

ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ КВАРЦА В ПРОИЗВОДСТВЕ ИЗДЕЛИЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

Важной задачей является разработка новых лазерных технологий обработки изделий из кварца, применяемых в современной микро- и оптоэлектронике, таких как фотошаблоны, кварцевые резонаторы, датчики электромагнитного излучения, фотоэлектронные умножители и оптические компоненты для фотолитографии (рис. 6.1). Свойства лазерного излучения обеспечивают возможность его применения для высокоточной размерной резки, сварки и других технологических процессов [1].

Традиционные методы обработки кварца характеризуются рядом существенных недостатков. Так, при очистке кварцевого сырья от примесей химическими, электрическими и магнитными методами [2] не обеспечивается возможность очистки от химически стабильных примесей, а также примесей, не восприимчивых к магнитному и электрическому взаимодействию. Для технологических процессов лазерной обработки кварца, характерен ряд особенностей, затрудняющих их широкое промышленное внедрение. Высокая термостойкость кварцевого стекла обуславливает повышенную зависимость от параметров лазерной обработки надежности формирования лазерно-индуцированной трещины. Существует принципиальная необходимость учета кристаллографической ориентации кристаллического кварца при выборе параметров лазер-

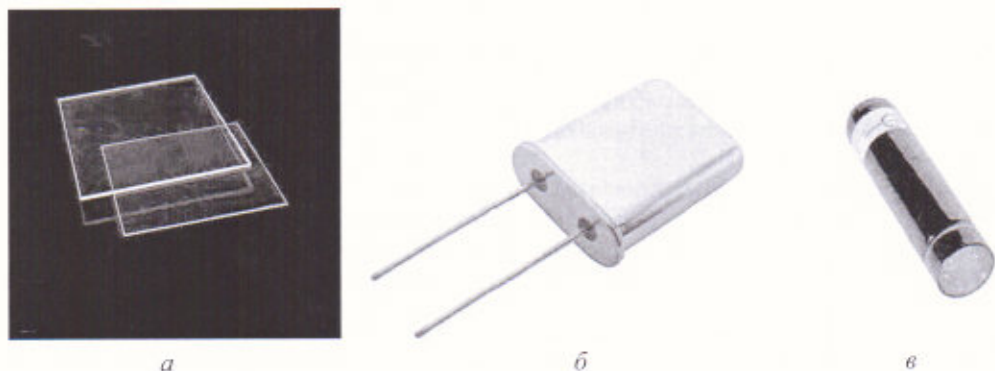


Рис. 6.1. Применение кварца в микроэлектронике: *а* – фотошаблоны; *б* – кварцевый резонатор; *в* – фотоэлектронный умножитель

ного термораскалывания. Существенные различия теплофизических свойств не позволяют перенести технологию двухлучевой сварки металлов на кварцевое стекло. Лазерной полировке также присущ ряд недостатков [3], обуславливающих необходимость проведения исследований.

6.1. Особенности лазерной микрообработки кристаллического кварца

Управляемое лазерное термораскалывание является одним 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 [4]. Основными достоинствами управляемого лазерного термораскалывания являются высокие точность и скорость разделения, низкая энергоемкость и безотходность процесса обработки. В работах [5–8] были 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 [9–10]. 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 [11–12]. Важность исследования особенностей применения этой технологии для обработки кристаллов кварца обусловлена широким промышленным применением кварцевых кристаллических элементов, годовое потребление которых превышает 1 млрд долл. США в год [13]. В данных работах показана принципиальная необходимость учета кристаллографической ориентации обрабатываемого материала при выборе параметров лазерного термораскалывания. Однако авторы акцентируют внимание лишь на анизотропии теплового расширения кристаллов кварца, при этом не учитывают 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 с учетом анизотропии их теплопроводности и упругих свойств.

Моделирование лазерного термораскалывания кварцевых пластин было выполнено с применением метода конечных элементов [14]. При этом на первом этапе выполнялся расчет полей температур, а затем определялись термоупругие напряжения, формируемые в результате воздействия лазерного излу-

чения и хладагента на кристаллическую кварцевую пластину. Такой алгоритм моделирования определяет получение результатов в рамках несвязанной задачи термоупругости в квазистатической постановке [15]. Для анализа полученных результатов был использован критерий максимальных растягивающих напряжений [16].

Расчеты проводились для квадратных пластин с геометрическими размерами $20 \times 20 \times 1,5$ мм и $20 \times 20 \times 0,75$ мм. Моделирование осуществлялось 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 $v = 5$ мм/с и $v = 15$ мм/с.

6.1.1. Лазерное термораскалывание кварца стандартных первоначальных ориентаций

Для моделирования были использованы стандартные первоначальные ориентации кристаллических образцов квадратной формы [17]. При этом для каждого из трех исследуемых срезов направления перемещения лазерного пучка совмещались с кристаллографическими осями, лежащими в соответствующей плоскости обработки (см. рис. 6.2). В соответствии с работой [17] для обозначения срезов были использованы две буквы, обозначающие кристаллографические оси, вдоль которых расположен кристаллический элемент, при этом первая буква определяет, какая из осей направлена вдоль толщины образца, а вторая буква соответствует оси направленной вдоль длины образца.

Очевидно, что использованных квадратных образцов в случае анализа среза xy достаточно для 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 анализов среза: I – xy при перемещении лазерного пучка в направлении оси X ; II – yx при перемещении лазерного пучка в направлении оси X ; III – yx при перемещении лазерного пучка в направлении оси Z ; IV – xy при перемещении лазерного пучка в направлении оси Z ; V – xy при перемещении лазерного пучка в направлении оси Y .

На рис. 6.2 представлены схемы расположения зон воздействия лазерного излучения и хладагента в плоскости обработки для пяти вариантов обработки, исследуемых в данной работе. Позицией 1 отмечен лазерный пучок, позицией 2 – хладагент, позицией 3 – лазерно-индуцированная трещина, позицией 4 – кварцевая пластина. Горизонтальной стрелкой на рисунке указано направление перемещения обрабатываемого изделия относительно лазерного пучка и хладагента.

Для расчетов плотность и удельная теплоемкость кристаллического кварца полагались соответственно равными $\rho = 2643$ кг/м³ и $C = 741$ Дж/кг·К. При

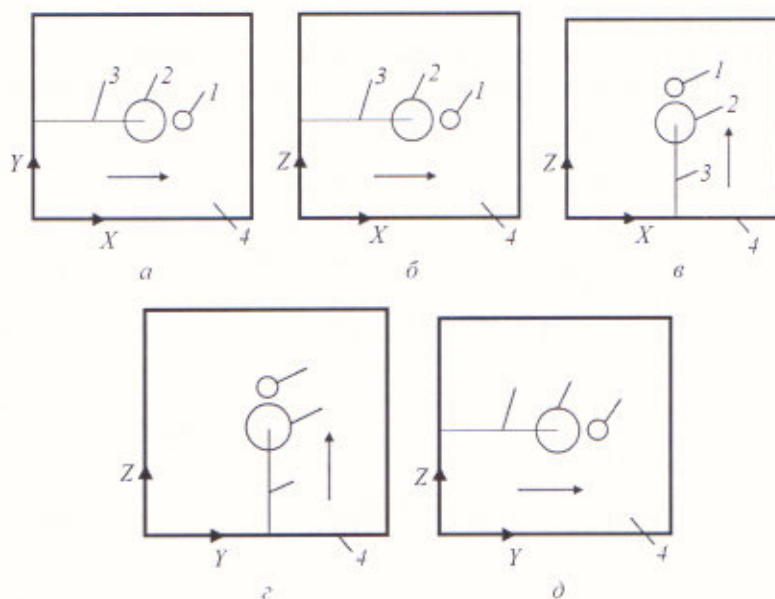


Рис. 6.2. Схемы расположения зон воздействия лазерного излучения и хладагента в плоскости обработки: а – I вариант обработки; б – II вариант обработки; в – III вариант обработки; г – IV вариант обработки; д – V вариант обработки

моделировании были учтены различия физических свойств кристаллического кварца в различных кристаллографических направлениях. Коэффициенты теплопроводности и линейного термического расширения кристаллического кварца полагались соответственно равными $\lambda_{\parallel} = 12,3 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$, $\alpha_{\parallel} = 9 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ вдоль оси симметрии третьего порядка Z и $\lambda_{\perp} = 6,8 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$, $\alpha_{\perp} = 14,8 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ – перпендикулярно оси Z [18–19].

Закон Гука для анизотропных материалов в матричной форме имеет вид [20–21]

$$\sigma_i = \sum_{k=1}^6 C_{ik} (\varepsilon_k - \varepsilon_k^t), \quad (6.1)$$

где напряжения

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

упругие деформации

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

температурные деформации

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

Низкотемпературный кварц принадлежит к тригональной системе, вследствие чего его упругие свойства описываются шестью независимыми компонентами тензора модулей упругости, матричная запись которого для среза yz имеет вид [22]

$$\{C_{ik}\} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{12} & -C_{14} & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{12} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ C_{14} & -C_{14} & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & C_{14} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{14} & \frac{C_{11}-C_{12}}{2} \end{pmatrix}. \quad (6.2)$$

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

$$\{C_{ik}\} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{13} & C_{12} & -C_{14} & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{33} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{13} & C_{11} & C_{14} & 0 & 0 \\ -C_{14} & 0 & C_{14} & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{C_{11}-C_{12}}{2} & -C_{14} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -C_{14} & C_{44} \end{pmatrix}. \quad (6.3)$$

Соответственно для среза xz матрица C_{ik} примет вид

$$\{C_{ik}\} = \begin{pmatrix} C_{33} & C_{13} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & C_{14} \\ C_{13} & C_{12} & C_{11} & 0 & 0 & -C_{14} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{C_{11}-C_{12}}{2} & -C_{14} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -C_{14} & C_{44} & 0 \\ 0 & C_{14} & -C_{14} & 0 & 0 & C_{44} \end{pmatrix}. \quad (6.4)$$

Для расчетов использовались следующие константы упругой жесткости: $C_{11} = 86,75$ ГПа, $C_{12} = 5,95$ ГПа, $C_{13} = 11,91$ ГПа, $C_{14} = -17,8$ ГПа, $C_{33} = 107,2$ ГПа, $C_{44} = 57,8$ ГПа [10, 19]. Используемый 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 на формирование полей температур и температурных напряжений при управляемом лазерном термораскалывании для каждого из пяти вариантов расчета использованы четыре набора свойств материала, учитывающих:

зависимость от кристаллографического направления коэффициентов теплопроводности, коэффициентов линейного термического расширения и упругих свойств кристаллов кварца;

зависимость от кристаллографического направления только коэффициентов теплопроводности;

зависимость от кристаллографического направления только коэффициентов линейного термического расширения;

зависимость от кристаллографического направления только упругих свойств кристаллов кварца.

Для моделирования управляемого лазерного термораскалывания изотропной кварцевой пластины использованы значения модуля Юнга и коэффициента Пуассона, приведенные в работе [10], а значения коэффициента теплопроводности и коэффициента линейного термического расширения определялись, как среднее арифметическое их значений вдоль оси Z и в перпендикулярном направлении.

Для проведения сравнительного анализа расчеты были выполнены 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 представлены в табл. 6.1 и 6.2 и на рис. 6.3 и 6.4. В табл. 6.1 приведены расчетные значения максимальных температур для набора свойств, учитывающего анизотропию теплопроводности кристаллов кварца.

Все расчетные значения температур не превышают температуру плавления кристаллического кварца, что является необходимым условием для реализации хрупкого разрушения пластины под действием термоупругих напряжений. Для всех расчетных вариантов меньшими значениями температуры характеризуется режим обработки толстых пластин ($h = 1,5$ мм) с высокой скоростью ($v = 15$ мм/с).

