

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ АЛМАЗОВ

В.А. Емельянов¹, Е.Б. Шершнеv², Ю.В. Никитюк², С.И. Соколов², И.Ю. Аушев³¹ОАО «Интеграл», Минск²Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины³Университет гражданской защиты МЧС Республики Беларусь, Минск

OPTIMIZATION OF LASER PROCESSING OF DIAMONDS

V.A. Emelyanov¹, E.B. Shershnev², Y.V. Nikitjuk², S.I. Sokolov², I.Y. Aushev³¹JSC "INTEGRAL", Minsk²Francisk Skorina Gomel State University³University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus, Minsk

Аннотация. С применением генетического алгоритма MOGA программы ANSYS Workbench проведена оптимизация параметров лазерной резки алмазов. Конечно-элементный расчет температур и термоупругих напряжений выполнялся с использованием языка программирования APDL. С применением гранцентрированного варианта центрального композиционного плана эксперимента построена регрессионная модель лазерной резки алмазов. В качестве варьируемых факторов использовались скорость резки, радиус лазерного пучка и плотность мощности лазерного излучения. В качестве откликов использовались максимальные температуры и термоупругие напряжения в зоне лазерной обработки. Оценка влияния параметров обработки на максимальные температуры и напряжения, формируемые лазерным излучением, показала, что основным фактором является плотность мощности лазерного излучения. Оптимизация лазерной резки алмазов выполнялась для двух вариантов постановки задачи: по критерию минимума термоупругих напряжений и по критериям минимума термоупругих напряжений и максимума скорости обработки. Выполнено сравнение параметров, полученных в результате оптимизации, и параметров, полученных в результате конечно-элементного моделирования. Максимальная относительная погрешность результатов, полученных при использовании алгоритма MOGA, не превысила 9% при определении температур и 15% при определении термоупругих напряжений. В результате моделирования определены параметры обработки, использование которых обеспечит повышение производительности и надёжности лазерной резки алмазов.

Ключевые слова: лазерная резка, алмаз, MOGA, ANSYS.

Для цитирования: Оптимизация параметров лазерной обработки алмазов / В.А. Емельянов, Е.Б. Шершнеv, Ю.В. Никитюк, С.И. Соколов, И.Ю. Аушев // Проблемы физики, математики и техники. – 2022. – № 4 (53). – С. 30–36. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2022_4_53_30. – EDN: KYDPZC

Abstract. Using the genetic algorithm MOGA of the ANSYS Workbench program, the parameters of laser cutting of diamonds were optimized. The finite element calculation of temperatures and thermoelastic stresses was performed using the APDL programming language. Using a face-centered version of the central compositional plan of the experiment, a regression model of laser cutting of diamonds was constructed. Cutting speed, laser beam radius, and laser power density were used as variable factors. The maximum temperatures and thermoelastic stresses in the laser treatment zone were used as responses. An assessment of the influence of processing parameters on the maximum temperatures and voltages generated by laser radiation showed that the main factor is the power density of laser radiation. Optimization of laser cutting of diamonds was carried out for two options for setting the problem: according to the criterion of minimum thermoelastic stresses and according to the criteria of minimum thermoelastic stresses and maximum processing speed. The parameters obtained as a result of optimization and the parameters obtained as a result of finite element modeling are compared. The maximum relative error of the results obtained using the MOGA algorithm did not exceed 9% when determining temperatures and 15% when determining thermoelastic stresses. As a result of the simulation, the processing parameters were determined, the use of which will increase the productivity and reliability of laser cutting of diamonds.

Keywords: laser cutting, diamond, MOGA, ANSYS.

For citation: Optimization of laser processing of diamonds / V.A. Emelyanov, E.B. Shershnev, Y.V. Nikitjuk, S.I. Sokolov, I.Y. Aushev // Problems of Physics, Mathematics and Technics. – 2022. – № 4 (53). – P. 30–36. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2022_4_53_30 (in Russian). – EDN: KYDPZC

Введение

Свойства алмаза обеспечивают стабильную работу устройств, созданных на его основе, в критических условиях и делают перспективным его применение при создании новой техники [1]. Лазерная обработка кристаллов алмаза имеет ряд

преимуществ, к которым относится возможность получения узких резов в сочетании с высокой производительностью процесса размерной обработки. Также следует отметить возможность автоматизации процесса лазерной резки алмаза [2], [3]. В работах [3]–[8] ранее авторами выполнено

моделирование лазерной обработки кристаллов алмазов и проведены экспериментальные исследования.

