

Оптический журнал

Лазерная физика и техника
Laser physics and technics

DOI: 10.17586/1023-5086-2023-90-06-15-24

УДК 621.791.78

Оптимизация параметров двухлучевого ассиметричного лазерного раскалывания силикатного стекла

Юрий Валерьевич Никитюк¹✉, Андрей Александрович Середа²,
Анатолий Николаевич Сердюков³, Сергей Викентьевич Шалупаев⁴,
Игорь Юрьевич Аушев⁵

^{1, 2, 3, 4}Гомельский государственный университет им. Франциска Скорины, Гомель, Республика Беларусь

⁵Университет гражданской защиты МЧС Республики Беларусь, Минск, Республика Беларусь

¹nikitjuk@gsu.by <https://orcid.org/0000-0002-4405-644X>

²sereda@gsu.by <https://orcid.org/0000-0001-9718-2311>

³serdyukov@gsu.by <https://orcid.org/0000-0002-8068-4224>

⁴shalupaev@gsu.by <https://orcid.org/0000-0002-7413-4605>

⁵ai@ucp.by <https://orcid.org/0000-0003-4425-2085>

Аннотация

Предмет исследования. Оптимизация параметров несквозных наклонных трещин в процессе двухлучевого лазерного асимметричного раскалывания силикатных стёкол на базе метамоделирования. **Цель работы.** Разработка моделей для подбора оптимальных технологических режимов нанесения наклонных трещин при лазерном раскалывании силикатного стекла с заданными параметрами, увеличение эффективности процесса создания скруглённых кромок при двухлучевом асимметричном лазерном раскалывании стеклоизделий. **Метод.** Многокритериальный поиск оптимальных технологических режимов лазерной обработки с использованием генетического алгоритма MOGA для формирования скруглённых кромок с заданными геометрическими параметрами в стеклоизделиях. **Основные результаты.** Расчёт геометрических параметров наклонных трещин, температур и термоупругих напряжений был выполнен с применением языка программирования APDL программы ANSYS. Для численного эксперимента был применён гранецентрированный вариант центрального композиционного плана эксперимента. План эксперимента формировался для четырёх факторов (P1–P4): мощность лазерного излучения YAG-лазера, длина волны излучения которого 1,06 мкм; мощность лазерного излучения CO₂-лазера, длина волны излучения которого 10,6 мкм; смещение центра пучка YAG-лазера относительно центра пучка CO₂-лазера в направлении, перпендикулярном линии обработки материала; скорость движения лазерных пучков и хладагента вдоль линии обработки материала. В качестве откликов использовались максимальные значения температуры и термоупругих напряжений в зоне лазерной обработки, а также геометрические параметры наклонной трещины, индуцированной лазерным излучением. Проведена оценка влияния технологических режимов обработки материала (факторы P1–P4) на геометрические параметры наклонной трещины. Самыми значимыми технологическими параметрами обработки стеклоизделий, которые влияют на величину максимальных температур, возникающих в материале в процессе лазерного термораскалывания, являются скорость обработки и мощность лазерного излучения с длиной волны 10,6 мкм. Значимыми параметрами, которые воздействуют на величину термоупругих напряжений, — это скорость обработки и мощность лазерного излучения с длиной волны 1,06 мкм. При этом геометрические характеристики наклонных трещин существенно зависят от мощности излучения YAG-лазера и от величины смещения

центра пучка этого лазера относительно центра пучка CO₂-лазера. При помощи пакета TensorFlow создана искусственная нейронная сеть, обучение и тестирование которой осуществлялось на выборках, сформированных при решении соответствующих задач методом конечных элементов в программе ANSYS. Выполнено сравнение результатов определения выходных параметров с использованием нейросетевой модели и модели, созданной с использованием метода непараметрической регрессии. Были использованы следующие критерии для оптимизации асимметричного раскалывания стекла: максимум растягивающих напряжений и максимум скорости обработки при заданных значениях параметров наклонной трещины. Применение генетического алгоритма обеспечило максимальную относительную погрешность результатов, не превышающую 9% при определении температур и 12% при определении термоупругих напряжений. Относительная погрешность определения значений геометрических параметров наклонных трещин не превысила 20%. **Практическая значимость.** Предложенная методика обеспечивает возможность определения технологических режимов формирования лазерно-индуцированных несквозных наклонных трещин с заданными геометрическими параметрами.

Ключевые слова: лазерное раскалывание, стеклянная пластина, оптимизация, MOGA, ANSYS

Ссылка для цитирования: Никитюк Ю.В., Середа А.А., Сердюков А.Н., Шалупаев С.В., Аушев И.Ю. Оптимизация параметров двухлучевого асимметричного лазерного раскалывания силикатного стекла // Оптический журнал. 2023. Т. 90. № 6. С. 15–24. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-06-15-24>

Код OCIS: 350.3390.

Parameters optimization of silicate glass two-beam asymmetric laser splitting

YURI NIKITYUK¹✉, ANDREY SEREDA², ANATOLY SERDYUKOV³,
SERGEY SHALUPAEV⁴, IGOR AUSHEV⁵

^{1, 2, 3, 4}Francisk Skorina Gomel State University, Gomel, Republic of Belarus

⁵University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

¹nikitjuk@gsu.by

<https://orcid.org/0000-0002-4405-644X>

²sereda@gsu.by

<https://orcid.org/0000-0001-9718-2311>

³serdyukov@gsu.by

<https://orcid.org/0000-0002-8068-4224>

⁴shalupaev@gsu.by

<https://orcid.org/0000-0002-7413-4605>

⁵ai@ucp.by

<https://orcid.org/0000-0003-4425-2085>

Abstract

Subject of study. Optimization of parameters of non-through oblique cracks in the process of two-beam laser asymmetric cracking of silicate glasses based on metamodeling. **The purpose of the work.** Development of models for the selection of optimal technological modes for applying inclined cracks during laser splitting of silicate glass with specified parameters, increasing the efficiency of the process of creating rounded edges during two-beam asymmetric laser splitting of glass products.

