

УДК 621.373.826

ОСОБЕННОСТИ ЛАЗЕРНОГО ТЕРМОРАСКАЛЫВАНИЯ КВАРЦЕВОГО СТЕКЛА

Е.Б. Шершнев, Ю.В. Никитюк, С.И. Соколов

Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины, Гомель

FEATURES OF CONTROLLED LASER THERMAL CLEAVAGE OF QUARTZ GLASS

E.B. Shershnev, Yu.V. Nikitjuk, S.I. Sokolov

F. Scorina Gomel State University, Gomel

В данной работе представлены результаты моделирования процесса формирования лазерно-индуцированной трещины в кварцевом стекле, полученные с использованием техники перестроения конечно-элементной сетки. Моделирование проводилось в рамках теории термоупругости с использованием критериев механики разрушения для определения условий роста трещины.

Ключевые слова: трещина, лазерное раскалывание, кварцевое стекло.

This paper presents finite element analysis based on the remeshing technique to predict laser-induced crack propagation in quartz glass. The simulation process is accomplished by the analysis of the coupled temperature and stress fields together with the criteria of fracture mechanics of the crack growth.

Keywords: crack, laser cleaving, quartz glass.

Введение

Кварцевое стекло характеризуется высокой механической прочностью и высокой термостойкостью, устойчиво к действию кислот и воды. Благодаря этим свойствам кварцевое стекло используется в качестве материала для изготовления иллюминаторов космических кораблей, окон фотоприемников и колб газоразрядных ламп. Из кварцевого стекла производятся линзы для передачи ультрафиолетового излучения и призмы для монохроматоров и спектрофотометров [1].

Традиционные методы обработки кварцевого стекла основываются на применении для резки алмазного инструмента, гидроабразивной струи или на применении лазерного излучения для резки в режиме испарения материала. Основным недостатком традиционных методов является высокая дефектность получаемых кромок, что приводит к значительному снижению прочности стекла [2].

Одним из наиболее эффективных методов высокоточной обработки хрупких неметаллических материалов является управляемое лазерное термораскалывание. Сущность данного метода заключается в разделении материала в результате формирования термо-индуцированной трещины при последовательном лазерном нагреве и воздействии хладагента на обрабатываемую поверхность. К основным достоинствам управляемого лазерного раскалывания относятся высокая точность разделения и высокая скорость обработки, безотходность и повышение прочности получаемых изделий [3].

Изучению лазерного раскалывания стекол, керамики и кристаллов посвящены работы [2]–[17]. Исследование особенностей лазерного раскалывания кварцевого стекла проведено в работах [2], [15]–[17]. В этих работах отмечается высокая термостойкость кварцевого стекла, определяемая низкими значениями коэффициента линейного термического расширения. Высокая термостойкость кварцевого стекла обуславливает повышенную зависимость от параметров лазерной обработки надежности формирования лазерно-индуцированной трещины.

Отметим, что моделирование процессов лазерной обработки в работах [15]–[17] проводилось в рамках теории термоупругости и при этом не учитывалось наличие в материале стартового дефекта и лазерно-индуцированной трещины. Это не позволяет использовать полученные результаты для точных расчетов технологических параметров лазерного раскалывания кварцевого стекла, так как наличие стартового дефекта и лазерно-индуцированной трещины существенным образом влияет на распределение полей напряжений. Кроме этого нужно отметить, что определение пространственной локализации термоупругих полей не позволяет установить, с необходимой точностью, будет ли стабильно развиваться лазерно-индуцированная трещина. Для решения данной задачи необходимо определение критического состояния в соответствии с критериями механики разрушения [18]–[19].

В работе [2] была предпринята попытка использования критериев механики разрушения

для анализа лазерного раскалывания кварцевого стекла, однако расчеты были выполнены в приближении бесконечной пластины ослабленной полубесконечной трещиной. Данное приближение значительно снижает точность расчетов режимов формирования лазерно-индуцированной трещины в кварцевом стекле и не позволяет использовать полученные результаты для точных расчетов технологических параметров данного процесса.

