

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРАБОТКИ СТАЛИ 30ХГСН2А ЛАЗЕРНЫМИ КОЛЬЦЕВЫМИ ПУЧКАМИ С ПОМОЩЬЮ СОЧЕТАНИЯ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

¹Никитюк Ю. В., ¹Баевич Г. А., ¹Мышковец В. Н.,

¹Максименко А. В., ²Аушев И. Ю.

*¹Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины, Гомель,
Беларусь, Nikitjuk@gsu.by*

*²Университет гражданской защиты МЧС Республики Беларусь,
Минск, Беларусь, ai@iscr.by*

Во многих отраслях промышленности используются лазерная сварка, наплавка и термообработка материалов. Применение технологий лазерной обработки наиболее эффективно при реализации задач, которые неосуществимы с помощью других источников энергии [1]. Одним из таких направлений является обработка материалов лазерными пучками кольцевого сечения, при этом в ряде случаев применение таких пучков повышает эффективность процесса лазерной обработки [2–7].

Одной из основных характеристик лазерной обработки является температурное поле в материале. Определение значений температур в материале обеспечивает возможность определения эффективных технологических режимов обработки. Аналитические решения для случая кольцевых пучков приведены в работах [7–8]. Результаты, приведенные в этих работах, были получены при решении уравнения теплопроводности, в котором не учитывалась зависимость теплофизических коэффициентов от температуры, что может привести к значительным погрешностям при определении параметров обработки.

В настоящее время для моделирования процессов лазерной обработки широко используются такие программные комплексы конечно-элементного анализа, как ANSYS [9–13]. Успешно используются для моделирования процессов лазерной обработки искусственные нейронные сети [14]. Нейронные сети являются эффективным инструментом моделирования, который успешно применяется в исследованиях лазерной сварки [15–16], лазерной резки [17–18] и лазерной поверхностной обработки [19]. В ряде случаев используется сочета-

ние искусственных нейронных сетей и метода конечных элементов при моделировании процессов лазерной обработки [20–23].

В работе [24] с помощью искусственных нейронных сетей и метода конечных элементов был выполнен расчет температурных полей, формируемых на разной глубине при лазерной обработке стали 30ХГСН2А круглыми лазерными пучками. В данной работе выполнены аналогичные расчеты температурных полей, формируемых при лазерной обработке стали 30ХГСН2А лазерными пучками кольцевого сечения. Обучающий массив данных и набор данных для тестирования нейронных сетей были подготовлены в программном комплексе ANSYS.

Моделирование проводилось для пластины с геометрическими размерами $2 \times 3 \times 0,6$ мм. На рисунке 1 приведено расположение кольцевого лазерного пучка с внешним диаметром 200 мкм и внутренним диаметром 100 мкм в плоскости обработки. Для моделирования была создана конечно-элементная модель, состоящая из 2497 элементов Solid 90 и 11762 узлов, при этом элементы в области воздействия лазерного пучка имели геометрические размеры $0,1 \times 0,1 \times 0,1$ мм.

При моделировании были учтены зависимости теплофизических свойств стали 30ХГСН2А от температуры. Зависимость теплового потока от времени задавалась в виде импульсов прямоугольной формы [12]. При конечно-элементном моделировании длительность импульсов лазерного излучения t изменялась от 1 до 10 мс, плотность мощности лазерного излучения P_0 – от 10^8 до 10^9 Вт/м². Расчеты были выполнены для 100 вариантов входных параметров, 90 из которых были использованы для обучения нейронной сети.

На рисунке 2 представлено распределение температурных полей в образце из стали 30ХГСН2А при обработке лазерным пучком кольцевого сечения.

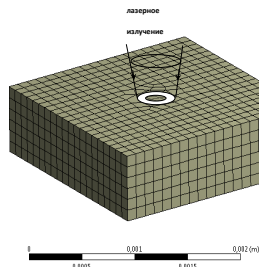


Рисунок 1 – Конечно-элементная модель

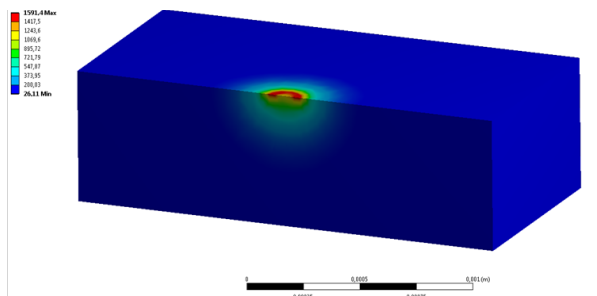


Рисунок 2 – Распределение температурных полей, °С

Входные параметры и результаты расчетов тестовой выборки представлены в таблице 1. T1, T2, T3 – значения температур на поверхности образца на глубине 250 мкм и 500 мкм соответственно.