Method. Multi-criteria search for optimal technological regimes of laser processing using the MOGA genetic algorithm for the formation of rounded edges with specified geometric parameters in glass products. **Main results.** The calculation of the geometric parameters of inclined cracks, temperatures and thermoelastic stresses was performed using the APDL programming language of the ANSYS program. For the numerical experiment, a face-centered version of the central compositional plan of the experiment was used. The experimental plan was formed for four factors (P1–P4): the laser radiation power of the YAG laser, the radiation wavelength of which is 1.06 μm; laser radiation power of a CO₂ laser, the radiation wavelength of which is 10.6 μm; shifting the center of the YAG laser beam relative to the center of the CO₂ laser beam in a direction perpendicular to the material processing line; the speed of movement of laser beams and coolant along the material processing line. The maximum values of temperature and thermoelastic stresses in the laser treatment zone, as well as the geometric parameters of the inclined crack induced by laser radiation, were used as responses.

The influence of technological regimes of material processing (factors P1–P4) on the geometrical parameters of an inclined crack has been evaluated. The most significant technological parameters of glass products processing, which affect the maximum temperatures that occur in the material during laser thermal splitting, are the processing speed and the power of laser radiation with a wavelength of 10.6 μm . Significant parameters that affect the magnitude of thermoelastic stresses are the processing speed and the power of laser radiation with a wavelength of 1.06 μm . In this case, the geometric characteristics of inclined cracks depend significantly on the radiation power of the YAG laser and on the displacement of the center of the beam of this laser relative to the center of the CO_2 laser beam. Using the TensorFlow package, an artificial neural network was created, the training and testing of which was carried out on samples formed when solving the corresponding problems by the finite element method in the ANSYS program. The results of determining the output parameters using a neural network model and a model created using the nonparametric regression method are compared. The following criteria were used to optimize asymmetric glass cracking: maximum tensile stresses and maximum processing speed for given values of the oblique crack parameters. The use of the genetic algorithm ensured the maximum relative error of the results, not exceeding 9% when determining temperatures and 12% when determining thermoelastic stresses. The relative error in determining the values of the geometric parameters of inclined cracks did not exceed 20%. **Practical significance.** The proposed technique makes it possible to determine the technological regimes for the formation of laser-induced non-through oblique cracks with specified geometric parameters.

Keywords: laser splitting, glass plate, optimization, MOGA, ANSYS

For citation: Nikityuk Yu.V., Sereda A.A., Serdyukov A.N., Shalupae S.V., Aushev I.Yu. Parameters optimization of silicate glass two-beam asymmetric laser splitting [In Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2023. V. 90. № 6. P. 15–24. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-06-15-24>

OCIS codes: 350.3390.

ВВЕДЕНИЕ

Лазерное раскалывание является одним из высокоточных методов разделения силикатных стёкол. При реализации данной технологии лазерно-индуцированные трещины формируются в результате последовательного лазерного нагрева и воздействия хладагента на обрабатываемую поверхность. Для лазерного раскалывания характерны высокая скорость и точность обработки [1–4].

Разработан ряд методов обработки хрупких неметаллических материалов, в основе которых лежит процесс лазерного раскалывания. Среди них метод асимметричного лазерного раскалывания, обеспечивающий возможность формирования наклонных трещин со скруглёнными кромками [3, 5]. В работах [6–8] авторами предложен двухлучевой способ лазерного раскалывания с использованием источников излучения с различными длинами волн, позволяющий повысить эффективность процесса инициализации и развития несквозной трещины, в том числе при формировании в стеклоизделиях скруглённых кромок [9, 10].

Для достижения наибольшей эффективности процесса разделения необходим подбор оптимальных технологических режимов об-

работки. Для этого в ряде случаев целесообразно применение метамоделей, которые характеризуются высокой эффективностью расчётов [11–13]. Одной из целей метамоделирования является нахождение приближённых значений выходных параметров без проведения полных расчётов. Примеры такого моделирования лазерного раскалывания стёкол с использованием, в том числе искусственных нейронных сетей, представлены в работах [14, 15]. Для искусственных нейронных сетей характерна возможность определения нелинейных зависимостей в больших массивах данных, что обуславливает их широкое использование в различных областях науки и техники [16, 17].

Другой целью метамоделирования является решение оптимизационных задач [12, 13]. Примеры решения таких задач с применением генетических алгоритмов представлены в статьях [18, 19]. При использовании генетических алгоритмов поиск решений реализуется в результате наследования и усиления полезных свойств совокупности объектов при имитации их эволюции [20, 21]. Генетический алгоритм MOGA (Multi-Objective Genetic Algorithm) в настоящее время является одним из

широко используемых генетических алгоритмов [22]. В работе [6] показано успешное применение данного алгоритма для оптимизации параметров лазерного раскалывания силикатных стёкол по прямолинейным траекториям [23].

