

Оптимизация обработки стали 12X18H9T кольцевыми лазерными пучками

Г. А. Баевич¹⁾, кандидаты физ.-мат. наук, доценты Ю. В. Никитюк¹⁾, В. Н. Мышковец¹⁾,
кандидаты техн. наук, доценты А. В. Максименко¹⁾, И. Ю. Аушев²⁾

¹⁾УО «Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины»
(Гомель, Республика Беларусь),

²⁾Университет гражданской защиты МЧС Республики Беларусь (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2023
Belarusian National Technical University, 2023

Реферат. В работе с использованием генетического алгоритма MOGA, встроенного в модуль DesignXplorer программы ANSYS Workbench, выполнена оптимизация лазерной обработки стали 12X18H9T кольцевыми пучками. Расчет температурных полей проводили с учетом зависимости теплофизических свойств материала от температуры методом конечных элементов в программе ANSYS Workbench. Получена регрессионная модель обработки стали 12X18H9T кольцевыми лазерными пучками с использованием гранецентрированного варианта центрального композиционного плана эксперимента. В качестве варьируемых факторов использовали плотность мощности и длительность импульсов лазерного излучения, внешний и внутренний диаметры лазерного пучка в плоскости обработки, в качестве откликов – глубины проплавления материала и максимальные температуры в зоне лазерной обработки. Произведена оценка влияния параметров обработки на глубины проплавления материала в зоне лазерного воздействия и максимальные значения температуры. Установлено, что на глубины проплавления материала и максимальные температуры наибольшее воздействие оказывает плотность мощности лазерного излучения. Оптимизацию лазерной обработки стали 12X18H9T кольцевыми пучками выполняли при задании предельных значений максимальной температуры в зоне обработки для трех вариантов минимальной глубины проплавления. Выполнено сравнение параметров, полученных в результате оптимизации с использованием алгоритма MOGA, и параметров, полученных в результате конечно-элементного моделирования. Максимальная относительная погрешность результатов при определении максимальных температур не превысила 1 %, при определении максимальных глубин проплавления – 6 %.

Ключевые слова: лазерная обработка, оптимизация, MOGA, ANSYS

Для цитирования: Оптимизация обработки стали 12X18H9T кольцевыми лазерными пучками / Г. А. Баевич [и др.] // *Наука и техника*. 2023. Т. 22, № 3. С. 186–192. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-3-186-192>

Optimization of 12X18H9T-Steel Processing by Ring Laser Beams

G. A. Bayevich¹⁾, Yu. V. Nikitjuk¹⁾, V. N. Myshkovets¹⁾, A. V. Maximenko¹⁾,
I. Yu. Aushev²⁾

¹⁾Francisk Skorina Gomel State University (Gomel, Republic of Belarus),

²⁾University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus
(Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Using the MOGA genetic algorithm built into the DesignXplorer module of the ANSYS Workbench program, optimization of laser processing of 12X18H9T-steel by annular beams has been performed. The calculation of temperature fields has been carried out taking into account the dependence of the thermophysical properties of the material on temperature

Адрес для переписки

Баевич Георгий Александрович
Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины
ул. Советская, 104,
246028, г. Гомель, Республика Беларусь
Тел.: +375 232 50-38-31
baevich@gsu.by

Address for correspondence

Bayevich Georgiy A.
Francisk Skorina Gomel State University
104, Sovetskaya str.,
246028, Gomel, Republic of Belarus
Tel.: +375 232 50-38-31
baevich@gsu.by

by the finite element method in the ANSYS Workbench program. A regression model has been obtained for processing 12X18H9T-steel by annular laser beams using a face-centered variant of the central compositional plan of the experiment. The power density and duration of laser radiation pulses, the outer and inner diameters of the laser beam in the processing plane were used as variable factors. The penetration depths of the material and the maximum temperatures in the laser processing zone were used as responses. The influence of processing parameters on the penetration depths of the material in the laser impact zone and the maximum temperature values has been evaluated. It has been established that the depth of penetration of the material and the maximum temperatures are most affected by the power density of laser radiation. Optimization of laser processing of 12X18H9T-steel by annular beams was carried out by setting the limiting values of the maximum temperature in the processing zone for three variants of the minimum penetration depth. The parameters obtained as a result of optimization using the MOGA algorithm and the parameters obtained as a result of finite element modeling are compared. The maximum relative error of the results when determining the maximum temperatures did not exceed 1 % and when determining the maximum penetration depths did not exceed 6 %.

