

УДК 621.791.725

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ 12X18H9T

**Ю. В. НИКИТЮК, Г. А. БАЕВИЧ, В. Н. МЫШКОВЕЦ,
А. В. МАКСИМЕНКО**

*Учреждение образования «Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины»,
Республика Беларусь*

И. Ю. АУШЕВ

*Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты Министерства
по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь»,
г. Минск*

С помощью метода конечных элементов и искусственных нейронных сетей выполнено моделирование температурных полей, формируемых лазерными пучками круглого и кольцевого сечения на разной глубине при обработке стали 12X18H9T. В программе конечно-элементного анализа ANSYS было осуществлено формирование обучающих массивов данных и массивов данных для тестирования нейронных сетей. Проведена верификация конечно-элементной модели на основании экспериментальных данных, полученных с использованием импульсного YAG:Nd³⁺-лазера, работающего в режиме свободной генерации и тепловизора ИТ-3СМ. Изучено влияние параметров нейросетевого моделирования на точность определения температур в зоне лазерной обработки стали 12X18H9T. Установлены параметры нейронных сетей, обеспечивающие приемлемые результаты при прогнозировании температур в зоне лазерной обработки круглыми и кольцевыми пучками стали 12X18H9T. Полученные результаты могут быть использованы при определении технологических параметров процессов импульсной лазерной сварки, наплавки и термообработки металлов пучками круглого и кольцевого сечения.

Ключевые слова: нейронные сети, метод конечных элементов, моделирование, лазерная обработка.

APPLICATION OF FINITE ELEMENT METHOD AND ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS TO DETERMINE PARAMETERS FOR LASER TREATMENT OF 12X18H9T STEEL

**Y. V. NIKITYUK, G. A. BAEVICH, V. N. MYSHKOVETS,
A. V. MAKSIMENKO**

*Educational Institution “Francisk Skorina Gomel State
University”, Republic of Belarus*

I. Y. AUSHEV

*Educational Institution “University of Civil Protection
of the Ministry for Emergency Situations of the Republic
of Belarus”, Minsk*

Modeling of the temperature fields formed by laser bunches of round and ring section at a different depth when processing steel 12X18H9T is executed by means of finite element method and artificial neural networks. In the ANSYS finite element analysis program, training data arrays and data arrays were formed for testing neural networks. Verification of the finite element model was carried out on the basis of experimental data obtained using a pulsed YAG:Nd³⁺-laser operating in free generation mode and a thermal imager IT-3SM. Influence of parameters of neural network modeling on the accuracy of determination of temperatures in a zone of laser processing of steel 12X18H9T is studied. The parameters of neural networks providing acceptable results when forecasting temperatures in a zone of laser processing with round and ring bunches of steel 12X18H9T are set. Obtained results can be used in determination of technological parameters of processes of pulse laser welding, surfacing and heat treatment of metals with beams of round and circular section.

Keywords: neural networks, finite element method, modeling, laser processing.

Введение

В настоящее время в промышленности широко используется лазерная сварка, наплавка и термообработка материалов, при этом применение технологий лазерной обработки наиболее эффективно по сравнению с использованием других высокоэнергетических источников энергии. Изготовление изделий из сталей при использовании газопламенной и электродуговой сварки в ряде случаев осложняется из-за больших остаточных деформаций и напряжений. Лазерная обработка обеспечивает локальность протекающих в зоне термического влияния физических процессов при сохранении физико-механических свойств исходного материала и отсутствии значительных напряжений и деформаций в зоне воздействия [1]. При этом использование не только круглых пучков, но и пучков кольцевого сечения повышает эффективность процесса лазерной обработки [2]–[5].

Температурное поле, формируемое в материале при лазерном воздействии, является основной характеристикой, определение которой обеспечивает возможность выбора оптимальных технологических режимов. Сегодня для расчета температурных полей при моделировании процессов лазерной обработки широко применяется программа конечно-элементного анализа ANSYS [6]–[8]. Также эффективным инструментом, который успешно применяется в исследованиях лазерной сварки, лазерной резки и лазерной поверхностной обработки, являются искусственные нейронные сети [9]–[11]. В ряде случаев применяется сочетание метода конечных элементов и искусственных нейронных сетей при моделировании процессов лазерной обработки [12]–[15].

Целью данной работы является прогнозирование температурных полей, формируемых при лазерной обработке стали 12X18H9T круглыми и кольцевыми пучками, с использованием метода конечных элементов и искусственных нейронных сетей.