Представляется целесообразным применение метамоделирования с использованием алгоритма MOGA модуля DesignXplorer для определения оптимальных параметров обработки силикатного стекла в процессе двухлучевого асимметричного лазерного раскалывания, использование которых обеспечит эффективное формирование скруглённых кромок с заданными геометрическими параметрами в стеклоизделиях.

МЕТАМОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ДВУХЛУЧЕВОГО АСИММЕТРИЧНОГО ЛАЗЕРНОГО РАСКАЛЫВАНИЯ СТЕКЛА

Для определения оптимальных технологических режимов формирования скруглённых кромок с заданной геометрией необходимы расчётные значения таких характеристик, как геометрия наклонных трещин, температурные поля и поля термоупругих напряжений, формируемых в силикатном стекле при двухлучевом асимметричном лазерном раскалывании. Расчётное распределение полей температур и термоупругих напряжений в обрабатываемом материале были получены с применением языка программирования APDL (ANSYS parametric design language) [23]. При этом определение геометрических параметров наклонных трещин осуществлялось на основе информации о пространственной локализации главных напряжений σ_1 [10].

На рис. 1 показаны взаимное пространственное расположение лазерных пучков и хладагента на поверхности материала в процессе двухлучевого асимметричного лазерного раскалывания, а также профиль образующейся несквозной наклонной трещины. Поверхность обрабатываемой пластины подвергается одновременному воздействию CO_2 -лазера, YAG-лазера и хладагента. При этом центры пучка CO_2 -лазера и зоны воздействия хладагента располагаются на одной линии, а центр пучка YAG-лазера располагается со смещением на расстояние L . Определяющими факторами места инициализации трещины являются

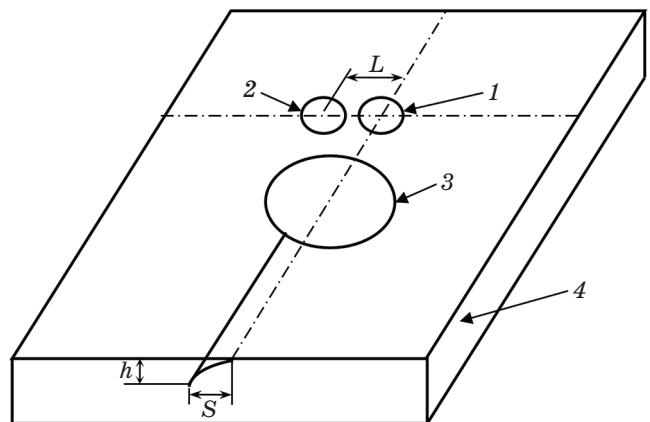


Рис. 1. Схема взаимного расположения зон воздействия лазерных пучков и хладагента. 1 — лазерный пучок с длиной волны 10,6 мкм, 2 — лазерный пучок с длиной волны 1,06 мкм, 3 — хладагент, 4 — пластина из стекла, L — расстояние между центрами лазерных пучков, h — глубина трещины, s — отклонение трещины

Fig. 1. Diagram of the relative location of the exposure zones of laser beams and refrigerant. 1 is a laser beam with a wavelength of 10.6 microns, 2 is a laser beam with a wavelength of 1.06 microns, 3 is a refrigerant, 4 is a plate made of glass, L is the distance between the centers of the laser beams, h is the depth of the crack, s is the deviation of the crack

геометрия пучков, величина L , плотность мощности излучения и скорость обработки. На рис. 1 показан вариант инициализации трещины от пучка CO_2 -лазера [10].

Для расчётов были выбраны следующие параметры обработки. Пучок CO_2 -лазера моделировался как поверхностный тепловой источник с поперечным сечением в виде круга радиусом $R_1 = 0,002$ м и мощностью излучения $P_1 = 15$ Вт. Пучок YAG-лазера моделировался как объёмный тепловой источник с поперечным сечением в виде круга радиусом $R_1 = 0,001$ м и мощностью излучения $P_2 = 20$ Вт. Хладагент моделировался как поверхностный элемент с коэффициентом теплоотдачи, равным $6800 \text{ Вт}/\text{м}^2\text{К}$. Скорость обработки была выбрана равной $V = 0,015$ м/с, смещение $L = 0,001$ м. Расчёты выполнены для пластины с размерами $0,03 \times 0,025 \times 0,004$ м. Конечно-элементная модель формировалась из 240000 элементов Solid 70 для теплового анализа и 240000 элементов Solid 185 для прочностного анализа.

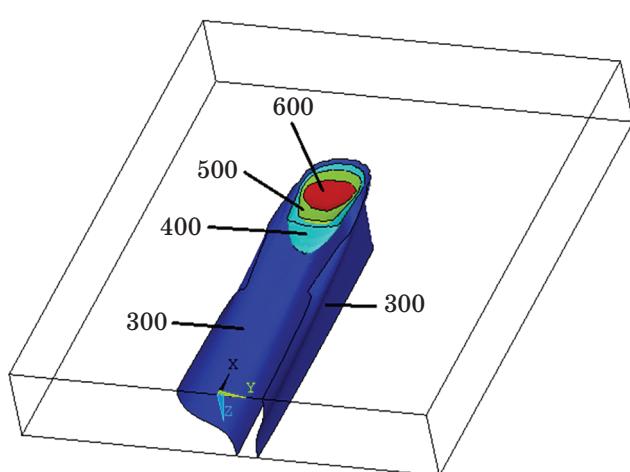


Рис. 2. Распределение температурных полей в К
Fig. 2. The distribution of temperature fields in K

Свойства силикатных стёкол для моделирования процесса лазерного разделения взяты из [2]: теплопроводность $\lambda = 0,88 \text{ Вт}/(\text{м К})$, удельная теплоёмкость $C = 860 \text{ Дж}/(\text{кг К})$, плотность $\rho_0 = 2450 \text{ кг}/\text{м}^3$, коэффициент температурного расширения $\alpha_T = 89 \times 10^{-7} (1/\text{°C})$, модуль Юнга $E = 70 \text{ ГПа}$, коэффициент Пуассона $\nu = 0,22$.