В работах [20]–[21] разработаны алгоритмы 2-D и 3-D моделирования процесса формирования термо-индуцированной трещины в рамках теории термоупругости и линейной механики разрушения с использованием техники перестроения конечноэлементной сетки. Предложенное авторами работ [20]–[21] перестроение конечно-элементной сетки, последовательность которого определяется расчетными значениями коэффициента интенсивности напряжений в вершине трещины, в значительной степени повышает точность моделирования лазерного раскалывания хрупких неметаллических материалов.

В связи с этим представляется целесообразным проведение исследования лазерного раскалывания кварцевого стекла в рамках теории термоупругости и линейной механики разрушения с учетом параметров стартового дефекта и с использованием предложенного в [20]–[21] техники перестроения конечно-элементной сетки.

1 Моделирование лазерного раскалывания кварцевых пластин

Моделирование лазерного раскалывания кварцевых пластин было выполнено с использованием алгоритма разработанного в [20]–[21] (рисунок 1.1). Расчет полей температурных напряжений осуществлялся в рамках несвязанной задачи термоупругости в квазистатической постановке с использованием метода конечных элементов [22].

Были использованы следующие условия роста лазерно-индуцированной трещины: расчетный коэффициент интенсивности напряжений K_I в вершине трещины должен превышать критический коэффициент интенсивности напряжений K_{IC} , при этом напряжения в вершине трещины должны быть растягивающими [20]. Критический коэффициент интенсивности напряжений K_{IC} представляет собой механическую характеристику материала, которая характеризует его способность сопротивляться распространению трещины нормального отрыва при хрупком разрушении [18]–[19].

Для повышения точности расчетов K_I были использованы специальные элементы моделирующие сингулярность напряжений у вершины трещины. При этом для получения корневой асимптотики у вершины трещины осуществлялся сдвиг узлов изопараметрических элементов на

четверть стороны элемента в направлении вершины [18], [20].

На рисунке 1.2 приведена схема расположения зон воздействия лазерного излучения и хладагента в плоскости обработки. Позицией 1 отмечен лазерный пучок, позицией 2 – хладагент, позицией 3 – трещина, позицией 4 – стеклянная пластина. Горизонтальной стрелкой на рисунке указано направление перемещения обрабатываемого изделия относительно лазерного пучка и хладагента.

Для проведения сравнительного анализа в данной работе расчеты выполнялись для кварцевого стекла и для листового силикатного стекла. Свойства данных материалов приведены в таблице 1.1.

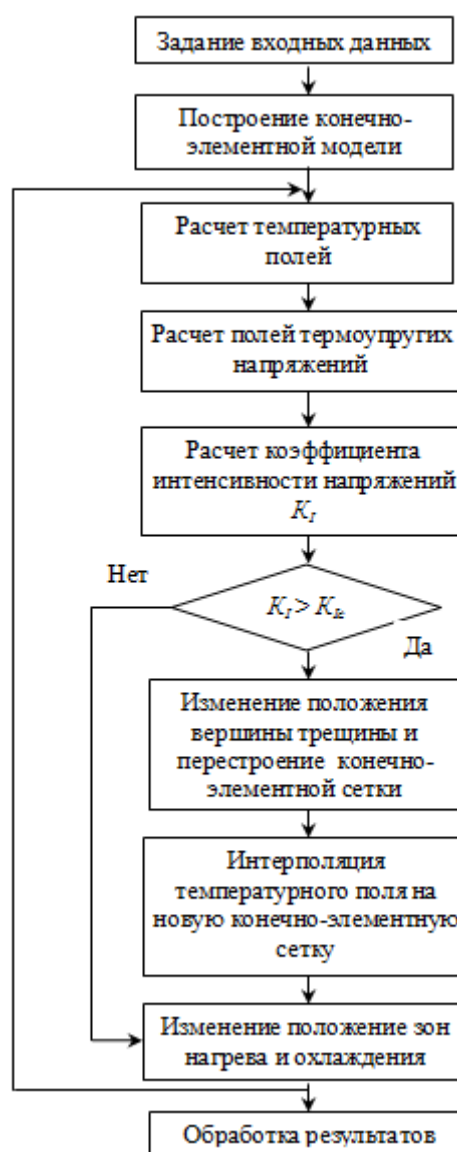


Рисунок 1.1 – Алгоритм конечно-элементного моделирования лазерного раскалывания кварцевого стекла

Расчеты проводились для прямоугольных пластин с геометрическими размерами $15 \times 20 \times 1$ мм. Моделирование проводилось для случая воздействия лазерного излучения с длиной волны равной $10,6$ мкм.

