

ОПТИМИЗАЦИЯ ЛАЗЕРНОЙ ПОЛИРОВКИ КВАРЦЕВОГО СТЕКЛА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ПЛАНИРОВАНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В.А. Емельянов¹, Е.Б. Шершнев², Ю.В. Никитюк², С.И. Соколов², И.Ю. Аушев³

¹ОАО «Интеграл», Минск

²Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины

³Университет гражданской защиты МЧС Республики Беларусь, Минск

OPTIMIZATION OF LASER POLISHING OF QUARTZ GLASS USING THE METHOD OF PLANNING COMPUTATIONAL EXPERIMENTS

V.A. Emelyanov¹, E.B. Shershnev², Y.V. Nikitjuk², S.I. Sokolov², I.Y. Aushev³

¹JSC "INTEGRAL", Minsk

²Francisk Skorina Gomel State University

³University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus, Minsk

Аннотация. В данной работе с использованием метода полного факторного эксперимента и метода перебора параметров выполнена оптимизация процесса лазерной полировки кварцевого стекла. В результате конечно-элементного моделирования определены режимы лазерной полировки кварцевого стекла с использованием CO₂-лазера, обеспечивающие заданные значения температуры в зоне обработки при минимальных значениях термоупругих напряжений в кварцевых пластинах.

Ключевые слова: лазерная полировка, кварцевая пластина, ANSYS.

Для цитирования: Оптимизация лазерной полировки кварцевого стекла с использованием метода планирования вычислительных экспериментов / В.А. Емельянов, Е.Б. Шершнев, Ю.В. Никитюк, С.И. Соколов, И.Ю. Аушев // Проблемы физики, математики и техники. – 2022. – № 2 (51). – С. 26–30. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2022_2_51_26 – EDN: NRYSQT

Abstract. In this work, using the method of full factorial experiment and the method of enumeration of parameters, the process of laser polishing of quartz glass is optimized. As a result of finite element modeling, the modes of laser polishing of quartz glass using a CO₂ laser were determined. These modes provide the specified temperatures in the treatment zone at the minimum values of thermoelastic stresses in quartz plates.

Keywords: laser polishing, quartz plate, ANSYS.

For citation: Optimization of laser polishing of quartz glass using the method of planning computational experiments / V.A. Emelyanov, E.B. Shershnev, Y.V. Nikitjuk, S.I. Sokolov, I.Y. Aushev // Problems of Physics, Mathematics and Technics. – 2022. – № 2 (51). – P. 26–30. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2022_2_51_26 (in Russian). – EDN: NRYSQT

Введение

Для кварцевого стекла характерны высокая прочность и термостойкость, устойчивость к воздействию кислот и воды. Уникальные свойства этого материала обеспечивают его широкое применение в различных областях техники [1]. Одним из перспективных методов обработки кварцевого стекла является лазерная полировка [2]–[6]. Авторами ранее было выполнено конечно-элементное моделирование лазерной полировки кварцевого стекла и проведены экспериментальные исследования с помощью полного факторного эксперимента первого порядка с формированием соответствующей регрессионной модели процесса лазерной обработки материала [7]–[9].

В настоящее время интенсивно развивается новое направление математического моделирования – метамоделирование, при реализации которого математические модели для сложных систем строятся по результатам вычислительных экспериментов. Такие модели называются метамоделами (модели над моделями), при этом метамоделами имеют значительную более высокую вычислительную эффективность по сравнению с исходными моделями. Основной целью создания метамоделей является определение приближенных значений выходных параметров на основе входных параметров без проведения полных расчетов. Достижение данной цели обеспечивается применением метода планирования вычислительных конечно-элементных экспериментов при создании соответствующих регрессионных выражений [10]–[12].

В данной работе с использованием метаоптимизации выполнено планирование параметров лазерной полировки кварцевого стекла.

1 Конечно-элементный анализ

Расчет температурных полей и полей термоупругих напряжений был выполнен в программе конечно-элементного анализа ANSYS. Моделирование осуществлялось в рамках несвязанной задачи термоупругости в квазистатической постановке с использованием расчётной программы на языке программирования APDL (ANSYS parametric design language) [13]–[17].