Конечно-элементный анализ

Для формирования обучающих массивов данных и массивов данных для тестирования нейронных сетей были выполнены расчеты температурных полей с использованием программы конечно-элементного анализа ANSYS [16], [17].

Расчеты проводилось для пластин с геометрическими размерами $10 \times 10 \times 0,5$ мм. При моделировании была создана конечно-элементная модель, состоящая из 50 143 элементов Solid 90 и 233 741 узла, при этом элементы в области воздействия лазерного пучка имели геометрические размеры $0,1 \times 0,1 \times 0,1$ мм (рис. 1).

При создании модели были учтены зависимости теплофизических свойств стали 12X18H9T от температуры [18]. Расчеты проводились для лазерных пучков круглого сечения диаметром 300 мкм и для пучков кольцевого сечения с внешним диаметром, равным 300 мкм, и внутренним диаметром 100 мкм в плоскости обработки.

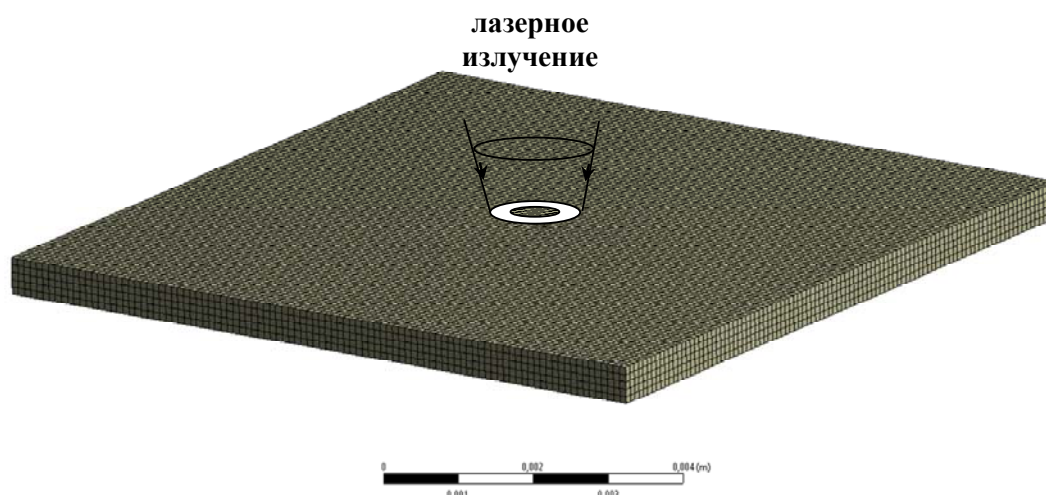


Рис. 1. Конечно-элементная модель

Зависимость теплового потока от времени задавалась в виде импульсов прямоугольной формы [8]. Длительность импульсов лазерного излучения t изменялась от 1 до 10 мс, плотность мощности лазерного излучения P_0 – от 10^7 до 10^8 Вт/м². Расчеты были выполнены для 100 вариантов входных параметров, 90 из которых были использованы для обучения искусственных нейронных сетей, а 10 – для тестирования (табл. 1).

Таблица 1

Тестовый набор данных

| № | P_0 , 10^7 Вт/м ² | t , мс | Круглый лазерный пучок | | | Кольцевой лазерный пучок | | |
|----|-------------------------------------|----------|------------------------|--------|--------|--------------------------|--------|--------|
| | | | T1, °C | T2, °C | T3, °C | T1, °C | T2, °C | T3, °C |
| 1 | 1 | 9 | 98,0 | 82,2 | 69,7 | 52,6 | 53,0 | 51,1 |
| 2 | 8 | 6 | 508,1 | 411,9 | 335,6 | 225,8 | 228,6 | 215,8 |
| 3 | 1 | 8 | 96,6 | 80,9 | 68,4 | 51,6 | 52,0 | 50,1 |
| 4 | 2 | 9 | 168,8 | 139,1 | 115,6 | 82,5 | 83,3 | 79,6 |
| 5 | 2 | 3 | 142,3 | 111,7 | 88,3 | 61,5 | 62,6 | 59,7 |
| 6 | 6 | 10 | 423,8 | 349,8 | 290,6 | 200,5 | 202,4 | 192,2 |
| 7 | 7 | 8 | 470,2 | 385,5 | 318,0 | 217,2 | 219,5 | 207,9 |
| 8 | 9 | 10 | 612,5 | 491,9 | 409,7 | 282,3 | 284,9 | 270,5 |
| 9 | 9 | 4 | 530,1 | 420,5 | 334,5 | 219,1 | 222,7 | 209,2 |
| 10 | 2 | 2 | 130,2 | 99,5 | 76,6 | 52,8 | 54,2 | 51,8 |

На рис. 2 и 3 представлено распределение температурных полей в образцах из стали 12X18H9T при обработке лазерными пучками круглого и кольцевого сечения соответственно при длительности импульсов лазерного излучения $t = 10$ мс и плотности мощности лазерного излучения $P_0 = 2 \cdot 10^8$ Вт/м².

