

УДК 621.373.8:621.937:549.517.14

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗДЕЛЕНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ НЕОДНОРОДНЫХ СТРУКТУР ИЗ СТЕКЛА ПО КРИВОЛИНЕЙНЫМ КОНТУРАМ

С.В. Шалупаев¹, Ю.В. Никитюк¹, А.А. Серeda¹, И.Ю. Аушев²

¹Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины

²Университет гражданской защиты МЧС Республики Беларусь, Минск

MODELING THE PROCESS OF SEPARATING MULTILAYER HETEROGENEOUS GLASS STRUCTURES ALONG CURVED CONTOURS

S.V. Shalupaev¹, Y.V. Nikitjuk¹, A.A. Sereda¹, I.Y. Aushev²

¹Francisk Skorina Gomel State University

²University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus, Minsk

В рамках теории термоупругости выполнен сравнительный анализ полей термоупругих напряжений, возникающих в многослойных структурах из стекла (триплекс) в процессе двухлучевого управляемого лазерного термораскалывания. При этом вдоль линии обработки предварительно наносится серия каналов перпендикулярных поверхности материала. Показано, что при наличии каналов величина максимальных растягивающих напряжений существенно увеличивается и зависит от радиуса каналов, расстояния между ними и параметров обработки. Серия нанесенных каналов вдоль линии обработки позволяет контролировать инициализацию и развитие трещины вдоль линии обработки по криволинейным траекториям.

Ключевые слова: термораскалывание, моделирование, метод конечных элементов, температура, триплекс, термоупругие напряжения.

Within the framework of the theory of thermoelasticity, a comparative analysis of the fields of thermoelastic stresses arising in multilayer glass structures (triplex) in the process of two-beam controlled laser thermal cleavage is carried out. In this case, a series of channels perpendicular to the surface of the material is preliminarily applied along the processing line. It is shown that in the presence of channels, the magnitude of the maximum tensile stresses increases significantly and depends on the radius of the channels, the distance between them and the processing parameters. A series of applied channels along the machining line allows control of crack initiation and propagation along the machining line along curved paths.

Keywords: thermal cleavage, modeling, finite element method, temperature, triplex, thermoelastic stresses.

Введение

Многослойное стекло (триплекс) используется для производства ограждений, элементов декора, прочных конструкций из стекла, стеклопакетов и бронированных стекол, элементов остекления кузова автомобиля. В ряде случаев требуется разделение готовых листов триплекса, подрезка краев, в том числе и по криволинейным траекториям.

В промышленных условиях, резка триплекса чаще всего осуществляется надрезанием стекла с двух сторон, после чего его аккуратно разламывают. Затем специальные инфракрасные нагревательные элементы прогревают всю линию надреза. Во время такой процедуры склеивающая пленка размягчается и позволяет отделить две части триплекса друг от друга. Также используют и гидроабразивную резку, в основе которой лежит принцип эрозионного воздействия смеси высокоскоростной водяной струи и твердых абразивных частиц на обрабатываемый материал. Физическая суть механизма гидроабразивной резки состоит в отрыве и уносе из полости реза частиц материала скоростным потоком твердофазных частиц.

Авторами данной статьи в работе [1] показано, что для разделения ламинированного стекла (триплекс), вместо механического нанесения поверхностного дефекта при помощи алмазного режущего инструмента можно использовать лазерно-индуцированную трещину вдоль линии разделения, полученную в процессе двухлучевого управляемого лазерного термораскалывания, сущность которого заключается в последовательном локальном нагреве и охлаждении вдоль линии разделения, в результате которого образуется несквозная трещина в области воздействия хладагента, следующая за лазерным пучком вдоль линии обработки [1]. Дальнейшее развитие трещины по всей толщине стеклянной пластины до PVB пленки возможно за счет механического, теплового или ультразвукового докалывания. При этом образуются бездефектные кромки разделенных пластин, что увеличивает их прочность в сравнении с механическим нанесением дефекта алмазным режущим инструментом и избавляет от необходимости дальнейшей обработки разделенной поверхности (шлифовка, полировка). При дальнейшем воздействии в области разделения

инфракрасными нагревательными элементами для размягчения пленки и окончательного разделения триплекса, бездефектные края снижают риск возникновения трещины в области разделения вследствие возникновения термоупругих напряжений.