Расчётоное распределение тепловых полей приведено на рис. 2.

Для численного эксперимента был применён гранецентрированный вариант центрального композиционного плана эксперимента [24]. План эксперимента формировался для четырёх факторов (P1–P4): P1 — мощность лазера P_1 с длиной волны излучения 10,6 мкм, P2 — мощность лазера P_2 с длиной волны излучения 1,06 мкм, P3 — смещение центра

Таблица 1. План эксперимента
Table 1. Experiment plan

<i>N</i>	<i>P1</i> <i>P₁</i>, Вт	<i>P2</i> <i>P₂</i>, Вт	<i>P3</i> <i>L</i>, м	<i>P4</i> <i>V</i>, м/с	<i>T</i>, К	<i>σ₁</i>, МПа	<i>s</i>, м	<i>h</i>, м
1	5	20	0,001	0,005	576	50	0,0005	0,0002
2	5	20	0,001	0,015	452	21	0,00025	0,0001
3	5	20	0,002	0,005	541	32	0,001	0,0003
4	5	20	0,002	0,015	437	12	0,00075	0,0002
5	5	45	0,0015	0,01	507	44	0,0005	0,0002
6	5	70	0,001	0,005	708	119	0,00025	0,0002
7	5	70	0,001	0,015	501	54	0,00125	0,0032
8	5	70	0,002	0,005	609	93	0,002	0,0022
9	5	70	0,002	0,015	448	43	0,00025	0,0002
10	10	20	0,0015	0,01	650	40	0,001	0,0003
11	10	45	0,001	0,01	695	67	0,0005	0,0002
12	10	45	0,0015	0,005	829	97	0,00075	0,0003
13	10	45	0,0015	0,01	667	56	0,0005	0,0002
14	10	45	0,0015	0,015	593	37	0,0005	0,0002
15	10	45	0,002	0,01	648	43	0,00075	0,0003
16	10	70	0,0015	0,01	697	77	0,0005	0,0002
17	15	20	0,001	0,005	1063	117	0,001	0,0002
18	15	20	0,001	0,015	740	42	0,00025	0,0001
19	15	20	0,002	0,005	1035	98	0,00225	0,0006
20	15	20	0,002	0,015	728	34	0,00225	0,0001
21	15	45	0,0015	0,01	833	69	0,00075	0,0002
22	15	70	0,001	0,005	1166	176	0,0005	0,0002
23	15	70	0,001	0,015	780	72	0,0005	0,0002
24	15	70	0,002	0,005	1038	115	0,00075	0,0004
25	15	70	0,002	0,015	728	46	0,0005	0,0003

пучка YAG-лазера относительно центра пучка CO₂-лазера перпендикулярно линии обработки на расстояние L , P4 — скорость обработки V . Для 25 комбинаций входных параметров определены следующие выходные параметры: максимальная температура T и максимальные напряжения σ_1 в зоне лазерной обработки, ширина s и глубина h лазерно-индуцированной наклонной трещины (табл. 1).

Функция отклика связывала выходные параметры (T, σ_1, s, h) с факторами (P_1, P_2, L, V).

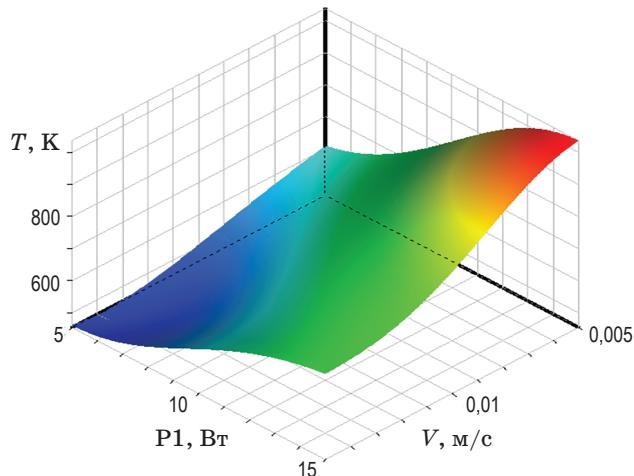


Рис. 3. Зависимость максимальной температуры T от параметров обработки $P_1 = P_1$ и $P_4 = V$.

Fig. 3. Dependence of the maximum temperature T on the processing parameters $P_1 = P_1$ and $P_4 = V$

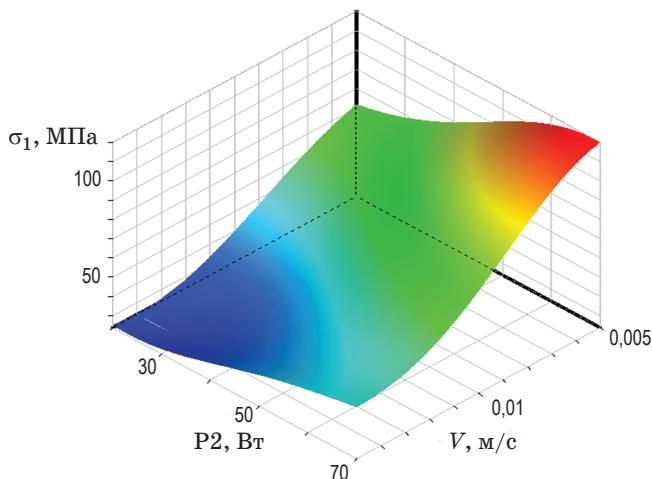


Рис. 4. Зависимость максимальных напряжений σ_1 от параметров обработки $P_2 = P_2$ и $P_4 = V$.

