

УДК 621.373.826

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЛАЗЕРНОЙ ПОЛИРОВКИ КВАРЦЕВОГО СТЕКЛА

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

Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины

## STUDY OF LASER BEAM POLISHING OF QUARTZ GLASS

E.B. Shershnev, Y.V. Nikitjuk, S.I. Sokolov, A.E. Shershnev

F. Scorina Gomel State University

Представлены результаты исследования процесса лазерной полировки кварцевого стекла, полученные с использованием конечно-элементного моделирования. Также представлены результаты экспериментов по лазерной полировке кварцевого стекла с использованием CO<sub>2</sub>-лазера.

**Ключевые слова:** лазер, кварцевое стекло, полировка, моделирование.

This paper presents the results of a study of the laser polishing quartz glass obtained by using finite element modeling. In addition, the results of experiments on the laser polishing quartz glass by using CO<sub>2</sub>-laser.

**Keywords:** laser, quartz glass, polishing, simulation.

**Введение**

Кварцевое стекло обладает высокой термостойкостью и высокой механической прочностью, устойчиво к действию кислот и воды. Благодаря этим свойствам кварцевое стекло применяется в качестве материала для изготовления окон фотоприемников и колб газоразрядных ламп, из него производятся линзы для передачи ультрафиолетового излучения и призмы для монохроматоров и спектрофотометров [1].

Применение излучения CO<sub>2</sub>-лазера в качестве технологического инструмента для обработки кварцевого стекла эффективно при лазерной резке и сварке, лазерной очистке кварцевого сырья и вытяжке волоконных световодов [2]–[11].

Так же известны примеры реализации лазерной полировки кварцевых стекол с использованием излучения CO<sub>2</sub>-лазера [11]–[14]. В работах [13], [14] отмечена высокая скорость лазерной полировки, а так же возможность обработки поверхностей различной формы. В работе [11] 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 [13], [14] и обуславливающих необходимость проведения исследований лазерной полировки кварцевого стекла с использованием излучения CO<sub>2</sub>-лазера.

**1 Моделирование**

Моделирование процесса лазерного нагрева кварцевого стекла было выполнено методом конечных элементов [15] в соответствии со схемой,

представленной на рисунке 1.1. Цифрой 1 отмечен лазерный пучок, цифрой 2 – кварцевое стекло. На рисунке прямыми линиями со стрелками указаны направления перемещения лазерного пучка относительно обрабатываемого изделия.

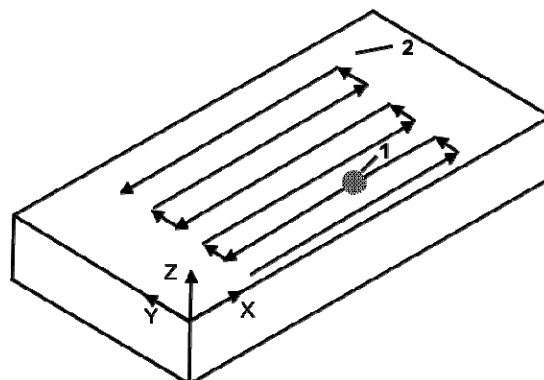


Рисунок 1.1 – Схема перемещения лазерного пучка в зоне обработки:  
1 – пятно лазерного пучка;  
2 – кварцевая пластина

Моделирование выполнялось с учетом зависимости теплофизических свойств кварцевого стекла от температуры (рисунок 1.2) [13].

Расчеты были выполнены для образца, имеющего форму прямоугольного параллелепипеда с геометрическими размерами 20×10×3 мм, с использованием следующих значений технологических параметров обработки: плотность мощности лазерного излучения  $P_0 = 22 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>, радиус поперечного сечения лазерного пучка  $R = 1,5$  мм. Модуль скорости относительного перемещения лазерного пучка и образца  $V = 2,5$  мм/с.

На рисунке 1.3 представлено разбиение кварцевой пластины на конечные элементы.

Символами Т1–Т9 отмечено расположение контрольных точек.

