

ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ

УДК 621.37/.39:621.9.048.7

ОСОБЕННОСТИ УПРАВЛЯЕМОГО ЛАЗЕРНОГО ТЕРМОРАСКАЛЫВАНИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КВАРЦА

© 2012 г. А. Н. Сердюков, Е. Б. Шершнев, Ю. В. Никитюк, В. Ф. Шолох, С. И. Соколов

*Гомельский государственный университет, Беларусь
E-mail: Nikitjuk@gsu.by*

Поступила в редакцию 17.04.2012 г.

Выполнено моделирование процесса управляемого лазерного термораскалывания кристаллического кварца. Расчет термоупругих полей, формируемых в квадратной монокристаллической кварцевой пластине в результате последовательного лазерного нагрева и воздействия хладагента, осуществлялся для пяти различных вариантов ориентации среза кристалла и направления перемещения лазерного пучка. Проведена экспериментальная проверка полученных результатов с использованием CO₂-лазера. Полученные результаты могут быть использованы в электронной промышленности для оптимизации процесса лазерной резки кристаллов кварца.

Управляемое лазерное термораскалывание — один из наиболее эффективных методов высокоточной обработки хрупких неметаллических материалов. Сущность данного метода заключается в разделении материала в результате формирования термоиндуцированной трещины при последовательном лазерном нагреве и воздействии хладагента на обрабатываемую поверхность [1]. Основными достоинствами управляемого лазерного термораскалывания являются высокие точность и скорость разделения, низкая энергоемкость и безотходность процесса обработки. В [2–5] выполнены исследования основных особенностей применения данного метода для обработки изотропных хрупких неметаллических материалов (в первую очередь силикатных стекол и алюмооксидной керамики).

В последнее время большое внимание уделяется изучению особенностей лазерного термораскалывания различных кристаллов [6, 7]. Актуальность данного направления исследований обусловлена существенными недостатками традиционных способов разделения кристаллов, к которым относятся значительные потери обрабатываемого материала и загрязнение рабочих поверхностей.

Среди публикаций по данной тематике особый интерес вызывают работы, посвященные изучению управляемого лазерного термораскалывания кристаллов кварца [8, 9]. Важность исследования особенностей применения этой технологии для обработки кристаллов кварца обусловлена широким промышленным применением кварцевых кристаллических элементов, стоимость годового потребления которых превышает 1 млрд. долларов в год [10]. В [8–10] показана принципиальная необходимость учета кристаллографической ориентации обрабатываемого материала при выборе

параметров лазерного термораскалывания. Однако авторы акцентируют внимание лишь на анизотропии теплового расширения кристаллов кварца, не учитывая зависимости от кристаллографического направления других свойств этих кристаллов. В связи с этим представляется целесообразным проведение исследований особенностей процесса управляемого лазерного термораскалывания кристаллического кварца с учетом анизотропии как теплового расширения кристаллов, так и анизотропии теплопроводности и упругих свойств.

Моделирование лазерного термораскалывания кварцевых пластин было выполнено с применением метода конечных элементов [11]. При этом на первом этапе выполнялся расчет полей температур, а затем определялись термоупругие напряжения, формируемые в результате воздействия лазерного излучения и хладагента на кристаллическую кварцевую пластину. Такой алгоритм моделирования определяет получение результатов в рамках несвязанной задачи термоупругости в квазистатической постановке [12]. Для анализа полученных результатов использовался критерий максимальных растягивающих напряжений [13].

Расчеты проводились для квадратных пластин с геометрическими размерами $20 \times 20 \times 1.5$ и $20 \times 20 \times 0.75$ мм. Моделирование проводилось для случая воздействия лазерного излучения с длиной волны, равной 10.6 мкм. Радиус пятна лазерного излучения $R = 1.5$ мм, мощность излучения $P = 50$ Вт. Скорость перемещения пластины относительно лазерного пучка и хладагента выбиралась равной $v = 5$ и $v = 15$ мм/с.