В настоящее время получило развитие новое направление математического моделирования – метамоделирование, при реализации которого модели сложных систем формируются в результате вычислительных экспериментов. Данные модели называются метамоделами (модели над моделями) или суррогатными моделями. При этом метамоделами характеризуются значительно более высокой вычислительной эффективностью по сравнению с исходными моделями [9]–[11]. Одной из целей метамоделирования является определение приближенных значений выходных параметров на основе входных параметров без выполнения полных расчетов. Достижение данной цели обеспечивается в результате применения метода планирования вычислительных экспериментов при нахождении соответствующих регрессионных выражений [9], [12], [13]. Другой целью метамоделирования является использование созданных моделей при оптимизации параметров конструкций и технологических процессов [10], [11].

Оптимизация является важным направлением повышения эффективности использования лазерных технологий, примеры реализации которой с применением, в том числе генетических алгоритмов, представлены в работах [14]–[18]. Генетические алгоритмы являются частным случаем эволюционных методов и обеспечивают поиск лучших решений при помощи наследования и усиления полезных свойств множества объектов в процессе имитации их эволюции [19], [20]. Одним из эффективных генетических алгоритмов является алгоритм MOGA (Multi-Objective Genetic Algorithm) [21].

В работах [16]–[18], [20], [22], [23] представлены результаты оптимизации параметров конструкций и параметров технологических процессов с использованием алгоритма MOGA, реализованного в модуле DesignXplorer программы ANSYS Workbench [24].

В данной работе выполнена оптимизация параметров лазерной обработки алмазов круглыми лазерными пучками с использованием генетического алгоритма MOGA модуля DesignXplorer программы ANSYS Workbench.

1 Определение оптимальных параметров лазерной резки алмазов

Температурные поля и поля термоупругих напряжений, формируемые в кристаллах алмаза при лазерной обработке, являются характеристиками, определение которых необходимо для выбора эффективных технологических режимов. Соответствующие расчеты выполнялись в рамках несвязанной задачи термоупругости в квазистатической постановке [25] с использованием

языка программирования APDL (ANSYS parametric design language) [24].

Расчеты выполнялись для образца, имеющего форму прямоугольного параллелепипеда с геометрическими размерами $2 \times 3 \times 1,5$ мм. Для моделирования была сформирована модель, состоящая из 45418 элементов (рисунок 1.1). Для теплового анализа применялись элементы Solid 70, для прочностного анализа применялись элементы Solid 64. При расчетах использовались свойства алмазов, приведенные в работах [2], [26], [27]. Расчетные значения температурных полей представлены на рисунке 1.2.

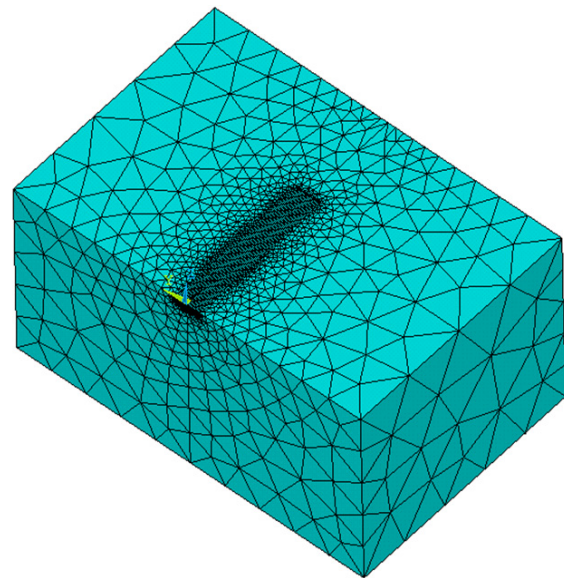


Рисунок 1.1 – Конечно-элементная модель

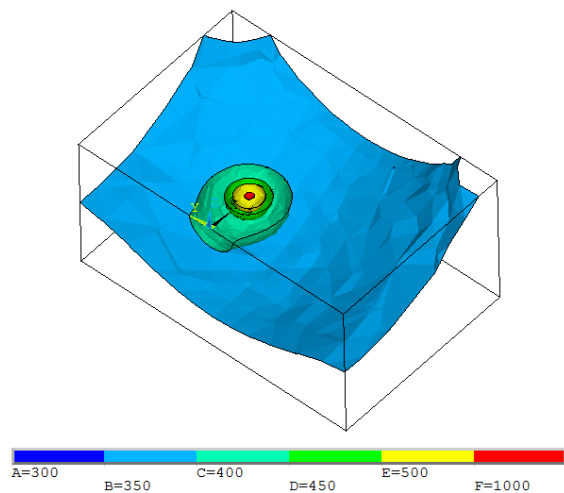


Рисунок 1.2 – Распределение температуры в объеме обрабатываемого алмаза, K
 $V = 5$ мм/с, $R = 6$ мм, $P = 10^{10}$ Вт/м²

Оптимизация параметров лазерной обработки проводилась с использованием модуля Ansys DesignXplorer расчетной среды Ansys Workbench в соответствии с последовательностью действий, представленных в работе [22].