Использование данного метода для разделения по криволинейной траектории обусловлено рядом трудностей. Это и отклонение формируемой профиля трещины от линии резки, и сложности в ее инициализации в заданной позиции на поверхности материала [2]–[3].

В работах [4]–[10] 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.

В работе [11] проведены теоретические исследования и показана возможность использования таких каналов для инициализации разделяющей трещины в процессе двулучевого управляемого лазерного термораскалывания триплекса по прямолинейным траекториям.

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

1 Постановка задачи

В соответствии с рисунком 1.1 вдоль линии обработки наносится серия сквозных отверстий 3, полученных посредством импульсного оптического пробоя поверхности микро-, пико- и фемтосекундными лазерами. Лазерный пучок 1 и хладагент 2 круглого сечения движутся вдоль 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, а радиус каналов выбраны для моделирования 150, 225, 300 мкм, угловой сектор между каналами 1,5, 3 и 4,5 градуса. Свойства стекла и PVB пленки представлены в работах [12]–[18].

Пучок CO_2 -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 / м^2 и поперечным сечением в виде круга радиусом 2 мм. Лазерные пучки и

хладагент формируются симметрично с обеих сторон ламинированного стекла (триплекс). При используемых параметрах подачи воздушно-водяной смеси обеспечивается охлаждение поверхности стекла с коэффициентом теплоотдачи равным 6800 Вт / ($\text{м}^2 \cdot \text{К}$) [19]. Хладагент подается на поверхность в виде мелкодисперсной воздушно-водяной смеси диаметром 6 мм. При этом пучок CO_2 -лазера и хладагент на поверхности обрабатываемой пластины располагали непосредственно друг за другом на линии обработки.

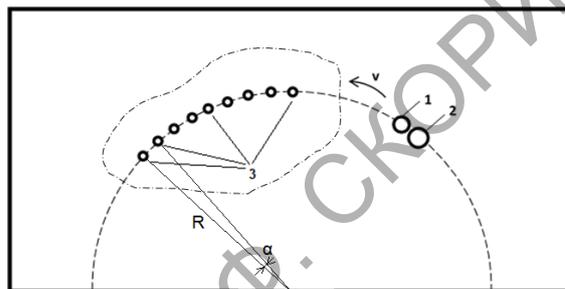


Рисунок 1.1 – Схема комбинированного лазерного термораскалывания по криволинейным траекториям

Скорость обработки материала v по схемам, представленным на рисунке 1.1, 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 нами стекол составляет порядка 780 К. Вследствие того, что стекло является аморфным веществом, при превышении данного значения оно теряет упругие свойства.

2 Результаты моделирования

На рисунке 2.1, а) представлено расчетное распределение термоупругих напряжений, направленных перпендикулярно линии разделения (вдоль радиуса окружности), на поверхности обрабатываемого материала в области воздействия лазерного пучка и хладагента в фиксированный момент времени при реализации двулучевого лазерного термораскалывания и при отсутствии сквозных каналов, нанесенных вдоль линии обработки. На рисунке 2.1, б) показан расчетный график зависимости аналогичных напряжений вдоль линии обработки. Расчеты выполнены с использованием метода конечных элементов, реализованных в инженерном пакете Ansys [20].

Полученное распределение характерно для процесса управляемого лазерного термораскалывания. На поверхности материала в области подачи хладагента, где происходит резкое охлаждение материала, возникает зона сильных растягивающих

