

Определение параметров двухлучевого лазерного раскалывания силикатных стекол с использованием нейро-нечетких сетей

Ю. В. Никитюк¹, А. Ф. Васильев¹, Л. Н. Марченко^{1,2}, А. В. Семченко¹, Д. Л. Коваленко¹

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

²«Северо-Западный центр математических исследований им. С. Ковалевской»

Псковского государственного университета, г. Псков, Россия,

nikitjuk@gsu.by

Аннотация. В работе выполнено моделирование двухлучевого лазерного раскалывания силикатных стёкол с использованием нейро-нечетких сетей ANFIS. Расчёт температур и термоупругих напряжений выполнялся с использованием языка программирования APDL. В модуле DesignXplorer программы ANSYS с использованием границентрированного варианта центрального композиционного плана численного эксперимента был получен набор данных для создания гибридной сети. В качестве варьируемых факторов использовались скорость обработки, мощность лазера с длиной волны излучения 10,6 мкм, радиус пятна излучения пучка с длиной волны излучения 10,6 мкм, мощность лазера с длиной волны излучения 1,06 мкм, радиус пятна излучения пучка с длиной волны излучения 1,06 мкм. В качестве откликов использовались максимальные температуры и напряжения растяжения в зоне лазерной обработки. Проведена проверка модели на тестовом наборе данных. Выполнено сравнение результатов определения максимальных температур и термоупругих напряжений в зоне лазерной обработки с использованием регрессионных моделей и нечетких нейросетевых моделей.

I. Введение

Лазерное раскалывание является одним из эффективных способов резки силикатных стекол, который реализуется в результате формирования лазерно-индуцированных трещин при последовательном лазерном нагреве и воздействии хладагента на обрабатываемую поверхность [1]. При этом применение двухлучевых вариантов обработки в ряде случаев обеспечивает повышение эффективности данной технологии [2-5].

Искусственные нейронные сети обеспечивают возможность эффективного моделирования сложных взаимосвязей между входами и выходами системы. В настоящее время искусственные нейронные сети успешно применяются для моделирования процессов лазерной обработки материалов методами лазерного раскалывания [7-8]. Нечеткая логика является средством отображения неопределенностей реального мира, близким к человеческому мышлению и естественным языкам. Средствами теории нечетких множеств можно отразить произвольную взаимосвязь «вход - выход» без использования сложного математического аппарата, при этом нечеткое моделирование наиболее эффективно, когда исследуемые процессы сложны для анализа с помощью традиционных методов [9-10].

Нейросетевые модели могут быть чрезмерно требовательны к данным, особенно к объему и качеству обучающей выборки. Одним из основных недостатков нечетких моделей является то, что процесс определения нечетких правил зависит от экспертного знания или опыта. Это может привести к субъективным оценкам и неоднозначным результатам. Этот недостаток нечетких моделей может быть устранен путем интеграции искусственных нейронных сетей в систему нечеткого вывода. Основная идея заключается в том, что нечеткая логика используется для моделирования нечетких или неопределенных величин, а нейронные сети используются для обучения системы на основе имеющихся данных. Данный подход обеспечивает возможность обучения таких систем без привлечения экспертов. Таким образом, гибридные сети позволяют сочетать преимущества обеих парадигм, при этом совместное применение обоих подходов позволяет преодолевать основные ограничения каждого из них [10]. Система ANFIS является примером эффективной реализации нейро-нечеткого подхода, в котором параметры функций

принадлежности настраиваются методом обратного распространения ошибки, а вывод результатов осуществляется с применением нечеткой логики. В данной работе с использованием нейро-нечетких сетей ANFIS выполнено моделирование двухлучевого лазерного раскалывания силикатных стёкол.

II. Определение параметров двухлучевого лазерного раскалывания силикатных стекол

Для определения поля температур и термоупругих напряжений в квазистатической постановке в рамках несвязанной задачи термоупругости, формируемых при двухлучевом раскалывании, была подготовлена программа на APDL. На рисунке 1 позиция 1 соответствует лазерному пучку с длиной волны 10,6 мкм, позиция 2 – лазерному пучку с длиной волны 1,06 мкм, позиция 3 – хладагенту.

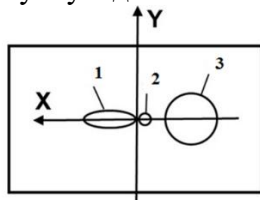


Рис. 1. Схема взаимного расположения зон воздействия лазерных пучков и хладагента

В модуле DesignXplorer был сформирован границентрированный вариант центрального композиционного плана численного эксперимента для пяти факторов (P1–P5): P1 – скорость обработки V, P2 – мощность лазера P с длиной волны излучения 10,6 мкм, P3 – радиус пятна излучения пучка R с длиной волны излучения 10,6 мкм, P4 – мощность лазера P₀ с длиной волны излучения 1,06 мкм, P5 – радиус пятна излучения пучка R₀ с длиной волны излучения 1,06 мкм. В соответствии с планом эксперимента выполнялись расчёты для 27 комбинаций входных параметров. При этом определялись следующие выходные параметры: максимальная температура T и максимальные напряжения растяжения σ_{yy} в зоне лазерной обработки [3].