Keywords: laser processing, optimization, MOGA, ANSYS

For citation: Bayevich G. A., Nikitjuk Yu. V., Myshkovets V. N., Maximenko A. V., Aushev I. Yu. (2023) Optimization of 12X18H9T-Steel Processing by Ring Laser Beams. *Science and Technique*. 22 (3), 186–192. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-3-186-192> (in Russian)

Введение

В настоящее время широкое распространение получила лазерная обработка материалов, так как применение лазерного излучения более эффективно по сравнению с использованием других высокоэнергетических источников энергии. Лазерная обработка обеспечивает локальность физических процессов, протекающих в зоне термического влияния при отсутствии значительных деформаций и напряжений в зоне воздействия излучения и сохранении физико-механических свойств исходного материала [1]. При этом использование пучков кольцевого сечения в ряде случаев способствует повышению эффективности лазерной обработки за счет оптимизации соответствующих технологических параметров, в том числе генетических алгоритмов [2–8]. Генетические алгоритмы обеспечивают поиск лучших решений при помощи наследования и усиления полезных свойств множества объектов в процессе имитации естественного отбора [9, 10]. Один из эффективных генетических алгоритмов – Multi-Objective Genetic Algorithm (MOGA) [11].

Основной характеристикой, определение которой позволяет оптимизировать параметры лазерной обработки, является температурное поле, формируемое в материале при воздействии лазерного излучения. В настоящее время для расчета температурных полей при моделировании процессов лазерной обработки широко применяется комплекс конечно-элементного анализа ANSYS [12].

В данной работе выполнена оптимизация с использованием генетического алгорит-

ма MOGA модуля DesignXplorer программы ANSYS Workbench параметров обработки стали 12X18H9T кольцевыми лазерными пучками.

Конечно-элементный анализ

В программе ANSYS Workbench проведено конечно-элементное моделирование по определению температурного поля в пластинах с геометрическими размерами $2 \times 2 \times 0,5$ мм [12]. Сформирована модель, состоящая из 17294 элементов и 73546 узлов (рис. 1).

При моделировании учтены температурные зависимости теплофизических свойств стали 12X18H9T [13]. Зависимость теплового потока от времени задавалась в виде импульсов прямоугольной формы [14].

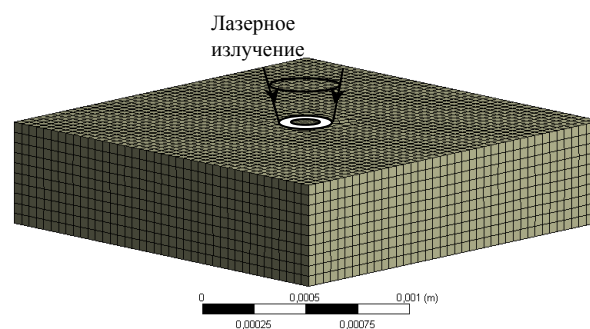


Рис. 1. Конечно-элементная модель

Fig. 1. Finite element model

Верификация конечно-элементной модели выполнена с применением экспериментальных данных, полученных с использованием импульсного YAG:Nd³⁺-лазера, работающего в режиме свободной генерации, и тепловизора ИТ-3СМ при воздействии на материал круг-

лого лазерного пучка (рис. 2). При этом относительная ошибка при определении максимальных температур на поверхности образца не превысила 5 %.

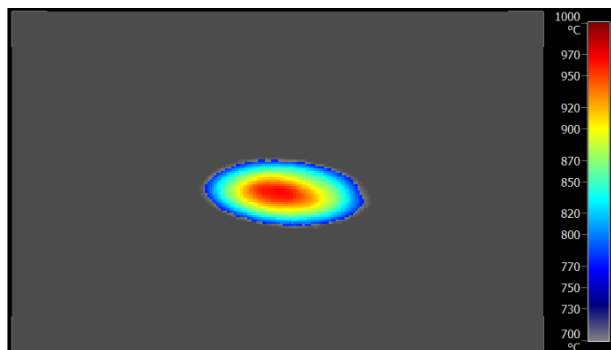


Рис. 2. Распределение температурного поля при воздействии круглого лазерного пучка, определенное экспериментально

Fig. 2. Temperature field distribution under the action of a circular laser beam, determined experimentally

Распределение температурных полей в образце из стали 12Х18Н9Т при обработке лазерным пучком кольцевого сечения с внешним диаметром $D_1 = 300$ мкм и внутренним диаметром $D_2 = 125$ мкм в плоскости обработки при длительности импульсов лазерного излучения $t = 5,5$ мс и плотности мощности лазерного излучения $P_0 = 5,5 \cdot 10^8$ Вт/м² представлено на рис. 3.