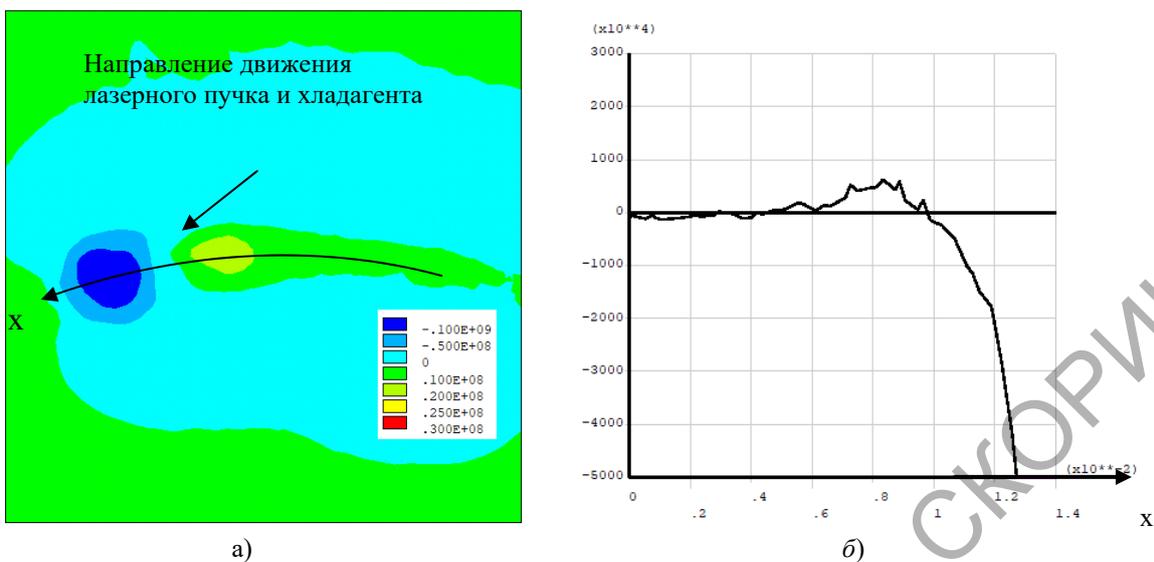


Рисунок 2.1 – Расчетное распределение и график зависимости термоупругих напряжений σ_R , Па: а) на поверхности материала; б) вдоль линии обработки

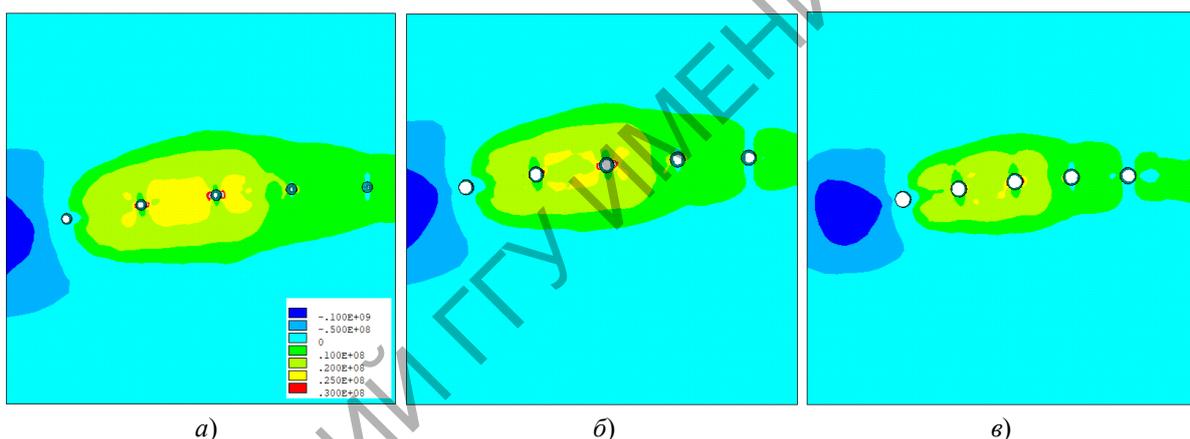


Рисунок 2.2 – Расчетное распределение термоупругих напряжений σ_R , Па, для $\alpha = 3^\circ$ и радиуса сквозных каналов: а) 150 мкм; б) 225 мкм; в) 300 мкм