Для моделирования использовалась пластина с геометрическими размерами $20 \times 10 \times 3$ мм. Для расчетов была создана конечно-элементная модель, состоящая из 19200 элементов и 23247 узлов. При реализации теплового анализа применялись элементы Solid 70, для прочностного анализа применялись элементы Solid 185. Моделирование выполнялось с учетом зависимости теплофизических свойств кварцевого стекла от температуры [4], [6]. Параметры, использованные при моделировании лазерной полировки кварцевого стекла с использованием CO_2 -лазера, представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Параметры лазерной полировки кварцевых стекол

Параметры	Значения
Плотность мощности лазерного излучения P_0 , Вт/м ²	22
Скорость обработки V , мм/с	2,5
Радиус лазерного пучка R , мм	1,5
Шаг сканирования, мм	0,25

Полученные при моделировании распределения температурных полей и полей термоупругих напряжений представлены на рисунках 1.1–1.2.

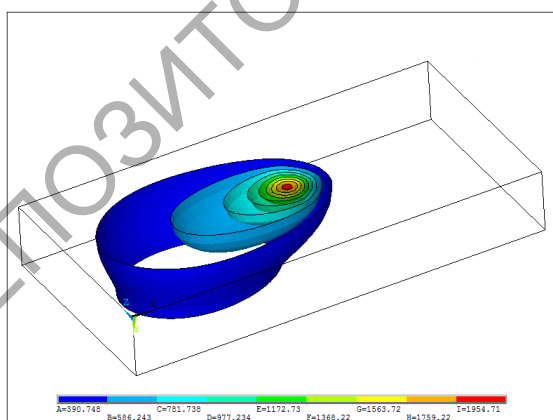


Рисунок 1.1 – Распределение температуры в объеме обрабатываемой кварцевой пластины, К

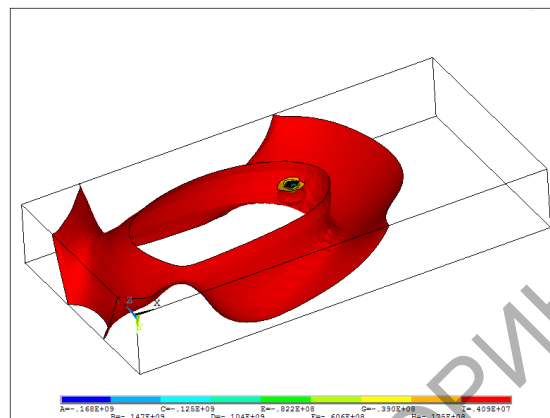


Рисунок 1.2 – Распределение напряжений σ_1 в объеме обрабатываемой кварцевой пластины, Па

Проведена верификация конечно-элементной модели на основании экспериментальных данных, полученных с использованием CO_2 -лазера и тепловизора ИТ-3СМ. На рисунке 1.3 представлено распределение температурного поля в образце при воздействии круглого лазерного пучка, определенное при помощи тепловизора ИТ-3СМ. Относительная ошибка при определении максимальных температур на поверхности кварцевой пластины не превысила 5%, что позволяет сделать вывод о необходимом соответствии результатов конечно-элементного моделирования экспериментальным данным.

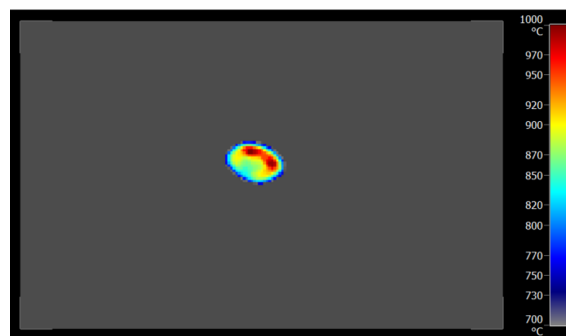


Рисунок 1.3 – Распределение температурного поля при обработке кварцевой пластины, определенное экспериментально, °С

2 Методика численного эксперимента

При реализации численного эксперимента была использована методика полного факторного эксперимента первого порядка с двухуровневым варьированием факторов. Сформирован план для трех факторов: скорость обработки V , шаг сканирования h , радиус лазерного пучка R . При этом определялись следующие выходные параметры: максимальная температура T и максимальные напряжения σ_1 в зоне лазерной обработки. Таким образом, моделью объекта исследования являлись функции отклика (T) и (σ_1),

связывающие выходные параметры с факторами (V, h, R).