Fig. 4. Dependence of maximum stresses σ_1 on processing parameters $P_2 = P_2$ and $P_4 = V$

При создании поверхности отклика использован метод непараметрической регрессии [25].

Установлено, что на максимальные значения температуры, формируемые лазерным излучением, наибольшее воздействие оказывают мощность YAG-лазера и скорость обработки (рис. 3). При этом на величину главных напряжений σ_1 основное влияние оказывают мощность CO₂-лазера и также скорость обработки (рис. 4).

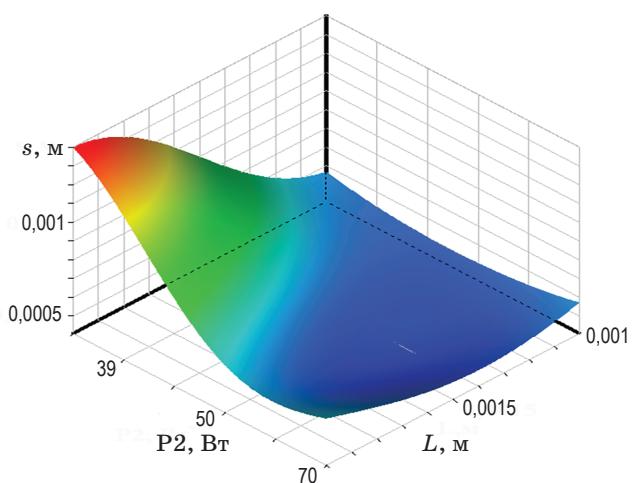


Рис. 5. Зависимость ширины s наклонной трещины от параметров обработки $P_2 = P_2$ и $P_3 = L$.

Fig. 5. The dependence of the width s of the inclined crack on the processing parameters $P_2 = P_2$ and $P_3 = L$

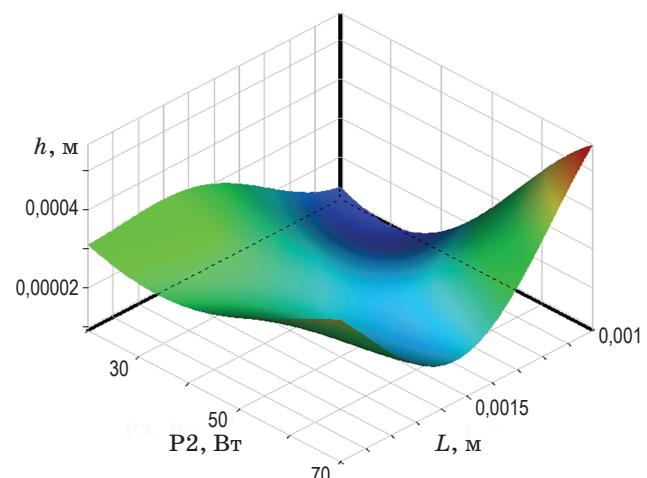


Рис. 6. Зависимость глубины h наклонной трещины от параметров обработки $P_2 = P_2$ и $P_3 = L$.

Fig. 6. The dependence of the depth h of the inclined crack on the processing parameters $P_2 = P_2$ and $P_3 = L$

Таблица 2. Тестовый набор параметров
Table 2. Test set of parameters

<i>N</i>	P1 <i>P₁</i>, Вт	P2 <i>P₂</i>, Вт	P3 <i>L</i>, м	P4 <i>V</i>, м/с	<i>T</i>, К	σ_1, МПа	<i>s</i>, м	<i>h</i>, м
1	7	39	0,0015	0,012	538	37	0,0005	0,0002
2	9	42	0,0015	0,009	651	57	0,0005	0,0002
3	12	38	0,002	0,008	768	52	0,00125	0,0004
4	11	44	0,001	0,015	643	45	0,00025	0,0001
5	10	34	0,0015	0,009	674	53	0,00075	0,0003

При этом геометрические характеристики наклонных трещин существенно зависят от мощности лазера P_2 с длиной волны излучения 1,06 мкм и от величины смещения центра пучка YAG-лазера относительно центра пучка CO₂-лазера L (рис. 5 и 6).

В соответствии с алгоритмом, представленным в работе [15], было выполнено моделирование процесса двухлучевого асимметричного лазерного раскалывания силикатных стёкол с помощью искусственной нейронной сети.

Выборки для обучения и тестирования нейронной сети были сформированы при решении соответствующих задач методом конечных элементов в программе ANSYS. При этом 25 комбинаций центрального композиционного плана эксперимента были дополнены ещё 50 комбинациями расчётов. Для тестирования поверхностей отклика, сформированных при помощи метода непараметрической регрессии и искусственной нейронной сети, использовался набор параметров, представленный в табл. 2.

Для определения выходных параметров при двухлучевом асимметричном лазерном раскалывании была использована полно связанные нейронная сеть с архитектурой [4-14-12-8-4]. Построение нейронной сети осуществлялось при помощи программы TensorFlow [17]. Искусственная нейронная сеть формировалась с оптимизатором Adam, с функцией активации ReLu и с функцией потерь MSE. Обучение нейронной сети осуществлялось в течении 500 эпох.