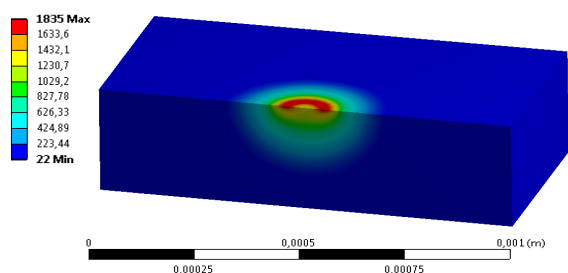


Рис. 3. Расчетное распределение температурного поля при воздействии кольцевого лазерного пучка, °С

Fig. 3. Estimated distribution of the temperature field under exposure of ring laser beam, °С

Определение оптимальных параметров обработки стали 12Х18Н9Т кольцевыми пучками

Оптимизация параметров лазерной обработки стали 12Х18Н9Т кольцевыми пучками выполнена в модуле DesignXplorer программы An-

sys Workbench в соответствии с последовательностью действий, представленных на рис. 4 [15].

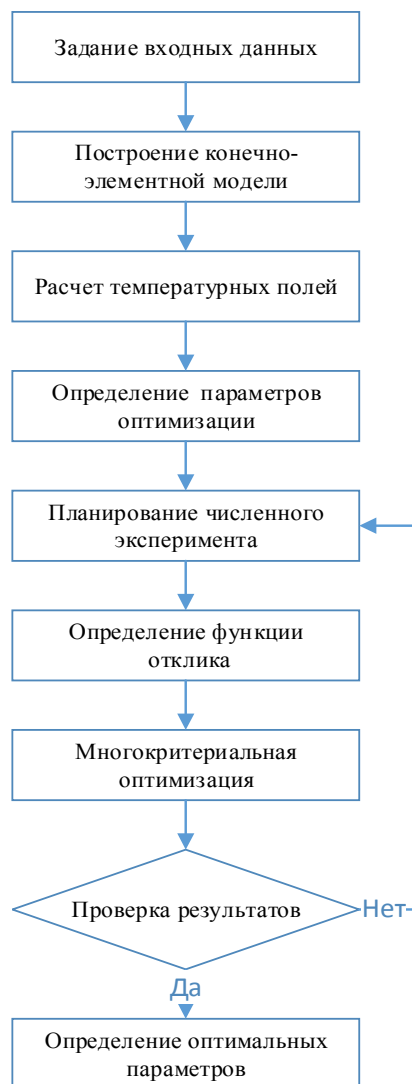


Рис. 4. Алгоритм оптимизации лазерной обработки стали кольцевыми пучками

Fig. 4. Optimization algorithm for laser processing of steel with annular beams

При моделировании использован трехфакторный факторно-центральное композиционное планирование эксперимента [16–17]. В качестве факторов эксперимента использовались плотность мощности лазерного излучения P_0 , длительность импульсов лазерного излучения t , внешний диаметр лазерного кольцевого пучка D_1 и внутренний диаметр лазерного кольцевого пучка D_2 . В качестве откликов использовались максимальные температуры в зоне обработки T и глубины проплавления материала L (табл. 1).

Таблица 1

План эксперимента и результаты расчетов

Experiment plan and calculation results

P1 $P_0, 10^8 \text{ Вт/м}^2$	P2 $t, \text{ мс}$	P3 $D_1, \text{ мкм}$	P4 $D_2, \text{ мкм}$	P5 $L, \text{ мкм}$	P6 $T, \text{ }^\circ\text{C}$
5,5	5,5	275	125	13	1665
1	5,5	275	125	0	427
10	5,5	275	125	68	2868
5,5	5,5	250	125	4	1495
5,5	5,5	300	125	23	1835
5,5	1	275	125	0	1252
5,5	10	275	125	19	1769
5,5	5,5	275	100	21	1822
5,5	5,5	275	150	3	1494
1	1	250	100	0	322
10	1	250	100	24	2152
1	1	300	100	0	358
10	1	300	100	36	2457
1	10	250	100	0	452
10	10	250	100	81	3013
1	10	300	100	0	536
10	10	300	100	120	3695
1	1	250	150	0	266
10	1	250	150	9	1708
1	1	300	150	0	316
10	1	300	150	24	2102
1	10	250	150	0	360
10	10	250	150	42	2321
1	10	300	150	0	458
10	10	300	150	94	3072