После преобразования независимых переменных в натуральном масштабе к безразмерным переменным с кодируемыми значениями: $-1, +1$ сформирована таблица 2.1.

Таблица 2.1 – Значения независимых переменных в кодированном виде

Независимые переменные	Безразмерные переменные	-1	+1
Скорость обработки, мм/с	X1	2	4
Шаг сканирования, мм	X2	0,25	0,5
Радиус лазерного пучка, мм	X3	1	2

В таблице 2.2 представлены результаты численного эксперимента по моделированию лазерной полировки кварцевого стекла.

Таблица 2.2 – Результаты численного эксперимента

Номер комбинации факторов	Факторы			T, К	σ_1 , МПа
	X1	X2	X3		
1	-1	-1	-1	1813	7,0
2	+1	-1	-1	1724	7,9
3	-1	+1	-1	1813	7,0
4	+1	+1	-1	1724	7,9
5	-1	-1	+1	4149	73,1
6	+1	-1	+1	3585	151,0
7	-1	+1	+1	4149	73,1
8	+1	+1	+1	3585	151,0

По данным, представленным в таблице 2.2, были построены регрессионные модели, определяющие зависимости T и σ_1 от параметров обработки, при этом шаг сканирования оказался

параметром не существенно влияющим на выходные параметры для выбранных диапазонов изменения технологических параметров лазерной обработки.

Полученные уравнения регрессии имеют следующий вид:

$$T = 2098,5 \cdot R - 163,25 \cdot V - (R - 1,5) \cdot (237,5 \cdot V - 712,5) + 159,75,$$

$$\sigma_1 = 104615000 \cdot R + 19697500 \cdot V + (R - 1,5) \cdot (38505000 \cdot V - 115515000) + 156272500.$$

На рисунках 2.1, 2.2 представлены зависимости максимальной температуры T и максимальных напряжений σ_1 от параметров обработки.

Оценка полученных регрессионных моделей была выполнена с использованием следующих критериев:

– средняя абсолютная ошибка (англ. Mean Absolute Error, MAE)

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |d_i - y_i|,$$

– средняя квадратичная ошибка (англ. Root Mean Square Error, $RMSE$)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (d_i - y_i)^2},$$

– средняя абсолютная процентная ошибка (англ. Mean Absolute Percentage Error, $MAPE$)

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{d_i - y_i}{d_i} \right| \cdot 100,$$

где d_i – значения, определенные методом конечных элементов, y_i – значения, определенные с использованием регрессионных моделей.

Значения критериев, используемых для оценки регрессионных моделей, представлены в таблице 2.3.

Полученные данные позволяют сделать вывод о наличии необходимого соответствия регрессионной модели результатам конечно-элементного анализа.