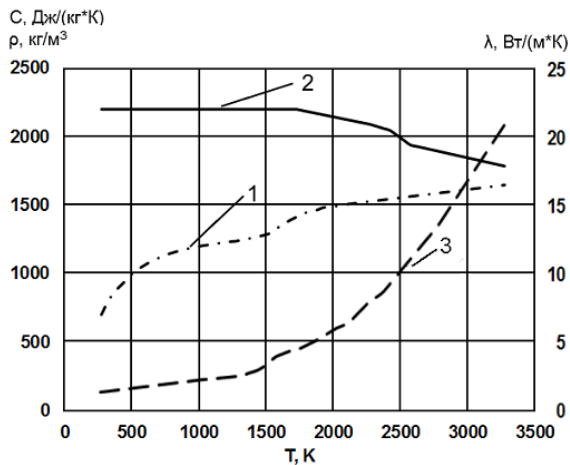


Рисунок 1.2 – Зависимость теплофизических свойств кварцевого стекла от температуры:  
 1 – теплоемкость  $C$ , Дж/(кг·К);  
 2 – плотность  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup>;  
 3 – теплопроводность  $\lambda$ , Вт/(м·К)  
 (графики 1 и 2 относятся к левой шкале ординат, график 3 к правой оси ординат)

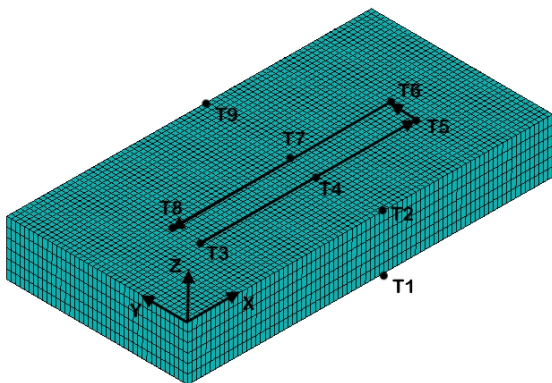


Рисунок 1.3 – Конечно-элементное разбиение расчетной области

Результаты проведенных расчетов приведены на рисунках 1.4, 1.5. На рисунке 1.4 представлены расчетные зависимости температуры в контрольных точках от времени.

Анализируя данные, приведенные на рисунке 1.4 а), видим, что температура в контрольных точках Т3–Т5 в результате многократного лазерного нагрева кварцевой пластинки по схеме, приведенной на рисунке 1.1, периодически резко повышается. При этом вначале в контрольных точках наблюдается плавное 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 изменяются и сопровождаются ростом максимальных значений, обусловленных прогревом

лазерным излучением обрабатываемой пластины (рисунок 1.4, б). 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 [5].

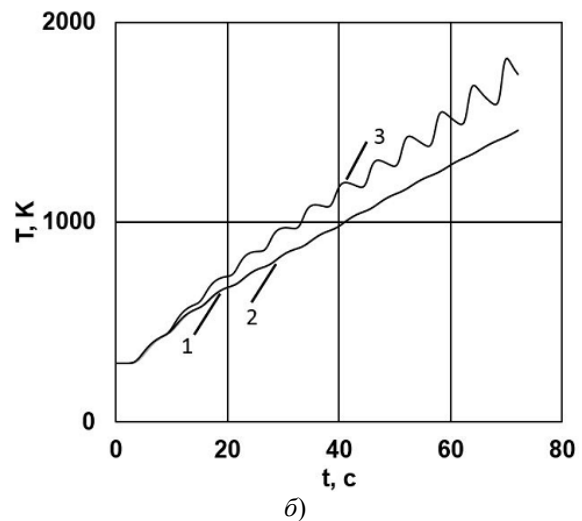
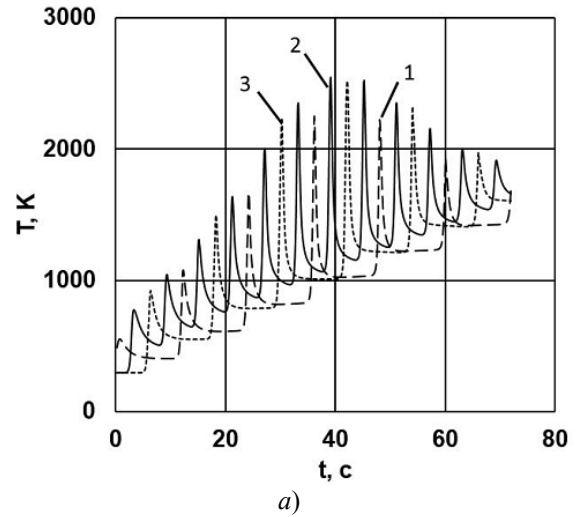


Рисунок 1.4 – Расчетные значения температуры  
 а) в контрольных точках Т3 (линия 1), Т4 (линия 2), Т5 (линия 3);  
 б) в контрольных точках Т1 (линия 1), Т2 (линия 2), Т9 (линия 3)

На рисунке 1.5 показаны расчетные распределения температурных полей на поверхности кварцевой пластины в моменты времени, соответствующие прохождению центра лазерного пучка через контрольные точки Т3–Т8.

