

**С. В. Шалупаев<sup>1</sup>, Ю. В. Никитюк<sup>1</sup>, А. А. Серeda<sup>1</sup>, И. Ю. Аушев<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>УО «Гомельский государственный университет  
имени Франциска Скорины», Гомель, Беларусь

<sup>2</sup>ГУО «Университет гражданской защиты Министерства по  
чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь», Минск, Беларусь

## **КОМБИНИРОВАННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ РАЗДЕЛЕНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ НЕОДНОРОДНЫХ СТРУКТУР ИЗ СТЕКЛА ПО КРИВОЛИНЕЙНЫМ ТРАЕКТОРИЯМ**

### **Введение**

В исследовании [1] предложено для разделения ламинированного стекла (триплекс) вместо механического нанесения поверхностного дефекта при помощи алмазного режущего инструмента использова-

ние лазерно-индуцированных трещин вдоль линии разделения, формируемых в процессе лазерного раскалывания.

Применение данного метода при резке по криволинейным траекториям сопряжено с рядом трудностей [2–3].

В работах [4–8] 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 формируются каналы диаметром 100–500 мкм.

В работе [9] установлена возможность использования таких каналов для инициализации разделяющей трещины в процессе двулучевого управляемого лазерного раскалывания триплекса по прямолинейным траекториям.

Таким образом, представляется целесообразным моделирование процесса лазерного раскалывания многослойных неоднородных структур из стекла с использованием серии каналов, нанесенных вдоль контура обработки для инициализации разделяющей трещины и в качестве направляющих при ее развитии по криволинейным траекториям.

### **1. Постановка задачи**

В соответствии с рисунком 1 вдоль линии обработки наносится серия сквозных отверстий 3, полученных посредством импульсного оптического пробоя поверхности микро-, пико- и фемтосекундными лазерами. Радиус отверстий выбран для моделирования 150, 225, 300 мкм, угловой сектор  $\alpha$  между каналами 1,5, 3 и 4,5 градуса. Лазерный пучок 1  $\text{CO}_2$ -лазера и хладагент 2 круглого сечения движутся вдоль линии обработки. Плотность мощности поверхностного теплового источника  $0,8 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2$ , поперечное сечение в виде круга радиусом 2 мм. Зона воздействия воздушно-водяной смеси диаметром 6 мм обеспечивает охлаждение поверхности стекла с коэффициентом теплоотдачи равным  $6800 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$  [10].

При этом пучок  $\text{CO}_2$ -лазера и хладагент на поверхности обрабатываемой пластины располагаются непосредственно друг за другом на линии обработки.

В качестве образца для моделирования выбрана конструкция из двух пластин силикатного float-стекла толщиной 3 мм с PVB пленкой толщиной 0,38 мм, радиус траектории движения лазерного пучка и хладагента, а также линии, вдоль которой располагаются сквозные

каналы  $R=4$  см. Свойства стекла и PVB пленки представлены в работах [11–13].

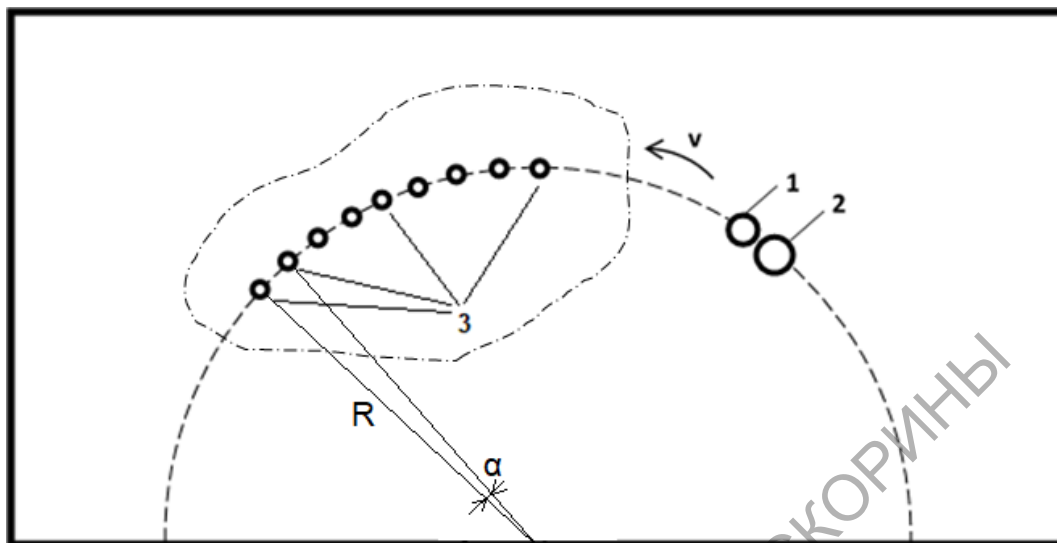


Рисунок 1 – Схема комбинированного лазерного термораскалывания по криволинейным траекториям

Скорость обработки материала  $v$  по схемам, представленным на рисунке 1, выбрана равной 10 мм/с.

