

Оптимизация параметров лазерной двулучевой сварки кварцевого стекла с использованием метода планирования вычислительных экспериментов

В.А. ЕМЕЛЬЯНОВ¹, Е.Б. ШЕРШНЕВ², Ю.В. НИКИТЮК², С.И. СОКОЛОВ², А.Ю. АУШЕВ³

В работе с использованием метода полного факторного эксперимента получена регрессионная модель двулучевой сварки кварцевого стекла с применением CO₂-лазеров и выполнена оптимизация параметров обработки. Расчет температурных полей был выполнен методом конечных элементов в программе ANSYS с учетом зависимости теплофизических свойств кварцевого стекла от температуры. В качестве варьируемых факторов использовались скорость обработки, радиусы и мощности лазерных пучков. В качестве откликов использовались максимальные температуры в зоне обработки и глубины проплавления материала. Определены значения технологических параметров двулучевой сварки кварцевого стекла, обеспечивающие максимальную глубину проплавления материала при заданном диапазоне значений температуры в зоне воздействия лазерного излучения.

Ключевые слова: лазерная сварка, кварцевая пластина, ANSYS.

The regression model of double-beam welding of quartz glass using CO₂ lasers and the optimization of processing parameters were obtained in this work using the method of full-factor experiment. The calculation of the temperature fields was performed with the finite element method in the ANSYS program taking into account the dependence of thermal physical properties of quartz glass on the temperature. The processing speed, radii, and laser beam powers were used as varying factors. The maximum temperatures in the treatment area and the depth of material penetration were used as responses. The values of technological parameters of double-beam welding of quartz glass, providing the maximum depth of material penetration at a given range of values of temperature in the zone of laser radiation were determined.

Keywords: laser welding, quartz plate, ANSYS.

Введение. Кварцевое стекло характеризуется уникальным набором характеристик [1]–[2]. Для данного материала характерна высокая термостойкость, химическая стойкость и прочность, что обуславливает применение кварцевого стекла в микроэлектронике [3]–[8].

Одним из эффективных методов создания изделий из кварцевого стекла является лазерная сварка, при этом благодаря высокой плотности энергии и узкой зоне проплавления использование лазерной сварки обеспечивает минимальные деформации сварных соединений [9]–[15]. В ряде случаев успешная реализация технологий лазерной сварки обеспечивалась применением двулучевых методов [14]. Ранее авторами с использованием конечно-элементного моделирования были проведены исследования процесса двулучевой лазерной сварки кварцевого стекла [15].

Повышение эффективности применения лазерных технологий может быть обеспечено за счет оптимизации соответствующих технологических параметров. Примеры реализации оптимизации параметров лазерной обработки приведены в работах [16]–[19].

В настоящее время успешно применяется метамоделирование, при реализации которого модели для сложных систем строятся по результатам вычислительных экспериментов. Основной целью создания метамоделей является определение приближенных значений выходных параметров на основе входных параметров без проведения полных расчётов. Достижение данного результата обеспечивается применением метода планирования вычислительных экспериментов при создании соответствующих регрессионных выражений [20]–[23].

В работе с использованием метамоделирования проведена оптимизация параметров лазерной двулучевой сварки кварцевого стекла.

Конечно-элементный анализ. Температурное поле, формируемое в материале лазерным излучением, является основной характеристикой, определение которой обеспечивает возможность оптимизации параметров лазерной сварки кварцевого стекла.

Для расчета температурных полей, формируемых при двулучевой лазерной сварке кварцевого стекла, использовался комплекс конечно-элементного анализа ANSYS. Моделирование осуществлялось с использованием подготовленной расчётной программы на языке программирования APDL (ANSYS parametric design language) [24]–[26] по схеме двулучевой суперпозиционной сварки кварцевого стекла (см. рисунок 1) [14]–[15].

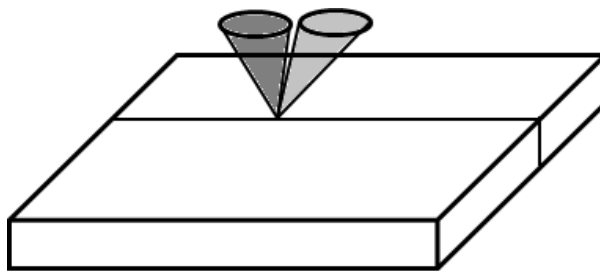


Рисунок 1 – Схема двулучевой суперпозиционной сварки

Для моделирования использовалась пластина с геометрическими размерами $20 \times 10 \times 3$ мм. Для расчетов была создана конечно-элементная модель, состоящая из 38400 элементов и 43173 узлов. При реализации теплового анализа применялись элементы Solid 70. Моделирование выполнялось с учетом зависимости теплофизических свойств кварцевого стекла от температуры [1]–[2], [13], [15].