Таблица 6.1. Расчетные значения максимальных температур в обрабатываемой пластине

Вариант обработки	Максимальная температура в обрабатываемой пластине 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

Таблица 6.2. Расчетные значения максимальных по величине напряжений растяжения и сжатия в зоне обработки

Вариант	Максимальные напряжения в зоне обработки, МПа	набор свойств а)				набор свойств б)			
		$h = 0,75$ 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
Вариант	Максимальные напряжения в зоне обработки, МПа	набор свойств с)				набор свойств д)			
		$h = 0,75$ 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	88,2	33,9	47,9	27,8	60,2	23,4	32,8	22,7
	сжатия	669,4	377,8	473,9	326,3	449,5	253,6	312,5	215,7
II	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
III	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
IV	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
V	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

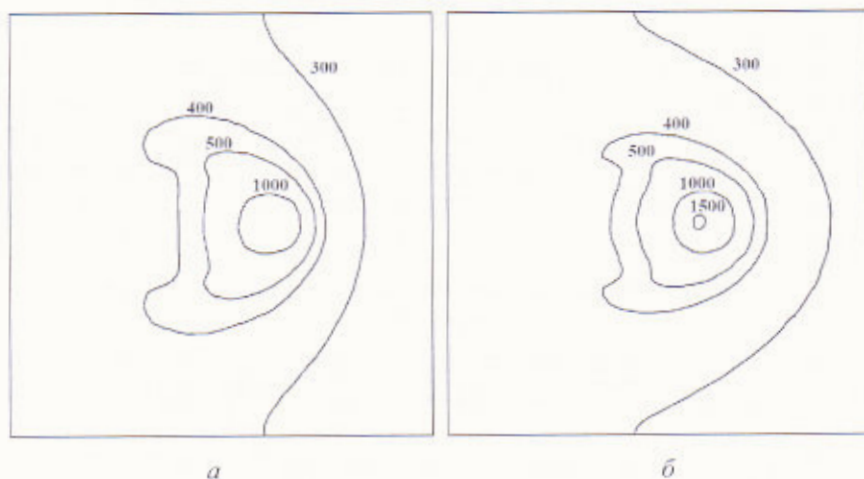


Рис. 6.3. Распределение температурных полей на поверхности кварцевой пластины ($v = 5$ мм/с, $h = 0,75$ мм), К: а – II и V варианты обработки; б – III и IV варианты обработки

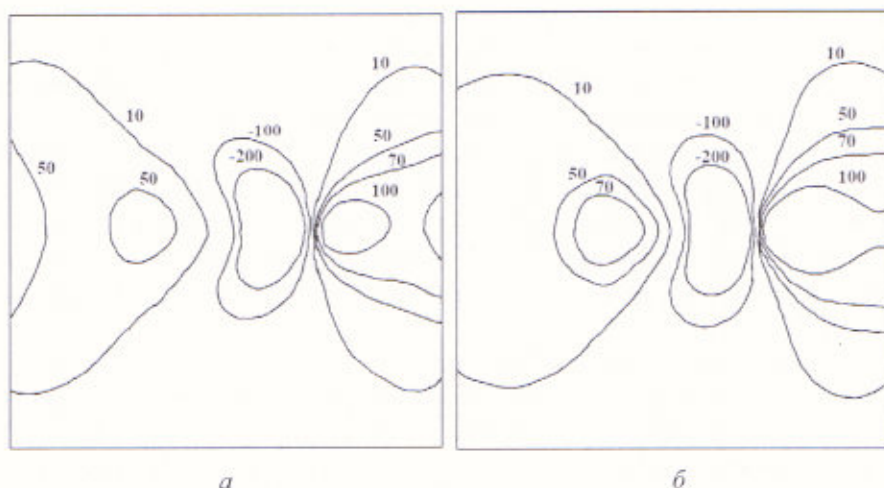


Рис. 6.4. Распределение полей температурных напряжений на поверхности кварцевой пластины ($v = 5$ мм/с, $h = 0,75$ мм), МПа: а – II вариант обработки; б – III вариант обработки

Нужно отметить, что анизотропия теплопроводности кварца обуславливает необходимость отдельного рассмотрения температурных полей, формируемых в элементах квадратной формы для трех случаев обработки из пяти расчетных вариантов резки кристаллической пластины:

перпендикулярно оси Z , при этом линия реза лежит в плоскости, перпендикулярной этой оси (I расчетный вариант);

перпендикулярно оси Z , при этом линия реза лежит в плоскости, параллельной этой оси (II и V расчетные варианты);

вдоль оси Z , при этом линия реза лежит в плоскости, параллельной этой оси (III и IV расчетные варианты).

Анализ данных, приведенных в табл. 6.1, 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 (λ_{\parallel} больше λ_{\perp} почти в два раза).

Повышенными значениями температуры характеризуется обработка срезов yx и xz при перемещении лазерного пучка 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 лазерного пучка 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. 6.2 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, например, 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 достигает 46,4 %, а в случае учета только анизотропии упругих свойств погрешность достигает 62,5 %.

Из анализа, данных приведенных в табл. 6.2, следует, что наибольших значений напряжения растяжения достигают во время термораскалывания срезов ux и xu при перемещении лазерного пучка 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 (см. табл. 6.1) в сравнении с другими вариантами обработками. 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 (4 вариант обработки), больше расчетных напряжений для II и V вариантов обработки и меньше напряжений для III и IV вариантов обработки. Такой результат объясняется, с одной стороны, низкими значениями температуры в зоне обработки (см. табл. 6.1), а с другой – большими значениями коэффициента линейного термического расширения, в направлении, перпендикулярном плоскости лазерно-индуцированной трещины.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют об определяющем значении 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. Отдельно нужно указать на особенности пространственной локализации термоупругих полей, формируемых при лазерном термораскалывании xu -среза (IV и V режимы). Как видно из рис. 6.5 распределение термоупругих полей, формируемых при управляемом лазерном термо-

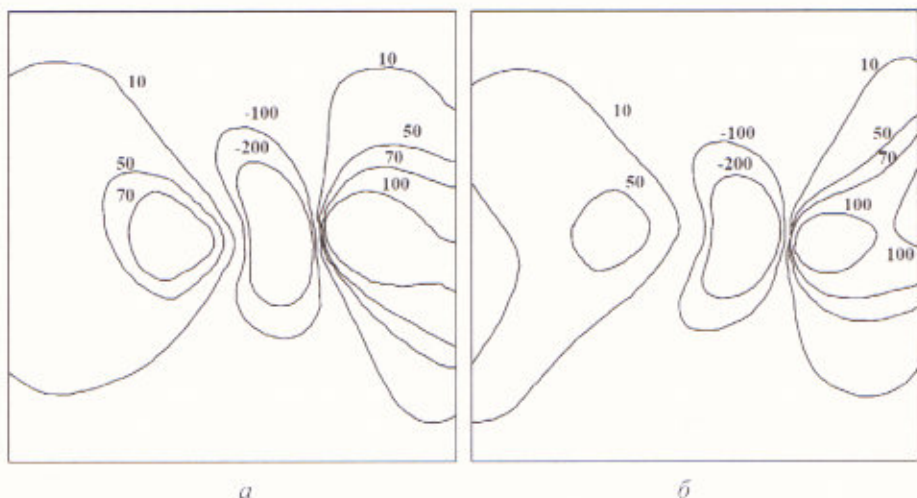


Рис. 6.5. Распределение полей температурных напряжений на поверхности кварцевой пластины ($v = 5 \text{ мм/с}$, $h = 0,75 \text{ мм}$), МПа: *a* – IV вариант обработки; *б* – V вариант обработки

раскалывании x -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 $10,6 \text{ мкм}$ на установке лазерной резки [23]. На рис. 6.6 представлен характерный вид торцов кварцевых пластин, разделенных методом управляемого лазерного термораскалывания. Результаты экспериментов показали адекватность используемой методики моделирования.



Рис. 6.6. Вид торцов кварцевых пластин, разделенных методом управляемого лазерного термораскалывания

Таким образом, выполненный 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.

6.1.2. Лазерное термораскалывание кварца АТ- и ВТ-срезов

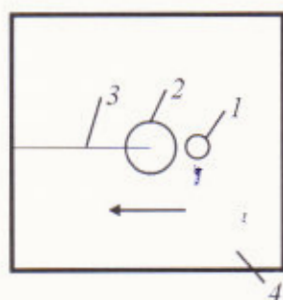


Рис. 6.7. Схема расположения зон воздействия лазерного излучения и хладагента в плоскости обработки кристалла кварца

На практике наиболее широко применяются кристаллы кварца АТ- и ВТ- срезов [24]. В связи с этим было выполнено исследование особенностей процесса лазерного термораскалывания кристаллического кварца АТ- и ВТ-срезов. На рис. 6.7 представлена схема расположения зон воздействия лазерного излучения и хладагента в плоскости обработки при перемещении лазерного пучка. Позицией 1 отмечен лазерный пучок; позицией 2 – хладагент; позицией 3 – лазерно-индуцированная трещина; позицией 4 – кварцевая пластина. Горизонтальной стрелкой на рисунке указано направление перемещения обрабатываемого изделия относительно лазерного пучка и хладагента. Любое расположение кристаллического элемента относительно осей X , Y , Z может быть получено последовательными поворотами одной из первоначальных ориентаций.

В случае АТ-среза выполняется поворот на 35° , а в случае ВТ-среза выполняется поворот на 49° [17] (рис. 6.8).

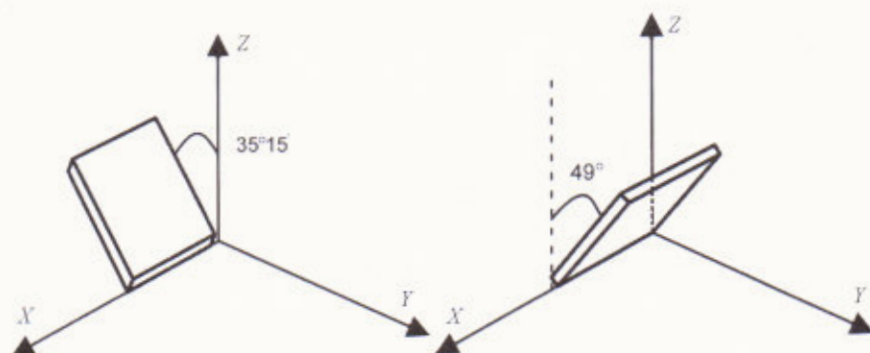


Рис. 6.8. АТ- и ВТ-срезы кристаллического кварца

Матрица $\{C_{ik}\}$ для АТ-среза может быть записана в следующем виде

$$\{C_{ik}\} = \begin{pmatrix} 86,74 & -8,25 & 27,15 & -3,66 & 0 & 0 \\ -8,25 & 129,77 & -7,42 & 5,70 & 0 & 0 \\ 27,15 & -7,42 & 102,83 & 9,92 & 0 & 0 \\ -3,66 & 5,70 & 9,92 & 38,61 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 68,78 & 2,57 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2,57 & 28,96 \end{pmatrix} \text{ ГПа.} \quad (6.5)$$

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

$$\{C_{ik}\} = \begin{pmatrix} 86,74 & 27,53 & -8,63 & 0,057 & 0 & 0 \\ 27,53 & 98,24 & -5,67 & -12,80 & 0 & 0 \\ -8,63 & -5,67 & 130,86 & 0,17 & 0 & 0 \\ 0,057 & -12,80 & 0,17 & 40,36 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 29,87 & -6,49 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -6,49 & 67,87 \end{pmatrix} \text{ ГПа.} \quad (6.6)$$

Расчет термоупругих полей, формируемых в кварцевой пластине в результате последовательного лазерного нагрева и воздействия хладагента, осуществлялся для четырех вариантов анализа: I – АТ-среза при перемещении лазерного пучка в направлении, параллельном оси X; II – АТ-среза при перемещении лазерного пучка в направлении, перпендикулярном оси X; III – ВТ-среза при перемещении лазерного пучка в направлении, параллельном оси X; IV – ВТ-среза при перемещении лазерного пучка в направлении, перпендикулярном оси X.

Результаты расчетов приведены в табл. 6.3–6.4 и на рис. 6.9–6.10. В табл. 6.3 содержатся значения максимальных температур, формируемые в кварцевой пластине для четырех исследуемых вариантов обработки. Расчетные значения максимальных по величине термоупругих напряжений растяжения и сжатия, приведены в табл. 6.4. На рис. 6.9–6.10 представлены распределения температурных полей и полей температурных напряжений для пластин толщиной $h = 0,75$ мм, обрабатываемых со скоростью $v = 5$ мм/с.

