

УДК 621.373.8:621.937:549.517.14

ЛАЗЕРНОЕ ТЕРМОРАСКАЛЫВАНИЕ САПФИРА ПУЧКАМИ СЕРПОВИДНОЙ ФОРМЫ

С.В. Шалупаев, Ю.В. Никитюк, А.А. Серeda

Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины

LASER THERMOSPLITTING OF SAPPHIRE BY CRESCENT-SHAPED BEAMS

S.V. Shalupaev, Y.V. Nikitjuk, A.A. Sereda

F. Scorina Gomel State University

В рамках теории термоупругости выполнен сравнительный анализ температурных полей и полей термоупругих напряжений, возникающих в пластинах кристаллического сапфира в процессе однолучевого и двухлучевого управляемого лазерного термораскалывания при использовании пучков круглого и серповидного сечения. Показано, что использование пучков серповидной формы обеспечивает формирование растягивающих напряжений, необходимых для стабильной реализации процесса лазерного термораскалывания при значительном снижении величин максимальных температур в образцах по сравнению с использованием пучков круглой формы.

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

In the framework of the thermoelasticity theory, a comparative analysis of the temperature fields and fields of thermoelastic stresses arising in the plates of crystalline sapphire in the process of single-beam and two-beam controlled laser thermosplitting is carried out using round and crescent-shaped beams. It is shown that the use of crescent-shaped beams provides the formation of tensile stresses necessary for the stable realization of the laser thermosplitting process, with a significant reduction in the maximum temperatures in the samples compared with the use of round-shaped beams.

Keywords: thermosplitting, modeling, finite element method, temperature, single crystal, sapphire, thermoelastic stresses.

Введение

Управляемое лазерное термораскалывание, сущность которого заключается в локальном нагреве вдоль линии обработки движущимся лазерным излучением с последующим быстрым охлаждением, является эффективным и высокоточным методом разделения изделий из хрупких неметаллических материалов. Образующиеся в области охлаждения растягивающие напряжения обеспечивают формирование разделяющей трещины, которая следует за лазерным пучком. Кромка готовых изделий отличается повышенной прочностью по сравнению с традиционными механическими методами разделения.

Исследования данного процесса были начаты во второй половине двадцатого века [1], [2] и остаются актуальными в настоящее время. Исследованиями в этой области занимаются коллективы авторов из различных стран [3]–[7], в том числе и авторы данной статьи [8]–[11]. Разработано много схем реализации данного метода применительно к изделиям из различных изотропных и анизотропных материалов [5]–[21].

В большинстве случаев для разделения данным методом используются лазерные пучки круглого или эллиптического сечения. Задача повышения эффективности метода управляемого лазерного термораскалывания может быть решена, в том числе, за счет выбора схем, позволяющих

при минимальных энергетических затратах получить заданные величины растягивающих напряжений в области обработки. Такой выбор технологических параметров позволяет увеличить скорость разделения, а также обрабатывать материалы чувствительные к величине нагрева.

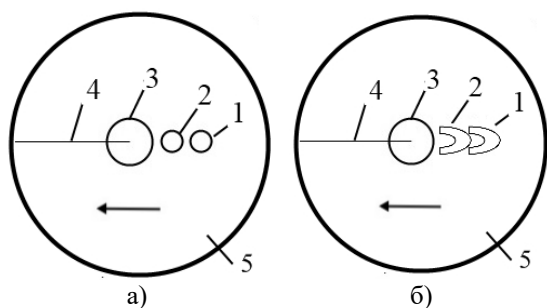
В данной работе, на примере кристаллов сапфира, выполнены исследования применения пучков серповидной геометрии в процессе управляемого лазерного термораскалывания.

1 Результаты расчетов

Для сравнительного анализа выполнен расчет термоупругих полей в пластинах сапфира в процессе однолучевого и двухлучевого управляемого лазерного термораскалывания при использовании пучков круглого и серповидного сечения. Исходя из спектра пропускания сапфира, представленного в источниках [22], [23], для однолучевого термораскалывания использовано непрерывное излучение с длиной волны 10,6 мкм, энергия которого эффективно поглощается в поверхностных слоях материала. Для двухлучевого термораскалывания в качестве второго источника излучения с объемным поглощением выбран лазер с длиной волны 5 мкм.