Таблица 1 – Параметры лазерной двулучевой сварки

Параметры	Значения
Скорость обработки v , мм/с	3
Радиус первого лазерного пучка r_1 , мм	1
Радиус второго лазерного пучка r_2 , мм	1,5
Мощность первого пучка P_1 , Вт	30
Мощность второго пучка P_2 , Вт	30

Полученные при моделировании распределения температурных полей представлены на рисунке 2.

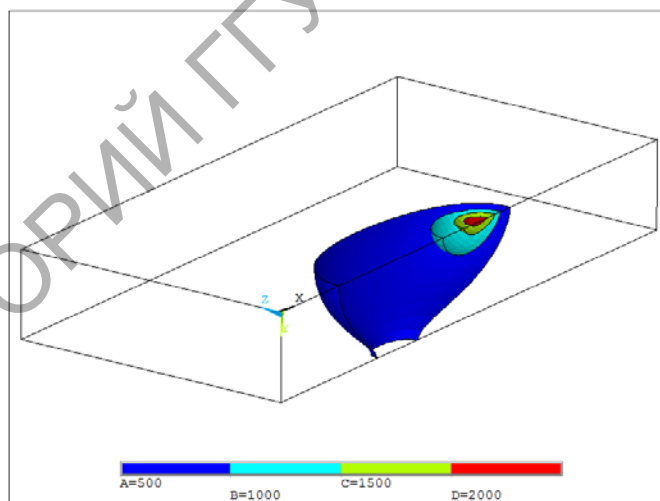


Рисунок 2 – Распределение температурного поля при воздействии двух круглых лазерных пучков, определенное с помощью ANSYS, К

Верификация конечно-элементной модели была выполнена на основании экспериментальных данных, полученных с использованием CO_2 -лазера и тепловизора ИТ-3СМ. При проведении экспериментов использовалась пластина из кварцевого стекла размерами $20 \times 10 \times 2$ мм. На рисунке 3 представлено распределение температурного поля в образце при воздействии круглого лазерного пучка радиусом 1 мм с мощностью 20 Вт, скорость обработки составляла 5 мм/с.

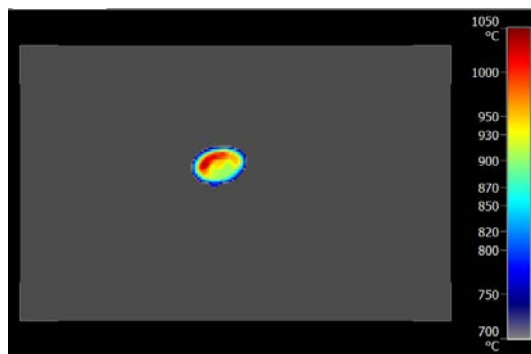


Рисунок 3 – Распределение температурного поля при воздействии круглого лазерного пучка, определенное экспериментально, °C

Результаты экспериментов позволяют сделать вывод о необходимом соответствии данных конечно-элементного моделирования экспериментальным данным. При этом относительная ошибка при определении максимальных температур на поверхности образца не превысила 5 %.

Методика численного эксперимента. При планировании численного эксперимента была использована методика полного факторного эксперимента первого порядка с двухуровневым варьированием факторов.

Сформирован план для пяти факторов: скорость обработки v , радиус первого лазерного пучка r_1 , радиус второго лазерного пучка r_2 , мощность первого пучка P_1 , мощность второго пучка P_2 . При этом определялись следующие выходные параметры: глубина проплавления z и максимальная температура в зоне обработки T . Таким образом, моделью объекта исследования являлись функции отклика (z) и (T), связывающие выходные параметры с факторами ($V, r1, r2, P1, P2$), которые менялись в заданных пределах при проведении опытов.

После преобразования независимых переменных в натуральном масштабе к безразмерным переменным с кодируемыми значениями $-1, +1$ была сформирована таблица 2.

