

**А.Н. Сердюков, Е.Б. Шершнев, Ю.В. Никитюк,  
В.Ф. Шолох, С.И. Соколов**

**УО «Гомельский государственный университет  
имени Франциска Скорины», Гомель, Беларусь**

## **КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ЛАЗЕРНОГО ТЕРМОРАСКАЛЫВАНИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КВАРЦА**

### **Введение**

В последнее время стали активно проводиться исследования управляемого лазерного термораскалывания различных кристаллов [1–2]. Актуальность данного направления работ обусловлена рядом недостатков традиционных способов обработки, к которым в первую очередь относятся значительные потери обрабатываемого материала, загрязнение рабочих поверхностей и низкое качество реза.

Особо перспективным представляется применение управляемого лазерного термораскалывания для разделения кристаллического кварца, используемого при изготовлении кварцевых кристаллических

элементов.

Изучению особенностей управляемого лазерного термораскалывания кристаллического кварца посвящены работы [3–4], в которых верно указывается на необходимость учета кристаллографической ориентации обрабатываемого материала при выборе соответствующих параметров обработки. Однако нужно отметить, что в данных работах акцентируется внимание лишь на анизотропии теплового расширения кристаллов кварца, при этом игнорируется зависимость от кристаллографического направления теплопроводности и упругих свойств данных кристаллов.

### 1. Постановка задачи для численного решения

Конечно-элементное моделирование процесса лазерного термораскалывания кристаллического кварца было выполнено в два этапа: на первом этапе выполнялся расчёт полей температур, а на втором этапе решалась задача о нахождении термоупругих напряжений, формируемых в результате воздействия лазерного излучения и хладагента на обрабатываемый материал [5]. Такая последовательность моделирования обеспечивает получение результатов в рамках несвязанной задачи термоупругости в квазистатической постановке [6].

При определении направления развития лазерной трещины, был использован критерий максимальных растягивающих напряжений, в соответствии с которым трещина распространяется в направлении, перпендикулярном действию максимальных растягивающих напряжений [7]. При этом учитывалось, что трещина прекращает свой рост в зоне напряжений сжатия.

Для расчетов плотность и удельная теплоемкость кристаллического кварца полагались соответственно равными  $\rho = 2649 \text{ кг/м}^3$  и  $C = 732 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$ . При моделировании были учтены различия физических свойств кристаллического кварца в различных кристаллографических направлениях: коэффициент теплопроводности и коэффициент линейного термического расширения кристаллического кварца считались соответственно равными  $\lambda_{\parallel} = 12,3 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ ,  $\alpha_{\parallel} = 9 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$  вдоль оси симметрии третьего порядка  $Z$  и  $\lambda_{\perp} = 6,8 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ ,  $\alpha_{\perp} = 14,8 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$  в плоскости перпендикулярной оси  $Z$ . Для расчетов использовались следующие константы упругой жесткости:  $C_{11} = 86,75 \cdot 10^9 \text{ МПа}$ ,  $C_{12} = 5,95 \cdot 10^9 \text{ МПа}$ ,  $C_{13} = 11,91 \cdot 10^9 \text{ МПа}$ ,  $C_{14} = -17,8 \cdot 10^9 \text{ МПа}$ ,  $C_{33} = 107,2 \cdot 10^9 \text{ МПа}$ ,  $C_{44} = 57,8 \cdot 10^9 \text{ МПа}$ ,  $C_{66} = 40,4 \cdot 10^9 \text{ МПа}$  [8–10].

Расчеты проводились для квадратных пластин с геометрическими размерами  $20 \times 20 \times 1,5 \text{ мм}$  и  $20 \times 20 \times 0,75 \text{ мм}$ . Радиус пятна лазерного излучения  $R = 1,5 \text{ мм}$ , мощность излучения  $P = 50 \text{ Вт}$ . Скорость

перемещения пластины относительно лазерного пучка и хладагента выбиралась равной  $v = 5$  мм/с.