Были использованы следующие значения параметров лазерного пучка: большая ось $A = 6 \cdot 10^{-3}$ м, малая ось $B = 2 \cdot 10^{-3}$ м. Скорость перемещения пластины относительно лазерного пучка и хладагента выбиралась равной $v = 15$ мм/с. Полагалось, что используемые параметры подачи воздушно-водяной смеси обеспечивают охлаждение поверхности стекла с коэффициентом теплоотдачи равным 7000 Вт/м²К [23]. Радиус пятна хладагента $R_h = 3$ мм. Длина стартовой трещины изменялась в диапазоне от $0,75$ мм до $1,5$ мм.

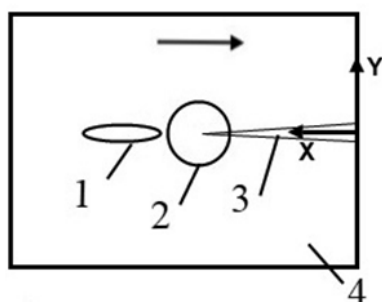


Рисунок 1.2 – Схема расположения зон воздействия лазерного излучения и хладагента в плоскости обработки стеклянной пластины

Таблица 1.1 – Свойства листового и кварцевого стекла

Свойства материала	Листовое силикатное стекло	Кварцевое стекло
Плотность, кг/м ³	2450	2200
Удельная теплоемкость, Дж/кг·К	860	880
Теплопроводность, Вт/м·К	0,88	1,34
Коэффициент линейного термического расширения, град ⁻¹ ·10 ⁻⁷	89	5
Модуль Юнга, ГПа	70	78
Коэффициент Пуассона	0,22	0,17
Критический коэффициент интенсивности напряжений K_{IC} , МПа м ^{1/2}	0,5	0,7

Отметим, что температура в зоне обработки при лазерном раскалывании должна быть ограничена значениями, соответствующими отсутствию релаксации термоупругих напряжений. Для стекол в качестве верхнего предела допустимых температур выбирают соответствующее данной марке стекла значение температуры стеклования (для кварцевого стекла температура стеклования равна 1473 К, для листового силикатного стекла – 789 К [4]).

2 Результаты численного эксперимента

В ходе численного эксперимента были определены значения мощности лазерного излучения, обеспечивающие нагрев материала до температуры стеклования, при использовании вышеперечисленных параметров обработки и геометрии образцов. В случае термораскалывания кварцевого стекла максимальная допустимая мощность лазерного излучения $P = 30$ Вт, а в случае листового силикатного стекла $P = 10$ Вт.

Результаты проведенных расчетов представлены на рисунках 2.1–2.6.

На рисунках 2.1–2.3 цифрой 1 отмечены расчетные кривые соответствующие случаю термораскалывания кварцевого стекла, а цифрой 2 отмечены расчетные кривые, полученные при моделировании термораскалывания листового силикатного стекла. При проведении сравнительного анализа лазерного термораскалывания кварцевого и листового силикатного стекла длина стартовой трещины задавалась равной 1 мм, при этом не использовалась техника перестройки конечно-элементной сетки (т. е. длина трещины оставалась постоянной).

Как уже отмечалось ранее, при используемых параметрах обработки нагрев материала осуществлялся до температур стеклования кварцевого и листового силикатного стекла (рисунок 2.1).

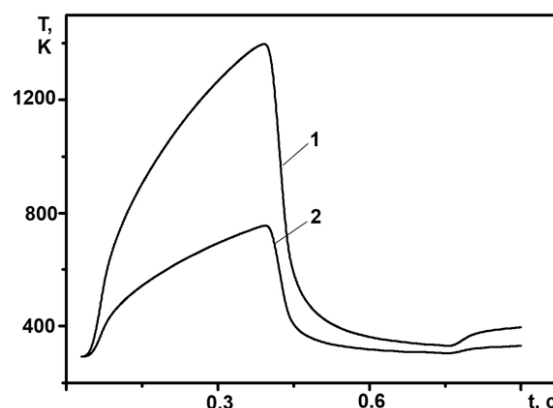


Рисунок 2.1 – Расчетные значения температуры T в вершине трещины

Как видно из графиков, представленных на рисунке 2.2, при лазерном термораскалывании кварцевых и листовых силикатных стекол в вершине стартового дефекта в результате лазерного