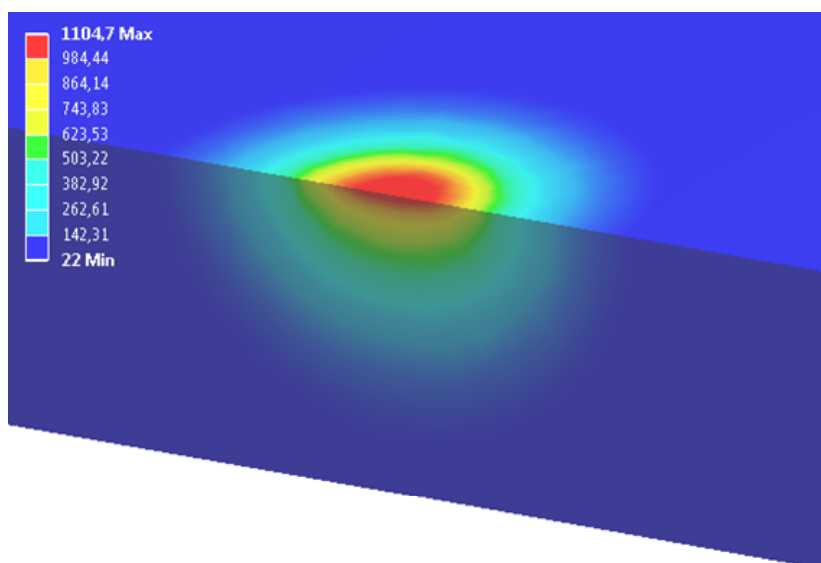


Рис. 2. Расчетное распределение температурного поля при воздействии круглого лазерного пучка, °С

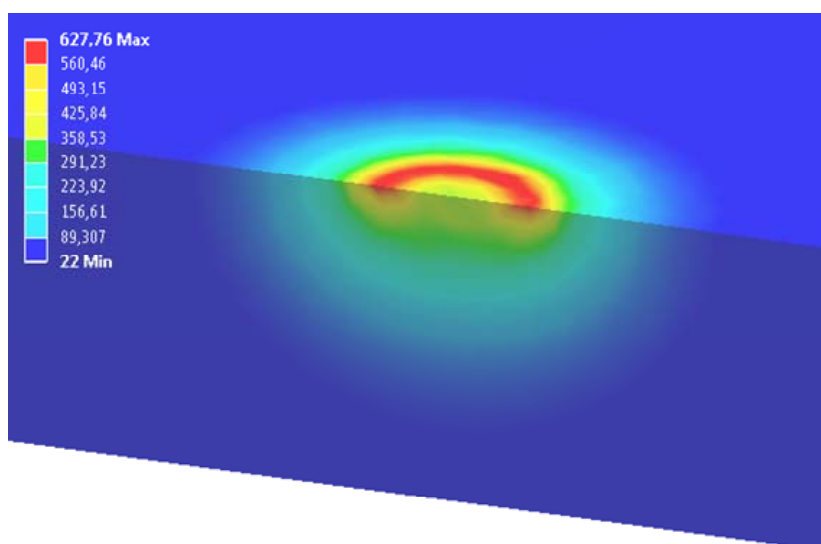


Рис. 3. Расчетное распределение температурного поля при воздействии кольцевого лазерного пучка, °С

Верификация конечно-элементной модели была выполнена на основании экспериментальных данных, полученных с использованием импульсного YAG:Nd³⁺-лазера, работающего в режиме свободной генерации, и тепловизора ИТ-3СМ. При проведении экспериментов использовалась пластина размерами 10 × 10 × 0,5 мм из стали 12Х18Н9Т.

На рис. 4 представлено распределение температурного поля в образце при воздействии круглого лазерного пучка диаметром 300 мкм, определенное экспериментально. 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 %.