Для определения значений температур при лазерной сварке были использованы полносвязанные нейронные сети с архитектурой, представленной на рисунке 3. Сети формировались в программной библиотеке для машинного обучения TensorFlow [25]. При создании сетей использовалась функция активации ReLu (Rectified Linear Unit), оптимизатор Adam, являющийся расширением алгоритма стохастического градиентного спуска.

Таблица 1 – Тестовый набор данных

N	$P_0, 10^8$ Вт/м ²	t, мс	T1, °С	T2, °С	T3, °С
1	6	1	977	641	408
2	1	5	205	153	116
3	6	10	1405	991	696
4	9	3	2002	1331	862
5	8	9	2105	1437	965
6	1	10	214	162	124
7	7	9	1720	1193	820
8	4	9	856	617	445
9	1	3	197	145	108
10	4	3	767	538	375

Для оценки эффективности работы нейронных сетей были использованы следующие критерии:
коэффициент детерминации

$$R^2 = 1 - \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (d_i - y_i)^2}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2},$$

средняя абсолютная ошибка (англ. Mean Absolute Error, MAE)

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |d_i - y_i|,$$

среднеквадратичная 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 – желаемый выход сети, y_i – реальный выход сети.

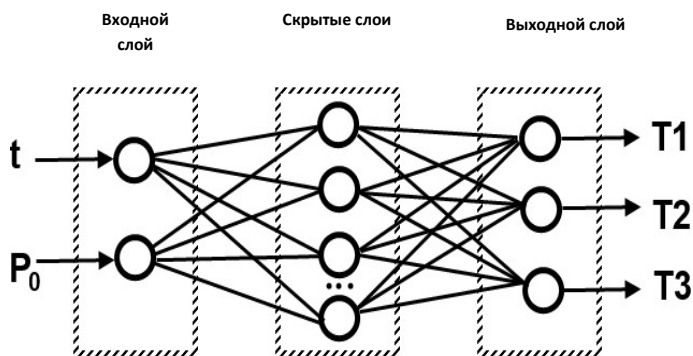


Рисунок 3 – Архитектура нейронной сети

Результаты тестирования созданных нейронных сетей приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты тестирования нейронных сетей

N	Архитектура сети	R ²	MAE	RMSE	MAPE
1	[2-2-3]	0,94142	99	122	39,6
2	[2-4-3]	0,99118	38	57	6,7
3	[2-6-3]	0,99348	30	40	4,2
4	[2-8-3]	0,99460	29	34	7,5
5	[2-10-3]	0,99682	21	25	5,4
6	[2-12-3]	0,99660	24	32	6,3
7	[2-10-2-3]	0,99419	29	48	3,6
8	[2-10-4-3]	0,99439	27	38	5,0
9	[2-10-6-3]	0,99856	17	21	3,8
10	[2-10-8-3]	0,99933	11	14	2,0
11	[2-10-10-3]	0,99843	17	23	3,3

Лучшие результаты при тестировании показал вариант 10 конфигурации нейронных сетей с двумя скрытыми слоями, обеспечивающий значения R² и MAPE, равные 0,99933 и 2,0 % соответственно.

В работе показана возможность определения режимов лазерной обработки кольцевыми пучками материалов на основе сочетания искусственных нейронных сетей и метода конечных элементов. В результате численного эксперимента определена нейронная сеть, обеспечивающая лучший результат при определении температур в зоне лазерной обработки стали 30ХГСН2А кольцевыми пучками.