Качество созданных моделей оценивалось при помощи средней абсолютной ошибки (англ. MAE), средней квадратичной ошибки (англ. RMSE), средней абсолютной процентной ошибки (англ. MAPE) и коэффициента детермина-

Таблица 3. Результаты оценки модели, сформированной при помощи метода непараметрической регрессии

Table 3. Results of evaluation of the model formed using the nonparametric regression method

Критерий	<i>T</i>	σ_1	<i>s</i>	<i>h</i>
RMSE	18	2E+6	7E-5	3E-5
MAE	14	2E+6	6E-5	3E-5
MAPE	2,1	4,1	13,7	13,4
R^2	0,9419	0,9135	0,9636	0,9194

Таблица 4. Результаты оценки нейросетевой модели

Table 4. Results of neural network model evaluation

Критерий	<i>T</i>	σ_1	<i>s</i>	<i>h</i>
RMSE	9	1E+6	6E-5	3E-5
MAE	7	1E+6	5E-5	3E-5
MAPE	1,0	2,7	7,7	11,9
R^2	0,9866	0,9646	0,9653	0,9069

ции R^2 [15]. Значения соответствующих критериев представлены в табл. 3 и 4.

Результаты оценки полученных моделей свидетельствуют о необходимом соответствии метамоделей результатам конечно-элементного анализа. При этом использование нейросетевых моделей и метода непараметрической регрессии дают схожие результаты.

Для оптимизации параметров двухлучевого асимметричного лазерного раскалывания стекла был использован модуль DesignXplorer программы ANSYS. Оптимизация осуществлялась в соответствии с алгоритмом, представленным в работе [6]. При оптимизации

Таблица 5. Результаты оптимизации
Table 5. Optimization results

P1 <i>P₁</i> , Вт	P2 <i>P₂</i> , Вт	P3 <i>L</i> , м	P4 <i>V</i> , м/с	T, К	σ_1 , МПа	<i>s</i> , м	<i>h</i> , м
10	70	0,002	0,009	726 (668)	75 (67)	0,0006 (0,0005)	0,00025 (0,0003)

с использованием генетического алгоритма MOGA с числом индивидов начальной популяции, равным 500, и с числом индивидов за итерацию, равным также 500.

Были использованы следующие критерии для оптимизации асимметричного раскалывания стекла: $V \rightarrow \max$, $\sigma_1 \rightarrow \max$ и при $T \leq 789$ К. При этом геометрические параметры лазерно-индуцированной трещины s и h равнялись соответственно 0,0006 м и 0,00025 м.

В табл. 5 представлены результаты проведённой оптимизации (значения параметров, полученные при помощи конечно-элементного расчёта, приведены в скобках). Применение генетического алгоритма обеспечило максимальную относительную погрешность результатов, не превышающую 9% при определении температур и 12% при определении термоупругих напряжений. Относительная погрешность определения значений геометрических параметров наклонных трещин не превысила 20%, при этом для более точной количествен-

ной оценки этих параметров необходимо выполнить моделирование процесса формирования наклонной трещины в рамках линейной механики разрушений [9].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненная в работе численная оптимизация технологических параметров двухлучевой лазерной обработки изделий из силикатного стекла показывает возможность использования нейросетевых моделей и моделей, созданных с использованием метода непараметрической регрессии, для подбора оптимальных технологических режимов нанесения наклонных трещин с заданными параметрами. При этом реализация оптимизации с использованием генетического алгоритма обеспечивает возможность увеличения эффективности процесса создания скруглённых кромок при двухлучевом асимметричном лазерном раскалывании стеклоизделий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Lumley R.M. Controlled separation of brittle materials using a laser // Am. Ceram. Soc. Bull. 1969. V. 48. P. 850–854.
2. Мачулка Г.А. Лазерная обработка стекла. М.: Сов. радио, 1979. 136 с.
3. Kondratenko V.S. Method of splitting non-metallic materials // Pat. US № 5609284. 1997.
4. Nisar S., Li L., Sheikh M. Laser glass cutting techniques — a review // Journal of Laser Applications. 2013. V. 25. № 4. P. 042010-1–042010-11. <https://doi.org/10.2351/1.4807895>
5. Кондратенко В.С., Наумов А.С. Способ притупления острых кромок изделий // Пат. РФ № 2426700. 2009.
6. Никитиuk Ю.В., Сердюков А.Н., Аушев И.Ю. Оптимизация двухлучевого лазерного раскалывания силикатного стекла // Оптический журнал. 2022. Т. 89. № 2. С. 80–86. <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2022-89-02-80-86>
7. Junke J., Xinbing W. Cutting glass substrates with dual-laser beams // Optics and Lasers in Engineering. 2009. V. 47. № 7–9. P. 860–864. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2008.12.009>
8. Сысоев В.К., Вятлев П.А., Чирков А.В. и др. Концепция двухлазерного термораскалывания стеклянных