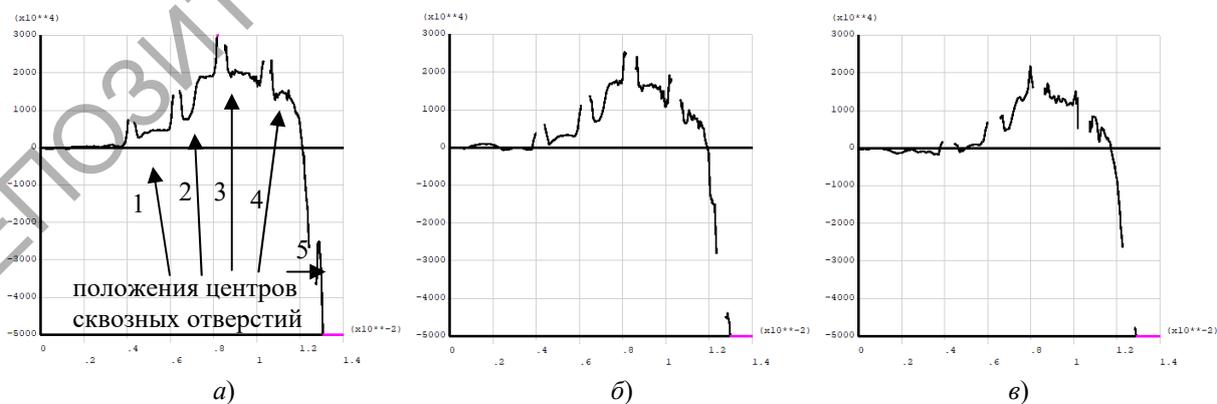


Рисунок 2.3 – Расчетный график зависимости термоупругих напряжений σ_R , Па на поверхности материала вдоль линии обработки для $\alpha = 3^\circ$ для радиуса сквозных каналов: а) 150 мкм; б) 225 мкм; в) 300 мкм

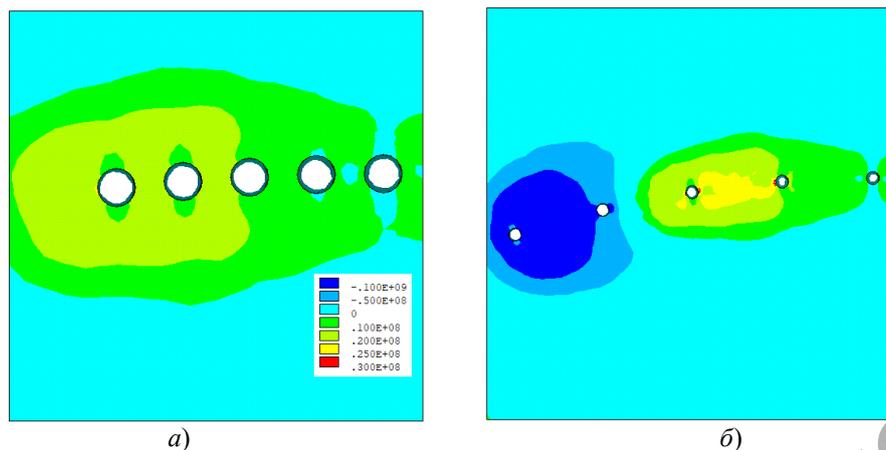


Рисунок 2.4 – Расчетное распределение термоупругих напряжений σ_R , Па:

для угла сектора между центрами каналов 3° для радиуса сквозных каналов:

a) для $\alpha = 1,5^\circ$ и радиуса сквозных каналов 300 мкм; б) для $\alpha = 4,5^\circ$ и радиуса сквозных каналов 225 мкм

Таблица 2.1 – Расчетные значения максимальных растягивающих напряжений σ_R , МПа в области сквозных каналов в процессе двулучевого лазерного термораскалывания триплекса

Угол сектора, $^\circ$	1,5			3			4,5		
Радиус сквозного канала R, мкм	150	225	300	150	225	300	150	225	300
Величина напряжений, МПа	43,6	27,2	20,6	45,7	37,4	30,2	43,5	32,8	30,3

напряжений. При этом максимум по величине напряжений 16,3 МПа смещен относительно линии воздействия CO_2 -лазера и хладагента (наблюдается характерная асимметрия в распределении напряжений вдоль линии обработки. Максимальное значение напряжений вдоль линии обработки, как видно из графика на рисунке 2.1, б), значительно ниже. Вследствие этого инициализация и развитие трещины происходит со смещением от линии обработки.

Максимальные значения температур не превышают температуры стеклования и составляют 680 К.

На рисунке 2.2 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. На рисунке 2.3 – расчетный график зависимости аналогичных напряжений вдоль линии обработки.