Как видно из данных, представленных на рисунке 1.5, локализация изотерм, соответствующих температуре размягчения, имеет круглую форму и практически не изменяется с течением времени.

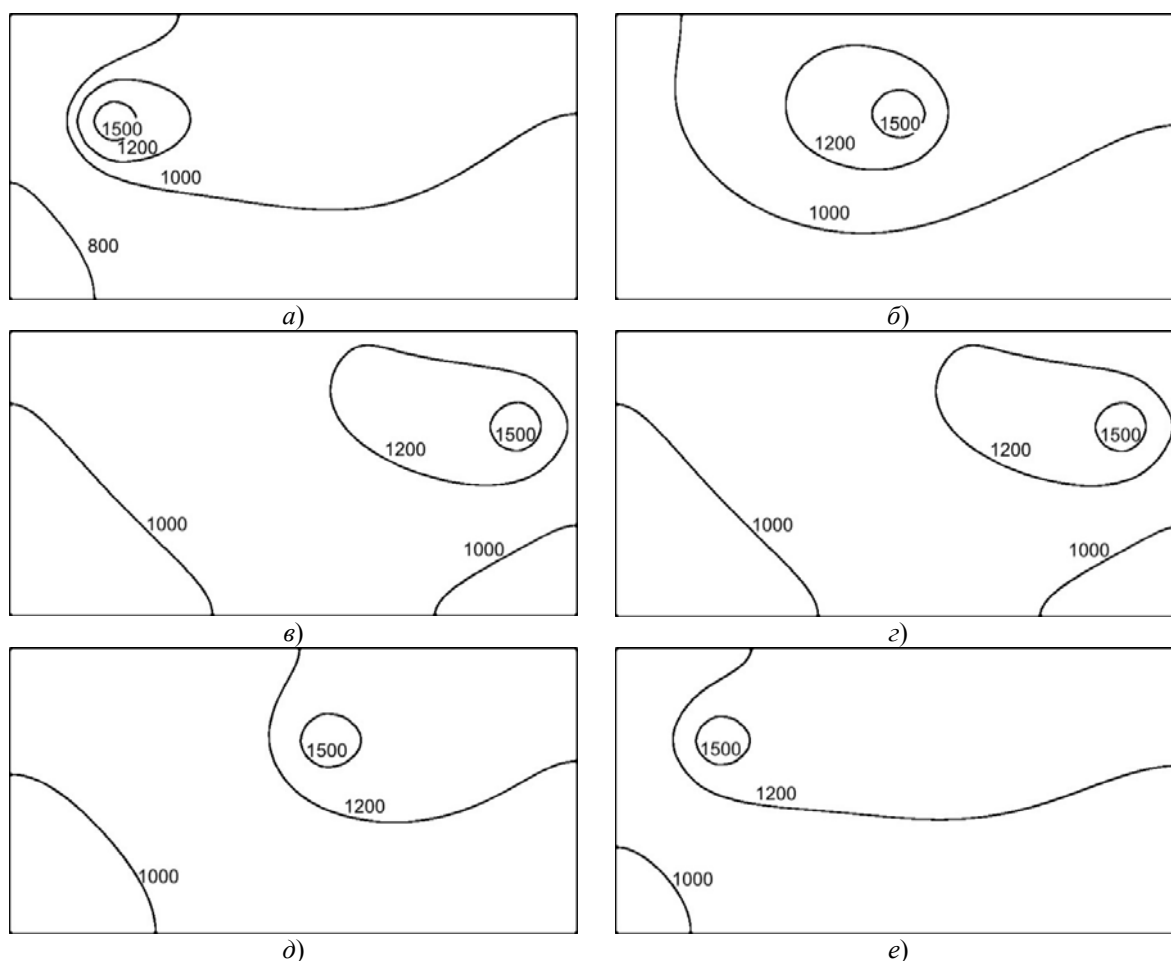


Рисунок 1.5 – Расчетное распределение температуры на поверхности кварцевого стекла:  
 а)  $t = 36$  с; б)  $t = 39$  с; в)  $t = 42$  с; г)  $t = 42,1$  с; д)  $t = 45$  с; е)  $t = 48$  с

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.

## 2 Эксперимент

Экспериментальные исследования процесса лазерной полировки кварцевых стекол были выполнены на установке для лазерной обработки материалов. На рисунке 2.1 представлена схема установки.