При создании поверхности отклика был использован трехфакторный факторно-центрованный вариант центрального композиционного плана эксперимента [12]–[13]. В качестве факторов эксперимента были выбраны скорость обработки V , радиус лазерного пучка R и плотность мощности лазерного излучения P_0 . Определялись следующие выходные параметры: максимальная температура в зоне лазерной обработки T , максимальные напряжения в зоне обработки σ_1 , (таблица 1.1).

Таблица 1.1 – План эксперимента и результаты вычислений

№	P_1 $V, \text{ м/с}$	P_2 $R, \text{ м}$	P_3 $P_0, \text{ Вт/м}^2$	P_4 $T, \text{ К}$	P_5 $\sigma_1, \text{ Па}$
1	0,001	0,00005	$5 \cdot 10^{10}$	5199	$2,53 \cdot 10^9$
2	0,001	0,00006	$3 \cdot 10^{10}$	3967	$1,87 \cdot 10^9$
3	0,001	0,00007	$5 \cdot 10^{10}$	7597	$3,67 \cdot 10^9$
4	0,005	0,00005	$3 \cdot 10^{10}$	3178	$1,51 \cdot 10^9$
5	0,005	0,00006	10^{10}	1489	$8,04 \cdot 10^8$
6	0,005	0,00006	$3 \cdot 10^{10}$	3882	$1,87 \cdot 10^9$
7	0,005	0,00006	$5 \cdot 10^{10}$	6275	$3,14 \cdot 10^9$
8	0,005	0,00007	$3 \cdot 10^{10}$	4559	$2,20 \cdot 10^9$
9	0,009	0,00005	10^{10}	1252	$7,63 \cdot 10^8$
10	0,009	0,00005	$5 \cdot 10^{10}$	5087	$2,53 \cdot 10^9$
11	0,009	0,00006	$3 \cdot 10^{10}$	3869	$1,87 \cdot 10^9$
12	0,009	0,00007	10^{10}	1709	$8,29 \cdot 10^8$
13	0,009	0,00007	$5 \cdot 10^{10}$	7374	$3,69 \cdot 10^9$
14	0,001	0,00005	10^{10}	1274	$8,16 \cdot 10^8$
15	0,001	0,00007	10^{10}	1754	$9,35 \cdot 10^8$

Моделью объекта исследования являлись функции отклика, связывающие выходные параметры (T, σ_1) с факторами (V, R, P_0), которые менялись в заданных пределах при проведении численных экспериментов (таблица 1.1).

Полученные уравнения регрессии имеют следующий вид:

$$T = 316 - 2,01 \cdot 10^{-8} P_0 + 1,89 \cdot 10^6 V^2 - 3,12 \cdot 10^8 VR - 4,22 \cdot 10^{-7} VP_0 + 2,38 \cdot 10^{-3} RP_0,$$

$$\sigma_1 = 3,89 \cdot 10^8 - 2,64 \cdot 10^{-2} P_0 + 2,61 \cdot 10^{-13} P_0^2 + 1,13 \cdot 10^3 RP_0.$$

Для оценки полученных регрессионных моделей были использованы следующие критерии: – коэффициент детерминации

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

– среднеквадратичная ошибка $RMSE$ (Root Mean Square Error)

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

где d_i – значения, определенные методом конечных элементов, y_i – значения, определенные с использованием регрессионных моделей.

Значения коэффициентов детерминации для выходных параметров T и σ_1 принимают значения, равные 0,999 и 0,9981, а значения $RMSE$ для T и σ_1 равны 13,3 К и $4,27 \cdot 10^7$ Па соответственно, что можно интерпретировать как наличие необходимого соответствия регрессионной модели данным конечно-элементного анализа.

Была проведена оценка влияния входных параметров на выходные параметры. Установлено, что на значения максимальных температур T в зоне лазерной обработки и на величину максимальных термоупругих напряжений σ_1 наибольшее влияние оказывают значения плотности мощности лазерного излучения (рисунки 1.3, 1.4).