Обучение нейро-нечеткой системы ANFIS проводилось на наборе данных, полученных в результате численного эксперимента в течение 20 эпох. Диаграммы, показывающие зависимость максимальной температуры и максимальных напряжений растяжения σ_{yy} от параметров обработки, полученных с использованием гибридной интеллектуальной системы ANFIS, представлены на рисунках 2-3.

Тестовая выборка была сформирована при решении соответствующих задач методом конечных элементов в программе ANSYS [3]. 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). Получены следующие оценки нейро-нечеткой модели, используемой для определения максимальных температур: RMSE=19,3K, MAE=13,6 K, MAPE=2,4%, $R^2=0,9882$. Значения критериев нейро-нечеткой модели, используемой для определения максимального напряжения растяжения σ_{yy} в зоне лазерной обработки, равны: RMSE=1,9 МПа, MAE=1,6 МПа, MAPE=4,6%, $R^2=0,9695$. Полученные данные позволяют сделать вывод о наличии необходимого соответствия нейро-нечеткой модели результатам конечно-элементного анализа.

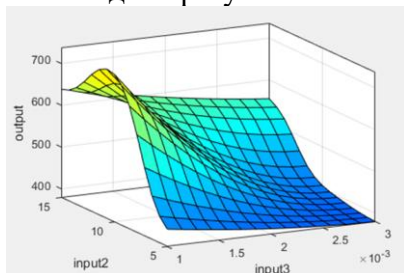


Рис. 2. Зависимость максимальной температуры T(K) от параметров обработки input2 = P(Вт) и input3 = R(м)

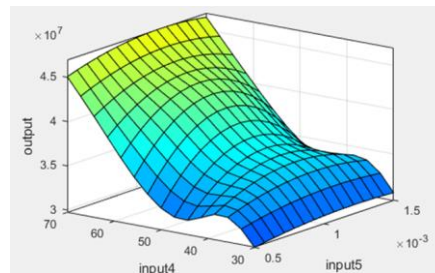


Рис. 3. Зависимость максимальных напряжений σ_{yy} (МПа) от параметров обработки input4 = P₀(Вт) и input5 = R₀(м)

При этом результаты нейро-нечеткой сети, обученной на наборе параметров центрально-композиционного плана, оказались лучше результатов регрессионных моделей двухлучевого лазерного раскалывания, представленных в работе [3]. Таким образом, можно сделать вывод о том, что использование нейро-нечетких моделей предпочтительно при прогнозировании параметров лазерной резки силикатных стекол методом двухлучевого лазерного раскалывания.

III. Заключение

В результате выполненных исследований показана возможность определения режимов лазерного двухлучевого раскалывания силикатных стекол на основе сочетания метода конечных элементов и нейро-нечетких моделей. Показана более высокая эффективность нейро-нечетких моделей при прогнозировании параметров двухлучевого лазерного раскалывания стекол по сравнению с регрессионными моделями.

Литература

- [1] V. S. Kondratenko, S. A. Kudzh, "Precision Cutting of Glass and Other Brittle Materials by Laser-Controlled Thermo-Splitting", *Glass and ceramics*, no. 74, 2017, pp. 75–81.
- [2] S. V. Shalupaev, E. B. Shershnev, Y. V. Nikityuk, A. A. Sereda, "Two-beam laser thermal cleavage of brittle nonmetallic materials", *Journal of Optical Technology*, Vol. 73, No. 5, 2006, pp. 356–359.
- [3] Y. V. Nikityuk, A. N. Serdyukov, I. Y. Aushev, "Optimization of two-beam laser cleavage of silicate glass", *Journal of Optical Technology*, Vol. 89, № 2, 2022, pp. 121–125
- [4] Y. Nikitjuk, A. Sereda, A. Serdyukov, S. Shalupaev, I. Aushev, "Parametric optimization of silicate-glass-based asymmetric two-beam laser splitting", *Journal of Optical Technology*, Vol. 90, № 6, 2023, pp. 296–301.
- [5] J. Junke, W. Xinbing, "Cutting glass substrates with dual-laser beams", *Optics and Lasers in Engineering*, V. 47. 2009. pp. 860–864
- [6] Y. Nikitjuk, A. Serdyukov, "Determination of the Parameters of Controlled Laser Thermal Cleavage of Crystalline Silicon Using Regression and Neural Network Models", *Crystallography Reports*, Vol. 68, № 7, 2023, pp. 195–200.
- [7] M. B. Kadri, S. Nisar, S. Z. Khan, W. A. Khan, "Comparison of ANN and finite element model for the prediction of thermal stresses in diode laser cutting of float glass", *Optik – Int. J. Light Electron Optics*. Vol 126. No 19, 2015, pp. 1959–1964.
- [8] Y. V. Nikitjuk, A. N. Serdyukov, I. Y. Aushev, "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*, T.1, 2022, pp. 35–43.
- [9] G. Klir, B. Yuan. Fuzzy sets and fuzzy logic. New Jersey: Prentice hall, 1995, 574 p.
- [10] С. Д. Шмоуба. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. Москва, Горячая линия, 2007, 284 с.