Для моделирования использовались стандартные первоначальные ориентации кристалличе-

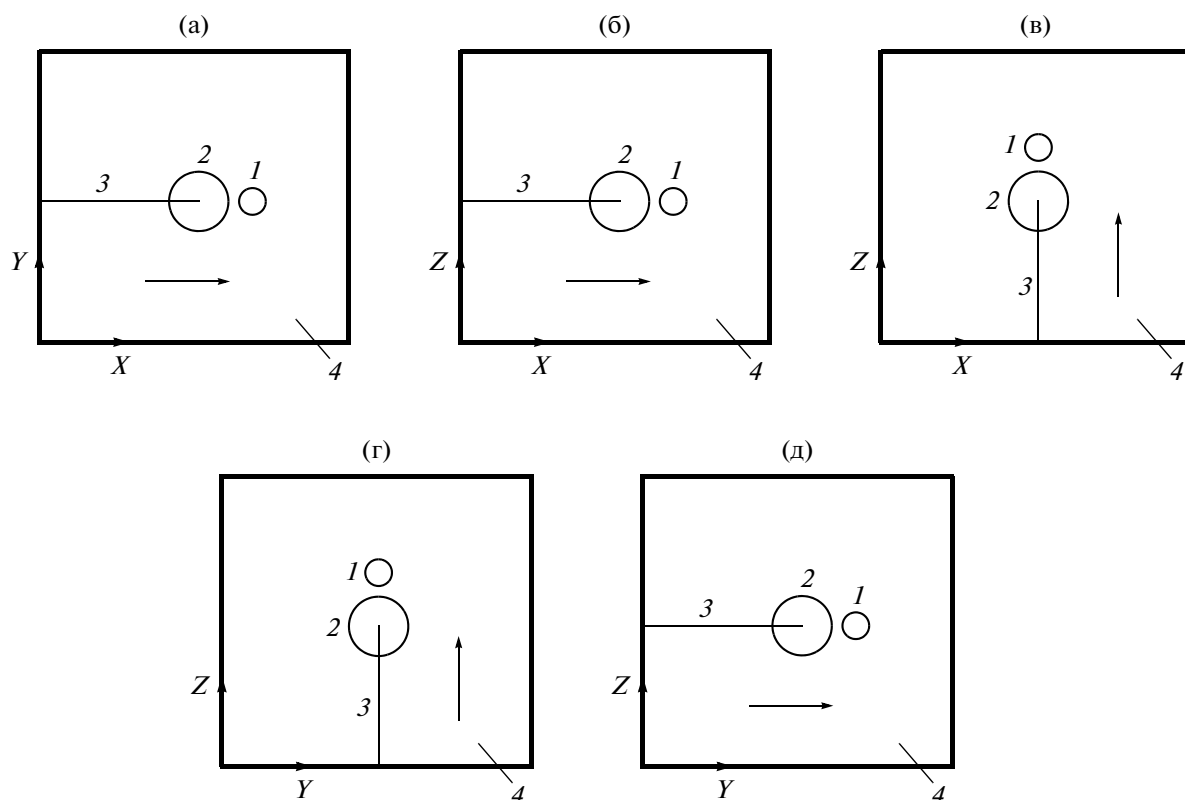


Рис. 1. Схемы расположения зон воздействия лазерного излучения и хладагента в плоскости обработки. Варианты обработки I (а), II (б), III (в), IV (г), V (д). 1 – лазерный пучок, 2 – хладагент, 3 – лазерно-индуцированная трещина, 4 – кварцевая пластина. Горизонтальной стрелкой указано направление перемещения обрабатываемого изделия относительно лазерного пучка и хладагента.

ских образцов квадратной формы [14]. При этом для каждого из трех исследуемых срезов направления перемещения лазерного пучка (ЛП) совпадали с кристаллографическими осями, лежащими в соответствующей плоскости обработки (рис. 1). В соответствии с [14], для обозначения срезов использовались две буквы, обозначающие кристаллографические оси, вдоль которых расположен кристаллический элемент. При этом первая буква определяет, какая из осей направлена вдоль толщины образца, а вторая соответствует оси, направленной вдоль длины образца.