Схема расположения пучков представлена на рисунке 1.1. Стрелкой указано направление движения пластины относительно лазерных пучков.

Расчеты выполнены для пластин радиусом 15,5 мм. Толщина пластин выбрана 0,2; 0,4 и 1 мм при скорости обработки 10 мм/с. Параметры лазерных пучков следующие: круглый пучок – радиус 1,5 мм; серповидный пучок – наружный контур представляет собой полуэллипс с размерами большой и малой полуосей 3,4 и 1,5 мм соответственно, а внутренний контур – полуэллипс с размерами большой и малой полуосей 1,7 и 0,75 мм соответственно. Размеры серповидных пучков были подобраны так, чтобы при неизменных плотностях мощности излучения во всех расчетах величина максимальных растягивающих напряжений в области обработки при использовании серповидных пучков и пучков круглого сечения были одинаковыми. Теплофизические свойства сапфира для расчетов приведены в [22], [23].



- 1 – лазерный пучок с длиной волны 10,6 мкм,
- 2 – лазерный пучок с длиной волны 5 мкм,
- 3 – хладагент,
- 4 – лазерно-индуцированная микротрещина,
- 5 – сапфировая пластина

Рисунок 1.1 – Схема расположения зон воздействия лазерного излучения и хладагента в плоскости обработки: а) – круглый пучок; б) – пучки серповидной формы

Моделирование процесса лазерного термораскалывания выполнено в рамках теории термоупругости с использованием метода конечных элементов [24]. На первом этапе решения задачи выполняется расчёт температурных полей в образце, на втором этапе решается задача о нахождении термоупругих напряжений, формируемых в результате воздействия лазерного излучения и хладагента на поверхность сапфировых пластин. Такая последовательность моделирования обеспечивает получение результатов в рамках несвязанной задачи термоупругости в квазистатической постановке. С физической точки зрения квазистатическая постановка задачи термоупругости означает использование предположения о том, что напряженное состояние устанавливается значительно быстрее, чем достигается тепловое равновесие.

В качестве критерия, определяющего направление развития трещины, выбран критерий максимальных растягивающих напряжений [25].

В соответствии с этим критерием лазерная микротрещина распространяется в направлении, перпендикулярном действию максимальных растягивающих напряжений. При этом принято во внимание, что трещина, распространяющаяся в зоне растяжения, прекращает свой рост в зоне сжатия.

Анализ выполнен с учетом анизотропии тепловых и упругих свойств сапфира для пластин, вырезанных в следующих плоскостях: I – срез (0001) или С-плоскость; II – срез (1102) или R-плоскость.

Матрица $\{C_{ik}\}$ которой с учетом кристаллографической структуры сапфира приобретет вид [26]:

$$\{C_{ik}\} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{13} & -C_{14} & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{13} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ C_{14} & -C_{14} & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & C_{14} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{14} & \frac{(C_{11} - C_{12})}{2} \end{pmatrix}.$$

Для расчетов использовались следующие константы упругой жесткости: $C_{11} = 4,97 \cdot 10^5$ МПа, $C_{12} = 1,626 \cdot 10^5$ МПа, $C_{13} = 1,172 \cdot 10^5$ МПа, $C_{14} = -0,229 \cdot 10^5$ МПа, $C_{33} = 4,981 \cdot 10^5$ МПа, $C_{44} = 1,472 \cdot 10^5$ МПа [27].

Для пластины, вырезанной в плоскости (1102), т. е. R-плоскости, матрица приобретает вид:

$$\{C_{ik}\} = \begin{pmatrix} 128,3 & -7,7 & -7,67 & 0,072 & -6,13 & -6,16 \\ -7,7 & 130,15 & -7,76 & 4,5 & -0,6 & -1,38 \\ -7,67 & -7,76 & 130,13 & 4,5 & -1,38 & -0,58 \\ 0,072 & 4,5 & 4,5 & 34,47 & -4,8 & -4,8 \\ -6,13 & -0,6 & -1,38 & -4,8 & 33,6 & 4,78 \\ -6,16 & -1,38 & -0,58 & -4,8 & 4,78 & 33,6 \end{pmatrix}, \text{ ГПа.}$$