Таблица 6.3. Расчетные значения максимальных температур в обрабатываемой пластине

Вариант	Максимальная температура в обрабатываемой пластине 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	1520	994	1125	842
II	1538	1005	1136	847
III	1502	999	1135	862
IV	1531	1018	1156	871

Таблица 6.4. Расчетные значения максимальных по величине напряжений растяжения и сжатия в зоне обработки

Вариант	Максимальные напряжения в зоне обработки, МПа	$h = 0,75 \text{ мм}$		$h = 1,5 \text{ мм}$	
		$v = 5 \text{ мм/с}$	$v = 15 \text{ мм/с}$	$v = 5 \text{ мм/с}$	$v = 15 \text{ мм/с}$
I	сжатия	650	343	431	281
	растяжения	85	33	45	22
II	сжатия	717	381	483	319
	растяжения	100	40	53	34
III	сжатия	605	322	401	264
	растяжения	77	27	42	19
IV	сжатия	563	316	395	272
	растяжения	74	31	50	30

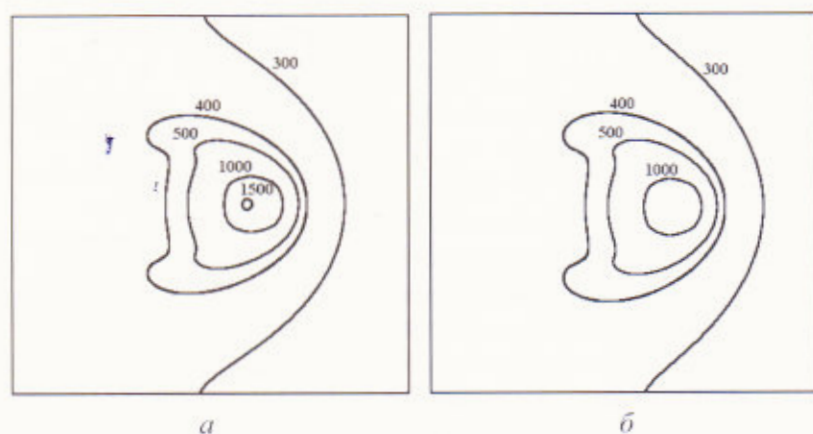


Рис. 6.9. Распределение температурных полей на поверхности кристаллического кварца: а – вариант I; б – вариант III

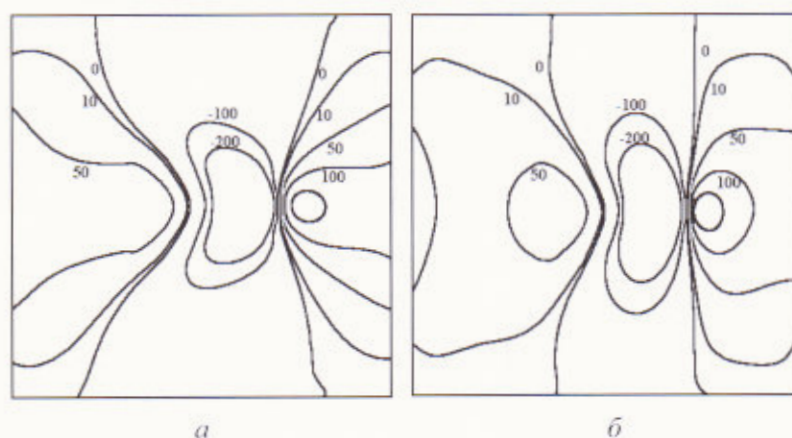


Рис. 6.10. Распределение полей термоупругих напряжений на поверхности кристаллического кварца: а – вариант I; б – вариант III

Анализ данных, приведенных в табл. 6.3, показывает, что анизотропия свойств кристаллов кварца в случае обработки АТ- и ВТ-срезов не оказывает существенного влияния на максимальные значения температуры в зоне обработки. Значительно более важными факторами оказываются такие параметры, как скорость обработки и геометрические размеры обрабатываемой пластины. Так, различия, обусловленные анизотропией теплофизических свойств, приводят к разнице в максимальных значениях температуры, не превышающей 3 %, а различия, обусловленные скоростью обработки и геометрией образца для выбранных расчетных параметров, достигают 45 %. Из анализа значений данных, приведенных в табл. 6.4, следует, что скорость обработки и геометрические размеры обрабатываемой пластины так же оказывают существенное влияние на значения термоупругих напряжений, формируемых в зоне обработки. Различия, обусловленные этими факторами, приводят к разнице в максимальных значениях растягивающих напряжений порядка 50–80 %. При этом и анизотропия свойств кристаллов кварца оказывает существенное влияние на максимальные значения термоупругих напряжений в зоне обработки. Так, соответствующие различия для максимальных значений растягивающих напряжений превышают 35 %. Данная разница в величинах растягивающих напряжений должна быть учтена при выборе параметров процесса лазерного термораскалывания.

Полученные результаты показывают необходимость учета анизотропии свойств кристаллов кварца при выборе параметров лазерного термораскалывания кварцевых пластин АТ- и ВТ-срезов.

6.2. Моделирование процесса лазерного термораскалывания кварца

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, фотоэлектронные умножители [25].

Традиционные методы обработки кварцевого стекла основываются на применении для резки алмазного инструмента, гидроабразивной струи или на использовании лазерного излучения для резки в режиме испарения материала. Основным недостатком традиционных методов является высокая дефектность получаемых кромок, что приводит к значительному снижению прочности стекла [1].

Изучению лазерного термораскалывания стекол, керамики и кристаллов посвящены работы [1, 4, 7, 8, 10, 12, 26–34]. Исследование особенностей лазерного термораскалывания кварцевого стекла проведено в работах [1, 33–34]. В этих исследованиях 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 трудах [33–34] 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 термораскалывания 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 [35–36].

В работе [8] была предпринята попытка применения критериев механики разрушения для анализа лазерного термораскалывания 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 исследованиях [37–38] разработаны алгоритмы 2D- и 3D-моделирования процесса формирования термоиндуцированной трещины в рамках теории термоупругости и линейной механики разрушения с использованием техники перестроения конечно-элементной сетки. Предложенное перестроение конечно-элементной сетки, последовательность которого определяется расчетными значениями коэффициента интенсивности напряжений в вершине трещины, в значительной степени повышает точность моделирования лазерного термораскалывания хрупких неметаллических материалов. В связи с этим представляется целесообразным проведение исследования лазерного термораскалывания кварцевого стекла в рамках теории термоупругости и линейной механики разрушения с учетом параметров стартового дефекта и с использованием техники перестроения конечно-элементной сетки.

Моделирование лазерного термораскалывания кварцевых пластин было выполнено с использованием алгоритма, разработанного в [37–38] (рис. 6.11). Расчет полей температурных напряжений осуществлялся в рамках несвязанной задачи термоупругости в квазистатической постановке с применением метода конечных элементов [14].

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 [37]. Критический коэффициент интенсивности напряжений K_{IC} представляет собой механическую характеристику материала, которая характеризует его способность сопротивляться распространению трещины нормального отрыва при хрупком разрушении [35–36].

Для повышения точности расчетов K_I были применены 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 [35–36].

На рис. 6.12 представлена 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 расчеты выполнялись для кварцевого стекла и для листового силикатного стекла, свойства которых приведены в табл. 6.5. Расчеты проводились для прямоугольных пластин с геометрическими размерами $15 \times 20 \times 1$ мм. Моделирование осуществлялось для лазерного излучения с длиной волны 10,6 мкм.

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 [39]. Радиус пятна хладагента $R_h = 3$ мм. Длина стартовой трещины изменялась в диапазоне 0,75–1,5 мм.



Рис. 6.11. Алгоритм конечно-элементного моделирования лазерного раскалывания кварцевого стекла

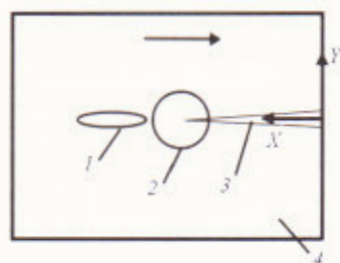


Рис. 6.12. Схема расположения зон воздействия лазерного излучения и хладагента в плоскости обработки стеклянной пластины

Таблица 6.5. 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 термораскалывании 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 [26]).

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 расчетов представлены на рис. 6.13–6.18. На рис. 6.13–6.15 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 перестроения конечно-элементной сетки (т. е. длина трещины оставалась постоянной).

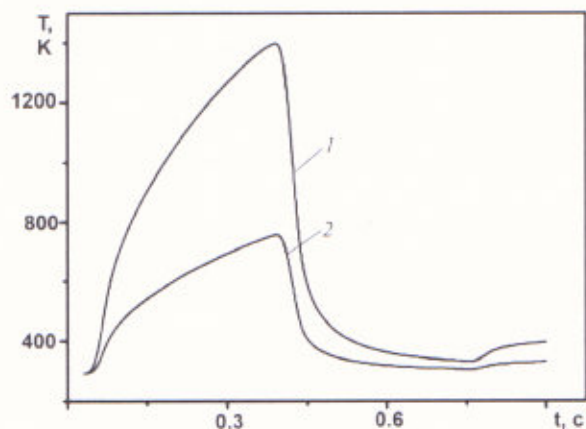


Рис. 6.13. Расчетные значения температуры T в вершине трещины

Как уже отмечалось ранее, при используемых параметрах обработки нагрев материала осуществлялся до температур стеклования кварцевого и листового силикатного стекла (рис. 6.13). Как видно из графиков, 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 (рис. 6.14).

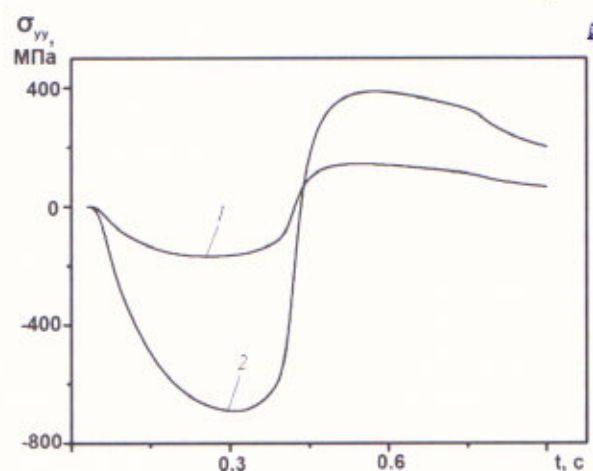


Рис. 6.14. Расчетные значения упругих напряжений σ_{yy} в вершине трещины

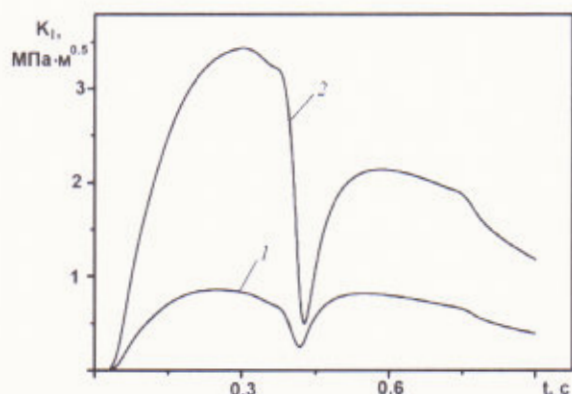


Рис. 6.15. Расчетные значения коэффициента интенсивности напряжений K_I в вершине трещины

Как видно из графиков на рис. 6.15, 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 и 2,14 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.

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.

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 рис. 6.16–6.18 цифрой 1 отмечены расчетные кривые, полученные при длине стартового дефекта $L = 0,75$ мм, цифрой 2 отмечены кривые, полученные при $L = 1$ мм, цифрой 3 отмечены кривые, полученные при $L = 1,5$ мм.

Необходимо отметить, что во всех трех расчетных случаях осуществляется развитие лазерно-индуцированных трещин из стартовых дефектов (рис. 6.16). Однако следует обратить внимание на заметное влияние длины стартового дефекта на величину термоупругих напряжений и коэффициентов интенсивности напряжения в вершине трещины (рис. 6.17, 6.18).

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

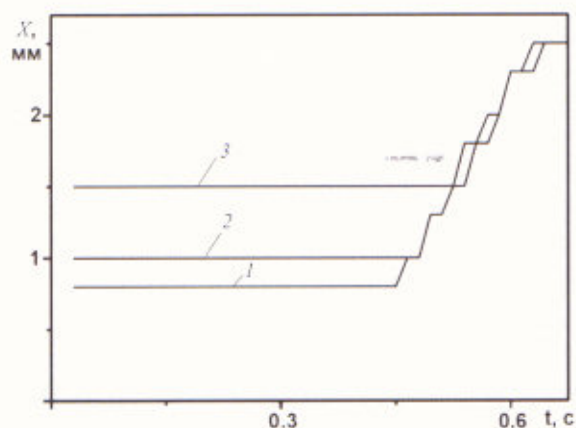


Рис. 6.16. Расчетные значения координат X вершины трещины

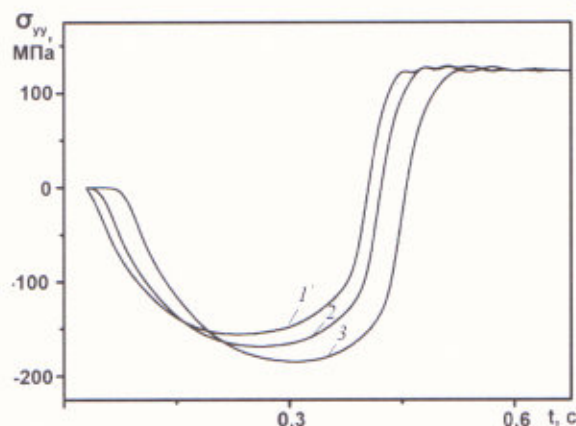


Рис. 6.17. Расчетные значения упругих напряжений σ_{yy} в вершине трещины

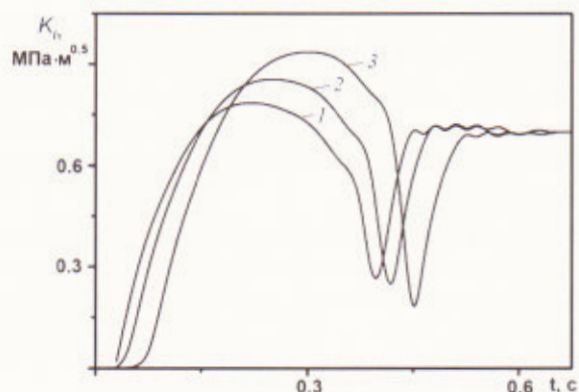


Рис. 6.18. Расчетные значения коэффициента интенсивности напряжений K_I в вершине трещины

$L = 1$ 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 имеют значения – $K_I = 0,94$ МПа м^{1/2}.