Очевидно, что при использовании квадратных образцов в случае среза zy достаточно рассмотрения варианта обработки только вдоль оси X . Таким образом, расчет термоупругих полей, формируемых в монокристаллической кварцевой пластине в результате последовательного лазерного нагрева и воздействия хладагента, осуществлялся для пяти различных вариантов:

I – анализ среза zy при перемещении ЛП в направлении оси X ;

II – анализ среза yx при перемещении ЛП в направлении оси X ;

III – анализ среза yx при перемещении ЛП в направлении оси Z ;

IV – анализ среза xz при перемещении ЛП в направлении оси Z ;

V – анализ среза xz при перемещении ЛП в направлении оси Y .

На рис. 1 для пяти исследуемых вариантов обработки приведены схемы расположения в плоскости обработки зон воздействия лазерного излучения и хладагента.

Для расчетов плотность и удельная теплоемкость кристаллического кварца полагались соответственно равными $\rho = 2643 \text{ кг/м}^3$ и $C = 741 \text{ Дж/кг К}$. При моделировании были учтены различия физических свойств кристаллического кварца в различных кристаллографических направлениях. Коэффициенты теплопроводности и линейного термического расширения кристаллического кварца полагались соответственно равными $\lambda_{\parallel} = 12.3 \text{ Вт/м К}$, $\alpha_{\parallel} = 9 \times 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ вдоль оси симметрии третьего порядка Z и $\lambda_{\perp} = 6.8 \text{ Вт/м К}$, $\alpha_{\perp} = 14.8 \times 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ – перпендикулярно оси Z [15, 16].

Закон Гука для анизотропных материалов может быть записан в матричной форме [17, 18]:

$$\sigma_i = \sum_{k=1}^6 C_{ik} (\varepsilon_k - \varepsilon_k^t), \quad (1)$$

где напряжения

$$\sigma_1 = \sigma_{xx}, \quad \sigma_2 = \sigma_{yy}, \quad \sigma_3 = \sigma_{zz}, \\ \sigma_4 = \sigma_{yz}, \quad \sigma_5 = \sigma_{zx}, \quad \sigma_6 = \sigma_{xy};$$

упругие деформации

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{xx}, \quad \varepsilon_2 = \varepsilon_{yy}, \quad \varepsilon_3 = \varepsilon_{zz}, \\ \varepsilon_4 = 2\varepsilon_{yz}, \quad \varepsilon_5 = 2\varepsilon_{zx}, \quad \varepsilon_6 = 2\varepsilon_{xy};$$

температурные деформации

$$\varepsilon_1^t = \alpha_x \Delta T, \quad \varepsilon_2^t = \alpha_y \Delta T, \quad \varepsilon_3^t = \alpha_z \Delta T, \\ \varepsilon_4^t = 0, \quad \varepsilon_5^t = 0, \quad \varepsilon_6^t = 0.$$

Низкотемпературный кварц принадлежит к тригональной системе, следовательно, его упругие свойства описываются шестью независимыми компонентами тензора модулей упругости, матричная запись которого для среза zx имеет вид [19]:

$$\{C_{ik}\} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{12} & -C_{14} & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{12} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ C_{14} & -C_{14} & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & C_{14} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{14} & \frac{C_{11} - C_{12}}{2} \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Матрица $\{C_{ik}\}$ для среза yx может быть записана в следующем виде:

$$\{C_{ik}\} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{13} & C_{12} & -C_{14} & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{33} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{13} & C_{11} & C_{14} & 0 & 0 \\ -C_{14} & 0 & C_{14} & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{C_{11} - C_{12}}{2} & -C_{14} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -C_{14} & C_{44} \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Соответственно для среза xz матрица $\{C_{ik}\}$ имеет вид

$$\{C_{ik}\} = \begin{pmatrix} C_{33} & C_{13} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & C_{14} \\ C_{13} & C_{12} & C_{11} & 0 & 0 & -C_{14} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{C_{11} - C_{12}}{2} & -C_{14} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -C_{14} & C_{44} & 0 \\ 0 & C_{14} & -C_{14} & 0 & 0 & C_{44} \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Для расчетов использовались следующие константы упругой жесткости: $C_{11} = 86.75 \times 10^9$, $C_{12} = 5.95 \times 10^9$, $C_{13} = 11.91 \times 10^9$, $C_{14} = -17.8 \times 10^9$, $C_{33} = 107.2 \times 10^9$, $C_{44} = 57.8 \times 10^9$ МПа [10, 19].