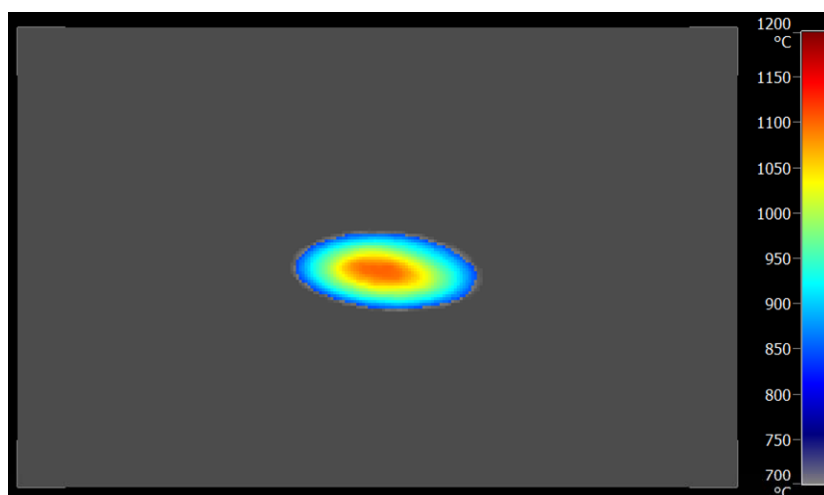


Рис. 4. Распределение температурного поля при воздействии круглого лазерного пучка, определенное экспериментально, °С

Применение нейронных сетей

Отличительная особенность искусственных нейронных сетей заключается в том, что они обучаются на множестве данных, а не программируются, при этом искусственные нейронные сети особенно эффективны при моделировании сложных связей между входными и выходными параметрами [19]. Как отмечалось выше, обучающие выборки и выборки для тестирования в настоящей статье были сформированы в результате решения соответствующих задач в программе ANSYS. После обучения нейронная сеть, используя уже новые наборы технологических параметров, способна корректно определять значения температур на различной глубине в образцах из стали 12Х18Н9Т при лазерном воздействии круглыми и кольцевыми пучками. Для определения значения температур на различной глубине были использованы нейронные сети прямого распространения с различными архитектурами, созданные в библиотеке машинного обучения TensorFlow [20]. При формировании сетей использовалась функция активации ReLu, оптимизатор Adam и функция потерь mse. Для определения значений температур при лазерной обработке были использованы нейронные сети с архитектурой, представленной на рис. 5. Количество эпох при обучении сетей было равно 100.

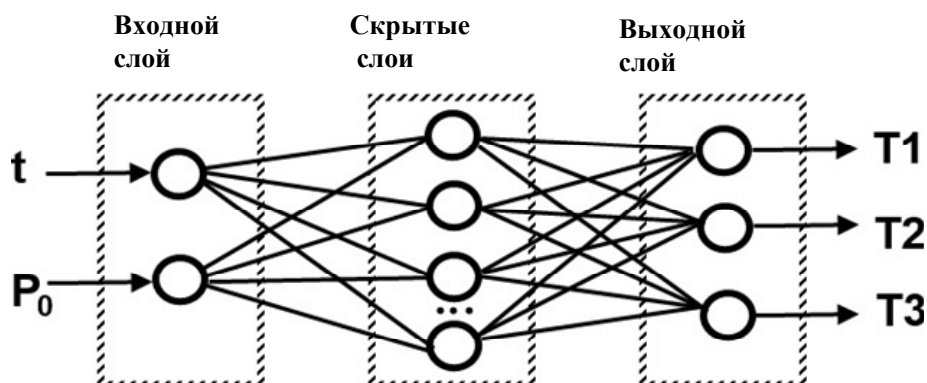


Рис. 5. Архитектура нейронной сети

Для оценки эффективности работы нейронных сетей были использованы следующие критерии:

– коэффициент детерминации

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

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

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

– среднеквадратичная ошибка (англ. Root Mean Square Error, RMSE):

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (d_i - y_i)^2};$$

– средняя абсолютная процентная ошибка (англ. Mean Absolute Percentage Error, MAPE):

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

где d_i – желаемый выход сети; y_i – реальный выход сети.

Результаты оценки созданных нейронных сетей для тестовой и обучающей выборок приведены в табл. 2. Буквами a и b обозначены результаты, полученные для тестовой и обучающей выборок соответственно.