Таким образом, за счет увеличения длины стартового дефекта можно увеличивать вероятности инициализации лазерно-индуцированной трещины, что принципиально важно в случае обработки режимов лазерного термораскалывания кварцевых стекол. При этом применение технологии 3D-моделирования процесса формирования термо-индуцированной трещины в рамках теории термоупругости и линейной механики разрушения с использованием техники перестроения конечно-элементной сетки обеспечивает возможность проведения необходимых расчетов технологических режимов лазерного термораскалывания кварцевых стекол с учетом параметров стартового дефекта.

Таким образом, полученные результаты показывают принципиальную необходимость учета параметров стартового дефекты при расчете технологических режимов лазерного термораскалывания кварцевых стекол.

6.3. Исследование двулучевой сварки кварцевого стекла

В основе традиционных методов сварки кварцевого стекла лежит использование газовой горелки, основными недостатками которой является малая точность и низкая производительность сварки. Благодаря высокой концентрации энергии в лазерном пучке и высокой точности локализации лазерного излучения лазер позволяет добиться более высокой производительности и точности обработки по сравнению с традиционными методами. Развитие лазерной сварки происходит довольно интенсивно, однако широкое внедрение сварки кварцевых изделий сдерживается существующим уровнем технологических разработок. Известно, что успешное решение внедрения некоторых процессов лазерной сварки реализовано с использованием двулучевых методов обработки. В настоящее время успешно применяются двулучевые схемы сварки металлов [40].

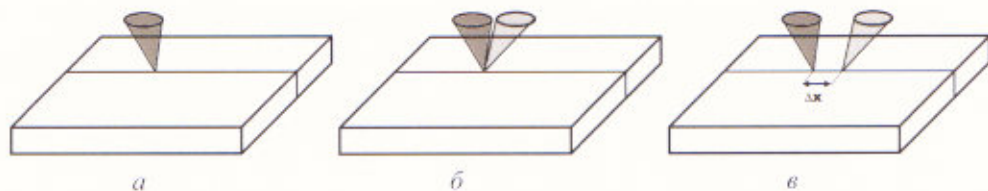


Рис. 6.19. Различные способы лазерной сварки: *a* – однолучевая сварка; *б* – двухлучевая суперпозиционная сварка; *в* – двухлучевая последовательная сварка

В связи с этим представляется целесообразным проведение исследований аналогичных двухлучевых схем в случае лазерной сварки кварцевых стекол. Принципиальная схема двухлучевой лазерной сварки приведена в [41]. В работе были выполнены расчеты температурных полей для следующих случаев обработки кварцевых стекол с использованием CO_2 -лазеров (рис. 6.19):

- 1) однолучевая сварка кварцевого стекла;
- 2) двухлучевая суперпозиционная сварка кварцевого стекла с использованием лазеров с различной дифракционной расходимостью;
- 3) двухлучевая последовательная сварка кварцевого стекла.

Для оптимизации процесса двухлучевой сварки кварцевого стекла необходимо создать математическую модель лазерной сварки, которая бы учитывала зависимость теплофизических свойств материала от температуры в отличие от других моделей [1]. Эти зависимости имеют следующий вид [42, 43] (рис. 6.20–6.23).

Моделирование процесса лазерной сварки проводилось с помощью конечно-элементного анализа. Анализировалась глубина проплавления кварцевого стекла, мощность лазерного излучения варьировалась с учетом того, чтобы максимальная температура в зоне сварки не превышала температуру кипения.

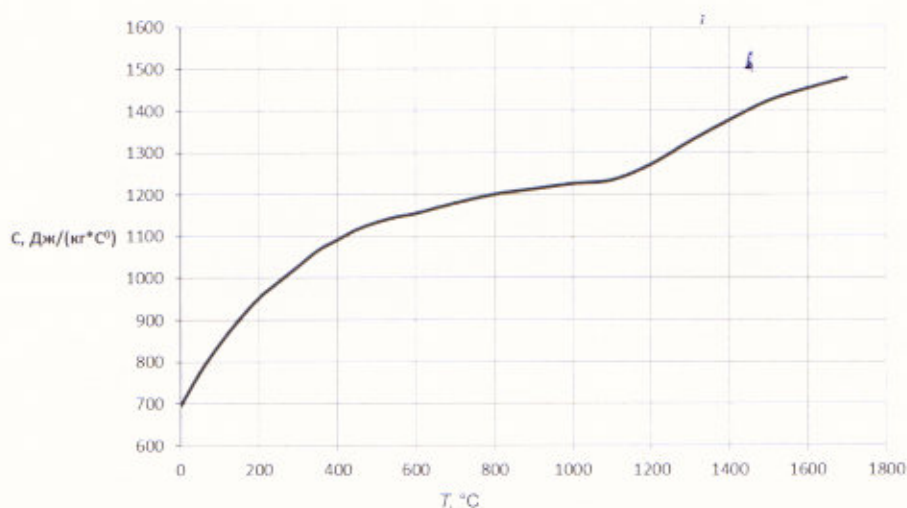


Рис. 6.20. Зависимость теплоемкости кварцевого стекла от температуры

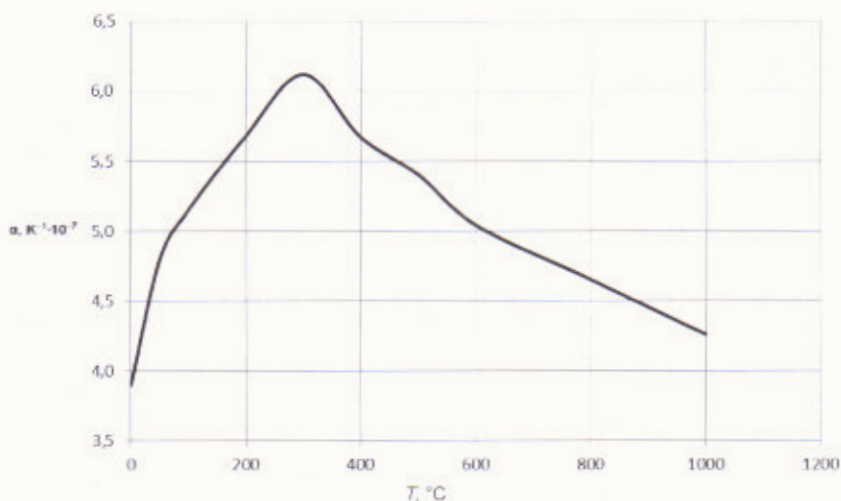


Рис. 6.21. Зависимость коэффициента линейного термического расширения кварцевого стекла от температуры



Рис. 6.22. Зависимость коэффициента теплопроводности кварцевого стекла от температуры

Для проверки гипотезы о существенном влиянии теплофизических свойств кварцевого стекла при лазерной сварке и необходимости их учета разработано две математические модели. Они отличаются тем, что в одной учитывается зависимость теплофизических свойств от температуры, а в другой – нет.

Анализ результатов показывает, что учет зависимости теплофизических свойств приводит к уменьшению максимальной расчетной температуры в зоне сварки в 1,7 раза (рис. 6.24).

Таким образом, для проведения расчетов температурных полей, возникающих при лазерной сварке кварцевого стекла необходимо учитывать зависимость теплофизических свойств материала от температуры.

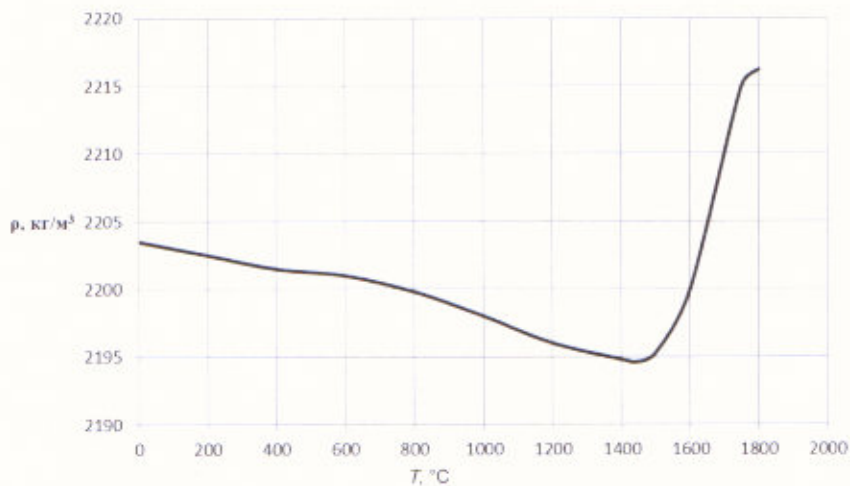


Рис. 6.23. Зависимость плотности кварцевого стекла от температуры

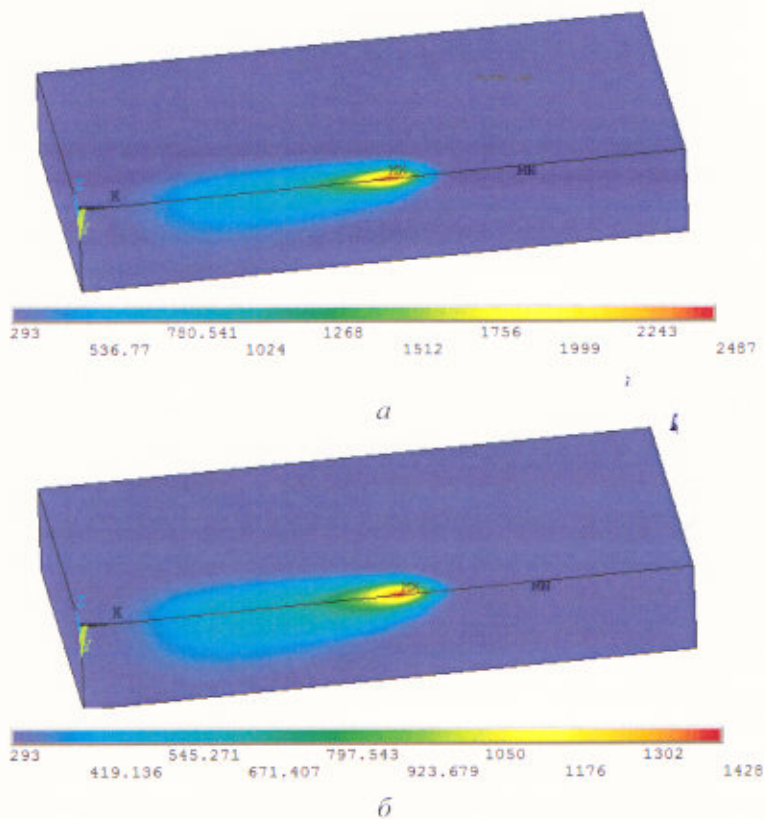


Рис. 6.24. Распределение температуры при однолучевой лазерной сварке кварцевого стекла: без учета зависимости теплофизических свойств кварцевого стекла от температуры (а) и с учетом этой зависимости (б)