Отметим, что используемый в настоящей работе алгоритм моделирования обеспечивает принципиальную возможность анализа процесса управляемого лазерного термораскалывания кварцевых кристаллических элементов любых срезов, в том числе широко используемых в радиоэлектронике и цифровой технике *AT*- и *BT*-срезов. Отметим, что данный алгоритм легко модифицируется для проведения расчетов термоупругих полей, формируемых в образцах других типоразмеров, а также для других скоростей обработки и параметров лазерного излучения.

Для определения вклада анизотропии различных свойств кристаллического кварца в формирование полей температур и температурных напряжений при управляемом лазерном термораскалывании для каждого из пяти вариантов расчета использовались четыре набора свойств материала, учитывающие зависимость:

- от кристаллографического направления коэффициентов теплопроводности, коэффициентов линейного термического расширения и упругих свойств кристаллов кварца (а);
- от кристаллографического направления только коэффициентов теплопроводности (б);
- от кристаллографического направления только коэффициентов линейного термического расширения (в);
- от кристаллографического направления только упругих свойств кристаллов кварца (г);

При этом для моделирования управляемого лазерного термораскалывания изотропной кварцевой пластины использовались модуль Юнга и коэффициент Пуассона, приведенные в [10], а значения коэффициента теплопроводности и коэффициента линейного термического расширения определялись как среднее арифметическое их значений вдоль оси Z и в перпендикулярном направлении.

Как отмечалось, для проведения сравнительного анализа расчеты выполнялись для пяти различных вариантов обработки кристаллических элементов квадратной формы со стандартной первоначальной ориентацией, при этом для каждого из вариантов обработки были использованы четыре различных набора свойств материала, в различной степени учитывающие анизотропию кристаллов кварца. Результаты проведенных расчетов приведены в табл. 1, 2 и на рис. 2, 3.

В табл. 1 представлены расчетные значения максимальных температур для набора свойств, учитывающего анизотропию теплопроводности кристаллов кварца.

Обратим внимание на то, что все расчетные значения температур не превышают температуру плавления кристаллического кварца, что является необходимым условием реализации хрупкого разрушения пластины под действием термоупругих

Таблица 1. Расчетные значения максимальных температур в обрабатываемой пластине

Вариант	Максимальная температура T , К			
	$h = 0.75$ мм		$h = 1.5$ мм	
	$v = 5$ мм/с	$v = 15$ мм/с	$v = 5$ мм/с	$v = 15$ мм/с
I	1546	991	1116	820
II, V	1468	1013	1163	909
III, IV	1523	1049	1202	933

напряжений. Для всех расчетных вариантов меньшими значениями температуры характеризуется режим обработки толстых пластин ($h = 1.5$ мм) с высокой скоростью ($v = 15$ мм/с).

Отметим, что анизотропия теплопроводности кварца обуславливает необходимость отдельного рассмотрения температурных полей, формируемых в элементах квадратной формы для трех случаев обработки из пяти расчетных вариантов, рассматриваемых в данной работе:

– резка кристаллической пластины перпендикулярно оси Z , при этом линия разреза лежит в

плоскости, перпендикулярной этой оси (I расчетный вариант);

– резка кристаллической пластины перпендикулярно оси Z , при этом линия разреза лежит в плоскости, параллельной этой оси (II и V расчетные варианты);

– резка кристаллической пластины вдоль оси Z , при этом линия разреза лежит в плоскости, параллельной этой оси (III и IV расчетные варианты).

Анализ данных, приведенных в табл. 1, показывает, что наименьших значений температура достигает при обработке среза zy (I вариант обработки), что объясняется большими значениями коэффициента теплопроводности вдоль оси Z кристаллов кварца по сравнению с их значениями в направлениях перпендикулярных этой оси ($\lambda_{\parallel} > \lambda_{\perp} \sim$ в 2 раза).