нагрева формируются значительные по величине напряжения сжатия. Максимальные по величине значения сжимающих напряжений в вершине стартовой трещины достигают 168 МПа для кварцевого стекла и 692 МПа для листового силикатного стекла. Далее вследствие воздействия хладагента в вершине стартового дефекта формируются растягивающие напряжения, максимальные значения которых равны соответственно 143 МПа в случае моделирования обработки кварцевого стекла и 388 МПа в случае листового силикатного стекла (рисунок 2.2).

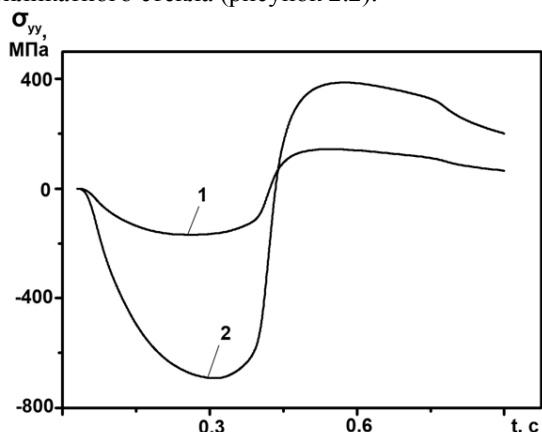


Рисунок 2.2 – Расчетные значения упругих напряжений σ_{yy} в вершине трещины

Как видно из графиков, представленных на рисунке 2.3, в вершине стартовой трещины последовательно формируются два максимума коэффициентов интенсивности напряжений. При этом второй максимум значений коэффициентов интенсивности напряжений значения которого для кварцевого стекла равно $0,82 \text{ МПа м}^{1/2}$ и $2,14 \text{ МПа м}^{1/2}$ для листового силикатного стекла соответствует уже растягивающим напряжениям в вершине трещины, что означает выполнение обоих необходимых условий для начала развития трещины.

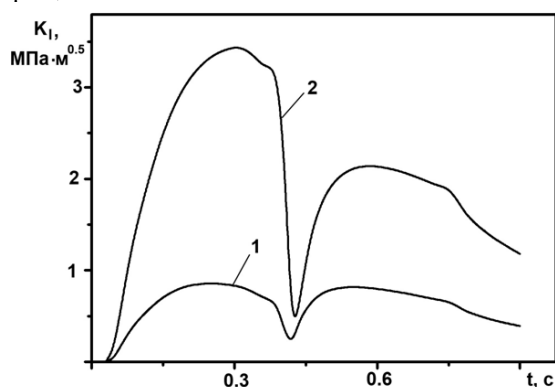


Рисунок 2.3 – Расчетные значения коэффициента интенсивности напряжений K_I в вершине трещины

При сравнении значений величины термоупругих напряжений и значений коэффициентов

интенсивности напряжений формируемых в вершине трещины при термораскалывании листового и кварцевого стекла видно, что в случае резки кварцевого стекла максимальные значения коэффициента интенсивности напряжений меньше в 2,6 раз. При этом необходимо учитывать, что сравнение проводится при различных максимальных значениях температуры в зоне обработки (рисунок 2.1).

Следует обратить внимание, что выбранные режимы обработки обеспечивают практически минимальные необходимые значения коэффициента интенсивности напряжений в случае резки кварцевого стекла. Таким образом, при небольшом увеличении скорости обработки или при небольшом снижении мощности лазерного излучения значения коэффициента интенсивности напряжений в вершине трещины не достигнут значений критического коэффициента интенсивности напряжений, что на эксперименте приведет к срыву процесса формирования лазерно-индуцированной трещины. Основной причиной низких значений коэффициентов интенсивности напряжений, формируемых в вершине трещины, является низкое значение коэффициента линейного термического расширения кварцевого стекла, которое на порядок меньше, чем у большинства промышленных силикатных стекол.