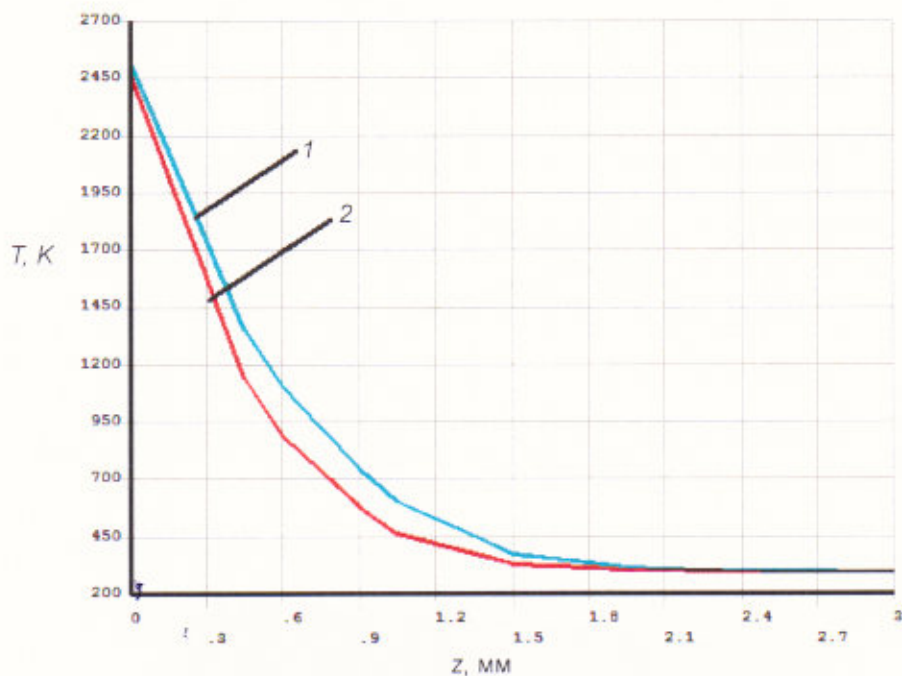


Рис. 6.25. Распределение температуры по глубине в зоне сварного шва при: 1 – двулучевой суперпозиционной сварке; 2 – при однолучевой лазерной сварке

Проведено моделирование двулучевой суперпозиционной лазерной сварки кварцевого стекла, в которой использовались 2 луча с различной дифракционной расходимостью. У лазеров большой мощности обычно высокая расходимость луча, поэтому, чтобы улучшить распределение мощности в сечении пучка, можно применять 2 менее мощных лазера, но с меньшей расходимостью луча [40]. В случае однолучевой лазерной сварки использовался лазер мощностью 300 Вт, а при суперпозиционной сварке – 2 лазера мощностью по 150 Вт. Распределение температуры по глубине в кварцевом стекле при однолучевой и двулучевой суперпозиционной сварке представлены на рис. 6.25.

Использование двух лазеров меньшей мощности, но с лучшими характеристиками луча, позволило увеличить глубину проплавления с 0,20 до 0,25 мм.

Одним из недостатков лазерной сварки металлов при больших скоростях является гидродинамическая неустойчивость жидкой фазы поверхности ванны расплава, приводящая к образованию неровностей [40]. Для уменьшения негативных последствий большой скорости сварки металлов используют последовательную двулучевую лазерную сварку с помощью двух лазеров, различной мощности. Проведено моделирование последовательной двулучевой лазерной сварки для кварцевого стекла при общей мощности двух лазеров составила 300 Вт. Мощность лазера при однолучевой сварке составила также 300 Вт. Результаты моделирования представлены на рис. 6.26 и 6.27.

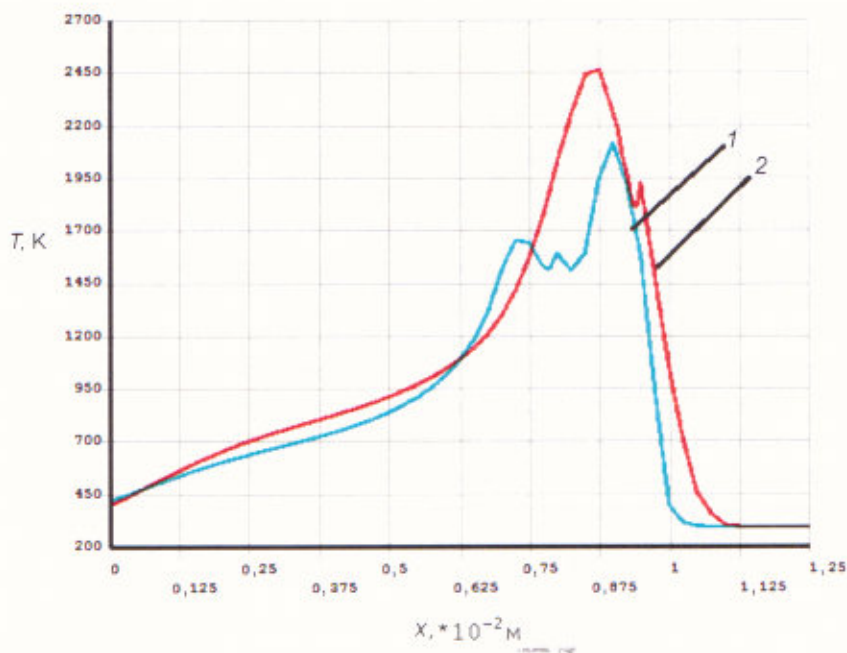


Рис. 6.26. Распределение температуры вдоль линии сварки: 1 – при двухлучевой последовательной сварке; 2 – при однолучевой лазерной сварке,

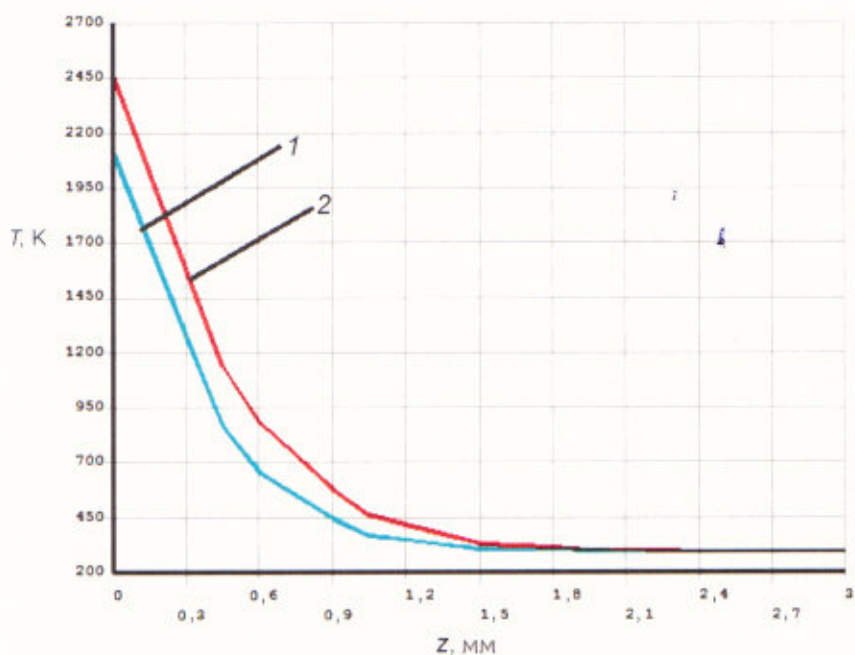


Рис. 6.27. Распределение температуры по глубине: 1 – при двухлучевой последовательной сварке; 2 – при однолучевой лазерной сварке

Как видно из рис. 6.26, последовательная двулучевая лазерная сварка позволяет замедлить спад температуры при остывании, однако кварцевое стекло обладает высокой вязкостью даже при высоких температурах, поэтому жидкая фаза ванны расплава шва, испытывающая гидродинамическую неустойчивость, характерная для металлов, для кварцевого стекла не образуется.

Кроме того, анализ рис. 6.27 показывает, что при последовательной двулучевой сварке уменьшается глубина проплавления, поэтому использование последовательной двулучевой лазерной сварки нецелесообразно в случае обработки кварцевого стекла.

Из анализа полученных результатов следует, что учет зависимости теплофизических свойств кварцевого стекла от температуры (плотность, теплопроводность, теплоемкость, коэффициент линейного термического расширения) принципиально важен для расчета технологических режимов лазерной сварки. Также в результате моделирования установлено, что двулучевая суперпозиционная сварка позволяет увеличить глубину проплавления до 25 %, по сравнению с традиционной однолучевой сваркой.

†

6.4. Исследование лазерной полировки кварцевого стекла

Известно применение излучения CO_2 -лазера в качестве технологического инструмента для обработки кварцевого стекла. Оно эффективно при лазерной резке и сварке, лазерной очистке кварцевого сырья и вытяжке волоконных световодов [25, 26, 44–50]. Так же известны примеры реализации лазерной полировки кварцевых стекол с использованием излучения CO_2 -лазера [50–52]. В работах [13, 14] отмечена высокая скорость лазерной полировки, а так же возможность обработки поверхностей различной формы. В работе [50] обращается внимание на возможность автоматизации процесса полировки лазерным излучением изделий из кварцевого стекла и отсутствие загрязнений нагреваемого объекта источниками нагрева.

Однако лазерной полировке присущ ряд недостатков, затрудняющих ее дальнейшее широкое промышленное распространение [3, 52] и обуславливающих необходимость проведения исследований лазерной полировки кварцевого стекла с использованием излучения CO_2 -лазера.

Моделирование процесса лазерного нагрева кварцевого стекла было выполнено методом конечных элементов [14] в соответствии со схемой, представленной на рис. 6.28. Цифрой 1 отмечен лазерный пучок, цифрой 2 – кварцевое стекло. На рис. 6.28 прямыми линиями со стрелками указаны направления перемещения лазерного пучка относительно обрабатываемого изделия. Моделирование выполнялось с учетом зависимости теплофизических свойств кварцевого стекла от температуры, представленных на рис. 6.29 [3]. Расчеты были выполнены для образца, имеющего форму прямоугольного параллелепипеда с геометрическими размерами $20 \times 10 \times 3$ мм, с использованием следующих значений технологических параметров обработки: плотность мощности лазерного

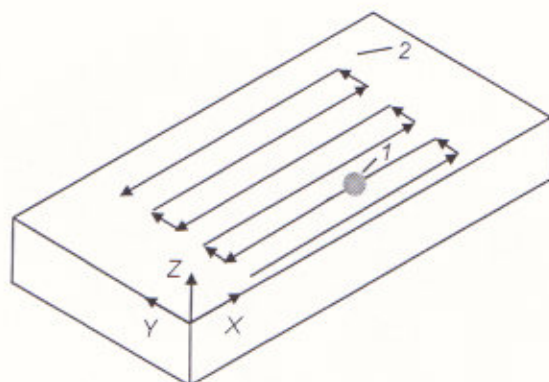


Рис. 6.28. Схема перемещения лазерного пучка в зоне обработки:
1 – пятно лазерного пучка; 2 – кварцевая пластина

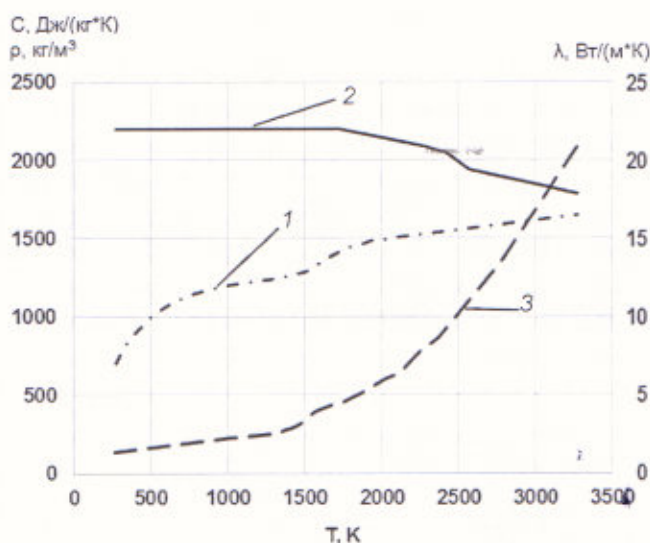


Рис. 6.29. Зависимость теплофизических свойств кварцевого стекла от температуры:
1 – теплоемкость C ; 2 – плотность ρ ; 3 – теплопроводность λ (графики 1 и 2 относятся к левой шкале ординат, график 3 к правой оси ординат)

излучения $P_0 = 22 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2$, радиус поперечного сечения лазерного пучка $R = 1,5 \text{ мм}$. Модуль скорости относительного перемещения лазерного пучка и образца $V = 2,5 \text{ мм/с}$. На рис. 6.30 представлено разбиение кварцевой пластины на конечные элементы. Символами Т1 – Т9 отмечено расположение контрольных точек.