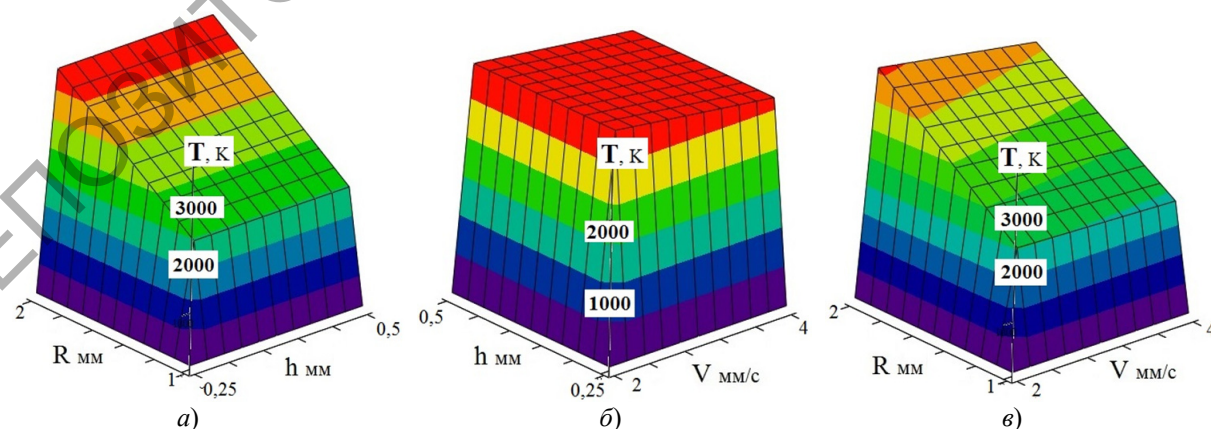


Рисунок 2.1 – Зависимость максимальной температуры T от параметров обработки
а) $V = \text{const}$; б) $R = \text{const}$; в) $h = \text{const}$

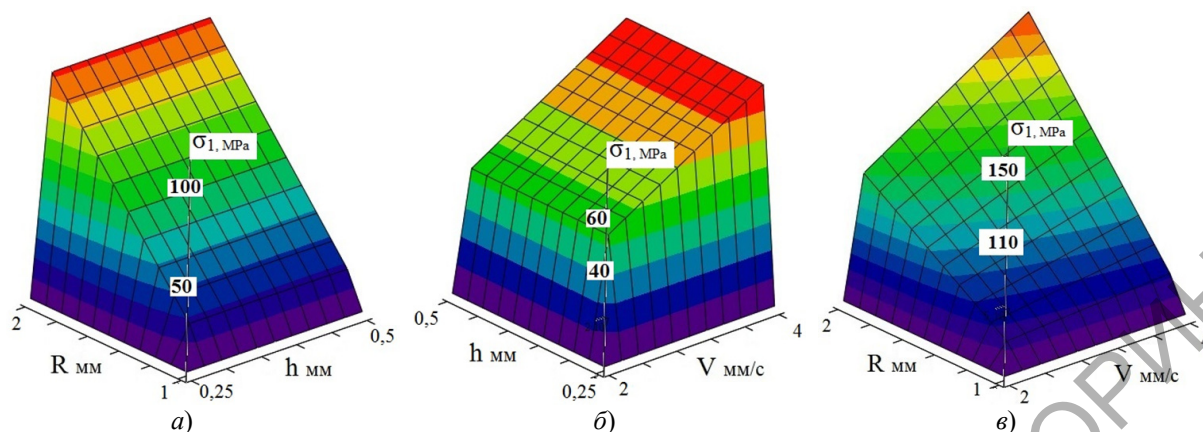


Рисунок 2.2 – Зависимость максимальных напряжений σ_1 от параметров обработки
 а) $V = \text{const}$; б) $R = \text{const}$; в) $h = \text{const}$

Таблица 2.3 – Результаты оценки регрессионных моделей

Критерий	Тестовый набор	
	T	σ_1
RMSE	3	140
MAE	3	136
MAPE	6	5

3 Определение оптимальных параметров процесса лазерной полировки кварцевого стекла

Оптимизация параметров лазерной полировки кварцевого стекла осуществлялась с использованием метода перебора. Этот метод в случае решения экстремальных задач является вариантом прямого метода оптимизации [18]. При этом диапазон значений температуры T , необходимой для эффективной полировки, был принят равным 2000–2005 К. Далее были рассчитаны температуры в зоне обработки по приведенной выше формуле. Скорость варьировалась в пределах 1–20 мм/с с шагом 1 мм/с, а радиус лазерного пучка изменялся в пределах 0,1–2 мм с шагом 0,1 мм. После определения параметров, обеспечивающих формирование заданной температуры в зоне лазерной обработки, были рассчитаны напряжения σ_1 (таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Расчетные параметры лазерной полировки кварцевого стекла

№	V , мм	R , мм	T , К	σ_1 , МПа
1	5	1,2	2004	45
2	8	1,5	2001	160
3	17	0,3	2004	400

Как видно из таблицы 3.1, формирование температур в заданном диапазоне осуществляется при выборе трех наборов скоростей и радиусов лазерного пучка, при этом в третьем наборе

формируются критически большие напряжения в зоне обработки.

