://www.agc-yourglass.com/>. – Дата доступа : 10.03.2019.

14 CAMILLA FORS. MECHANICAL PROPERTIES OF INTERLAYERS IN LAMINATED GLASS – Experimental and Numerical Evaluation (Master's Dissertation) [Электронный ресурс] / Официальный сайт Lund University. FACULTY OF ENGINEERING. – Режим доступа : <http://www.byggmek.lth.se>. – Дата доступа : 20.03.2019.

15 PROPERTIES OF SODA-LIME SILICA FLOAT GLASS [Электронный ресурс] / Technical Bulletin. NSG group. – Режим доступа : <https://www.pilkington.com/resources/ats129propertiesofglass20130114.pdf>. – Дата доступа : 10.03.2019.

16 ГОСТ 9438-85. Пленка поливинилбутиральная клеящая. Технические условия. – Москва : Издательство стандартов, 1985. – 27 с.

17 Properties of SGP and PVB [Электронный ресурс] / Официальный сайт DuPont. – Режим доступа : <https://www.dupont.com/building.html>. – Дата доступа : 24.02.2019.

18 Saflex® Clear PVB interlayer [Электронный ресурс] / Официальный сайт компании Saflex. – Режим доступа : <https://www.saflex.com/products>. – Дата доступа : 15.03.2019.

19 Кикоин, И. К. Таблицы физических величин: Справочник. / И. К. Кикоин, В. Г. Аверин, Б. А. Аронзон ; под ред. И. К. Кикоина. – Москва : Атомиздат, 1976. – 1008 с.