На рисунках 1.2 и 1.3 представлено распределение полей термоупругих напряжений на поверхности сапфировой пластины толщиной 0,2 мм при однолучевом и двулучевом лазерном термораскалывании. Картины полей при использовании круглых и серповидных пучков схожи и характерны, в общем, для процесса управляемого лазерного термораскалывания. В области воздействия лазерного излучения формируется зона сильных сжимающих напряжений, которые в области подачи хладагента перерастают в растягивающие. Именно в этой зоне происходит инициирование и развитие разделяющей трещины. Перед лазерным пучком также формируется зона растягивающих напряжений, величина которых увеличивается при приближении к краям образца. Это может приводить к негативному эффекту, а именно к инициированию трещины от разупрочненной кромки и ее развитию в

направлении зоны воздействия лазерного излучения. В таблицах 1.1 и 1.2 представлены расчетные значения максимальных растягивающих напряжений в области воздействия хладагента в образце.

Как видно из представленных расчетных данных в таблицах 1.1 и 1.2, величины значений максимальных растягивающих напряжений в области воздействия хладагента в образце при

использовании лазерных пучков с указанными выше параметрами практически одинаковы.

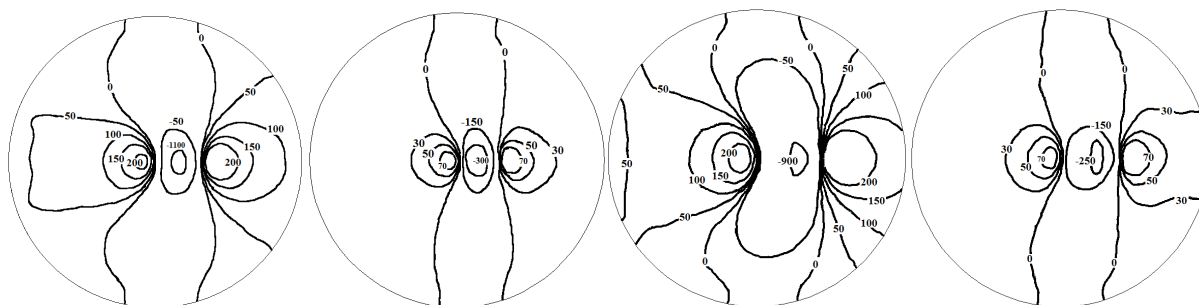
Результаты расчета температур представлены в таблице 1.3 и 1.4 и на рисунках 1.4 и 1.5. На рисунке 1.2 представлено расчетное распределение температур на поверхности сапфировой пластины толщиной 0,2 мм при однолучевом лазерном термораскалывании, а на рисунке 1.3 аналогичные распределения при двухлучевом.

Таблица 1.1 – Расчетные значения максимальных растягивающих напряжений в области воздействия хладагента в образце при использовании лазерных пучков круглого сечения

Толщина пластины, мм	Напряжение, МПа			
	Однолучевое термораскалывание		Двулучевое термораскалывание	
	срез (0001)	срез (1102)	срез (0001)	срез (1102)
$h = 0,2$	235	87,7	284	101
$h = 0,4$	95,8	26,6	131	36,2
$h = 1$	31,3	7,6	52,9	12,7

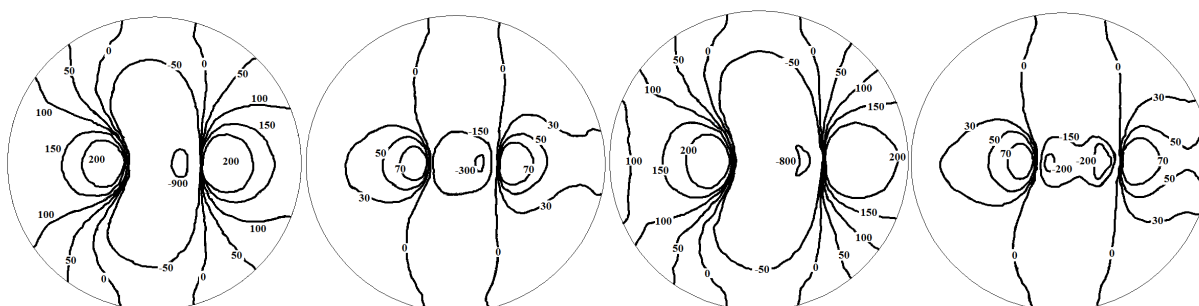
Таблица 1.2 – Расчетные значения максимальных растягивающих напряжений в области воздействия хладагента в образце при использовании лазерных пучков серповидного сечения