Повышенными значениями температуры характеризуется обработка срезов yx и xz при перемещении ЛП вдоль оси Z (III и IV варианты обработки). Отметим, что эти значения лишь немного больше значений температур, формируемых при обработке этих же срезов в случае перемещения

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

Вариант	Максимальные напряжения, МПа	$h = 0.75$ мм		$h = 1.5$ мм		$h = 0.75$ мм		$h = 1.5$ мм	
		$v = 5$ мм/с	$v = 15$ мм/с	$v = 5$ мм/с	$v = 15$ мм/с	$v = 5$ мм/с	$v = 15$ мм/с	$v = 5$ мм/с	$v = 15$ мм/с
I	растяжения	83.8	31.8	42.9	23.5	72.4	27.7	36.4	23.7
	сжатия	641.9	328.4	414.2	262.5	550.0	278.4	337.8	211.3
II	растяжения	63.5	21.1	33.2	26.5	69.5	27.0	40.5	31.3
	сжатия	512.7	287.6	355.9	244.1	559.9	322.1	414.2	294.5
III	растяжения	85.1	38.8	56.2	43.2	70.4	30.2	48.0	35.8
	сжатия	607.3	388.4	459.1	335.2	528.4	314.1	395.2	618.0
IV	растяжения	93.1	42.4	73.0	55.1	70.4	30.2	48.0	39.8
	сжатия	628.5	377.3	480.8	355.3	528.4	314.1	395.2	286.5
V	растяжения	65.7	22.7	34.3	26.3	69.5	27.0	40.5	31.3
	сжатия	520.9	292.9	356.0	245.4	559.9	322.1	414.2	294.5
I	набор свойств а								
	растяжения	88.2	33.9	47.9	27.8	60.2	23.4	32.8	22.7
II	сжатия	669.4	377.8	473.9	326.3	449.5	253.6	312.5	215.7
	растяжения	49.6	16.4	22.3	14.2	88.4	33.1	47.2	34.5
III	сжатия	410.3	224.6	256.0	166.7	587.2	330.1	409.9	282.3
	растяжения	87.2	36.1	54.0	42.5	64.2	24.8	31.9	16.2
IV	сжатия	590.2	335.0	418.7	295.5	512.0	284.5	348.7	232.2
	растяжения	87.2	36.1	54.0	42.5	69.1	27.2	37.2	22.3
V	сжатия	590.2	335.0	418.7	295.5	524.8	294.3	357.7	244.1
	набор свойств б								
I	растяжения	49.6	16.4	22.3	14.2	87.2	33.7	47.2	33.9
	сжатия	410.3	224.6	256.0	166.7	597.1	334.2	412.8	284.8
II	набор свойств в								
	растяжения	88.2	33.9	47.9	27.8	60.2	23.4	32.8	22.7
III	сжатия	669.4	377.8	473.9	326.3	449.5	253.6	312.5	215.7
	набор свойств г								
IV	растяжения	49.6	16.4	22.3	14.2	88.4	33.1	47.2	34.5
	сжатия	410.3	224.6	256.0	166.7	587.2	330.1	409.9	282.3
V	растяжения	87.2	36.1	54.0	42.5	64.2	24.8	31.9	16.2
	сжатия	590.2	335.0	418.7	295.5	512.0	284.5	348.7	232.2
I	растяжения	87.2	36.1	54.0	42.5	69.1	27.2	37.2	22.3
	сжатия	590.2	335.0	418.7	295.5	524.8	294.3	357.7	244.1
II	растяжения	49.6	16.4	22.3	14.2	87.2	33.7	47.2	33.9
	сжатия	410.3	224.6	256.0	166.7	597.1	334.2	412.8	284.8

