

Определение параметров лазерного раскалывания кристаллического кварца с использованием нейро-нечетких сетей

Ю. В. Никитюк¹, Л. Н. Марченко^{1,2}, Х. Чжан³, А. Чжан³

¹Гомельский государственный университет им. Франциска Скорины, г. Гомель, Беларусь,

²Научно-образовательный математический центр «Северо-Западный центр математических исследований имени Софьи Ковалевской» Псковского государственного университета, г. Псков, Россия,

³Нанкинский университет науки и технологий, г. Нанкин, Китайская Народная Республика, nikitjuk@gsu.by, lmarchenko@gsu.by

Аннотация. Работа посвящена построению нейро-нечеткой модели ANFIS лазерного раскалывания кристаллического кварца. Температуры и термоупругие напряжения рассчитывались на языке программирования APDL. Определение термоупругих полей, формируемых в монокристаллической кварцевой пластине в результате последовательного лазерного нагрева и воздействия хладагента, осуществлялся для трех различных вариантов: I – анализ среза z_0 при перемещении лазерного пучка в направлении оси X ; II – анализ среза yx при перемещении лазерного пучка в направлении оси X ; III – анализ среза xz при перемещении лазерного пучка в направлении оси Z . В модуле DesignXplorer программы ANSYS с использованием границентрированного варианта центрального композиционного плана численного эксперимента был получен набор данных для создания модели ANFIS. В качестве входных параметров рассматривались скорость обработки, геометрические параметры эллиптического лазерного пучка, мощность CO_2 -лазера и толщина кварцевой пластины, выходных – температуры и термоупругие напряжения. Эффективность модели определялась на основе статистических метрик. Показано, что предложенная модель обладает удовлетворительной точностью.

I. Введение

В настоящее время возрастают требования к точности и качеству обработки хрупких неметаллических материалов, в том числе различных кристаллов, что в свою очередь определяет важность моделирования процессов лазерного раскалывания кристаллического кварца. Одним из эффективных способов обработки хрупких материалов является лазерное раскалывание. Эта технология основана на создании локальных термоупругих напряжений в материале за счет комбинированного воздействия лазерного излучения и охлаждающей среды. При этом отмечается высокая точность резки, минимальное повреждение материала, а также высокая производительность [1-2].

Использование методов искусственного интеллекта в настоящее время является эффективным инструментом для изучения процессов лазерной обработки материалов и улучшения управления такими процессами с целью достижения высокого качества обработки. Искусственные нейронные сети, а также нечеткие системы успешно применяются для исследования процессов лазерной обработки, в том числе лазерного раскалывания кристаллического кварца [3-7].

Целью настоящего исследования является построение нейро-нечеткой модели ANFIS лазерного раскалывания кристаллического кварца для изучения параметров обработки на максимальную температуру и максимальное напряжение растяжения, формируемые в зоне обработки.

II. Основная часть

Для построения нейро-нечеткой модели ANFIS использовались результаты численного эксперимента, реализованного на языке программирования APDL. Моделирование температурных полей и термоупругих напряжений, возникающих в процессе лазерного раскалывания кристаллического кварца, проводилось в квазистатической постановке с

использованием несвязанной задачи термоупругости. Исследования выполнялись на квадратных пластинах с размерами 20×20 мм, при этом толщина образцов варьировалась в диапазоне от 0,5 до 2 мм. Моделирование осуществлялось для условий воздействия лазерного излучения с длиной волны 10,6 мкм. В эксперименте применялись стандартные начальные ориентации кристаллических образцов квадратной формы [7].

Определение термоупругих полей, формируемых в монокристаллической кварцевой пластине, в результате последовательного лазерного нагрева и воздействия хладагента осуществлялось для трех различных вариантов: I – анализ среза zy при перемещении лазерного пучка в направлении оси X; II – анализ среза yx при перемещении лазерного пучка в направлении оси X; III – анализ среза xz при перемещении лазерного пучка в направлении оси Z. Численный эксперимент в модуле DesignXplorer программы ANSYS предполагал формирование центрального композиционного плана. Влияющими параметрами были: P1 – скорость обработки (V), P2 и P3 – большая полуось (A) и малая полуось (B) эллиптического лазерного пучка соответственно, P4 – мощность (P) CO₂-лазера, P5 – толщина кварцевой пластины (H). В соответствии с планом численного эксперимента расчеты выполнялись для 27 комбинаций параметров, для которых были определены значения максимальных температур T1, T2, T3 соответственно для трех вариантов обработки квадратной кварцевой пластины, описанных выше, и трех соответствующих значений максимальных напряжений растяжения S1, S2, S3, действующих перпендикулярно фронту лазерно-индуцированных трещин. Далее проводилось построение нейро-нечеткой системы ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System), представляющей собой гибридную систему, сочетающую нейронные сети и нечеткую логику, которая широко применяется для моделирования сложных систем и прогнозирования. Оптимизация и обучение функций принадлежности выполняется согласно алгоритмам построения искусственных нейронных сетей [8].

Для прогнозирования максимальных температур (T1, T2, T3) и максимальных напряжений растяжения (S1, S2, S3) в зависимости от параметров обработки разработана нейро-нечеткая система вывода на основе лингвистических переменных входных параметров. На слое фазификации четкие входные параметры преобразовывались в нечеткие с использованием соответствующих функций принадлежности. При моделировании рассматривались правила Сугено if-then с линейными функциями вывода. Обучение нейро-нечеткой модели ANFIS проводилось на наборе данных, полученных в результате численного эксперимента. Для обучения сети использовался гибридный метод обучения – комбинация метода градиентного спуска и метода наименьших квадратов.