Таблица 2 – Значения независимых переменных в кодированном виде

Независимые переменные	Безразмерные переменные	-1	+1
Скорость обработки v , мм/с	x_1	3	4
Радиус первого лазерного пучка r_1 , мм	x_2	1	1,25
Радиус второго лазерного пучка r_2 , мм	x_3	1,5	1,75
Мощность первого пучка P_1 , Вт	x_4	30	35
Мощность второго пучка P_2 , Вт	x_5	30	35

В таблице 3 представлены результаты численного эксперимента по двулучевой лазерной сварке кварцевого стекла, проведенные при всех значениях факторов.

Таблица 3 – Результаты численного эксперимента

Номер комбинации факторов	Факторы					Глубина проплавления z , мм	Максимальная температура в зоне обработки T , К
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5		
1	-1	-1	-1	-1	-1	0,24	2222
2	1	-1	-1	-1	-1	0,20	2111
3	-1	1	-1	-1	-1	0,25	2121
4	1	1	-1	-1	-1	0,18	2014
5	-1	-1	1	-1	-1	0,20	2124
6	1	-1	1	-1	-1	0,15	2017
7	-1	1	1	-1	-1	0,18	1984
8	1	1	1	-1	-1	0,11	1884
9	-1	-1	-1	1	-1	0,30	2404
10	1	-1	-1	1	-1	0,25	2281
11	-1	1	-1	1	-1	0,32	2273
12	1	1	-1	1	-1	0,25	2155
13	-1	-1	1	1	-1	0,27	2307

Окончание таблицы 3

14	1	-1	1	1	-1	0,22	2188
15	-1	1	1	1	-1	0,26	2136
16	1	1	1	1	-1	0,20	2024
17	-1	-1	-1	-1	1	0,27	2312
18	1	-1	-1	-1	1	0,22	2194
19	-1	1	-1	-1	1	0,30	2227
20	1	1	-1	-1	1	0,23	2112
21	-1	-1	1	-1	1	0,23	2198
22	1	-1	1	-1	1	0,19	2084
23	-1	1	1	-1	1	0,23	2066
24	1	1	1	-1	1	0,16	1959
25	-1	-1	-1	1	1	0,33	2494
26	-1	-1	-1	1	1	0,27	2364
27	-1	1	-1	1	1	0,36	2378
28	1	1	-1	1	1	0,29	2253
29	-1	-1	1	1	1	0,30	2380
30	1	-1	1	1	1	0,24	2255
31	-1	1	1	1	1	0,30	2218
32	1	1	1	1	1	0,23	2100

По данным, представленным в таблице 3, были построены регрессионные модели, определяющие зависимости z и T от параметров обработки. Полученные уравнения регрессии имеют следующий вид:

$$z = 0,2410 - 0,0295x_1 - 0,0011x_2 - 0,0248x_3 + 0,0333x_4 + 0,0173x_5 - 0,0048x_1x_2 + 0,0008x_1x_3 - 0,0011x_1x_4 - 0,0008x_1x_5 - 0,0070x_2x_3 + 0,0030x_2x_4 + 0,0039x_2x_5 + 0,0030x_3x_4 + 0,0002x_3x_5 - 0,0017x_4x_5 + 0,0005x_1x_2x_3 + 0,0017x_1x_2x_4 + 0,0002x_1x_2x_5 - 0,0002x_1x_3x_4 + 0,0008x_1x_3x_5 - 0,0011x_1x_4x_5 + 0,0002x_2x_3x_4 - 0,0008x_2x_3x_5 - 0,0008x_2x_4x_5 - 0,0008x_3x_4x_5 + 0,0002x_1x_2x_3x_4 - 0,0008x_1x_2x_3x_5 + 0,0005x_1x_2x_4x_5 - 0,0014x_1x_3x_4x_5 + 0,0002x_2x_3x_4x_5 + 0,0002x_1x_2x_3x_4x_5; \tag{1}$$

$$T = 2182,46875 - 57,7812x_1 - 63,4688x_2 - 62,2188x_3 + 80,6563x_4 + 42,1563x_5 - 1,4063x_1x_2 + 1,4063x_1x_3 - 2,8438x_1x_4 - 1,7188x_1x_5 - 10,4063x_2x_3 - 7,5313x_2x_4 + 2,9683x_2x_5 + 0,0938x_3x_4 - 4,9063x_3x_5 - 0,0313x_4x_5 + 0,3438x_1x_2x_3 + 0,0938x_1x_2x_4 - 0,0313x_1x_2x_5 - 0,0313x_1x_3x_4 + 0,0938x_1x_3x_5 + 0,0938x_1x_4x_5 - 0,0938x_2x_3x_4 - 0,8438x_2x_3x_5 + 0,0318x_2x_4x_5 + 0,0318x_3x_4x_5 - 0,0938x_1x_2x_3x_4 - 0,0318x_1x_2x_3x_5 + 0,0313x_1x_2x_4x_5 + 0,0313x_1x_3x_4x_5 + 0,0938x_2x_3x_4x_5 - 0,0313x_1x_2x_3x_4x_5, \tag{2}$$

где $x_1 = \frac{v-3,5}{0,5}$, $x_2 = \frac{r_1-1,125}{0,125}$, $x_3 = \frac{r_2-1,625}{0,125}$, $x_4 = \frac{P_1-32,5}{2,5}$, $x_5 = \frac{P_2-32,5}{2,5}$.