Полученные уравнения регрессии имеют следующий вид:

$$Y_L = -4,488 \cdot 10^{-1} - 3,116 \cdot 10^{-8} P_0 + 1,558 \cdot 10^{-17} P_0^2 + 1,473 \cdot 10^{-10} P_0 D_1 + 1,635 \cdot 10^{-9} P_0 t - 1,233 \cdot 10^{-10} P_0 D_2;$$

$$L = (Y_L \cdot 0,64 + 1)^{1/0,64} - 1;$$

$$Y_T = 1,766 \cdot 10^1 + 6,370 \cdot 10^{-8} P_0 - 2,884 \cdot 10^{-17} P_0^2 - 1,404 \cdot 10^{-1} t^2 + 1,020 \cdot 10^{-10} P_0 D_1 + 8,429 \cdot 10^{-10} P_0 t - 1,429 \cdot 10^{-10} P_0 D_2 + 7,321 \cdot 10^{-3} D_1 t;$$

$$T = (Y_T \cdot 0,445 + 1)^{1/0,445} - 1.$$

Коэффициенты детерминации для выходных параметров L и T принимают значения, равные 0,9712 и 0,9973 соответственно, что можно интерпретировать как наличие необходимого соответствия регрессионной модели результатам конечно-элементного моделирования.

Была проведена оценка влияния входных параметров на выходные параметры. На максимальные температуры в зоне обработки T и глубины проплавления материала L влияют все факторы эксперимента, при этом наибольшее воздействие оказывает плотность мощности лазерного излучения P_0 (рис. 5).

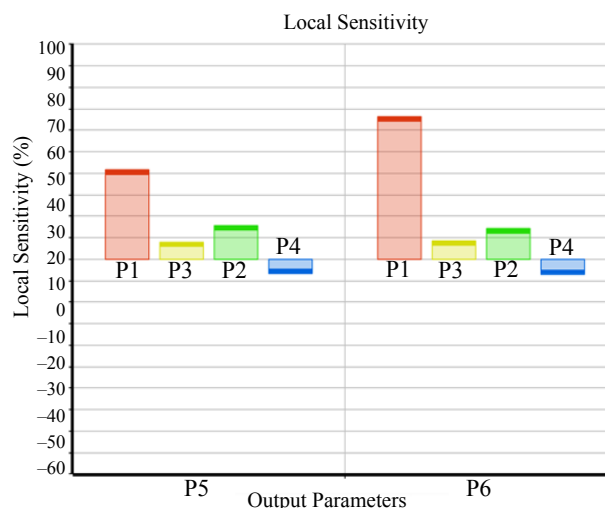


Рис. 5. Диаграмма чувствительности оптимизируемых параметров: P1 – P_0 , P2 – t , P3 – D_1 , P4 – D_2 , P5 – L , P6 – T

Fig. 5. Sensitivity diagram of optimized parameters: P1 – P_0 , P2 – t , P3 – D_1 , P4 – D_2 , P5 – L , P6 – T

Зависимости максимальной температуры в зоне обработки T и глубины проплавления материала L от плотности мощности лазерного излучения P_0 , длительности импульсов лазерного излучения t , внешнего диаметра кольцевого лазерного пучка D_1 и внутреннего диаметра кольцевого лазерного пучка D_2 представлены на рис. 6–7.

Оптимизация осуществлялась с использованием многокритериального генетического алгоритма MOGA, интегрированного в модуль DesignXplorer программы ANSYS Workbench с числом индивидов начальной популяции 100 и числом индивидов за итерацию 100.