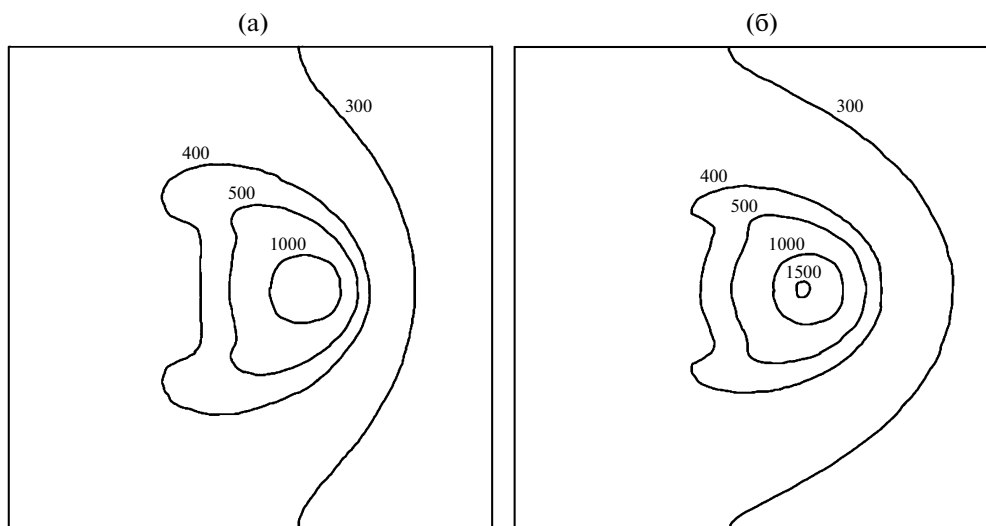


Рис. 2. Изолинии температурных полей (в Кельвинах) на поверхности кварцевой пластины ($v = 5$ мм/с, $h = 0.75$ мм). Варианты обработки II и V (а), III и IV (б).

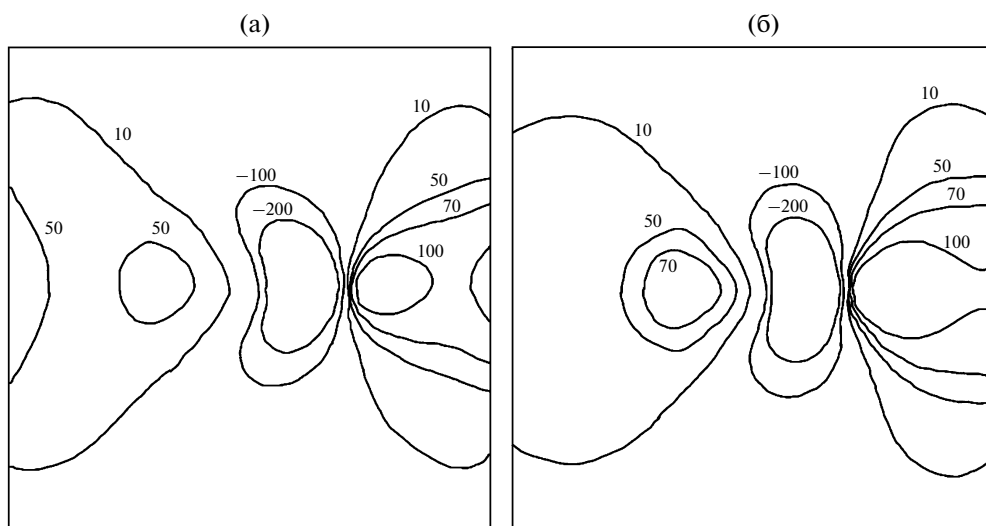


Рис. 3. Изолинии полей температурных напряжений (в единицах МПа) на поверхности кварцевой пластины ($v = 5$ мм/с, $h = 0.75$ мм). Варианты обработки II (а) и III (б).

ЛП вдоль оси X и вдоль оси Y соответственно (II и V варианты обработки). Так, максимальная разница между III и II вариантами обработки для используемых расчетных параметров не превышает 3.6%, в то время как разница между III и I вариантами достигает 12.1%.

В табл. 2 содержатся расчетные значения максимальных по величине напряжений растяжения и сжатия, формируемые в зоне обработки для пяти исследуемых вариантов обработки. Проведенные расчеты позволяют утверждать, что при моделировании управляемого лазерного термораскалывания кристаллов кварца принципиально важно учитывать анизотропию всех его свойств, оказывающих влияние на формирование термоупругих полей в образце. Учет только одной из

анизотропных характеристик материала приводит к существенным погрешностям. Так, в случае учета только анизотропии теплопроводности при определении величины напряжений растяжения в зоне обработки для анализируемых режимов погрешность достигает 34.2%, в случае учета только анизотропии теплового расширения погрешность 46.4%, а в случае учета только анизотропии упругих свойств погрешность 62.5%.