Была проведена проверка регрессионной модели на тестовом наборе данных, приведенном в таблице 4.

Таблица 4 – Тестовый набор данных

v , мм/с	r_1 , мм	r_2 , мм	P_1 , Вт	P_2 , Вт	z , мм	T , К
3,3	1,1	1,6	32	32	0,26	2198
3,3	1,2	1,7	32	32	0,22	2076
3,3	1,2	1,7	34	34	0,27	2169
3,6	1,2	1,7	33	33	0,22	2089
3,6	1,1	1,6	32	34	0,25	2198

Оценка полученной регрессионной модели 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)

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

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 5.

Таблица 5 – Результаты оценки регрессионных моделей

Критерий	Тестовый набор	
	z	T
RMSE	0,008	21,1
MAE	0,006	18,8
MAPE	2,5	0,9

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

Оптимизация параметров лазерной сварки кварцевого стекла осуществлялась с использованием метода перебора. Этот метод в случае решения экстремальных задач является вариантом прямого метода оптимизации [27].

Диапазон значений температуры T , необходимой для эффективной лазерной сварки, был принят равным 2000–2500 К. Затем были рассчитаны глубины проплавления. Скорость v варьировалась в пределах 3–4 мм/с с шагом 0,1 мм/с, радиус первого лазерного пучка r_1 изменялся в пределах 1,0–1,25 мм с шагом 0,025 мм, радиус второго лазерного пучка r_2 изменялся в пределах 1,5–1,75 мм с шагом 0,025 мм, мощность первого лазерного пучка P_1 изменялся в пределах 30–35 Вт с шагом 0,5 Вт и мощность второго лазерного пучка P_2 изменялся в пределах 30–35 Вт с шагом 0,5 Вт. Результаты оптимизации приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Результаты оптимизации

№	$v, \text{мм/с}$	$r_1, \text{мм}$	$r_2, \text{мм}$	$P_1, \text{Вт}$	$P_2, \text{Вт}$	$T, \text{К}$	$z, \text{мм}$
1	3,0	1,25	1,50	35,00	35,00	2378	0,360
2	3,0	1,23	1,50	35,00	35,00	2390	0,357
3	3,0	1,25	1,50	35,00	34,50	2367	0,356

Как видно из таблицы 5, формирование температур в заданном диапазоне осуществляется при выборе трех наборов параметров лазерной обработки, при этом значения параметров во всех наборах имеют небольшие различия.

Заключение. В работе с использованием методики полного факторного эксперимента первого порядка с двухуровневым варьированием факторов получена регрессионная модель лазерной двулучевой сварки кварцевых пластин. Выполнена верификация конечно-элементной модели на основании экспериментальных данных. Установлено наличие необходимого соответствия регрессионной модели результатам конечно-элементного анализа. В результате численного эксперимента определены оптимальные параметры лазерной сварки кварцевых изделий, обеспечивающие максимальную глубину проплавления при заданном диапазоне значений температуры в зоне воздействия лазерного излучения. Полученные результаты могут быть использованы при оптимизации процессов лазерной сварки кварцевых изделий.

Литература

1. Арбузов, В. И. Основы радиационного оптического материаловедения / В. И. Арбузов. – СПб. : СПб ГУ ИТМО, 2008. – 284 с.
2. Леко, В. К. Свойство кварцевого стекла / В. К. Леко, О. В. Мазурин. – Л. : Наука, 1985. – 165 с.