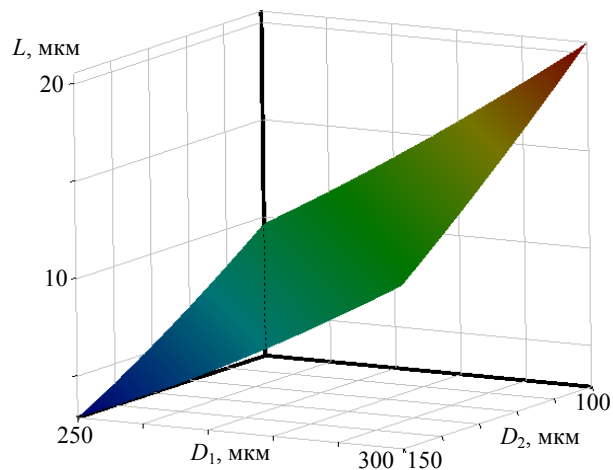
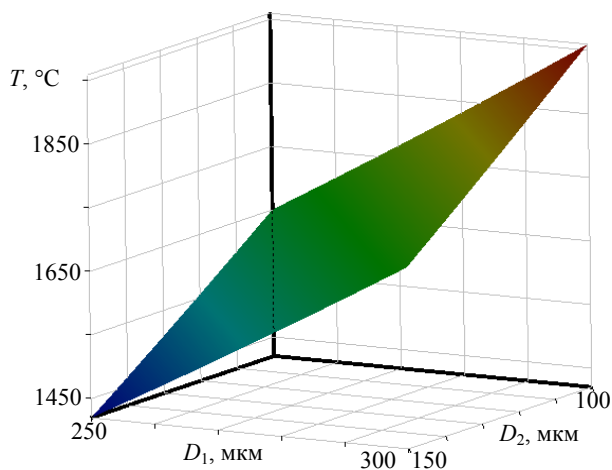
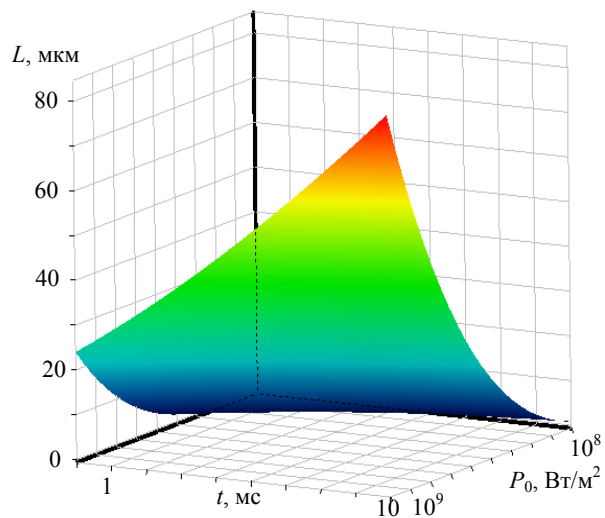
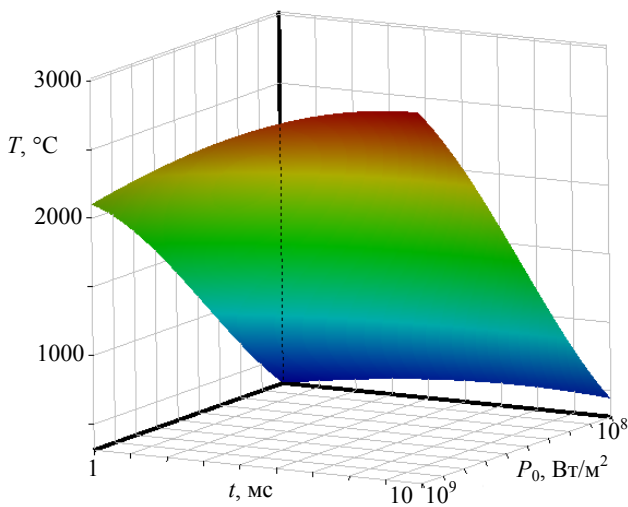


Рис. 6. Зависимость максимальной температуры T от параметров обработки

Fig. 6. Dependence of the maximum temperature T on processing parameters

Рис. 7. Зависимость глубины проплавления материала L от параметров обработки

Fig. 7. Dependence of material penetration depth L on processing parameters

Оптимизацию лазерной обработки стали 12Х18Н9Т кольцевыми пучками выполняли при задании предельных значений максимальной температуры в зоне обработки для трех вариантов минимальной глубины проплавления $L = 50; 60; 70$ мкм (табл. 2). В скобках в табл. 2 приведены значения параметров, полученные в результате конечно-элементного расчета, при этом максимальная относительная погрешность результатов, полученных при использовании алгоритма MOGA, при определении максимальных температур не превысила 1 %; максимальных глубин проплавления – 6 %.