## 2. Результаты моделирования

На рисунке 2 а представлено расчетное распределение термоупругих напряжений  $\sigma_R$ , на поверхности обрабатываемого материала в области воздействия лазерного пучка и хладагента в фиксированный момент времени при реализации двулучевого лазерного раскалывания и при отсутствии сквозных каналов, нанесенных вдоль линии обработки. На рисунке 2 б показан расчетный график зависимости аналогичных напряжений вдоль линии обработки. Расчеты выполнены с использованием метода конечных элементов, реализованных в Ansys [14].

Полученное распределение характерно для процесса управляемого лазерного раскалывания. При этом максимум по величине напряжений 16,3 МПа смещен относительно линии воздействия  $\text{CO}_2$ -лазера и хладагента (наблюдается характерная асимметрия в распределении напряжений вдоль линии обработки). Вследствие этого инициализация и развитие трещины происходит со смещением от линии обработки.

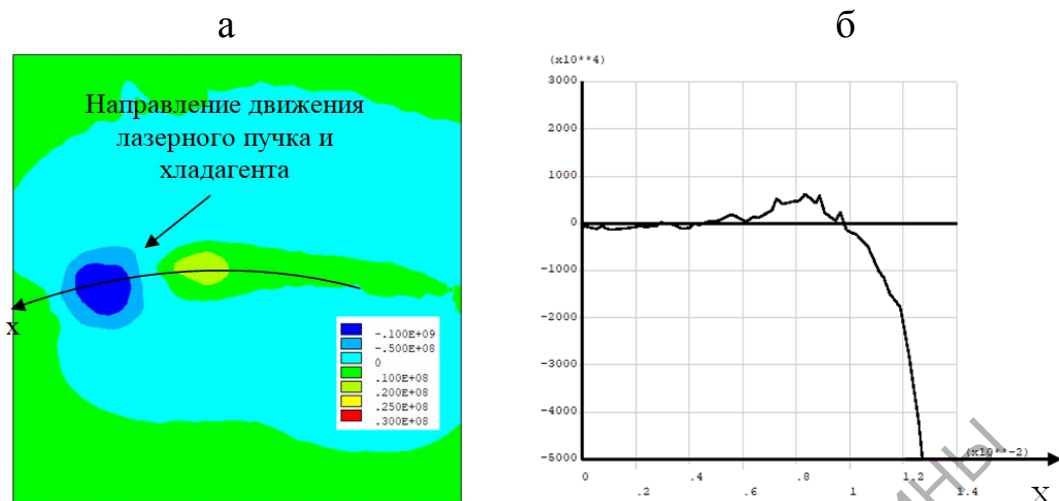


Рисунок 2 – Расчетное распределение и график зависимости термоупругих напряжений  $\sigma_R$ , Па: а) на поверхности материала; б) вдоль линии обработки

На рисунке 3 представлено расчетное распределение термоупругих напряжений при наличии сквозных каналов, центры которых лежат на линии обработки, для величины угла сектора между центрами каналов  $\alpha=3^\circ$  и разных значениях радиуса сквозных каналов.

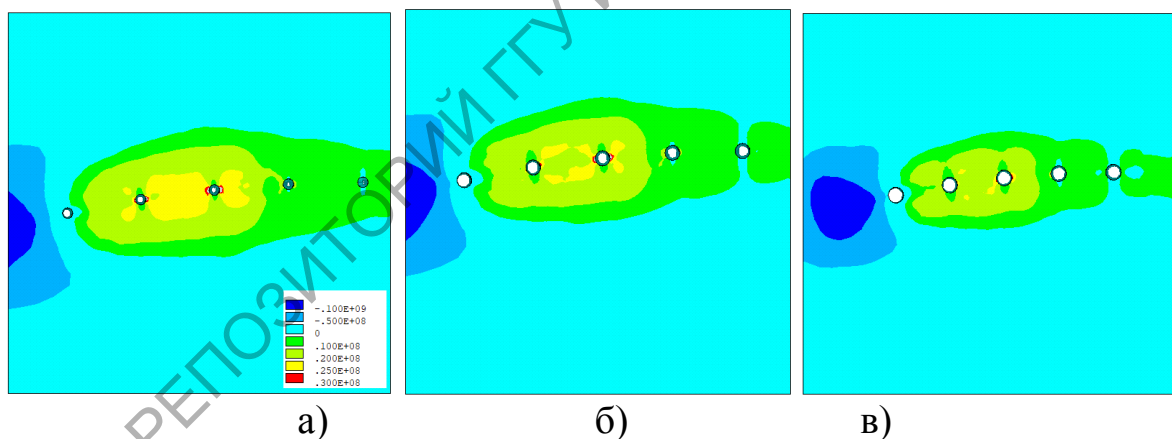


Рисунок 3 – Расчетное распределение термоупругих напряжений  $\sigma_R$ , Па, для  $\alpha=3^\circ$  и радиуса сквозных каналов: а) 150 мкм; б) 225 мкм; в) 300 мкм