Из анализа данных табл. 2 следует, что наибольших значений напряжения растяжения достигают во время термораскалывания срезов yx и xz при перемещении ЛП в направлении оси Z (III и IV варианты обработки). Одной из причин этого являются более высокие значения температуры при реализации III и IV вариантов обработки

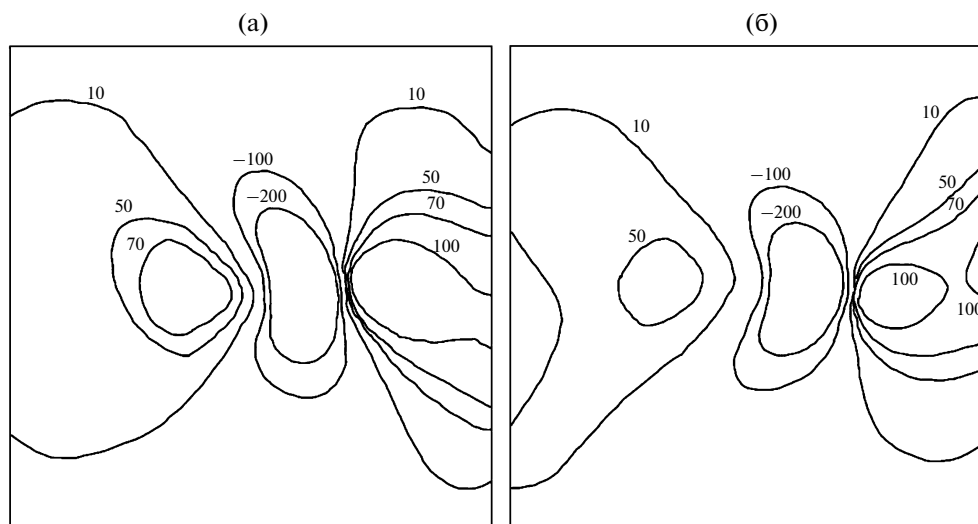


Рис. 4. Изолинии полей температурных напряжений (в единицах МПа) на поверхности кварцевой пластины ($v = 5$ мм/с, $h = 0.75$ мм). Варианты обработки IV (а) и V(б).

(табл. 1) в сравнении с другими вариантами. Кроме этого, формированию высоких напряжений растяжения при реализации III и IV вариантов обработки содействуют большие значения коэффициента линейного термического расширения в направлении, перпендикулярном плоскости лазерно-индуцированной трещины, по сравнению с их значениями при обработке ux - и xu -срезов в направлении осей X и Y , соответственно (II и V варианты обработки).

В свою очередь низкие значения температуры в зоне обработки и небольшие значения коэффициента линейного термического расширения в направлении, перпендикулярном плоскости лазерно-индуцированной трещины, обуславливают низкие значения напряжений растяжения при реализации II и V вариантов обработки. При этом растягивающие напряжения, формируемые при разделении zu -среза (I вариант обработки), больше расчетных напряжений для II и V вариантов обработки и меньше напряжений для III и IV вариантов. Такой результат объясняется, с одной стороны, низкими значениями температуры в зо-

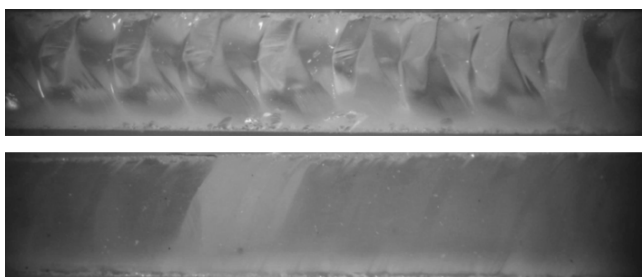


Рис. 5. Вид торцов кварцевых пластин, разделенных методом управляемого лазерного термораскалывания.