В качестве образцов использовались кварцевые пластины различного типоразмера. Полировка осуществлялась лазерным пучком, который сканировал поверхность пластины по схеме, представленной на рисунке 1.1. Скорость обработки варьировалась от 1,25 мм/с 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 рисунках 2.2–2.3 и в таблице 2.1.

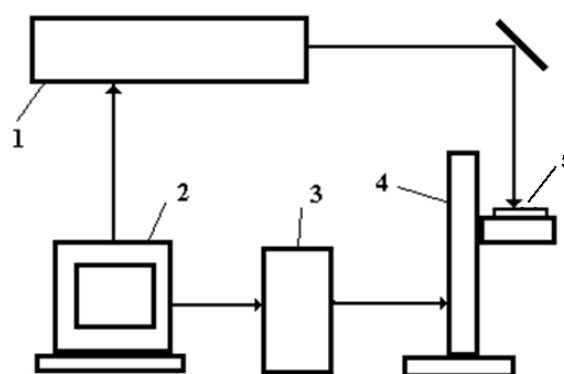


Рисунок 2.1 – Схема лазерной установки:  
 1 – CO<sub>2</sub>-лазер, 2 – компьютер,  
 3 – блок управления, 4 – координатный стол,  
 5 – кварцевая пластина

Как видно из данных, приведенных в таблице 2.1 и на рисунке 2.2, в результате лазерной полировки поверхности кварцевого стекла параметр  $R_a$  уменьшался в 5–8 раз, а параметр  $R_z$  – в 8–12 раз.

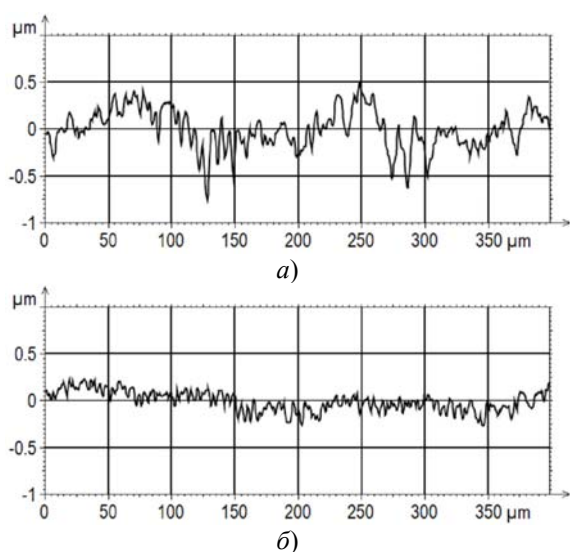


Рисунок 2.2 – Профилограмма пластинки из кварцевого стекла  
а) до лазерной полировки;  
б) после лазерной полировки

Таблица 2.1 – Результаты эксперимента по полировке кварцевого стекла

$V_p$ , мм/с	До полировки		После полировки	
	$R_z$ , мкм	$R_{a2}$ , мкм	$R_z$ , мкм	$R_{a2}$ , 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

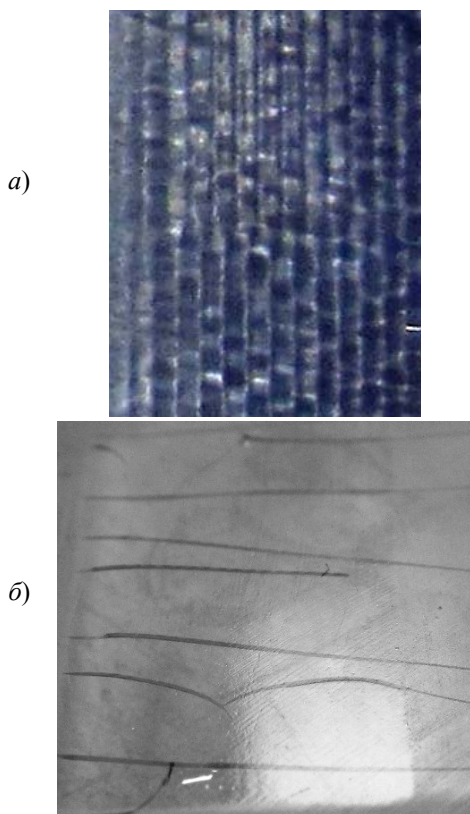


Рисунок 2.3 – Дефекты, возникающие при полировке кварцевого стекла:  
а) появление борозд; б) появление трещин

В ходе проведения экспериментальных исследований было установлено, что при параметрах обработки, приводящих к перегреву кварцевой пластины, наблюдается формирование борозд на обрабатываемой поверхности (рисунок 2.3, а). Кроме этого, в ряде случаев происходит растрескивание образцов (рисунок 2.3, б), обусловленное наличием остаточных напряжений.