Таблица 2

Результаты оптимизации
Optimization results

P1 $P_0, 10^8 \text{ Вт/м}^2$	P2 $t, \text{ мс}$	P3 $D_1, \text{ мкм}$	P4 $D_2, \text{ мкм}$	P5 $L, \text{ мкм}$	P6 $T, \text{ }^\circ\text{C}$
8,6	2,9	296	125	50 (51)	2460 (2475)
7,3	9,6	294	138	60 (63)	2357 (2345)
7,9	9,3	286	129	70 (78)	2540 (2968)

ВЫВОДЫ

1. Выполнено моделирование обработки стали 12Х18Н9Т лазерными кольцевыми пуч-

ками с использованием конечно-элементной модели, верификация которой осуществлена на основе экспериментальных данных.

2. Построены регрессионные модели исследуемого процесса с применением трехфакторного факторно-центрированного варианта центрального композиционного плана численного эксперимента, установлено основное воздействие плотности мощности лазерного излучения на значения максимальных температур в зоне обработки и на глубину проплавления материала.

3. Показана возможность оптимизации параметров лазерной обработки стали с использованием генетического алгоритма MOGA модуля DesignXplorer программы ANSYS Workbench с максимальной относительной погрешностью результатов при определении максимальных температур не более 1 % и максимальных глубин проплавления не более 6 %.

4. В результате многокритериальной оптимизации установлены наборы параметров, использование которых на практике обеспечит эффективную реализацию процесса обработки стали 12X18H9T кольцевыми лазерными пучками.

5. Результаты могут быть использованы при разработке и оптимизации технологических режимов импульсной лазерной сварки и наплавки сталей.

ЛИТЕРАТУРА

- 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.
- Термоупругие поля в твердых телах при их обработке лазерными пучками специальной геометрии / Б. В. Бокучь [и др.]. Минск, 1987. 59 с. (Препринт / Ин-т физики АН БССР).
- 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. Оpubл. 03.30.01.
- 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.
- 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.
- Бессмельцев, В. П. Оптимизация режимов лазерной микрообработки / В. П. Бессмельцев, Е. Д. Булушев // Автометрия. 2014. Т. 50, № 6. С. 3–21.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2014.05.008>.
- Nikityuk, Y. V. Optimization of Two-Beam Laser Cleavage of Silicate Glass / Y. V. Nikityuk, A. N. Serdyukov, I. Y. Aushev // Journal of Optical Technology. 2022. Vol. 89, № 2. P. 121–125. <https://doi.org/10.1364/jot.89.000121>.
- Емельянов, В. В. Теория и практика эволюционного моделирования / В. В. Емельянов, В. В. Курейчик, В. М. Курейчик. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 432 с.
- Красновская, С. В. Обзор возможностей оптимизационных алгоритмов при моделировании конструкций компрессорно-конденсаторных агрегатов методом конечных элементов / С. В. Красновская, В. В. Напрасников // Вестн. Нац. акад. Наук Беларусі. Сер. фізіка-тэхн. навук. 2016. № 2. С. 92–98.
- Fonseca, C. Genetic Algorithms for Multiobjective Optimization: Formulation Discussion and Generalization / C. Fonseca, P. Fleming // In Proceedings of the 5th International Conference on Genetic Algorithms. CA, USA. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers Inc, 1993. P. 416–423.
- Ansys [Electronic Resource]. Mode of access: <https://www.ansys.com/>.
- Зиновьев, В. Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах: справочник / В. Е. Зиновьев. М.: Металлургия, 1989. 384 с.
- 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.
- Multi-Objective Optimization of Microstructure of Grayscale Cell Based on Response Surface Method / S. Wu [et al.] // Processes. 2021. Vol. 9, № 2. P. 1–15. <https://doi.org/10.3390/pr9020403>.
- Моргунов, А. П. Планирование и анализ результатов эксперимента: учеб. Пособие / А. П. Моргунов, И. В. Ревина; М-во образования России, ОмГТУ. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2014. 343 с.
- Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. М.: Наука. 1976. 278 с.