Анализируя данные, приведенные на рис. 6.31, а, видно, что температура в контрольных точках Т3 – Т5 в результате многократного лазерного нагрева кварцевой пластинки по схеме, приведенной на рис. 6.28, периодически резко повышается. При этом вначале в контрольных точках наблюдается плавное

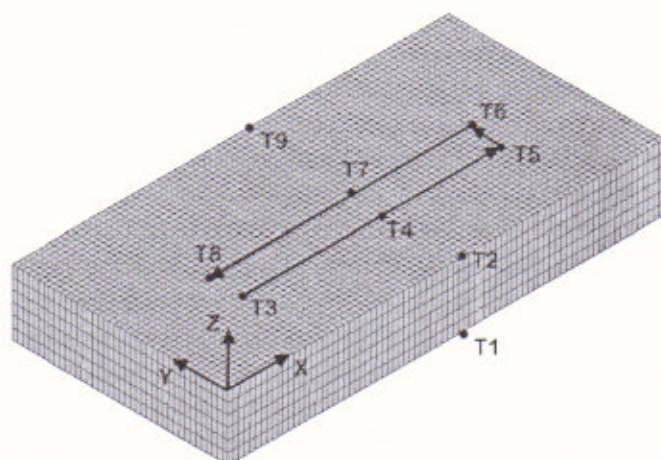


Рис. 6.30. Конечно-элементное разбиение расчетной области

увеличение максимальных значений температуры, которое после прохождения центром лазерного пучка этих точек сменяется их снижением. Значения температуры в контрольных точках Т1 – Т2, Т9, расположенных вне контура обработки так же периодически изменяется и сопровождаются ростом максимальных значений, обусловленным прогревом лазерным излучением обрабатываемой пластины. Нужно отметить, что, при выбранной схеме и параметрах лазерной полировки участки обрабатываемой поверхности неоднократно достигают температуры размягчения кварцевого стекла, которая находится в диапазоне 1773–1943 К [1].

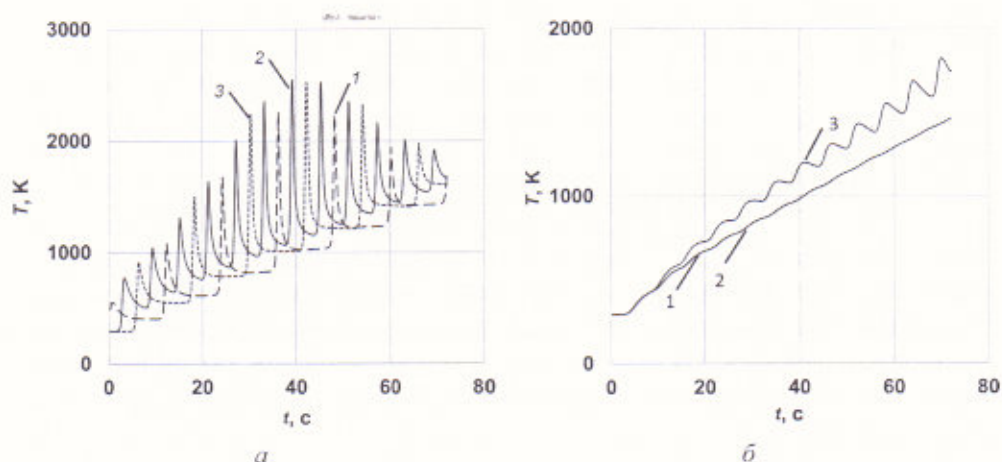


Рис. 6.31. Расчетные значения температуры: а – в контрольных точках Т3 (линия 1), Т4 (линия 2), Т5 (линия 3); б – в контрольных точках Т1 (линия 1), Т2 (линия 2), Т9 (линия 3)

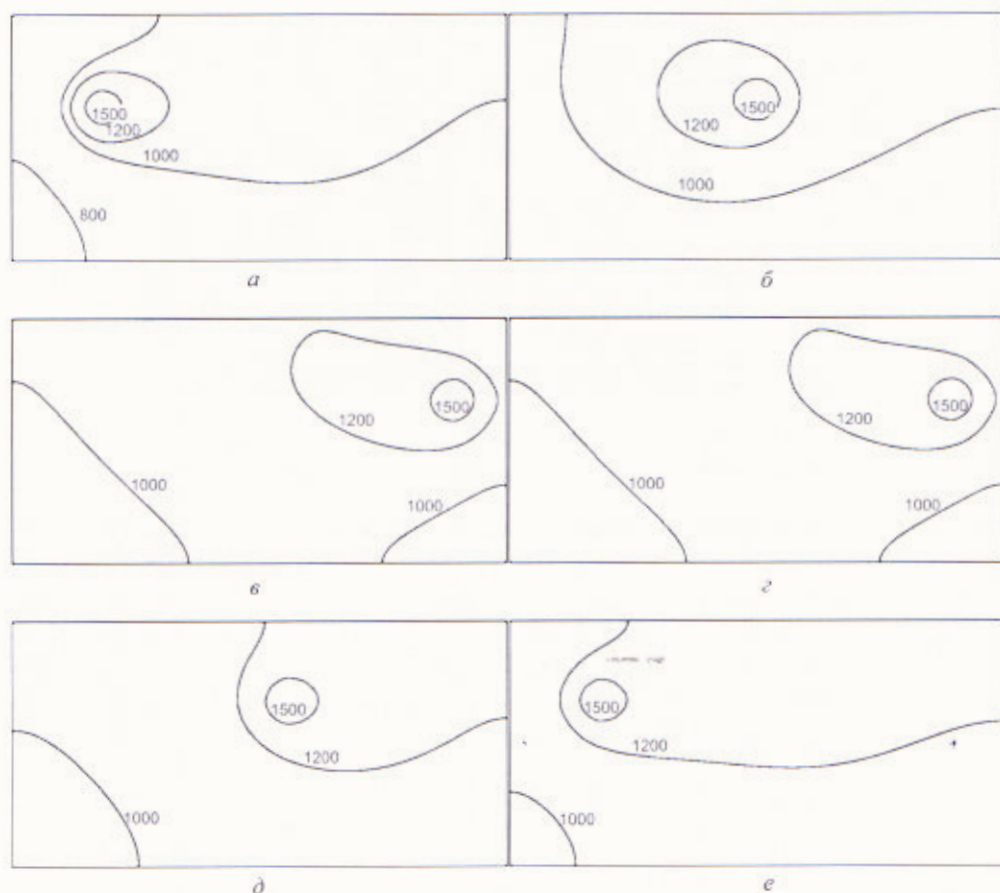


Рис. 6.32. Расчетное распределение температуры на поверхности кварцевого стекла: а – $t = 36$ с; б – $t = 39$ с; в – $t = 42$ с; г – $t = 42,1$ с; д – $t = 45$ с; е – $t = 48$ с

На рис. 6.32 представлены расчетные распределения температурных полей на поверхности кварцевой пластины в моменты времени, соответствующие прохождению центра лазерного пучка через контрольные точки ТЗ – Т8. Как видно из данных, представленных на рис. 6.32, локализация изотерм, соответствующих температуре размягчения, имеет круглую форму и практически не изменяется с течением времени.

При этом изотермы, соответствующие более низким температурам в ходе обработки постоянно изменяются. Стабильность формы зоны размягчения при выбранной схеме и технологических параметрах на практике обеспечивает однородность качества обработанной поверхности при реализации процесса лазерной полировки кварцевого стекла. Экспериментальные исследования процесса лазерной полировки кварцевых стекол были выполнены на установке для лазерной обработки материалов. На рис. 6.33 представлена схема установки. В качестве образцов использовались кварцевые пластины различного

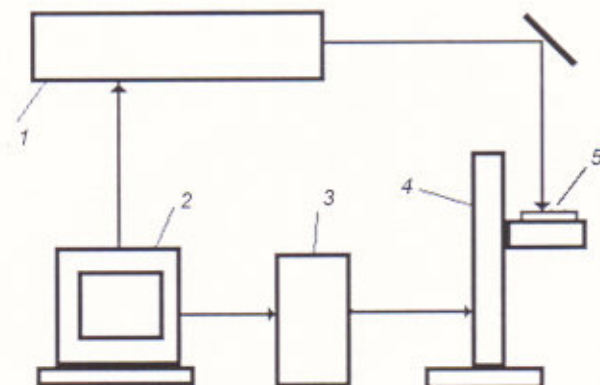


Рис. 6.33. Схема лазерной установки: 1 – CO₂-лазер; 2 – компьютер; 3 – блок управления; 4 – координатный стол; 5 – кварцевая пластина

типоразмера. Полировка осуществлялась лазерным пучком, который сканировал поверхность пластины по схеме, представленной на рис. 6.28. Скорость обработки варьировалась от 1,25 до 5 мм/с. Шаг смещения лазерного пучка после одного прохода в направлении оси Y составлял 0,25 мм. Качество обработки поверхности кварцевого стекла оценивалось по параметрам шероховатости R_a и R_z . Полученные экспериментальные результаты представлены на рис. 6.34–6.35 и в табл. 6.6.

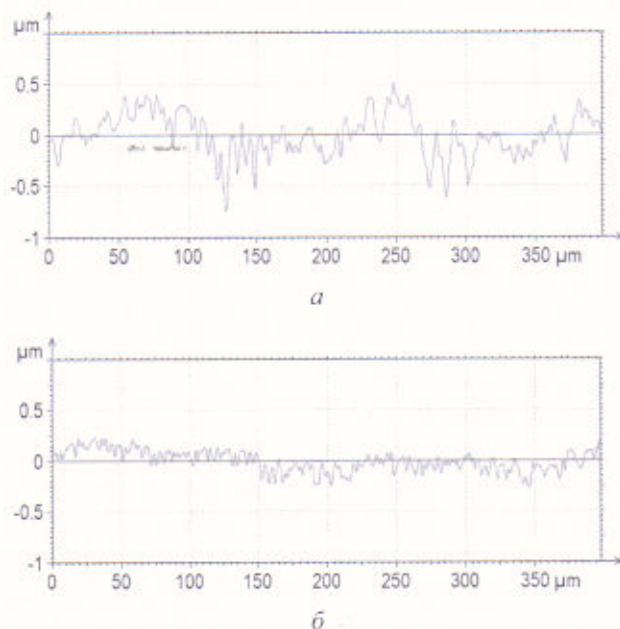


Рис. 6.34. Профилограмма пластинки из кварцевого стекла: а – до лазерной полировки; б – после лазерной полировки

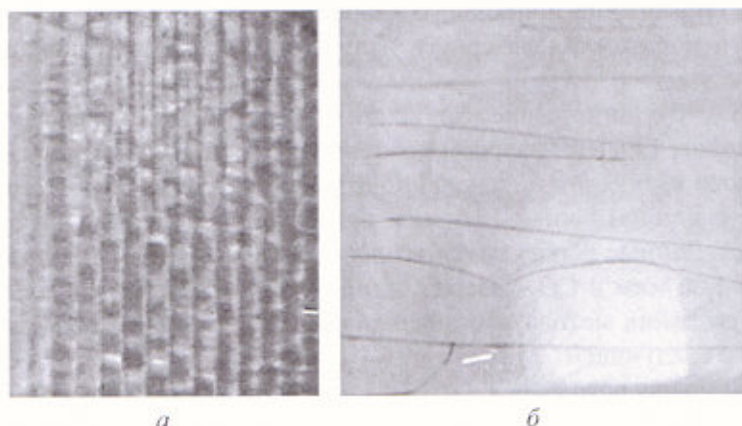


Рис. 6.35. Дефекты полировки кварцевого стекла: *а* – борозды; *б* – трещины

Таблица 6.6. Результаты эксперимента по полировке кварцевого стекла

V , мм/с	До полировки		После полировки	
	R_z , мкм	R_a , мкм	R_z , мкм	R_a , мкм
1,25	4,58	0,333	0,49	0,0645
2,5	2,71	0,278	0,220	0,0374
5	4,07	0,547	0,460	0,0812

Как видно из данных табл. 6.6 и рис. 6.35, в результате лазерной полировки поверхности кварцевого стекла параметр R_a уменьшался в 5–8 раз, а параметр R_z – в 8–12 раз.

В ходе проведения экспериментальных исследований было установлено, при параметрах обработки, приводящих к перегреву кварцевой пластины, наблюдается формирование борозд на обрабатываемой поверхности (рис. 6.35, *а*). Кроме этого, в ряде случаев происходит растрескивание образцов (рис. 6.35, *б*), обусловленное наличием остаточных напряжений. В ходе исследования определены особенности пространственной локализации температурных полей при полировке кварцевого стекла излучением CO_2 -лазера.

6.5. Двухлучевая лазерная сепарация кварцевого сырья

Важной задачей является получение чистого, не содержащего примесей кварцевого сырья [53]. В настоящее время наиболее распространенными способами очистки кварцевого сырья от примесей являются химические, электрические и магнитные методы [2]. Однако эти методы не позволяют очистить кварцевое сырье от химически стабильных примесей, а также примесей, не восприимчивых к магнитному и электрическому взаимодействию.