REFERENCES

1. Lumley R.M. Controlled separation of brittle materials using a laser // Am. Ceram. Soc. Bull. 1969. V. 48. P. 850–854.
2. Machulka G.A. Laser processing of glass. M.: Sov. radio, 1979. 136 p.
3. Kondratenko V.S. Method of splitting non-metallic materials // Pat. US № 5609284. 1997.
4. Nisar S., Li L., Sheikh M. Laser glass cutting techniques — a review // Journal of Laser Applications. 2013. V. 25. № 4. P. 042010-1–042010-11. <https://doi.org/10.2351/1.4807895>
5. Kondratenko V.S., Naumov A.S. The method of blunting the sharp edges of products // Pat. RF No. 2426700. 2009.
6. Nikityuk Yu.V., Serdyukov A.N., Aushev I.Yu. Optimization of two-beam laser cleavage of silicate glass // Journal of Optical Technology. 2022. V. 89. № 2. P. 121–125. <https://doi.org/10.1364/JOT.89.000121>
7. Junke J., Xinbing W. Cutting glass substrates with dual-laser beams // Optics and Lasers in Engineering. 2009. V. 47. Iss. 7–9. P. 860–864. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2008.12.009>
8. Sysoev V.K., Vyatlev P.A., Chirkov A.V. et al. Concept of two-laser thermal splitting of glass elements for space

- элементов для космических аппаратов // Вестник «ФГУП НПО им. С.А. Лавочкина». 2011. № 1. С. 38–44.
9. Zhao C., Zhang H., Yang L., Wang Y., Ding Y. Dual laser beam revising the separation path technology of laser induced thermal-crack propagation for asymmetric linear cutting glass // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2016. V. 106. P. 43–55. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2016.04.005>.
10. Сердюков А.Н., Шалупаев С.В., Никитюк Ю.В., Середа А.А. Моделирование процесса двулучевого асимметричного термораскалывания хрупких неметаллических материалов // Известия Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины. 2011. № 6 (69). С. 124–127.
11. Агалаков Ю.Г., Бернштейн А.В. Сокращение размерности данных в задачах имитационного моделирования // Информационные технологии и вычислительные системы. 2012. № 3. С. 3–17.
12. Koziel S., Leifsson L. Surrogate-based modeling and optimization. Applications in engineering. New York: Springer, 2013. 412 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7551-4>
13. Jiang P., Zhou Q., Shao X. Surrogate model-based engineering design and optimization. Singapore: Springer, 2020. 240 p. <https://doi.org/10.1007/978-981-15-0731-1>
14. Kadri M.B., Nisar S., Khan S.Z., Khan W.A. Comparison of ANN and finite element model for the prediction of thermal stresses in diode laser cutting of float glass // Optik — International Journal for Light and Electron Optics. 2015. V. 126. № 19. P. 1959–1964. <http://doi.org/10.1016%2Fj.ijleo.2015.05.033>
15. Nikitjuk Y.V., Serdyukov A.N., Aushev I.Y. Determination of the parameters of two-beam laser splitting of silicate glasses using regression and neural network models // Journal of the Belarusian State University. Physics. 2022. V. 1 P. 35–43. <https://doi.org/10.33581/2520-2243-2022-1-35-43>
16. Головко В.А., Краснопропин В.В. Нейросетевые технологии обработки данных: Учеб. пособие. Минск: БГУ, 2017. 263 с.
17. Chollet F. Deep Learning with Python. N.Y.: Manning, 2018. 400 p.
18. Бессмельцев В.П., Булушев Е.Д. Оптимизация режимов лазерной микрообработки // Автометрия. 2014. Т. 50. № 6. С. 3–21.
19. Parandoush P., Hossain A. A review of modeling and simulation of laser beam machining // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2014. V. 85. P. 135–145. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2014.05.008>
20. Емельянов В.В., Курейчик В.В., Курейчик В.М. Теория и практика эволюционного моделирования. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 432 с.
21. Красновская С.В., Напрасников В.В. Обзор возможностей оптимизационных алгоритмов при моделировании конструкций компрессорно-конденсаторных агрегатов методом конечных элементов // Вестн Нацыянальной акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. 2016. № 2. С. 92–98.
22. Fonsecay C., Flemingz P. Genetic algorithms for multiobjective optimization: Formulation discussion and generalization // In Proceedings of The 5th International Conference on Genetic Algorithms. CA, USA. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1993. P. 416–423.
23. ANSYS [Электронный ресурс] / Официальный сайт компании ANSYS. Режим доступа: <https://www.ansys.com/> (дата обращения 21.11.2022)
- vehicles // Bulletin “FSUE NPO im. S.A. Lavochkin». 2011. № 1. P. 38–44.
9. Zhao C., Zhang H., Yang L., Wang Y., Ding Y. Dual laser beam revising the separation path technology of laser induced thermal-crack propagation for asymmetric linear cutting glass // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2016. V. 106. P. 43–55. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2016.04.005>.
10. Serdyukov A.N., Shalupaev S.V., Nikityuk Yu.V., Sereda A.A. Simulation of the process of two-beam asymmetric thermal splitting of brittle non-metallic materials // Izvestiya of the Francisk Skoryna Gomel State University. 2011. № 6 (69). P. 124–127.
11. Agalakov Yu.G., Bernstein A.V. Data dimension reduction in simulation modeling problems // Information Technologies and Computing Systems. 2012. № 3. P. 3–17.
12. Koziel S., Leifsson L. Surrogate-based modeling and optimization. Applications in engineering. New York: Springer, 2013. 412 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7551-4>
13. Jiang P., Zhou Q., Shao X. Surrogate model-based engineering design and optimization. Singapore: Springer, 2020. 240 p. <https://doi.org/10.1007/978-981-15-0731-1>
14. Kadri M.B., Nisar S., Khan S.Z., Khan W.A. Comparison of ANN and finite element model for the prediction of thermal stresses in diode laser cutting of float glass // Optik — International Journal for Light and Electron Optics. 2015. V. 126. № 19. P. 1959–1964. <http://doi.org/10.1016%2Fj.ijleo.2015.05.033>
15. Nikitjuk Y.V., Serdyukov A.N., Aushev I.Y. Determination of the parameters of two-beam laser splitting of silicate glasses using regression and neural network models // Journal of the Belarusian State University. Physics. 2022. V. 1 P. 35–43. <https://doi.org/10.33581/2520-2243-2022-1-35-43>
16. Golovko V.A., Krasnoproshin V.V. Neural network technologies for data processing: Proc. allowance. Minsk: BGU, 2017. 263 p.
17. Chollet F. Deep Learning with Python. N.Y.: Manning, 2018. 400 p.
18. Bessmeltsev V.P., Bulushev E.D. Optimization of laser micromachining modes // Avtometriya. 2014. V. 50. № 6. P. 3–21.
19. Parandoush P., Hossain A. A review of modeling and simulation of laser beam machining // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2014. V. 85. P. 135–145. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2014.05.008>
20. Emelyanov V.V., Kureichik V.V., Kureichik V.M. Theory and practice of evolutionary modeling. M.: FIZMATLIT, 2003. 432 p.
21. Krasnovskaya S.V., Naprasnikov V.V. A review of the possibilities of optimization algorithms in modeling the structures of compressor-condensing units by the finite element method // Vesti National Academy of Sciences of Belarus. Physics and technical sciences series. 2016. № 2. P. 92–98.
22. Fonsecay C., Flemingz P. Genetic algorithms for multiobjective optimization: Formulation discussion and generalization // In Proceedings of The 5th International Conference on Genetic Algorithms. CA, USA. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1993. P. 416–423.
23. ANSYS [Electronic resource] / Official site of the ANSYS company. Access mode: <https://www.ansys.com/> (accessed 11/21/2022)