Для оценки полученных нейро-нечетких моделей были использованы следующие критерии: коэффициент детерминации R^2 , средняя абсолютная ошибка (англ. Mean Absolute Error, MAE), средняя квадратичная ошибка (англ. Root Mean Square Error, RMSE), средняя абсолютная процентная ошибка (англ. Mean Absolute Percentage Error, MAPE).

В таблице 1 представлены значения статистических метрик нейро-нечеткой модели ANFIS для выходных параметров максимальных температур (T1, T2, T3) и максимальных напряжений растяжения (S1, S2, S3). Построенная модель обладает удовлетворительной точностью в сравнении с моделями нейронных сетей, рассматриваемыми в [7].

Таблица 1. Результаты оценки

	T1	T2	T3	S1	S2	S3
<i>RMSE</i>	66 К	53 К	66 К	9.9E+06 Па	1.1E+07 Па	8.3E+06 Па
<i>MAE</i>	60 К	49 К	60 К	7.9E+06 Па	9.3E+06 Па	7.3E+06 Па
<i>MAPE</i>	7.2 %	5.9 %	7.0 %	11.2%	10.3%	11.3%
R^2	0.9490	0.9601	0.9522	0.7808	0.9222	0.8553

Нейро-нечеткая модель ANFIS формирует достаточно гладкую поверхность, которая показывает высокую точность моделирования. Например, трехмерный график разработанной нейро-нечеткой модели ANFIS зависимости максимальной температуры (T1 = output, К) от скорости обработки (V = input2, м/с) и мощности CO₂-лазера (P = input4, Вт), представлены на

рисунке 1. Имеет место гладкая нелинейная зависимость, характеризующая влияние скорости обработки и мощности CO₂-лазера на максимальную температуру T₁.

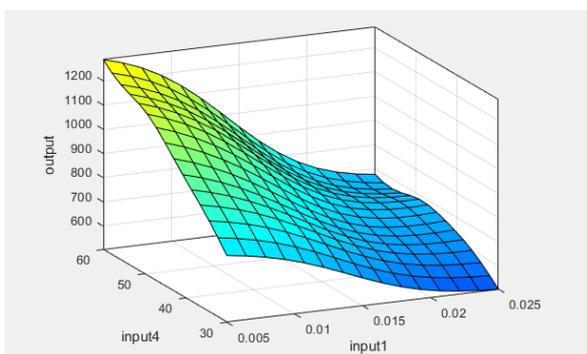


Рис. 1. Трехмерный сетчатый график разработанной нейро-нечеткой модели ANFIS зависимости максимальной температуры ($T_1 = \text{output}$, К) от скорости обработки ($V = \text{input2}$, м/с) и мощности CO₂-лазера ($P = \text{input4}$, Вт)

Полученные результаты позволяют сделать вывод о наличии необходимого соответствия нейро-нечеткой модели ANFIS результатам конечно-элементного анализа. Результаты моделирования лазерной обработки алмазов с использованием искусственных нейронных сетей, представленные в работе [12], оказались несколько лучше результатов моделирования с применением нейро-нечеткой модели ANFIS, однако для формирования нейросетевых моделей потребовалась на порядок большая обучающая выборка.

III. Заключение

В результате выполненных исследований показана возможность определения режимов лазерного раскалывания кристаллического кварца на основе сочетания метода конечных элементов и нейро-нечеткой модели ANFIS, которые дают достаточную эффективность.

Литература

- [1] V. Kondratenko, S. Kudzh, "Precision Cutting of Glass and Other Brittle Materials by Laser-Controlled Thermo-Splitting", *Glass and ceramics*, no. 74, 2017, pp.75-81.
- [2] *Laser cleaving of brittle non-metallic materials*, Yu. V. Nikityuk, A. A. Sereda, A. N. Serdyukov, Francisk Skorina Gomel State University, Gomel: Francisk Skorina Gomel State University, 2025, 217p.
- [3] Prashant P Kharche and Vijay H Patil, "Systematic review of optimization techniques for laser beam machining." *Engineering Research Express*, Vol 6, № 2, 2024.
- [4] Y. Nikityuk, A. Serdyukov, I. Aushev, "Optimization of two-beam laser cleavage of silicate glass", *Journal of Optical Technology*, Vol. 89, №. 2, 2022, pp.121-125.
- [5] Y. Nikitjuk, A. Serdyukov. Determination of the Parameters of Controlled Laser Thermal Cleavage of Crystalline Silicon Using Regression and Neural Network Models. *Crystallogr. Rep.* 68, 2023, pp.1199-1204. <https://doi.org/10.1134/S106377452360067>
- [6] N. Zhao, H. Zhang, J. Lu, M. Tang, H. Zhang, "Photoelasticity-based stress field analysis of glass under 1064 nm laser irradiation", *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 181, 2024, 108367.
- [7] Ю.В. Никитюк, Л. Н. Марченко, А. Ф. Васильев, Ю.В. Бруттан., "Разработка нейросетевых моделей для прогнозирования параметров управляемого лазерного раскалывания кристаллического кварца". Проблемы взаимодействия излучения с веществом: VI Международная научная конференция, посвящ. акад. Б. В. Бокуню, 2025, С. 220-225
- [8] С. Д. Штовба. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. Москва, Горячая линия, 2007, 284с.