

В. А. Емельянов, Е. Б. Шершнев, Ю. В. Никитюк, С. И. Соколов
УО «Гомельский государственный университет
имени Франциска Скорины», Гомель, Беларусь

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛАЗЕРНОЙ ПОЛИРОВКИ КВАРЦЕВОГО СТЕКЛА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ПЛАНИРОВАНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Введение

Уникальные свойства кварцевого стекла обеспечивают его широкое применение в различных областях техники [1]. При этом лазерная полировка является перспективным методом обработки кварцевого стекла [2–5]. Авторами статьи ранее были проведены исследования процесса лазерной полировки кварцевого стекла с использованием конечно-элементного моделирования и экспериментальные исследования с помощью полного факторного эксперимента первого порядка с составлением соответствующей регрессионной модели процесса лазерной обработки материала [6–8].

В данной работе выполнено конечно-элементное моделирование лазерной полировки кварцевого стекла с использованием метода планирования вычислительных экспериментов. Такой подход обеспечивает значительное сокращение объема необходимых для успешного решения задачи вычислений [9–12].

1. Методика численного эксперимента

При численном моделировании была использована методика полного факторного эксперимента первого порядка с двухуровневым варьированием факторов (скорость обработки V , шаг сканирования h , радиус лазерного пучка R) с выходным параметром (максимальная температура в зоне лазерной обработки T). Статистической моделью объекта исследования являлась функция отклика (T), связывающая выходной параметр с факторами (V, h, R), которые менялись в заданных пределах при проведении численных экспериментов [7]. После преобразования независимых переменных в натуральном масштабе к безразмерным переменным с кодируемыми значениями: $-1, +1$ была сформирована таблица 1.

После преобразования была построена матрица планирования численного эксперимента, соответствующая полному факторному эксперименту, в котором реализуются все возможные сочетания уровней факторов.

Таблица 1 – Значения независимых переменных в кодированном виде

Независимые переменные	Безразмерные переменные	-1	+1
Скорость обработки, мм/с	X_1	2	4
Шаг сканирования, мм	X_2	0,25	0,5
Радиус лазерного пучка, мм	X_3	1	2

Соответствующее уравнение регрессии при полном факторном эксперименте имеет следующий общий вид:

$$R_a = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3. \quad (1)$$

2. Результаты моделирования

В таблице 2 представлены результаты численного эксперимента по лазерной полировке кварцевого стекла, приведенные при всех значения факторов.

Таблица 2 – Результаты численного эксперимента

Номер комбинации факторов, n	Факторы			Температура, К
	X_1	X_2	X_3	
1	-1	-1	-1	2349
2	+1	-1	-1	2026
3	-1	+1	-1	2361
4	+1	+1	-1	2034
5	-1	-1	+1	4947
6	+1	-1	+1	3811
7	-1	+1	+1	4994
8	+1	+1	+1	3852

По результатам, представленным в таблице 2, была построена модель, определяющая зависимость максимальной температуры в зоне воздействия лазерного излучения на поверхности кварцевого стекла от основных технологических параметров обработки.

После соответствующих вычислений уравнение (1) выглядит следующим образом:

$$T = 3296,75 - 366x_1 + 13,5x_2 + 1104,25x_3 - 1,25x_1x_2 - 203,5x_1x_3 + 8,5x_2x_3 - 0,25x_1x_2x_3. \quad (2)$$

При переходе к реальным значениям уравнение регрессии принимает следующий вид:

$$T = 2208,5 \cdot R - 366 \cdot V + 108 \cdot h - (R-1,5) \cdot (407 \cdot V - 1221) + (R-1,5) \cdot (136 \cdot h - 51) - (h-0,375) \cdot (10 \cdot V - 30) - 2 \cdot (R-1,5) \cdot (h-0,375) \cdot (2 \cdot V - 6) + 1041,5. \quad (3)$$

Зависимость максимальной температуры в зоне воздействия лазерного излучения от параметров обработки представлена на рисунке 1.

В дальнейшем планируется использование полученной регрессионной зависимости для решения задач оптимизации лазерной полировки кварцевых стекол.

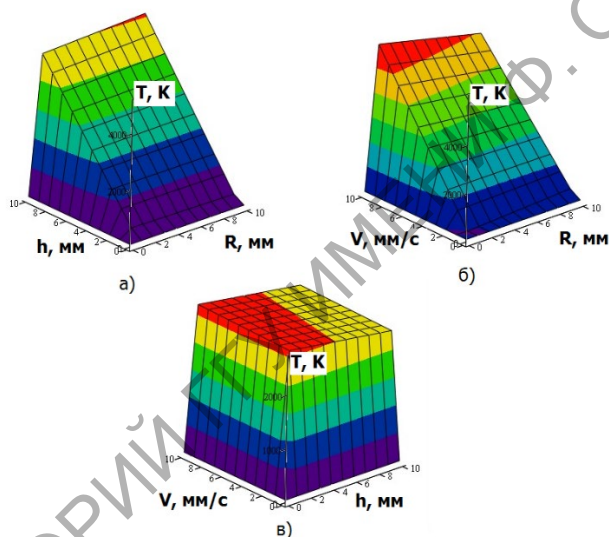


Рисунок 1 – Зависимость максимальной температуры T в зоне воздействия лазерного излучения от параметров обработки
а) $V = \text{const}$; б) $h = \text{const}$; в) $R = \text{const}$

Литература

1. Арбузов, В. И. Основы радиационного оптического материаловедения / В. И. Арбузов. – СПб: СПб ГУ ИТМО, 2008. – 284 с.
2. Top-hat and Gaussian laser beam smoothing of ground fused silica surface / D. Wang [et al.] // Optics & Laser Technology. – 2020. – Vol. 127. – P. 106141, doi:10.1016/j.optlastec.
3. Sysoev, V. K. Laser etching and polishing of quartz tubes / V. K. Sysoev // Glass and Ceramics. – 2003 – Vol. 60. – P. 463.

4. Laser Beam Polishing of Quartz Glass Surfaces / J. Hildebrand, K. Hecht, J. Bliedtner, H. Мӱller // Physics Procedia. – 2011. – Vol. 12. – P. 452–461.

5. Advanced analysis of laser beam polishing of quartz glass surfaces / J. Hildebrand, K. Hecht, J. Bliedtner, H. Мӱller // Physics Procedia. – 2012. – Vol. 39. – P. 277–285.

6. 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.

7. 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.

8. 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.

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

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