### Выводы

В работе определены особенности пространственной локализации температурных полей при полировке кварцевого стекла излучением  $CO_2$ -лазера. Установлена необходимость проведения дополнительного моделирования процесса лазерной полировки кварцевого стекла с анализом полей термоупругих напряжений.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Арбузов, В.И. Основы радиационного оптического материаловедения / В.И. Арбузов. – СПб: СПб ГУ ИТМО, 2008. – 284 с.
2. Мачулка, Г.А. Лазерная обработка стекла / Г.А. Мачулка. – М.: Сов. радио, 1979. – 136 с.
3. Шершнев, Е.Б. Разработка и внедрение новых эффективных процессов в производстве стеклоизделий с применением лазерной технологии: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.11 / Е.Б. Шершнев. – М., 1990. – 145 с.
4. Установка для обогащения жильного кварца: пат. 5147 Респ. Беларусь, МПК (2006) С 03В 33/00 / Е.Б. Шершнев, С.И. Соколов, А.С. Побыха; заявитель Гомель. гос. ун-т. им. Ф.Скорины – № и 20080615; заявл. 30.07.08; опубл. 30.06.04 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтра інтэлектуал. уласнасці. – 2008. – № 5. – С. 88.
5. Борисовский, В.Е. Развитие теории и разработка комплекса технологий и оборудования для лазерной обработки кварцевого стекла: дис. докт. техн. наук: 05.11.14 / В.Е. Борисовский; МГУПИ. – М., 2011. – 182 с.
6. Шершнев, Е.Б. Распределение температурных полей при двулучевой сварке аморфного кварца / Е.Б. Шершнев, Ю.В. Никитюк, С.И. Соколов, А.Е. Шершнев // Известия Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины. – 2012. – № 6 (75). – С. 105–109.
7. Шершнев, Е.Б. Особенности лазерного термораскалывания кварцевого стекла / Е.Б. Шершнев, Ю.В. Никитюк, С.И. Соколов, А.Е. Шершнев // Проблемы физики, математики и техники. – 2013. – № 3 (16). – С. 39–44.
8. Шершнев, Е.Б. Моделирование двулучевой лазерной сепарации кварцевого сырья / Е.Б. Шершнев, Ю.В. Никитюк, С.И. Соколов, Г.А. Баевич // Известия Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины. – 2013. – № 6 (81). – С. 216–220.
9. Установка для обогащения жильного кварца: пат. 9675 Респ. Беларусь, МПК (2006)

С 03В 1/00 / Е.Б. Шершневу, Ю.В. Никитюку, С.И. Соколову; заявитель Гомель. гос. ун-т. им. Ф. Скорины – № и 20130334; заявл. 15.04.13; опубл. 30.10.13 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтра інтэлектуал. уласнасці. – 2013. – № 5. – С. 196.

10. Установа для двулучевой лазерной сварки кварцевого стекла: пат. 9962 Респ. Беларусь, МПК (2006) С 03В 33/02 Е.Б. Шершневу, Ю.В. Никитюку, С.И. Соколову; заявитель Гомель. гос. ун-т. им. Ф. Скорины – № и 20130623; заявл. 25.07.13; опубл. 28.02.14 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтра інтэлектуал. уласнасці. – 2014. – № 1. – С. 171.

11. Многопрофильная лазерная технология обработки кварцевого стекла / В.К. Сысоев // Электронный научный журнал «Исследовано в России» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2003/053.pdf>. – Дата доступа: 25.01.2009.

12. Sysoev, V.K. Laser etching and polishing of quartz tubes / V.K. Sysoev // Glass and Ceramics. – 2003. – Vol. 60. – P. 106–107.

13. Hildebrand, J. Laser Beam Polishing of Quartz Glass Surfaces / J. Hildebrand, K. Hecht, J. Bliedtner, H. Müller // Physics Procedia. – 2011. – № 12. – P. 452–461.

14. Hildebrand, J. Advanced analysis of laser beam polishing of quartz glass surfaces / J. Hildebrand, K. Hecht, J. Bliedtner, H. Müller // Physics Procedia. – 2012. – № 39. – P. 277–285.

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

Поступила в редакцию 11.09.15.