Лазерный метод очистки кварцевого сырья является уникальным. Он позволяет извлекать примеси, которые невозможно удалить другими известными

способами обогащения природного кварцевого сырья. Метод основан на селективности поглощения лазерного излучения кристаллическим кварцевым сырьем.

Известно, что поглощение излучения ближнего инфракрасного диапазона с длиной волны 1,06 мкм кварцем практически не происходит, при этом энергия лазерного излучения интенсивно поглощается примесями. В то же время излучение с длиной волны 10,6 мкм поглощается в тонком поверхностном слое кварца. Данные особенности воздействия излучения YAG-лазера с длиной волны 1,06 мкм и CO₂-лазера с длиной волны 10,6 мкм обеспечили возможность создания метода обогащения кварцевого сырья, суть которого заключается в следующем:

частицы кварцевого сырья нагреваются лазерным излучением CO₂-лазера с длиной волны 10,6 мкм до температуры, близкой к температуре плавления;

одновременно на частицы кварцевого сырья направляется излучение YAG-лазера с длиной волны 1,06 мкм. В результате этого происходит нагрев частиц сырья с поглощающими включениями до температур выше температуры плавления кварца;

далее перегретые частицы кварцевого сырья с примесями контактируют с частицами без примесей, в результате этого образуются конгломераты из нескольких частиц;

обработанное сырье механически сепарируется для удаления конгломератов, содержащих примеси.

Рассмотрим случай нагрева частиц, считая их сферическими и расположенными в один слой (рис. 6.36). В результате воздействия излучения CO₂-лазера частицы кварца нагреваются до температуры, близкой к температуре плавления $T_{пл}$. При этом происходит оплавление частицы 1 вследствие нагрева примеси 3 излучением YAG-лазера. После оплавления частицы 1 обеспечивается контакт с частицей 2 в точке 4. В результате частица 2 получает дополнительное тепло, необходимое для частичного оплавления поверхностного слоя.

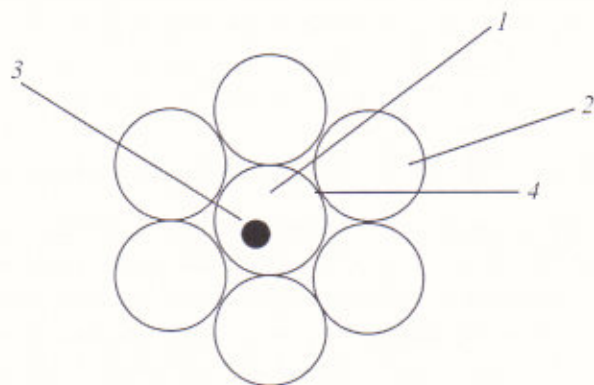


Рис. 6.36. Слой частиц кварцевого сырья: 1 – частица кварца с включением из примеси; 2 – частица кварца без примеси; 3 – примесь; 4 – место контакта частиц кварца

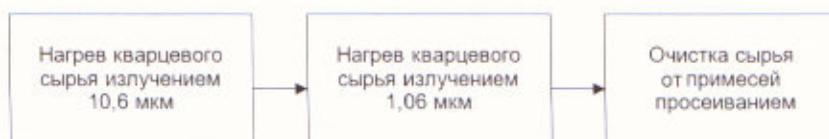


Рис. 6.37. Схема очистки кварцевого сырья от примесей

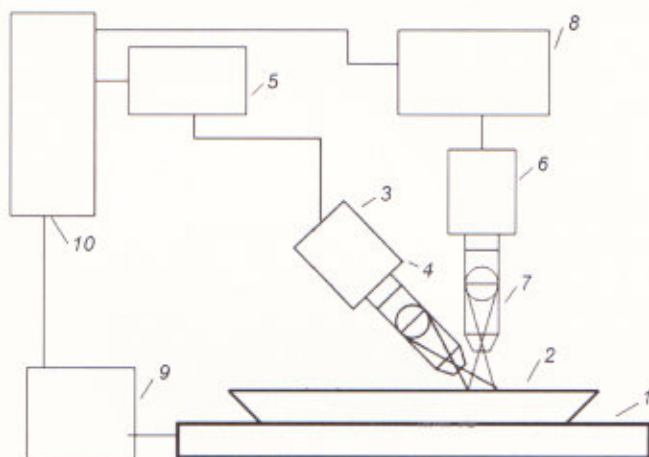


Рис. 6.38. Схема установки очистки кварцевого сырья: 1 – координатный стол; 2 – средство для подачи сырья; 3 – лазер для нагрева и плавления примесей и включений с длиной волны 1,06 мкм; 4 – фокусирующий объектив для лазера 3; 5 – блок управления лазером 3; 6 – лазер для прогрева кварцевого сырья с длиной волны 10,6 мкм; 7 – фокусирующий объектив для лазера 6; 8 – блок управления лазером 6; 9 – блок управления координатным столом; 10 – блок управления установкой

При контакте оплавленных частиц образуется конгломерат из оплавленной частицы с примесью и окружающих ее частиц кварцевого сырья. Схема очистки кварцевого сырья включает три операции (рис. 6.37).⁴

Нужно отметить, что для увеличения производительности очистки кварцевого сырья от примесей целесообразно применение наклонного вибростола. Принципиальная схема установки для очистки кварцевого стекла выглядит следующим образом (рис. 6.38) [48]. Для оптимизации режимов сепарации кварцевого сырья построена модель нагрева частицы кварца с включением из примеси. В модели частица кварца считалась сферической, как и примесь внутри нее (рис. 6.39–6.40).

Параметры обработки кварцевого сырья выбирались исходя из следующих технических характеристик оборудования:

- мощности используемых лазеров равны 100 Вт;
- оптическая система позволяет сформировать лазерный пучок размером 25×2 мм.

При моделировании применялись следующие допущения:
размеры кварцевых частиц не превышают 1 мм;

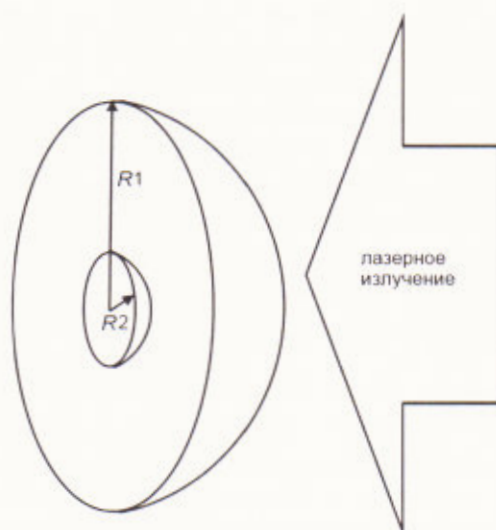


Рис. 6.39. Схема воздействия лазерного излучения на частицу из кварца в модели, где R_1 – радиус частицы; R_2 – радиус примеси

начальная температура частицы равна 20 °С;

время обработки, необходимое для прогрева всей частицы, составляет 1 с.

При моделировании были использованы следующие физические свойства кварца и примесей [19]:

плотность кварца – 2206 кг/м³;

• коэффициент теплопроводности кварца – 1,34 Вт/(м·К);

теплоемкость кварца – 732 Дж/(кг·К);

плотность примеси – 2750 кг/м³;

коэффициент теплопроводности примеси – 0,52 Вт/(м·К);

теплоемкость примеси – 840 Дж/(кг·К).

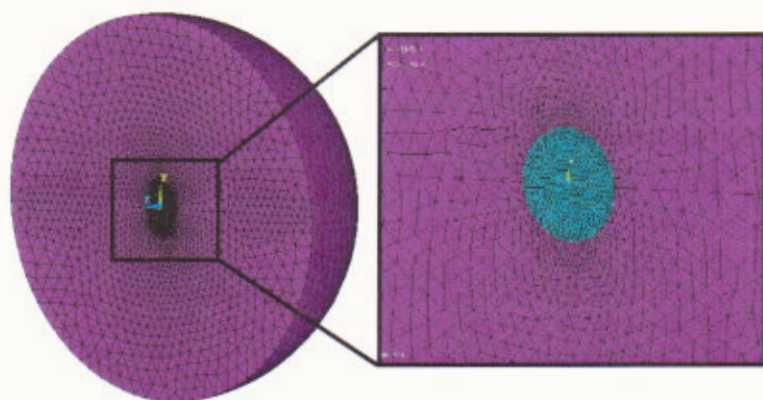


Рис. 6.40. Конечно-элементная модель частицы кварца с включением

При этом свойства примеси выбирались исходя из свойств слюды как основного вида примеси, содержащейся в кварцевом сырье [54].

На рис. 6.41 представлено характерное распределение температурных полей в случае двухлучевого нагрева частицы кварца с примесью (рис. 6.41, *а*) и в случае нагрева частицы кварца без примеси (рис. 6.41, *б*). Распределение температурных полей в обоих случаях характеризуется наличием зоны больших температур в верхней области частиц кварца, сформированной воздействием

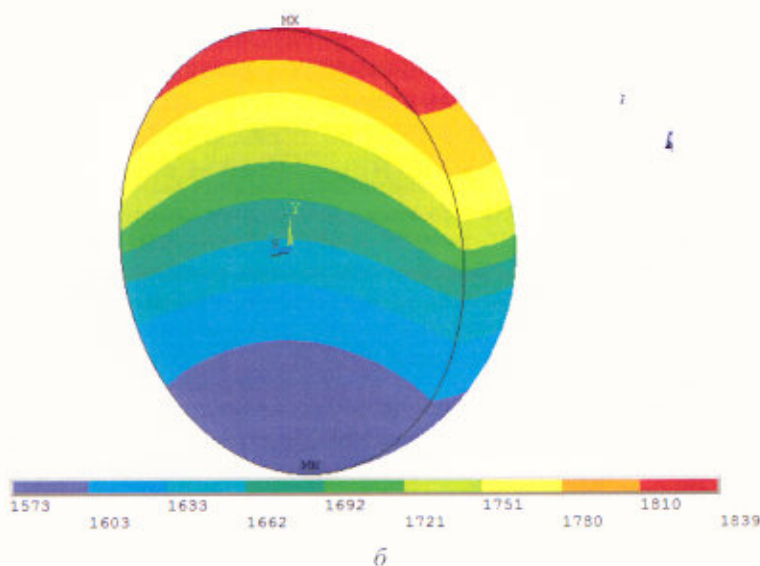
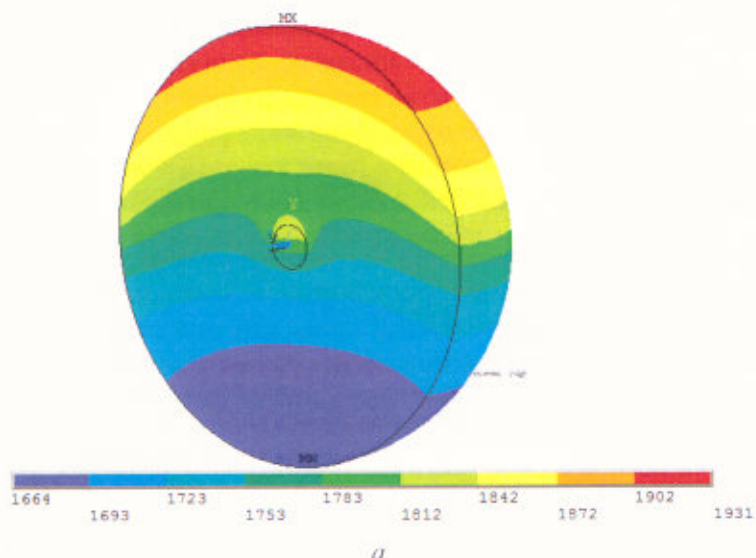


Рис. 6.41. Распределение температурных полей при воздействии лазерного излучения на частицу кварца с включением

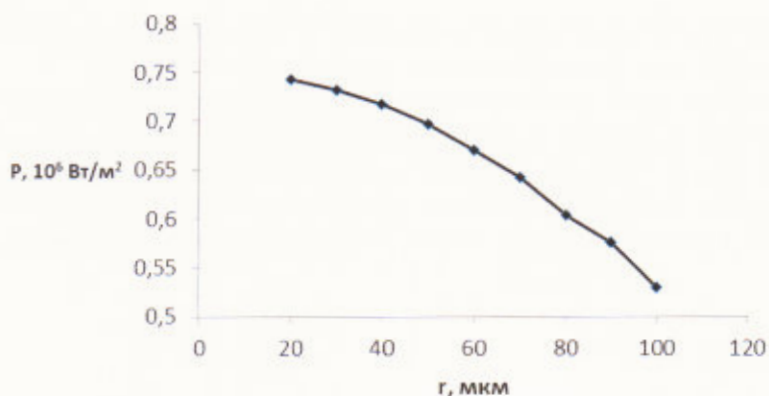


Рис. 6.42. Зависимость плотности мощности излучения CO_2 -лазера, необходимой для оплавления частицы кварца размером 400 мкм при различных размерах примеси

лазерного излучения с длиной волны 10,6 мкм. Отмечено локальное увеличение температуры в месте расположения примеси, возникающее в результате поглощения лазерного излучения с длиной волны 1,06 мкм материалом примеси.