Как видно из представленных на рисунках 2.2, 2.3 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 напряжений существенно выше, нежели в случае отсутствия каналов, что создает условия для стабильного зарождения разделяющей трещины от каналов, полученных посредством импульсного

оптического пробоя поверхности микро-, пико- и фемтосекундными лазерами (таблица 2.1). 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.

Анализ распределения напряжений, полученных в процессе моделирования двулучевого лазерного термораскалывания при значениях угла сектора между центрами сквозных каналов $1,5^\circ$ и $4,5^\circ$, некоторые из которых представлены на рисунке 2.4, позволяет сделать вывод, что величина максимальных растягивающих напряжений σ_R на торцах отверстий, а также в зоне обработки между ними, ниже, чем при значениях угла сектора 3° . Таким образом, существует некоторое оптимальное значение расстояния между центрами отверстий, при которых можно добиться максимальной стабильности зарождения и развития разделяющей трещины. Это расстояние

обусловлено, радиусом кривизны траектории и параметрами обработки и может быть определено при моделировании каждого технологического режима разделения.

Заключение

Выполненное численное моделирование схемы комбинированного лазерного термораскалывания по криволинейным траекториям показывает, что в области воздействия хладагента, вдоль линии, проходящей через центры соседних отверстий, на поверхности материала формируется область сильных растягивающих напряжений направленных поперечно линии обработки. Иницированная от отверстия трещина распространяется вдоль данной линии. При этом величина растягивающих напряжений в области воздействия хладагента при наличии каналов существенно выше, нежели при их отсутствии и зависит от диаметра отверстий, расстояния между ними и параметров обработки. Таким образом, серия нанесенных каналов вдоль линии обработки позволяет контролировать инициализацию и развитие трещины вдоль линии обработки по криволинейным траекториям.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Разработка технологии термораскалывания анизотропных и многослойных неоднородных структур лазерными пучками специальной геометрии*: отчет о НИР (заключ.) / ГГУ им. 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. Шершнева, Ю.В. Никитюк, А.А. Середа, А.Евтухов МКИ⁷ С 03В 33/02. Заявка и 20050085, заявлено 2005.04.22, опубликовано 2005.09.30.
3. *Шалупаев, С.В.* 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.
4. *Эффект затягивания излучения СО₂-лазера в узкий канал при обработке металлов комбинированным лазерным излучением* / А.В. Федин [и др.] // *Изв. РАН. Сер. физ.* – 1999. – Т. 63, № 10. – С. 2053–2058.
5. *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.
6. *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.

7. *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.

8. *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. – М., 1999. – 40 с.

9. *Модификация кварцевого стекла лазерными импульсами фемтосекундной длительности* / В.В. Кононенко [и др.] // *Компьютерная оптика*. – 2009. – Т. 33, № 3. – С. 254–259.

10. *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.

11. *Шалупаев, С.В.* Комбинированное лазерное термораскалывание многослойных неоднородных структур из стекла / С.В. Шалупаев, Ю.В. Никитюк, А.А. Середа // Юбилейная научно-практич. конф., посвящ. 90-летию ГГУ им. Ф. 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.

12. *AGS. Technical Data Sheet – Planibel* [Электронный ресурс] / Официальный сайт AGS Glass UK Ltd. – Режим доступа: <https://www.agc-younglass.com/>. – Дата доступа: 10.03.2021.

13. *Camilla fors. Mechanical properties of interlayers in laminated glass – Experimental and Numerical Evaluation (Master's Dissertation)* [Электронный ресурс] / Официальный сайт Lund University. – Режим доступа: <http://www.byggmek.lth.se>. – Дата доступа: 20.03.2021.

14. *Properties of soda-lime silica float glass* [Электронный ресурс] / Technical Bulletin. NSG group. – Режим доступа: <https://www.pilkington.com/resources/ats129propertiesofglass20130114.pdf>. – Дата доступа: 10.04.2021.

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

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

17. *Saflex® Clear PVB interlayer* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.saflex.com/products>. – Дата доступа: 10.04.2021.

18. *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.

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

20. *Ansys* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ansys.com>. – Дата доступа: 14.02.2021.

Поступила в редакцию 05.04.2021.