Расчет термоупругих полей, формируемых в монокристаллической кварцевой пластине в результате последовательного лазерного нагрева и воздействия хладагента, осуществлялся для пяти различных вариантов: I – трехмерный анализ среза  $zy$ , при перемещении лазерного пучка в направлении оси  $X$ ; II – трехмерный анализ среза  $ux$ , при перемещении лазерного пучка в направлении оси  $X$ ; III – трехмерный анализ среза  $ux$ , при перемещении лазерного пучка в направлении оси  $Z$ ; IV – трехмерный анализ среза  $xu$ , при перемещении лазерного пучка в направлении оси  $Y$ ; V – трехмерный анализ среза  $xu$ , при перемещении лазерного пучка в направлении оси  $Z$ . В соответствии с [10] для обозначения срезов использованы две буквы, обозначающие кристаллографические оси, вдоль которых расположен кристаллический элемент, при этом первая буква определяет, какая из осей направлена вдоль толщины образца.

## 2. Результаты конечно-элементного анализа

Результаты расчетов приведены в таблицах 1 и 2. Из анализа данных приведенных в таблице 1 следует, что максимальные значения температуры для всех расчетных режимов не превышают температуру плавления кристаллического кварца, что является необходимым условием для реализации хрупкого разрушения пластины под действием термоупругих напряжений.

В таблице 2 приведены расчетные значения максимальных по величине напряжений растяжения и сжатия, формируемые в зоне обработки при управляемом лазерном термораскалывании кристаллического кварца.

Таблица 1 – Расчетные значения максимальных температур в обрабатываемой пластине

Вариант	Максимальная температура в обрабатываемой пластине $T$ , К	
	$h = 0,75$ мм	$h = 1,5$ мм
I	1546	1116
I	1468	1163
III	1523	1202
IV	1523	1202
V	1468	1163

Сравнительный анализ данных приведенных в таблице 2 с результатами работ [3–4] позволяет сделать вывод о том, что при

выборе режимов лазерного термораскалывания кристаллов кварца необходимо учитывать не только анизотропию теплового расширения данного материала, но также необходимо учитывать зависимость от кристаллографического направления теплопроводности и упругих свойств данных кристаллов. При этом существенное отличие вышеуказанных параметров от ориентации кристалла обуславливает необходимость осуществления дифференцированного нагрева при резке в различных кристаллографических направлениях.

Таблица 2 – Расчетные значения максимальных по величине напряжений растяжения и сжатия в зоне обработки

Вариант	Максимальные напряжения в зоне обработки $\sigma_y$ , МПа	$h = 0,75$ мм	$h = 1,5$ мм
		I	растяжения
сжатия	641,9		414,2
II	растяжения	63,5	33,2
	сжатия	512,7	355,9
III	растяжения	85,1	56,2
	сжатия	607,3	459,1
IV	растяжения	93,1	73,0
	сжатия	628,5	480,8
V	растяжения	65,7	34,3
	сжатия	520,9	356,0

### Заключение

В данной работе выполнено конечно-элементное моделирование процесса управляемого лазерного термораскалывания кристаллического кварца. На основании выполненных расчетов показана необходимость учета анизотропии свойств данного материала при выборе параметров обработки.

### Литература

1. Наумов, А.С. Разработка технологии разделения приборных пластин на кристаллы: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.11.14 / А.С. Наумов; МГУПИ. – М., 2007. – 20 с.
2. 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.
3. Способ резки хрупких неметаллических материалов: пат. 2224648 РФ, МКИ 7 В28D5/00, С03В33/00/ В.С. Кондратенко, П.Д. Гиндин;

заявитель В.С. Кондратенко, П.Д. Гиндин. – №2002123517/03; заявл. 03.09.02; опубл. 27.02.04

4. Гиндин, 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. – 44 с.

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

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

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

8. Корицкий, Ю.В. Справочник по электротехническим материалам / Ю.В. Корицкий, В.В. Пасынков, Б.М. Тареева. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 728 с.

9. Смагин, А.Г. Пьезоэлектричество кварца и кварцевые резонаторы / А.Г. Смагин, М.И. Ярославский. – М.: Энергия, 1970. – 488 с.

10. Глюкман, Л.И. Пьезоэлектрические кварцевые резонаторы / Л.И. Глюкман. – М.: Радио и связь, 1981. – 232 с.