не обработки (табл. 1), а с другой – большими значениями коэффициента линейного термического расширения в направлении, перпендикулярном плоскости лазерно-индуцированной трещины.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют об определяющем влиянии анизотропии теплопроводности кристаллов кварца и анизотропии их теплового расширения на величину термоупругих напряжений, формируемых при управляемом лазерном термораскалывании этого материала. Однако наличие анизотропии упругих свойств обуславливает необходимость отдельного рассмотрения всех пяти вариантов обработки кристаллических элементов квадратной формы со стандартной первоначальной ориентацией, исследуемых в данной работе. Необходимо отметить особенности пространственной локализации термоупругих полей, формируемых при лазерном термораскалывании xu -среза (IV и V режимы). Как видно из рис. 4, распределение термоупругих полей, формируемых при управляемом лазерном термораскалывании xu -среза, характеризуется асимметричностью относительно линии воздействия лазерного излучения. Указанная асимметричность полей упругих напряжений на практике будет приводить к нежелательному отклонению лазерно-индуцированной трещины от контура обработки, что необходимо учитывать при выборе параметров термораскалывания.

Для проверки результатов численного моделирования были проведены экспериментальные исследования с использованием лазерного излучения с длиной волны 10.6 мкм. На рис. 5 представлен характерный вид торцов кварцевых пластин, разделенных методом управляемого лазерного термораскалывания. Результаты экспериментов

показали адекватность используемой методики моделирования.

Таким образом, выполненный в работе сравнительный анализ учета вкладов, связанных с проявлением анизотропии различных свойств кристаллов кварца, позволяет сделать вывод, что они являются величинами одного порядка. Пренебрежение хотя бы одним из видов анизотропии приводит при выборе технологических параметров процесса термораскалывания к погрешностям, достигающим 30% и более. Результаты работы могут быть использованы для выбора параметров и оптимизации процесса прецизионного разделения кварцевых пластин при изготовлении кристаллических элементов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кондратенко В.С. Способ резки неметаллических материалов // Патент РФ № 2024441.
2. Шалунаев С.В., Шершнев Е.Б., Сердюков А.Н. и др. // *Ceram. Polish Ceram. Bull.* 2001. V. 65. P. 75.
3. Сысоев В.К., Папченко Б.П., Захарченко А.В. и др. // *Оптический журн.* 2004. Т. 71. № 2. С. 65.
4. Tsai C., Chen H. // *J. Mater. Proc. Technol.* 2003. V. 136. P. 166.
5. Шалунаев С.В., Шершнев Е.Б., Никитюк Ю.В. и др. // *Оптический журн.* 2005. Т. 73. № 5. С. 62.
6. Наумов А.С. Дис. “Разработка технологии разделения приборных пластин на кристаллы” к-та техн. наук. М.: МГУПИ, 2007.
7. Сердюков А.Н., Шалунаев С.В., Никитюк Ю.В. // *Кристаллография.* 2010. Т. 55. № 6. С. 1180.
8. Кондратенко В.С., Гиндин П.Д. Способ резки неметаллических материалов // Патент РФ № 2224648.
9. Гиндин П.Д. Дис. “Разработка новых технологий и оборудования на основе метода лазерного управляемого термораскалывания для обработки деталей приборостроения, микро- и оптоэлектроники” д-ра техн. наук. М.: МГУПИ, 2009.
10. Heyliger P., Ledbetter H., Kim S. // *J. Acoust. Soc. Am.* 2003. V. 114. № 2. P. 644.
11. Шабров Н.Н. Метод конечных элементов в расчетах деталей тепловых двигателей. Л.: Машиностроение, 1983. 212 с.
12. Коваленко Л.Д. Основы термоупругости. Киев: Наукова думка, 1970. 307 с.
13. Карзов Г.П. Физико-механическое моделирование процессов разрушения. СПб.: Политехника, 1993. 391 с.
14. Глюкман Л.И. Пьезоэлектрические кварцевые резонаторы. М.: Радио и связь, 1981. 232 с.
15. Блистанов А.А., Бондаренко В.С., Чкалова В.В. Акустические кристаллы. М.: Наука, 1982. 632 с.
16. Корицкий Ю.В., Пасынкова В.В., Тареева Б.М. Справочник по электротехническим материалам. Л.: Энергоатомиздат, 1988. 728 с.
17. Lackner T. // *J. Electron. Mater.* 1989. V. 18. P. 19.
18. Новацкий В. Динамические задачи теории термоупругости. М.: Мир, 1970. 256 с.
19. Смагин А.Г., Ярославский М.И. Пьезоэлектричество кварца и кварцевые резонаторы. М.: Энергия, 1970. 488 с.