24. Моргунов А. П., Ревина И. В. Планирование и анализ результатов эксперимента. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2014. 343 с.
25. Santner T.J., Williams B.J., Notz W.I. The design and analysis of computer experiments. NY: Springer New York, 2003. 285 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-3799-8>.
24. Morgunov A.P., Revina I.V. Planning and analysis of experimental results. Omsk: Publishing House of OmGTU, 2014. 343 p.
25. Santner T.J., Williams B.J., Notz W.I. The design and analysis of computer experiments. NY: Springer New York, 2003. 285 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-3799-8>.

АВТОРЫ

Юрий Валерьевич Никитюк — канд. физ.-мат. наук, доцент, проректор по учебной работе, Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины, 246028, Гомель, Республика Беларусь; Scopus ID: 6507883018, <https://orcid.org/0000-0002-4405-644X>, nikitjuk@gsu.by

Андрей Александрович Середа — старший преподаватель кафедры радиофизики и электроники, Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины, 246028, Гомель, Республика Беларусь; Scopus ID: 56627619800, <https://orcid.org/0000-0001-9718-2311>, sereda@gsu.by

Анатолий Николаевич Сердюков — доктор физ.-мат. наук, профессор, профессор кафедры оптики, Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины, 246028, Гомель, Республика Беларусь; Scopus ID: 6701524916, <https://orcid.org/0000-0002-8068-4224>, serdyukov@gsu.by

Сергей Викентьевич Шалупаев — канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент кафедры общей физики, Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины, 246028, Гомель, Республика Беларусь; Scopus ID: 6506498665, <https://orcid.org/0000-0002-7413-4605>, shalupaev@gsu.by

Игорь Юрьевич Аушев — канд. техн. наук, доцент, профессор кафедры промышленной безопасности, Университет гражданской защиты МЧС Республики Беларусь, 220118, Минск, Республика Беларусь; Scopus ID: 57614157700, <https://orcid.org/0000-0003-4425-2085>, ai@ucp.by

Статья поступила в редакцию 28.11.2022
Одобрена после рецензирования 01.03.2023
Принята к печати 27.04.2023

AUTHORS

Yuri V. Nikitjuk — PhD in Physics and Mathematics, docent, Vice-Rector for Academic Affairs, Francisk Skorina Gomel State University, 246028, Gomel, Republic of Belarus; Scopus ID: 6507883018, <https://orcid.org/0000-0002-4405-644X>, nikitjuk@gsu.by

Andrei A. Sereda — Senior Lecturer, Department of Radiophysics and Electronics, Francisk Skorina Gomel State University, 246028, Gomel, Republic of Belarus; Scopus ID: 56627619800, <https://orcid.org/0000-0001-9718-2311>, sereda@gsu.by

Anatoly N. Serdyukov — Dr.Sc. in Physics and Mathematics, Professor, Professor of the Department of Optics, Francisk Skorina Gomel State University, 246028, Gomel, Republic of Belarus; Scopus ID: 6701524916, <https://orcid.org/0000-0002-8068-4224>, serdyukov@gsu.by

Sergey V. Shalupaev — PhD in Physics and Mathematics, Docent, Associate Professor of the Department of General Physics, Francisk Skorina Gomel State University, 246028, Gomel, Republic of Belarus; Scopus ID: 6506498665, <https://orcid.org/0000-0002-7413-4605>, shalupaev@gsu.by

Igor Yu. Aushev — Phd in Technical Science, Docent, Professor of the Department of Industrial Safety, University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus, 220118, Minsk, Republic of Belarus; Scopus ID: 57614157700, <https://orcid.org/0000-0003-4425-2085>, ai@ucp.by

The article was submitted to the editorial office 28.11.2022
Approved after review 01.03.2023
Accepted for publication 27.04.2023