Заключение

В работе с использованием методики полного факторного эксперимента первого порядка с двухуровневым варьированием факторов получена регрессионная модель лазерной полировки кварцевых пластин. Установлено наличие необходимого соответствия регрессионной модели результатам конечно-элементного моделирования. Выполнена верификация конечно-элементной модели на основании экспериментальных данных, полученных с использованием CO_2 -лазера и тепловизора ИТ-3СМ. В результате численного эксперимента установлены оптимальные параметры лазерной полировки кварцевых пластин, обеспечивающие минимальные значения термоупругих напряжений при заданных значениях температуры. Предложенная методика применяется для определения технологических параметров, использование которых на практике обеспечит эффективную реализацию процесса лазерной полировки кварцевых стекол.

ЛИТЕРАТУРА

- Арбузов, В.И. Основы радиационного оптического материаловедения / В.И. Арбузов. – СПб: СПб ГУ ИТМО, 2008. – 284 с.
- Top-hat and Gaussian laser beam smoothing of ground fused silica surface / D. Wang, F. Fan, M. Liu, T. Tan, H. Li, Y. Li, // Optics & Laser Technology. – 2020. – № 127. – Article 106141.
- Sysoev, V.K. Laser etching and polishing of quartz tubes / V.K. Sysoev // Glass and Ceramics. – 2003. – Vol. 60. – P. 106–107.
- Laser Beam Polishing of Quartz Glass Surfaces / J. Hildebrand [et al.] // Physics Procedia. – 2011. – Vol. 12. – P. 452–461.
- Advanced analysis of laser beam polishing of quartz glass surfaces / J. Hildebrand [et al.] // Physics Procedia. – 2012. – Vol. 39. – P. 277–285.

6. *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. – Москва, 2011. – 182 с.

7. *Исследование процесса лазерной полировки кварцевого стекла* / Е.Б. Шершнев, Ю.В. Никитюк, А.Е. Шершнев, С.И. Соколов // Проблемы физики, математики и техники. – 2015. – № 4 (25). – С. 45–49.

8. *Исследование лазерного макро- и микроформообразования хрупких неметаллических материалов методом полного факторного эксперимента* / Е.Б. Шершнев, Ю.В. Никитюк, А.Е. Шершнев, С.И. Соколов // Проблемы физики, математики и техники. – 2017. – № 4 (33). – С. 30–32.

9. *Инновационные технологии и оборудование субмикронной электроники* / А.П. Достанко [и др.]; под ред. акад. НАН Беларуси А.П. Достанко. – Минск: Беларуская навука, 2020. – 260 с.

10. *Сокращение размерности данных в задачах имитационного моделирования* / Ю.Г. Агалаков, А.В. Бернштейн // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2012. – № 3. – С. 3–17.

11. *Планирование и анализ результатов эксперимента: учеб. пособие* / А.П. Моргунов, И.В. Ревина; Минобрнауки России, ОмГТУ. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2014. – 343 с.

12. *Адлер, Ю.П.* Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – Москва: Наука, 1976. – 278 с.

13. *Официальный сайт компании ANSYS.* – Режим доступа: <https://www.ansys.com>. – Дата доступа: 04.05.2022.

14. *Каплун, А.Б.* ANSYS в руках инженера: практическое руководство / А.Б. Каплун, Е.М. Морозов, М.А. Олферьева. – Москва: Едиториал УРСС, 2003. – 272 с.

15. *Чигарев, А.В.* ANSYS для инженеров: справочное пособие / А.В. Чигарев, А.С. Кравчук, А.Ф. Смалюк. – Москва: Машиностроение, 2004. – 512 с.

16. *Введение в ANSYS: прочностной и тепловой анализ: учебное пособие* / А.С. Шалумов [и др.]. – Ковров: КГТА, 2002. – 52 с.

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

18. *Gill, F.* Practical optimization / F. Gill, W. Murray, M. Wright. – M.: Mir, 1985. – 383 p.

Поступила в редакцию 04.05.2022.

Информация об авторах

Емельянов Виктор Андреевич – д.т.н., профессор
Шершнев Евгений Борисович – к.т.н., доцент
Никитюк Юрий Валерьевич – к.ф.-м.н., доцент
Соколов Сергей Иванович – ст. преподаватель
Аушев Игорь Юрьевич – к.т.н., доцент