Для изучения влияния параметров стартового дефекта на процесс инициализации лазерно-индуцированной трещины были выполнены расчеты значений напряжений и коэффициентов интенсивности напряжений в вершине трещины для различных значений длины стартового дефекта с использованием техники перестроения конечно-элементной сетки.

На рисунках 2.4–2.6 цифрой 1 отмечены расчетные кривые, полученные при длине стартового дефекта $L = 0,75 \text{ мм}$, цифрой 2 отмечены кривые, полученные при $L = 1 \text{ мм}$, цифрой 3 отмечены кривые, полученные при $L = 1,5 \text{ мм}$.

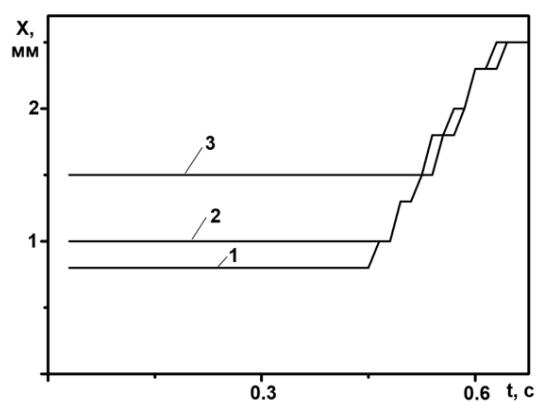


Рисунок 2.4 – Расчетные значения координат X вершины трещины

Необходимо отметить, что во всех трех расчетных случаях осуществляется развитие

лазерно-индуцированных трещин из стартовых дефектов (рисунок 2.4). Однако следует обратить внимание на заметное влияние длины стартового дефекта на величину термоупругих напряжений и коэффициентов интенсивности напряжения в вершине трещины (рисунок 2.5, 2.6).

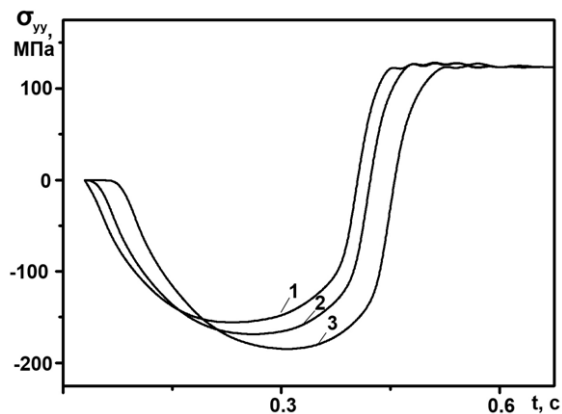


Рисунок 2.5 – Расчетные значения упругих напряжений σ_{yy} в вершине трещины

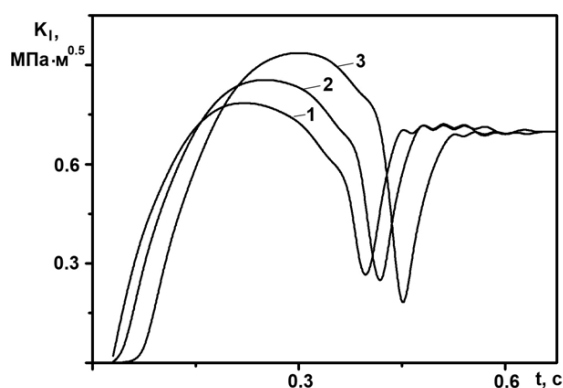


Рисунок 2.6 – Расчетные значения коэффициента интенсивности напряжений K_I в вершине трещины

Так при длине стартового дефекта $L = 0,75$ мм максимальные значения коэффициента интенсивности напряжений составляют $K_I = 0,79$ МПа м^{1/2}, при $L = 1$ мм, максимальные значения коэффициента интенсивности напряжений составляют $K_I = 0,86$ МПа м^{1/2}, а при $L = 1,5$ мм максимальные значения коэффициента интенсивности напряжений составляют $K_I = 0,94$ МПа м^{1/2}.