Толщина пластины, мм	Напряжение, МПа			
	Однолучевое термораскалывание		Двулучевое термораскалывание	
	срез (0001)	срез (1102)	срез (0001)	срез (1102)
$h = 0,2$	238	82	279	93,4
$h = 0,4$	99	26,7	130	34,7
$h = 1$	30,1	7	53,2	12,5



а) – срез (0001) или С-плоскость, сечение пучка – круг; б) – срез (1102) или R-плоскость, сечение пучка – круг; в) – срез (0001) или С-плоскость, серповидный пучок; г) – срез (1102) или R-плоскость, серповидный пучок.

Рисунок 1.2 – Распределение полей температурных напряжений (МПа) на поверхности сапфировой пластины при воздействии лазерного излучения с длиной волны равной 10,6 мкм с учетом анизотропии тепловых свойств



а) – срез (0001) или С-плоскость, сечение пучка – круг; б) – срез (1102) или R-плоскость, сечение пучка – круг; в) – срез (0001) или С-плоскость, серповидный пучок; г) – срез (1102) или R-плоскость, серповидный пучок.

Рисунок 1.3 – Распределение полей температурных напряжений (МПа) на поверхности сапфировой пластины при одновременном воздействии лазерного излучения с длиной волны равной 10,6 мкм и 5 мкм с учетом анизотропии тепловых свойств

Таблица 1.3 – Расчетные значения максимальных температур в образце при использовании лазерных пучков круглого сечения

Толщина пластины, мм	Температура, К			
	Однолучевое термораскалывание		Двулучевое термораскалывание	
	срез (0001)	срез (1102)	срез (0001)	срез (1102)
$h = 0,2$	1511	1780	1572	1795
$h = 0,4$	935	1025	963	1040
$h = 1$	619	607	630,6	617,5

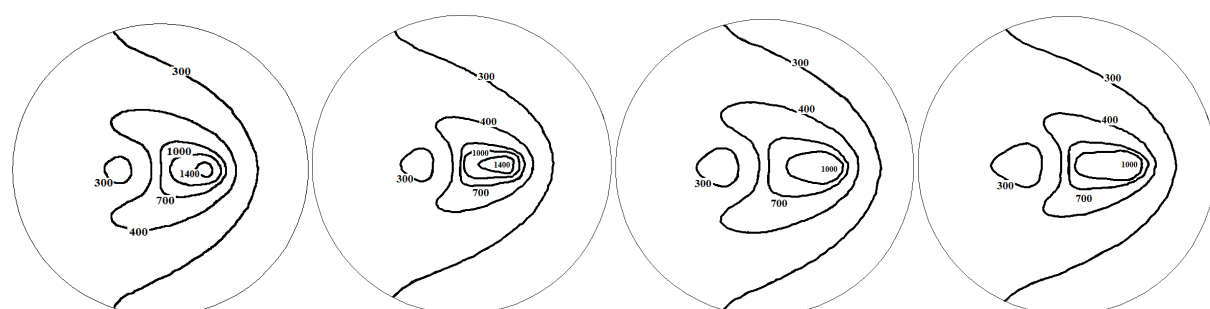
Таблица 1.4 – Расчетные значения максимальных температур в образце при использовании лазерных пучков серповидного сечения

Толщина пластины, мм	Температура, К			
	Однолучевое термораскалывание		Двулучевое термораскалывание	
	срез (0001)	срез (1102)	срез (0001)	срез (1102)
$h = 0,2$	1299	1342	1304	1420
$h = 0,4$	820,4	813,7	822,6	814
$h = 1$	564,8	542	566,8	540



а) – срез (0001) или С-плоскость, сечение пучка – круг; б) – срез (1102) или R-плоскость, сечение пучка – круг; в) – срез (0001) или С-плоскость, серповидный пучок; г) – срез (1102) или R-плоскость, серповидный пучок.