Таблица 2

Результаты тестирования нейронных сетей

| № | Архитектура сети | Круглый лазерный пучок | | | | Кольцевой лазерный пучок | | | | |
|---|------------------|------------------------|--------|------|------|--------------------------|--------|------|------|------|
| | | R^2 | MAE | RMSE | MAPE | R^2 | MAE | RMSE | MAPE | |
| 1 | a | [2-2-3] | 0,9870 | 13,8 | 18,8 | 5,9 | 0,9796 | 10,8 | 12,2 | 11,6 |
| | b | | 0,9550 | 21,9 | 27,4 | 10,9 | 0,9515 | 11,7 | 15,8 | 12,0 |
| 2 | a | [2-4-3] | 0,9903 | 12,3 | 16,8 | 7,0 | 0,9890 | 7,4 | 9,0 | 6,9 |
| | b | | 0,9857 | 11,6 | 15,9 | 5,3 | 0,9692 | 9,2 | 12,6 | 9,5 |
| 3 | a | [2-6-3] | 0,9959 | 7,9 | 10,4 | 5,4 | 0,9937 | 5,3 | 6,8 | 5,5 |
| | b | | 0,9919 | 8,9 | 11,8 | 4,4 | 0,9891 | 5,0 | 7,5 | 5,0 |
| 4 | a | [2-8-3] | 0,9980 | 5,8 | 7,1 | 4,0 | 0,9975 | 3,2 | 4,2 | 3,1 |
| | b | | 0,9946 | 7,2 | 9,4 | 3,7 | 0,9927 | 4,1 | 6,1 | 3,9 |
| 5 | a | [2-10-3] | 0,9985 | 4,7 | 6,2 | 2,8 | 0,9991 | 1,8 | 2,4 | 2,1 |
| | b | | 0,9961 | 6,3 | 8,2 | 3,1 | 0,9964 | 2,9 | 4,2 | 2,8 |
| 6 | a | [2-12-3] | 0,9987 | 4,5 | 5,4 | 3,5 | 0,9991 | 1,7 | 2,5 | 1,8 |
| | b | | 0,9960 | 6,0 | 8,1 | 3,0 | 0,9951 | 3,5 | 5,0 | 3,2 |
| 7 | a | [2-14-3] | 0,9989 | 3,2 | 5,6 | 3,1 | 0,9984 | 2,5 | 3,4 | 2,2 |
| | b | | 0,9980 | 3,9 | 5,7 | 1,9 | 0,9932 | 4,1 | 5,9 | 4,0 |

Окончание табл. 2

| № | Архитектура сети | Круглый лазерный пучок | | | | Кольцевой лазерный пучок | | | | |
|----|------------------|------------------------|--------|------|------|--------------------------|--------|------|------|-----|
| | | R^2 | MAE | RMSE | MAPE | R^2 | MAE | RMSE | MAPE | |
| 8 | a | [2-16-3] | 0,9989 | 4,4 | 5,4 | 2,8 | 0,9982 | 2,7 | 3,6 | 2,8 |
| | b | | 0,9968 | 4,8 | 7,1 | 2,2 | 0,9967 | 3,0 | 4,1 | 2,7 |
| 9 | a | [2-12-6-3] | 0,9990 | 3,8 | 5,2 | 3,3 | 0,9976 | 3,3 | 4,1 | 3,5 |
| | b | | 0,9984 | 3,7 | 5,1 | 1,8 | 0,9963 | 3,4 | 4,3 | 3,3 |
| 10 | a | [2-12-8-3] | 0,9991 | 3,8 | 4,8 | 2,3 | 0,9993 | 1,7 | 2,1 | 1,8 |
| | b | | 0,9985 | 3,6 | 5,0 | 1,7 | 0,9970 | 2,7 | 3,9 | 2,0 |
| 11 | a | [2-12-10-3] | 0,9988 | 4,3 | 5,7 | 3,4 | 0,9967 | 4,3 | 4,9 | 4,5 |
| | b | | 0,9981 | 4,2 | 5,5 | 2,0 | 0,9970 | 3,1 | 3,9 | 2,5 |

При тестировании лучшие результаты были получены для варианта 10 конфигурации нейронных сетей с двумя скрытыми слоями. Средние абсолютные процентные ошибки (MAPE) при тестировании этих сетей не превысили 2,3 %, а средние абсолютные ошибки (MAE) и среднеквадратичные ошибки (RMSE) не превысили 5 °С.