3. Технология интегральной электроники : учеб. пособ. по дисциплине / Л. П. Ануфриев, С. В. Бордусов, Л. И. Гурский [и др.]. – Минск : «Интегралполиграф», 2009. – 379 с.: ил.
4. Ланин, В. Л. Формирование токопроводящих контактных соединений в изделиях электроники / В. Л. Ланин, А. П. Достанко, Е. В. Телеш. – Минск : Изд. центр БГУ, 2007. – 574 с.
5. Бокарев, В. Контактная литография в нанотехнологии / В. Бокарев, Е. Горнев // Наноиндустрия. – 2010. – № 5. – С. 22–25.
6. 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.
7. Аваков, С. Оптико-механические комплексы для бездефектного изготовления фотошаблонов 0,35 мкм и 90 нм // С. Аваков, В. Овчинников, С. Карпович, Е. Титко, Г. Трапашко // Фотоника. – 2007. – № 6. – С. 35–39.
8. Сысоев, В. К. Многофункциональная технология обработки кварцевого стекла излучением Co_2 лазеров / В. К. Сысоев // Известия высш. учебн. завед. Приборостроение. – 2004. – Т. 47. – № 6. – С. 61–67.
9. Мачулка, Г. А. Лазерная обработка стекла / Г. А. Мачулка. – М. : Советское радио, 1979. – 135 с.
10. Kondratenko, V. S. Laser Welding of Glass / V. S. Kondratenko, V. E. Borisovskii // Glass and Ceramics. – 2018. – № 75 (3-4). – P. 83–88.
11. Sysoev, V. K. Laser welding of quartz glass workpieces / V. K. Sysoev, B. N. Planida, A. A. Verlan [et al.] // Glass and Ceramics. – 2012. – № 68 (11-12). – P. 389–392.
12. Miyamoto, I. Laser welding of glass / I. Miyamoto // Handbook of Laser Welding Technologies. – Woodhead Publishing, 2013. – P. 301–331.
13. Борисовский, В. Е. Развитие теории и разработка комплекса технологий и оборудования для лазерной обработки кварцевого стекла : дис. ... д-ра техн. наук : 05.11.14 / В. Е. Борисовский. – М., 2011. – 182 с.
14. Григорьянц, А. Г. Технологические процессы лазерной обработки / А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов, А. И. Мисюров. – М. : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 664 с.
15. Распределение температурных полей при двухлучевой сварке кварцевого стекла / Е. Б. Шершнев, Ю. В. Никитюк, С. И. Соколов, А. Е. Шершнев // Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины. – 2012. – № 6 (75). – С. 105–109.
16. Бессмельцев, В. П. Оптимизация режимов лазерной микрообработки / В. П. Бессмельцев, Е. Д. Булушев // Автометрия. – 2014. – Т. 50, № 6. – С. 3–21.
17. Parandoush, P. review of modeling and simulation of laser beam machining / P. Parandoush, A. Hossain // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2014. – V. 85. – P. 135–145.
18. Nikityuk, Y. V. Optimization of two-beam laser cleavage of silicate glass / Y. V. Nikityuk, A. N. Serdyukov, I. Y. Aushev // J. Opt. Technol. – 2022. – V. 89. – P. 121–125.
19. Никитюк, Ю. В. Оптимизация параметров лазерного раскалывания кварцевого стекла / Ю. В. Никитюк, А. Н. Сердюков, И. Ю. Аушев // Проблемы физики, математики и техники. – 2021. – № 4 (49). – С. 21–28.
20. Сокращение размерности данных в задачах имитационного моделирования / Ю. Г. Агалаков, А. В. Бернштейн // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2012. – № 3. – С. 3–17.
21. Wang, G. Review of Metamodeling Techniques in Support of Engineering Design Optimization / G. Wang, S. Gary Shan // J. Mech. Des. – 2007. – № 129 (3). – P. 370–381.
22. Планирование и анализ результатов эксперимента : учеб. пособ. / А. П. Моргунов, И. В. Ревина ; Минобрнауки России, ОмГТУ. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2014. – 343 с.
23. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М. : Наука, 1976. – 278 с.
24. Официальный сайт компании ANSYS [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://www.ansys.com/>. – Дата доступа : 25.04.2022.
25. Каплун, А. Б. ANSYS в руках инженера : практическое руководство / А. Б. Каплун, Е. М. Морозов, М. А. Олферьева. – М. : Едиториал УРСС, 2003. – 272 с.
26. Чигарев, А. В. ANSYS для инженеров : справочное пособие / А. В. Чигарев, А. С. Кравчук, А. Ф. Смалюк. – М. : Машиностроение, 2004. – 512 с.
27. Gill, F. Practical optimization / F. Gill, W. Murray, M. Wright. – М. : Mir, 1985. – P. 383.

¹ОАО «Интеграл»

²Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины

³Университет гражданской защиты
МЧС Республики Беларусь