Таким образом, за счет увеличения длины стартового дефекта можно увеличивать вероятность инициализации лазерно-индуцированной трещины, что принципиально важно в случае отработки режимов лазерного термораскалывания кварцевых стекол. При этом применение технологии 3-D моделирования процесса формирования термо-индуцированной трещины в рамках теории термоупругости и линейной механики разрушения с использованием техники перестроения конечноэлементной сетки обеспечивает

возможность проведения необходимых расчетов технологических режимов лазерного термораскалывания кварцевых стекол с учетом параметров стартового дефекта.

Заключение

Полученные в работе результаты показывают принципиальную необходимость учета параметров стартового дефекта при расчете технологических режимов лазерного раскалывания кварцевых стекол.

ЛИТЕРАТУРА

1. Арбузов, В.И. Основы радиационного оптического материаловедения / В.И. Арбузов. – СПб : СПб ГУ ИТМО, 2008. – 284 с.
2. Борисовский, В.Е. Развитие теории и разработка комплекса технологий и оборудования для лазерной обработки кварцевого стекла: автореф. дис. докт. техн. наук : 05.11.14 / В.Е. Борисовский; МГУПИ. – М., 2011. – 36 с.
3. Способ резки неметаллических материалов: пат. 2024441 РФ, МКИ 5 С03В33/02 / В.С. Кондратенко; заявитель В.С. Кондратенко; заявл. 04.02.92; опубл. 12.15.94
4. Мачулка, Г.А. Лазерная обработка стекла / Г.А. Мачулка. – М. : Сов. радио, 1979. – 136 с.
5. Chwan-Huei Tsai. Fracture mechanism of laser cutting with controlled fracture / Chwan-Huei Tsai, Chi-Sheng Liou // Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2003. – Vol. 125. – P. 519–528.
6. Двухлучевое лазерное термораскалывание хрупких неметаллических материалов / С.В. Шалупаев [и др.] // Оптический журнал. – 2005. – Т. 73, № 5. – С. 62–66.
7. 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.
8. Junke, J. Cutting glass substrates with dual-laser beams / J. Junke, W. Xinbing // Optics and Lasers in Engineering. – 2009. – Vol. 47. – P. 860–864.
9. Effect of thermal stress on chip-free diode laser cutting of glass / Salman Nisar [et al.] // Optics and Laser Technology. – 2009. – Vol. 41. – P. 318–327.
10. YAG laser cutting soda-lime glass with controlled fracture and volumetric heat absorption / L.J. Yang [et al.] // International Journal of Machine Tools & Manufacture. – 2010. – Vol. 50. – P. 849–859.
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. Гундин, П.Д. Разработка новых технологий и оборудования на основе метода лазерного управляемого термораскалывания для обработки

деталей приборостроения, микро- и оптоэлектроники: автореф. дис. докт. техн. наук : 05.11.14 / П.Д. Гиндин; МГУПИ. – М., 2009. – 43 с.

13. 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.

14. Особенности управляемого лазерного термораскалывания кристаллического кварца / А.Н. Сердюков [и др.] // Кристаллография. – 2012. – Т. 57, № 6. – С. 906–912.

15. Шалупаев, С.В. Термоупругие поля, формируемые в твердых телах световыми и звуковыми потоками: дис. ... канд. физ.-матем. наук: 01.04.05 / С.В. Шалупаев. – Мн, 1987. – 157 с.

16. Шершнев, Е.Б. Разработка и внедрение новых эффективных процессов в производство стеклоизделий с применением лазерной технологии: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.11 / Е.Б. Шершнев. – М., 1990. – 145 с.

17. Никитюк, Ю.В. Физические закономерности лазерного термораскалывания силикатных стекол и алюмооксидной керамики : дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.21 / Ю.В. Никитюк. – Гомель, 2009. – 165 с.

18. Морозов, Е.М. ANSYS в руках инженера: Механика разрушения / Е.М. Морозов, А.Ю. Муйземнек, А. С. Шадский. – М. ЛЕНАНД, 2008. – 456 с.

19. Партон, В.З. Механика разрушения: от теории к практике / В.З. Партон. – М. : Наука, 1990. – 240 с.

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

21. 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.

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

23. Богуславский, И.А. Высокопрочные закаленные стекла / И.А. Богуславский. – М. : Издательство литературы по строительству, 1969. – 208 с.

Поступила в редакцию 12.08.13.