Как видно из представленных результатов расчета, наличие сквозных каналов выравнивает картину термоупругих напряжений относительно линии обработки. Максимум растягивающих напряжений находится в поверхностных слоях материала на линии обработки в зоне сквозных каналов, которые являются так называемыми «концентраторами напряжений». При этом величина растягивающих напря-

жений существенно выше, нежели в случае отсутствия каналов, что создает условия для стабильного зарождения разделяющей трещины от каналов, полученных посредством импульсного оптического пробоа поверхности (таблица 1).

Таблица 1 – Расчетные значения максимальных растягивающих напряжений  $\sigma_R$ , МПа в области сквозных каналов в процессе двулучевого лазерного термораскалывания триплекса для  $\alpha=3^\circ$

|                                |      |      |      |
|--------------------------------|------|------|------|
| Радиус сквозного канала R, мкм | 150  | 225  | 300  |
| Величина напряжений, МПа       | 45,7 | 37,4 | 30,2 |

Между отверстиями в области подачи хладагента образуется зона растягивающих напряжений, которая обуславливает развитие разделяющей трещины вдоль линии обработки. Максимумы растягивающих напряжений, направленных перпендикулярно линии обработки (вдоль радиуса траектории обработки), образуются на торцах сквозных каналов. Уменьшение радиуса сквозных каналов ведет не только к увеличению величины максимальных растягивающих напряжений в области сквозных каналов, но и к общему увеличению напряжений в зоне между отверстиями.

Все это формирует условия инициализации трещины от торца отверстий и ее развития вдоль линии обработки по направлению к зоне максимальных растягивающих напряжений в области следующего отверстия, т. е. распространению трещины от канала к каналу.

## Литература

1. Разработка технологии термораскалывания анизотропных и многослойных неоднородных структур лазерными пучками специальной геометрии: отчет о НИР (заключ.) / ГГУ имени Ф. Скорины: рук. С. В. Шалупаев. – Гомель, 2021. – 69 с. – № ГР 20161487.
2. Патент №2164 РБ. Установка для лазерной резки хрупких неметаллических материалов / С. В. Шалупаев, Е. Б. Шершневу, Ю. В. Никитюк, А. А. Середя, А. Евтухов МКИ<sup>7</sup> С 03В 33/02. Заявка и 20050085, заявлено 2005.04.22, опубликовано 2005.09.30.
3. Лазерное термораскалывание хрупких неметаллических материалов по замкнутым криволинейным контурам / С. В. Шалупаев, Ю. В. Никитюк, А. А. Середя // Оптический журнал. – 2008. – Т. 75, № 2. – С. 11–15.
4. Эффект затягивания излучения CO<sub>2</sub>-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.

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

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

9. Шалупаев, С. В. Комбинированное лазерное термораскалывание многослойных неоднородных структур из стекла / С. В. Шалупаев, Ю. В. Никитюк, А. А. Серeda // Юбилейная научно-практическая конференция, посвященная 90-летию Гомельского государственного университета имени Франциска Скорины (Гомель, 19–20 ноября 2020 г.) : материалы : в 3 ч. / редкол. : С. А. Хахомов (гл. ред.) [и др.]. – Гомель ГГУ им. Ф. Скорины, 2020. – С. – 191–194.

10. Кикоин, И. К. Таблицы физических величин: Справочник. / И. К. Кикоин, В. Г. Аверин, Б. А. Аронзон // Под ред. И. К. Кикоина. – М.: Атомиздат, 1976. – 1008 с.

11. 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: 20.03.2021.

12. ГОСТ 9438-97. Пленка поливинилбутиральная клеящая. Технические условия. – Введ. 01.07.2002 – Мн.: Белор. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2003. – 29 с.

13. Properties of SGP and PVB [Электронный ресурс] / Официальный сайт DuPont. – Режим доступа: <https://www.dupont.com/building.html>. – Дата доступа: 10.04.2021.

14. Ansys [Электронный ресурс] / Официальный сайт компании Ansys, Inc. – Режим доступа: <https://ansys.com>. – Дата доступа: 14.02.2021.