Рисунок 1.4 – Распределение температурных полей (К) на поверхности сапфировой пластины при воздействии лазерного излучения с длиной волны равной 10,6 мкм с учетом анизотропии тепловых свойств



а) – срез (0001) или С-плоскость, сечение пучка – круг; б) – срез (1102) или R-плоскость, сечение пучка – круг; в) – срез (0001) или С-плоскость, серповидный пучок; г) – срез (1102) или R-плоскость, серповидный пучок.

Рисунок 1.5 – Распределение температурных полей (К) на поверхности сапфировой пластины при одновременном воздействии лазерного излучения с длиной волны равной 10,6 мкм и 5 мкм с учетом анизотропии тепловых свойств

Распределение полей температур на поверхности при использовании обоих типов пучков также как и в случае с распределением напряжений схоже и, в общем, характерно для процесса управляемого лазерного термораскалывания. В области воздействия лазерного излучения происходит интенсивный нагрев поверхности пластины. Далее тепло за счет теплопроводности

распространяется по объему пластины. В месте подачи хладагента происходит интенсивное охлаждение поверхности и температура снижается практически до начальных значений. Однако в случае использования серповидных пучков максимальные значения температур ниже, чем при использовании пучков круглого сечения.

2 Выводы

Анализ данных, приведенных в таблице 1.1, позволяет установить, что использование пучков серповидной формы позволяет получить аналогичные величины максимальных растягивающих напряжений в области воздействия хладагента, как и в случае использования пучков круглой формы. При этом максимальные значения температур в образце ниже. Например, при однолучевом термораскалывании пластин толщиной 0,2 мм при выбранных режимах максимальная температура для режима I при использовании серповидных пучков меньше, чем при использовании пучков круглого сечения на 55–212° С в зависимости от толщины пластины и вида управляемого лазерного термораскалывания. При разделении тонких пластин разница в температурах выше. Для режима II разница в температурах составляет 65–432° С. Также следует отметить, что при неизменных плотностях мощности площадь поперечного сечения серповидного пучка меньше на 15%, чем площадь пучка с сечением в виде круга, а следовательно и требуемая мощность источника излучения, необходимая для получения идентичных величин максимальных растягивающих напряжений в области подачи хладагента, меньше.

Изменяя параметры лазерных пучков серповидной формы, можно добиться увеличения растягивающих напряжений в области обработки по сравнению с термораскалыванием пучками круглого сечения без увеличения максимальных температур в образце, что ведет к повышению стабильности зарождения трещины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lumley, R.M. Controlled separation of brittle materials using a laser / R.M. Lumley // *Am. Ceram. Soc. Bull.* – 1969. – Vol. 48. – P. 850–854.
2. Мачулка, Г.А. Лазерная обработка стекла / Г.А. Мачулка. – М.: Сов. радио, 1979. – 136 с.
3. Junke, J. Cutting glass substrates with dual-laser beams / J. Junke, W. Xinbing // *Optics and Lasers in Engineering.* – 2009. – Vol. 47. – P. 860–864.
4. Zhao, C. Semiconductor laser asymmetry cutting glass with laser induced thermal-crack propagation / C. Zhao, H. Zhang, Y. Wang // *Optics and Lasers in Engineering.* – 2014. – Vol. 63. – P. 43–52.
5. Кондратенко, В.С. Развитие метода лазерного управляемого термораскалывания / В.С. Кондратенко, А.С. Наумов // *Вестник МГТУ МИРЭА.* – 2015. – Т. 2, № 3. – С. 1–11.
6. Григорьянц, А.Г. Технологические процессы лазерной обработки: учеб. пособие / А.Г. Григорьянц, И.Н. Шиганов, А.И. Мисюров; под ред. А.Г. Григорьянца. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 664 с.

7. Малов, И.Е. Исследование применимости технологии лазерного управляемого термораскалывания для изготовления элементов термооптического покрытия радиаторов космических аппаратов / И.Е. Малов // *Научноёмкие технологии в машиностроении.* – 2017. – № 12. – С. 36–39.