Полученные результаты могут быть использованы при определении технологических параметров процессов импульсной лазерной сварки и наплавки металлов пучками кольцевого сечения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорьянц, А. Г. Технологические процессы лазерной обработки / А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов, А. И. Мисюров. – Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. – 664 с.
2. Мышковец, В. Н. Формирование лазерных пучков и исследование процессов контурной обработки материалов: автореферат дис. канд. физ-мат. наук : 01.04.05 / В. Н. Мышковец; – Минск, 1994. – 19 с.
3. Максименко, А. В. Технология восстановления поверхностей деталей авиационной техники импульсной лазерной наплавкой: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.02.07 / Максименко Александр Васильевич. – Минск, 2011. – 23 с.
4. Установка для лазерной обработки кольцевым пучком : пат. № 2068328 РФ, МПК 6 В23К 26/00 / А. Т. Малащенко, В. Н. Мышковец, А. В. Максименко, Г. Л. Покаташкин; заявитель Гомел. гос. ун-т им. Ф. Скорины. – № 4884890 ; заявл. 26.11.90 ; опубл. 27.11.96
5. Установка для лазерной обработки кольцевым пучком: пат. №235 Респ. Беларусь, МПК В 23К 26/00 / В. Н. Мышковец, А. В. Максименко, С. В. Шалупаев, И. М. Каморников, Ю. В. Никитюк; заявитель Гом. гос. ун-т им. Ф. Скорины. – № u 20000106; заявл. 06.26.2000; опубл. 03.30.01.
6. С. В. Солоневич, А. А. Рыжевич, Н. С. Казак и др. Перестраиваемые кольцевые световые поля и их возможности для лазерной обработки материалов // Взаимодействие излучений с твердым телом = Interaction of Radiation with Solids: Материалы 9-й Международ. конф., 20–22 сент. 2011 г. – Минск, 2011. С. 451–452.
7. Максименко, А. В. Импульсная лазерная наплавка конструкционных сталей кольцевыми пучками / А. В. Максименко, В. Н. Мышковец, П. С. Шаповалов // Вестник ГГТУ имени П. О. Сухого. – 2010. – № 4. – С. 63–68.
8. Бокуть Б. В., Кондратенко В. С., Мышковец В. Н., Сердюков А. Н., Шалупаев С. В. Термоупругие поля в твердых телах при их обработке лазерными пучками специальной геометрии // Мн.: препринт Институт физики АН БССР, 1987. 59 с.
9. В. П. Бессмельцев, Е. Д. Булушев, Оптимизация режимов лазерной микрообработки // Автометрия. 2014. Т. 50. № 6 С. 3–21.
10. Parandoush, P. Hossain A. A review of modeling and simulation of laser beam machining // International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2014. 85, P. 135–145.

11. Монфаред А., Пантелеенко А. Ф. Математическое моделирование сварочных деформаций в тонких пластинах // Вестник БНТУ № 5, 2011 С. 18–25.

12. Баевич, Г. А. Динамика формирования термических циклов при импульсной лазерной сварке и наплавке высокопрочных конструкционных сталей / Г. А. Баевич, А. В. Максименко, В. Н. Мышковец // Вестник ГГТУ имени П. О. Сухого: научно-практический журнал. – 2016. – № 1. – С. 38–44.

13. Ansys.com – Официальный сайт компании ANSYS.

14. A.N. Bakhtiyari, Z. Wang, L. Wang, H. Zheng. A review on applications of artificial intelligence in modeling and optimization of laser beam machining, *Optics & Laser Technology*, Vol. 135, pp 1–18 (2021).

15. M. Ismail, Y. Okamoto and A. Okado, Neural network modeling for prediction of weld bead geometry in laser microwelding, *Advances in Optical Technologies*, Vol. 2013, 7 pages, (2013).

16. J. Jeng, T. Mau, and S. Leu, “Prediction of laser butt joint welding parameters using back propagation and learning vector quantization networks,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 99, no. 1–3, pp. 207–218 (2000).

17. B. F. Yousef, G. K. Knopf, E. V. Bordatchev, and S. K. Nikumb, Neural network modeling and analysis of the material removal process during laser machining, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 22, no. 1-2, pp. 41–53 (2003).

18. 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. pp. 1959–1964. – 2015.

19. H. G. Woo and H. S. Cho, Estimation of hardened layer dimensions in laser surface hardening processes with variations of coating thickness, *Surface and Coatings Technology*, vol. 102, no. 3, pp. 205–217 (1998).

20. Rusia, S. and Pathak, K. (2016) Application of Artificial Neural Network for Analysis of Triangular Plate with Hole Considering Different Geometrical and Loading Parameters. *Open Journal of Civil Engineering*, 6, 31–41.

21. Kant, R., Joshi, S. N. & Dixit, U. S. An integrated FEM-ANN model for laser bending process with inverse estimation of absorptivity. *Mech Adv Mater Mod Process* 1, 6 (2015).

22. 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.* – 2015. Vol 126. No 19. P. 1959–1964.

23. Ю. В. Никитюк, А. Н. Сердюков, В. А. Прохоренко, И. Ю. Аушев. Применение искусственных нейронных сетей и метода конечных элементов для определения параметров обработки кварцевых золь-гель стекол эллиптическими лазерными пучками *Проблемы физики, математики и техники*, № 3 (48), 2021 С. 30–36.

24. Y. V. Nikitjuk, G. A. Bayevich, V. N. Myshkovets, A. V. Maximenko, I. Y. Aushev. Characterization of laser welding of steel 30XГCH2A by combining artificial neural networks and finite element method // *Inter-Academia 2021 [Electronic resource] : The 19th International Conference on Global Research and Education (Gomel, Belarus, 20–22 October, 2021) : collection of abstracts / Francisk Skorina Gomel State University ; editorial board : S. A. Khakhomov (chief editor) [et al.]*. – Gomel : F. Skorina Gomel State University, 2021. pp – 125–127.

25. F. Chollet. *Deep Learning with Python / Manning Publications Co.*, 2018, pp. 400.