Поступила 07.10.2022

Подписана в печать 10.01.2023

Опубликована онлайн 31.05.2023

REFERENCES

- Grigoryants A. G., Shiganov I. N., Misyurov A. I. (2006) *Technological Processes of Laser Processing*. Moscow,

- Bauman Moscow State Technical University, 664 (in Russian).
2. Bokut' B. V., Kondratenko V. S., Myshkovets V. N., Serdyukov A. N., Shalupaev S. V. (1987) *Thermoelastic Fields in Solids During their Processing by Laser Beams of Special Geometry. Preprint. B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus. Minsk, 59* (in Russian).
 3. Myshkovets V. N., Maximenko A. V., Shalupaev S. V., Kamornikov I. M., Nikityuk Yu. V. (2001) *Annular Beam Laser Processing Machine. Patent No. 235 Republic of Belarus* (in Russian).
 4. Solonevich, S. V., Ryzhevich, A. A., Kazak, N. S., Al'-Mukhanna M. K., Al'-Khovaiter S. Kh., Al'-Saud T. S. M. (2011) Tunable Ring Light Fields and Their Possibilities for Laser Processing of Materials. *Vzaimodeistvie Izlucheni s Tverdyim Telom: Materialy 9-i Mezhdunar. Konf., Minsk, 20–22 Sent. 2011 g. = Interaction of Radiation with Solids: Proceedings of the 9th International Conference, Minsk, September 20–22, 2011. Minsk, 451–452* (in Russian).
 5. Maximenko A. B., Myshkovets V. N., Shapovalov P. S. (2010) Pulsed Laser Cladding of Structural Steels with Annular Beams. *Vestnik GGTU im. P. O. Sukhogo = Bulletin Sukhoi State Technical University of Gomel*, (4), 63–68 (in Russian).
 6. Bessmeltsev V. P., Bulushev E. D. (2014) Optimization of Laser Micromachining Regimes. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 50 (6), 533–548. <https://doi.org/10.3103/s8756699014060016>.
 7. Parandoush P., Hossain A. (2014) A Review of Modeling and Simulation of Laser Beam Machining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 85, 135–145. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2014.05.008>.
 8. Nikityuk Y. V., Serdyukov A. N., Aushev I. Y. (2022) Optimization of Two-Beam Laser Cleavage of Silicate Glass. *Journal of Optical Technology*, 89 (2), 121–125. <https://doi.org/10.1364/jot.89.000121>.
 9. Emelyanov V. V., Kureychik V. V., Kureychik V. M. (2003) *Theory and Practice of Evolutionary Modeling. Moscow, Publishing House “FIZMATLIT”, 432* (in Russian).
 10. Krasnovskaya S. V., Naprasnikov V. V. (2016) Overview of Optimization Algorithms at Finite Elements Modeling of Condensing Units Design. *Vestsi Natsyyanal'nai Akademii Navuk Belarusi. Seryya Fizika-Tekhnichnyh Navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-Technical Series*, (2), 92–98 (in Russian).
 11. Fonseca C., Flemingz P. (1993) 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, 416–423*.
 12. Ansys. Available at: <https://www.ansys.com/>.
 13. Zinoviev V. E. (1989) *Thermophysical Properties of Metals at High Temperatures. Moscow, Metallurgiya Publ. 384* (in Russian).
 14. Baevich G. A., Maximenko A. V., Myshkovets V. N. (2016) Dynamics of Thermal Cycles formation in Pulsed Laser Welding and Surfacing of High-Strength Structural steels. *Vestnik GGTU im. P. O. Sukhogo = Bulletin Sukhoi State Technical University of Gomel*, (1), 38–44 (in Russian).
 15. Wu S., Xing J., Dong L., Zhu H. (2021) Multi-Objective Optimization of Microstructure of Gravure Cell Based on Response Surface Method. *Processes*, 9 (2), 403. <https://doi.org/10.3390/pr9020403>.
 16. Morgunov A. P., Revina I. V. (2014) *Planning and Analysis of the Results of the Experiment. Omsk, Publishing House of Omsk State Technical University, 343* (in Russian).
 17. Adler Yu. P., Markova E. V., Granovsky Yu. V. (1976) *Planning an Experiment in the Search for Optimal Conditions. Moscow, Nauka Publ, 278* (in Russian).

Received: 07.10.2022

Accepted: 10.01.2023

Published online: 31.05.2023