Заключение

Показана возможность прогнозирования режимов лазерной обработки пучками круглого и кольцевого сечения стали 12X18H9T с использованием сочетания метода конечных элементов и искусственных нейронных сетей. В результате численного эксперимента выявлена архитектура нейронной сети, обеспечивающая лучший результат при определении значений температур на различной глубине при лазерной обработке стали круглыми пучками и пучками кольцевого сечения. Полученные результаты могут быть использованы при определении технологических параметров процессов импульсной лазерной сварки, наплавки и термообработки металлов круглыми пучками и пучками кольцевого сечения.

Литература

1. 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.
2. Установка для лазерной обработки кольцевым пучком : пат. № 235 Респ. Беларусь : МПК В 23К 26/00 / Мышковец В. Н., Максименко А. В., Шалупаев С. В., Каморников И. М., Никитюк Ю. В. ; заявитель Гомел. гос. ун-т им. Ф. Скорины. – № u20000106 ; заявл. 06.26.2000 ; опубл. 03.30.01.
3. Перестраиваемые кольцевые световые поля и их возможности для лазерной обработки материалов / С. В. Солоневич [и др.] // Взаимодействие излучений с твердым телом = Interaction of Radiation with Solids : материалы 9-й Междунар. конф., Минск, 20–22 сент. 2011 г. – Минск, 2011. – С. 451–452.
4. Максименко, А. В. Импульсная лазерная наплавка конструкционных сталей кольцевыми пучками / А. В. Максименко, В. Н. Мышковец, П. С. Шаповалов // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2010. – № 4. – С. 63–68.
5. Термоупругие поля в твердых телах при их обработке лазерными пучками специальной геометрии / Б. В. Бокуть [и др.]. – Минск, 1987. – 59 с. (Препринт / Ин-т физики АН БССР).

6. Бессмельцев, В. П. Оптимизация режимов лазерной микрообработки / В. П. Бессмельцев, Е. Д. Булушев // Автометрия. – 2014. – Т. 50, № 6. – С. 3–21.
7. Parandoush, P. A review of modeling and simulation of laser beam machining / P. Parandoush, A. Hossain // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2014. – Vol. 85. – P. 135–145.
8. 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 // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2016. – № 1. – С. 38–44.
9. A review on applications of artificial intelligence in modeling and optimization of laser beam machining / A. N. Bakhtiyari [et al.] // Optics & Laser Technology. – 2021. – Vol. 135. – P. 1–18.
10. Ismail, M. Neural network modeling for prediction of weld bead geometry in laser micro-welding / M. Ismail, Y. Okamoto, A. Okado // Advances in Optical Technologies. – 2013. – Vol. 2013. – P. 1–7.
11. Neural network modeling and analysis of the material removal process during laser machining / B. F. Yousef [et al.] // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2003. – Vol. 22, №. 1–2. – P. 41–53.
12. Rusia, S. Application of Artificial Neural Network for Analysis of Triangular Plate with Hole Considering Different Geometrical and Loading Parameters / S. Rusia, K. Pathak // Open Journal of Civil Engineering. – 2016. – Vol. 6. – P. 31–41.
13. 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, 2015. – Vol. 1. – P. 6.
14. Comparison of ANN and finite element model for the prediction of thermal stresses in diode laser cutting of float glass / M. B. Kadri [et al.] // Optik – Int. J. Light Electron Optics. – 2015. – Vol. 126, № 19. – P. 1959–1964.
15. Применение искусственных нейронных сетей и метода конечных элементов для определения параметров обработки кварцевых золь-гель стекол эллиптическими лазерными пучками / Ю. В. Никитюк [и др.] // Проблемы физики, математики и техники. – 2021. – № 3 (48). – С. 30–36.
16. Ansys.com – Официальный сайт компании ANSYS.
17. ANSYS в руках инженера : практ. рук. / А. Б. Каплун, Е. М. Морозов, М. А. Олферьева. – М. : Едиториал УРСС, 2003. – 272 с.
18. Зиновьев, В. Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах: справочник / В. Е. Зиновьев. – М. : Металлургия, 1989. – 384 с.
19. Головкин, В. А. Нейросетевые технологии обработки данных : учеб. пособие / В. А. Головкин, В. В. Краснопрошин. – Минск : БГУ, 2017. – 263 с.
20. Шолле, Ф. Глубокое обучение на Python / Ф. Шолле. – СПб. : Питер, 2018. – 400 с.

Получено 11.02.2022 г.