8. *Прецизионная лазерная обработка хрупких неметаллических материалов* / С.В. Шалупаев [и др.] // *Известия Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины.* – 2005. – № 3 (30). – С. 87–92.

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

10. *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, № 4. – P. 1149–1155.

11. *Исследование процесса лазерного раскалывания кремниевых пластин, вырезанных в плоскости (110)* / А.Н. Сердюков [и др.] // *Проблемы физики, математики и техники* – 2012. – № 3 (12). – С. 37–40.

12. *Способ резки неметаллических материалов*: пат. 2024441 Рос. Федерация, МПК5 С 03 В 33/02 №5030537/33 / В.С. Кондратенко; дата публ. 15.12.94.

13. Tsai, C.-H. Laser cutting of thick ceramic substrates by controlled fracture technique / C.-H. Tsai, H.-W. Chen // *Journal of materials processing technology.* – 2003. – Vol. 136. – P. 166–173.

14. Сысоев, В.К. Технологические характеристики процесса лазерного термораскалывания / В.К. Сысоев, П.А. Вятлев // *Известия ВУЗов. Приборостроение.* – 2008. – Т. 51, № 4. – С. 48–50.

15. *Сорокин, А.В. Разработка технологического процесса лазерного параллельного термораскалывания хрупких материалов*: дис. ... канд. техн. наук: 05.11.14 / А.В. Сорокин. – Москва, 2011. – 148 л.

16. Клуникова, Ю.В. Лазерное управляемое термораскалывание сапфира / Ю.В. Клуникова, С.П. Малюков, А.В. Саенко // *Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ».* – 2015. – № 9. – С. 6–10.

17. Буй, Т.Х. Разработка и исследование чувствительных элементов датчиков давления на основе структур «кремний на сапфире» с использованием лазерных технологий: дис. ... канд. техн. наук: 05.27.01 / Т.Х. Буй. – Таганрог, 2016. – 127 л.

18. *Моделирование температурных полей и внутренних напряжений в пластине сапфира при лазерной обработке* / С.П. Малюков [и др.] // *Физика и химия обработки материалов.* – 2016. – № 5. – С. 11–16.

19. *Shalupaev, S.V. Modeling of mechanical influence of double-beam laser on single-crystalline silicon* / S.V. Shalupaev [et al.] // *Archives of metallurgy and materials.* – 2013. – Vol. 58, № 4. – P. 1381–1385.

20. Шалупаев, С.В. Особенности процесса лазерного термораскальвания кристаллов с кубической гранецентрированной кристаллической решеткой типа алмаза / С.В. Шалупаев, Ю.В. Никитюк, А.А. Серeda // IV Международная научная конференция «Проблемы взаимодействия излучения с веществом», посвященная 90-летию со дня рождения Б.В. Бокутя, Гомель, 9–11 ноября 2016 г.: в 2 ч. / ГГУ им. Ф. Скорины. – Гомель, 2016. – Ч. 2. – С. 188–192.

21. Шалупаев, С.В. Моделирование процесса управляемого лазерного термораскальвания сапфира / С.В. Шалупаев, Ю.В. Никитюк, А.А. Серeda // Известия Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины. – 2017. – № 6 (105). – С. 158–164.

22. Сапфир [Электронный ресурс] / Официальный сайт ООО «ТИДЕКС». – Режим доступа: <http://www.tydexoptics.com/pdf/ru/Sapphire.pdf>. – Дата доступа: 10.07.2018.

23. Лейкосапфир (Al_2O_3). Оптика из сапфира: линзы, защитные окна, микрооптика из лейкосапфира [Электронный ресурс] / Официаль-

ный сайт компании ООО Алкор Текнолоджиз. – Режим доступа: <http://www.alkor.net/alkorru/Sapphire1.html>. – Дата доступа: 10.07.2018.

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

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

26. Daniel, G. Harris Does anyone out there know the strength of sapphire? [Electronic resource]. – Mode of access: <http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=ADA421203>. – Date of access: 27.02.2017.

27. *The effect of anisotropy on the deformation and fracture of sapphire wafers subjected to thermal shocks* / T. Vodenitcharova [et al.] // Journal of Materials Processing Technology. – 2007. – Vol. 194. – P. 52–62.

Поступила в редакцию 17.08.18.