Отметим, что воздействие лазерного излучения с длиной волны 1,06 мкм обуславливает также и увеличение значений температуры в верхней области частицы с примесью, которое составляет порядка 100 °К по сравнению со случаем обработки беспримесной частицы. При больших размерах примеси это увеличение может достигать 600 °К.

Определены значения плотности мощности CO_2 -лазера, при которых обеспечивается нагрев кварцевых частиц различного размера до температуры плавления. При этом варьировались как размеры частиц кварца, так и размеры частиц примеси (табл. 6.7), а также проводились расчеты при фиксированном размере частиц кварца и различных размерах частиц примеси (рис. 6.42).

В расчетах, представленных в табл. 6.7 и рис. 6.42 плотность мощности излучения YAG-лазера составила $2 \cdot 10^6$ Вт/м², размер частицы кварца оставался постоянным и равным 400 мкм.

Таблица 6.7. Плотность мощности излучения CO_2 -лазера, необходимая для оплавления частицы кварца при различных размерах частицы и размерах примеси

Размер частицы кварца, мкм	Размер включения, мкм	Плотность мощности излучения CO_2 -лазера с длиной волны 10,6 мкм, 10^6 Вт/м ²
250	25	0,457
300	30	0,548
350	35	0,635
400	40	0,717
450	45	0,795
500	50	0,867
550	55	0,933

Анализ результатов моделирования показал, что с увеличением размера частиц кварца и пропорциональным увеличением размера примеси плотность мощности лазерного излучения с длиной волны 10,6 мкм, необходимая для оплавления частицы кварца, практически линейно растет. Увеличение размера частицы примеси при неизменном размере частицы кварца приводит к снижению значений плотности мощности лазерного излучения с длиной волны 10,6 мкм, необходимой для оплавления частицы кварца. Это объясняется тем, что с увеличением размера частицы примеси увеличивается вклад лазерного излучения с длиной волны 1,06 мкм в нагрев частицы кварца за счет поглощения этого излучения частицей примеси.

Таким образом, разработанный алгоритм позволяет моделировать процесс двулучевой лазерной сепарации кварцевого сырья и получать информацию о распределении температурных полей в системе кварцевая частица – примесь. Полученные данные можно использовать для оптимизации технологических режимов лазерной сепарации кварцевого сырья.

Литература

1. Борисовский, В. Е. Развитие теории и разработка комплекса технологий и оборудования для лазерной обработки кварцевого стекла : автореферат дис. ... д-ра техн. наук : 05.11.14 / В. Е. Борисовский; Моск. гос. ун-т приборостроения и информатики. – М., 2011. – 36 с.
2. Новая концепция обогащения сырья для производства особо чистого кварца / Е. Н. Гулин [и др.] // Разведка и охрана недр. – 1999. – № 3. – С. 5–7.
3. Laser Beam Polishing of Quartz Glass Surfaces / J. Hildebrand [et al.] // Physics Procedia. – 2011. – Vol. 12. – P. 452–461.
4. Способ резки неметаллических материалов : пат. 2024441 РФ, МКИ 5 C03B33/02 / В. С. Кондратенко. – Оpubл. 12.15.94.
5. The Analysis of Laser Thermosplitting of Fragile Materials by Using of Special Geometry Beams / S. Shalupaev [et al.] // Ceramics. Polish ceramic bulletin. – 2001. – Vol. 65. – P. 75–83.
6. Увеличение эффективности управляемого лазерного термораскалывания диэлектрических материалов / В. К. Сысоев [и др.] // Оптический журнал. – 2004. – Т. 71, № 2. – С. 65–79.
7. Tsai, C. Laser cutting of thick ceramic substrates by controlled fracture technique / C. Tsai, H. Chen // Journal of Materials Processing Technology. – 2003. – Vol. 136. – P. 166.
8. Двулучевое лазерное термораскалывание хрупких неметаллических материалов / С. В. Шалупаев [и др.] // Оптический журнал. – 2005. – Т. 73, № 5. – С. 62–66.
9. Наумов, А. С. Разработка технологии разделения приборных пластин на кристаллы : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.11.14 / А. С. Наумов ; МГУПИ. – М., 2009. – 19 с.
10. 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.
11. Способ резки хрупких неметаллических материалов : пат. 2224648 РФ, МКИ5 C03 B 33/02 / В. С. Кондратенко, П. Д. Гиндин. – Оpubл. 27.02.2004.
12. Гиндин, П. Д. Разработка новых технологий и оборудования на основе метода лазерного управляемого термораскалывания для обработки деталей приборостроения, микро- и оптоэлектроники : автореф. дис. ... д-ра. техн. наук : 05.11.14 / П. Д. Гиндин; МГУПИ. – М., 2009. – 43 с.
13. Heyliger, P. Elastic constants of natural quartz / P. Heyliger, H. Ledbetter, S. Kim // The Journal of the Acoustical Society of America. – 2003. – Vol. 114, № 2. – P. 644–650.
14. Шабров, Н. Н. Метод конечных элементов в расчетах деталей тепловых двигателей / Н. Н. Шабров. – Л. : Машиностроение, 1983. – 212 с.

15. Коваленко, Л. Д. Основы термоупругости / Л. Д. Коваленко. – Киев : Навук. думка, 1970. – 307 с.
16. Карзов, Г. П. Физико-механическое моделирование процессов разрушения / Г. П. Карзов. – СПб. : Политехника, 1993. – 391 с.
17. Глюкман, Л. И. Пьезоэлектрические кварцевые резонаторы / Л. И. Глюкман. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Радио и связь, 1981. – 232 с.
18. Блистанов, А. А. Акустические кристаллы / А. А. Блистанов, В. С. Бондаренко, В. В. Чкалова. – М. : Наука, 1982. – 632 с.
19. Корицкий, Ю. В. Справочник по электротехническим материалам / Ю. В. Корицкий, В. В. Пасынков, Б. М. Тареев. – Л. : Энергоатомиздат, 1988. – Т. 3. – 728 с.
20. Lackner, T. Determination of axisymmetric elastic constants in anisotropic silicon for a thyristor tablet / T. Lackner // *Journal of electronic materials*. – 1989. – Vol. 18. – P. 19–24.
21. Новацкий, В. Динамические задачи теории термоупругости / В. Новацкий. – М. : Мир, 1970. – 256 с.
22. Смагин, А. Г. Пьезоэлектричество кварца и кварцевые резонаторы / А. Г. Смагин, М. И. Ярославский. – М. : Энергия, 1970. – 488 с.
23. Установка для лазерной резки хрупкого неметаллического материала : пат. 9035 ВУ МПК С 03В 33/00 / Ю. В. Никитюк; Патентообладатель: УО «Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины» (ВУ). – Оpubл. 17.07.2013.
24. Kestler, W. О подборе кварцевых резонаторов / W. Kestler, W. Jung, J. Bryant // *Основы схемотехники*. – 2001. – № 5. – P. 19–23.
25. Арбузов, В. И. Основы радиационного оптического материаловедения / В. И. Арбузов. – СПб. : СПб ГУ ИТМО, 2008. – 284 с.
26. Мачулка, Г. А. Лазерная обработка стекла / Г. А. Мачулка. – М. : Сов. радио, 1979. – 136 с.
27. Шалупаев, С. В. Лазерное термораскалывание хрупких неметаллических материалов по замкнутым криволинейным контурам / С. В. Шалупаев, Ю. В. Никитюк, А. А. Серeda // *Оптический журнал*. – 2008. – Т. 75, № 2. – С. 11–15.
28. Junke, J. Cutting glass substrates with dual-laser beams / J. Junke, W. Xinbing // *Optics and Lasers in Engineering*. – 2009. – Vol. 47. – P. 860–864.
29. Effect of thermal stress on chip-free diode laser cutting of glass / N. Salman [et al.] // *Optics and Laser Technology*. – 2009. – Vol. 41. – P. 318–327.
30. 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.
31. Концепция двухлазерного термораскалывания стеклянных элементов для космических аппаратов / В. К. Сысоев [и др.] // *Вестн. «ФГУП НПО им. С. А. Лавочкина»*. – 2011. – № 1. – С. 38–44.
32. Особенности управляемого лазерного термораскалывания кристаллического кварца / А. Н. Сердюков [и др.] // *Кристаллография*. – 2012. – Т. 57, № 6. – С. 906–912.
33. Шалупаев, С. В. Термоупругие поля, формируемые в твердых телах световыми и звуковыми потоками : дис. ... канд. физ.-матем. наук : 01.04.05 / С. В. Шалупаев. – Минск, 1987. – 157 с.
34. 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.
35. Морозов, Е. М. ANSYS в руках инженера: механика разрушения / Е. М. Морозов, А. Ю. Музейменек, А. С. Шадский. – М. : ЛЕНАНД, 2008. – 456 с.
36. Партон, В. З. Механика разрушения: от теории к практике / В. З. Партон. – М. : Наука, 1990. – 240 с.
37. 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.
38. 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.

39. Богуславский, И. А. Высокопрочные закаленные стекла / И. А. Богуславский. – М. : Изд-во литературы по строительству, 1969. – 208 с.
40. Григорьянц, А. Г. Гибридные технологии лазерной сварки : учеб. пособие / А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов, А. М. Чирков. – М. : изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. – 52 с.
41. Установка для двулучевой лазерной сварки кварцевого стекла : пат. ВУ 9962 МПК С 03В 33/02 / Е. Б. Шершнев, Ю. В. Никитюк, С. И. Соколов. – Оpubл. 25.07.2014.
42. Глаголев, С. П. Кварцевое стекло. Его свойства, производство и применение / С. П. Глаголев. – М. : ОНТИ, 1934. – 214 с.
43. Павлов, В. П. Стеклоплавильная аппаратура для производства чистых веществ / В. П. Павлов, М. П. Макевнин. – М. : Машиностроение, 1972. – 332 с.
44. Установка для обогащения жильного кварца : пат. 5147 ВУ МПК(2006) С 03В 33/00 / Е. Б. Шершнев С. И. Соколов, А. С. Побияха; Оpubл. 30.07.2009.
45. Распределение температурных полей при двулучевой сварке аморфного кварца / Е. Б. Шершнев Ю. В. [и др.] // Изв. Гомельского гос. ун-та им. Ф. Скорины. – 2012. – 6 (75). – С. 105–109.
46. Особенности лазерного термораскалывания кварцевого стекла / Е. Б. Шершнев [и др.] // Проблемы физики, математики и техники. – 2013. – 3 (16). – С. 39–44.
47. Моделирование двулучевой лазерной сепарации кварцевого сырья / Е. Б. Шершнев [и др.] // Изв. Гомельского гос. ун-та им. Ф. Скорины. – 2013. – 6 (81). – С. 216–220.
48. Установка для обогащения жильного кварца : пат. 9675 ВУ Респ. Беларусь, МПК(2006) С 03В 1/00 / Е. Б. Шершнев, Ю. В. Никитюк, С. И. Соколов. – Оpubл. 30.10.2013.
49. Установка для двулучевой лазерной сварки кварцевого стекла : пат. 9962 ВУ, МПК(2006) С 03В 33/02 / Е. Б. Шершнев, Ю. В. Никитюк; С. И. Соколов. – Оpubл. 28.02.2014.
50. Сысоев, В. К. Многопрофильная лазерная технология обработки кварцевого стекла [Электронный ресурс] / В. К. Сысоев // Электронный научный журнал «Исследовано в России». – Режим доступа: <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2003/053.pdf>. – Дата доступа: 25.01.2009.
51. Sysoev, V. K. Laser etching and polishing of quartz tubes / V. K. Sysoev // Glass and Ceramics. – 2003. – Vol. 60. – P. 106–107.
52. Laser Beam Polishing of Quartz Glass Surfaces / J. Hildebrand K. [et al.] // Physics Procedia. – 2011. – № 12. – P. 452–461.
53. Бурьян, Ю. И. Современные требования к производству и потреблению кварцевого сырья / Ю. И. Бурьян // Разведка и охрана недр. – 1999. – № 3. – С. 4–5.
54. Книпович, Ю. Н. Анализ минерального сырья / Ю. Н. Книпович. – 3-е изд., стер., испр. – Л. : ГХИ, 1955. – 1055 с.