Эффективность нагрева лазерным излучением зависит как от параметров излучения, так и от свойств обрабатываемого материала, который должен обладать достаточной поглощательной способностью для излучения данной длины волны. На практике для решения этой задачи поверхность алмаза покрывают слоем вещества с низкой теплопроводностью и большим коэффициентом поглощения. Использование покрытия необходимо только на начальном этапе. В дальнейшем на поверхности алмаза в результате воздействия лазерного излучения формируется графитсодержащая пленка, которая эффективно поглощает энергию лазерного излучения. Можно считать, что стадия интенсивной графитизации алмаза наступает при достижении обрабатываемым материалом температуры 2300 К [2].

С учетом данного условия оптимизация лазерной обработки алмазов осуществлялась с использованием многокритериального генетического алгоритма MOGA модуля DesignXplorer с числом индивидов начальной популяции, равным 500, и числом индивидов за итерацию, равным 500 для двух вариантов постановки задачи:

1) по критерию минимума термоупругих напряжений

$$\sigma_1 \rightarrow \min$$

при задании значений максимальной температуры в зоне обработки $T \geq 2300\text{K}$.

2) по критериям минимума термоупругих напряжений

$$\sigma_1 \rightarrow \min$$

и максимума скорости обработки $V \rightarrow \max$

при задании значений максимальной температуры в зоне обработки $T \geq 2300\text{K}$.

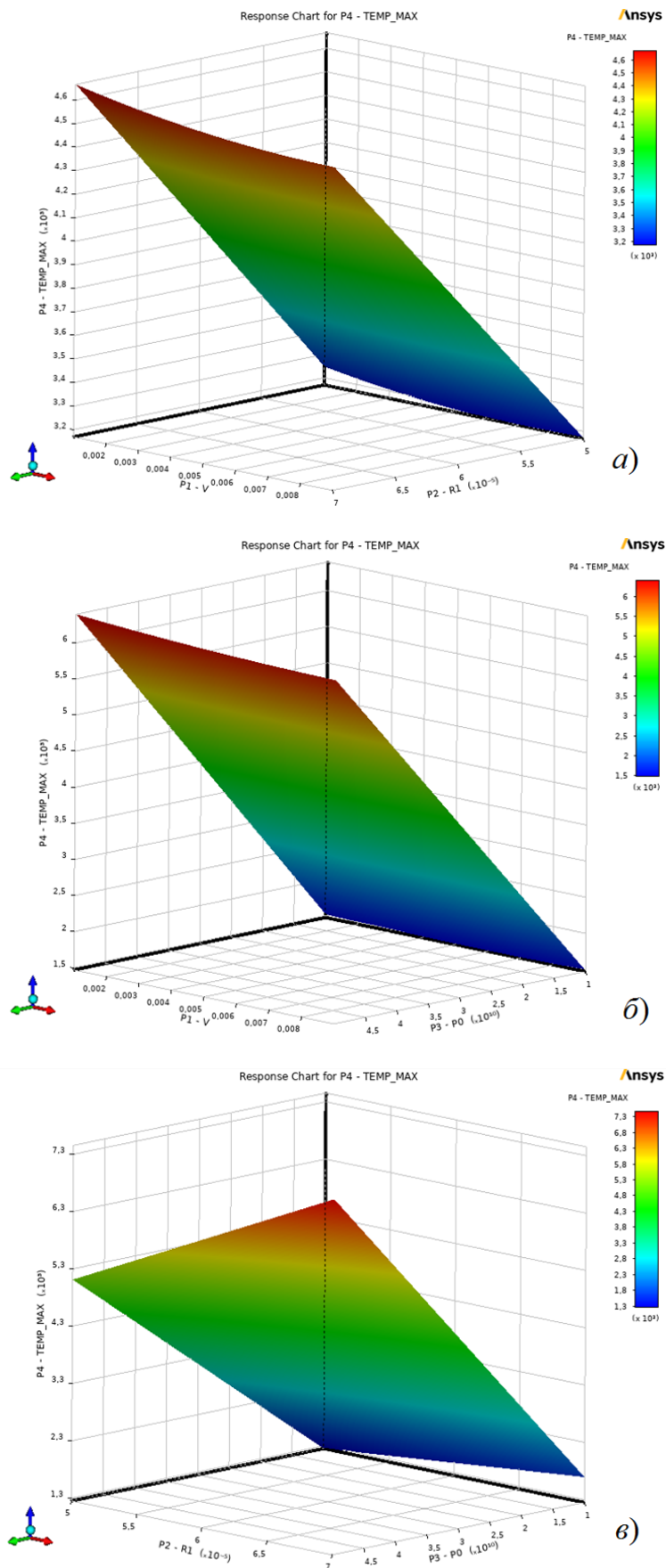


Рисунок 1.3 – Зависимость максимальной температуры T от параметров обработки:
 а) P_0 – const, б) R – const, в) V – const

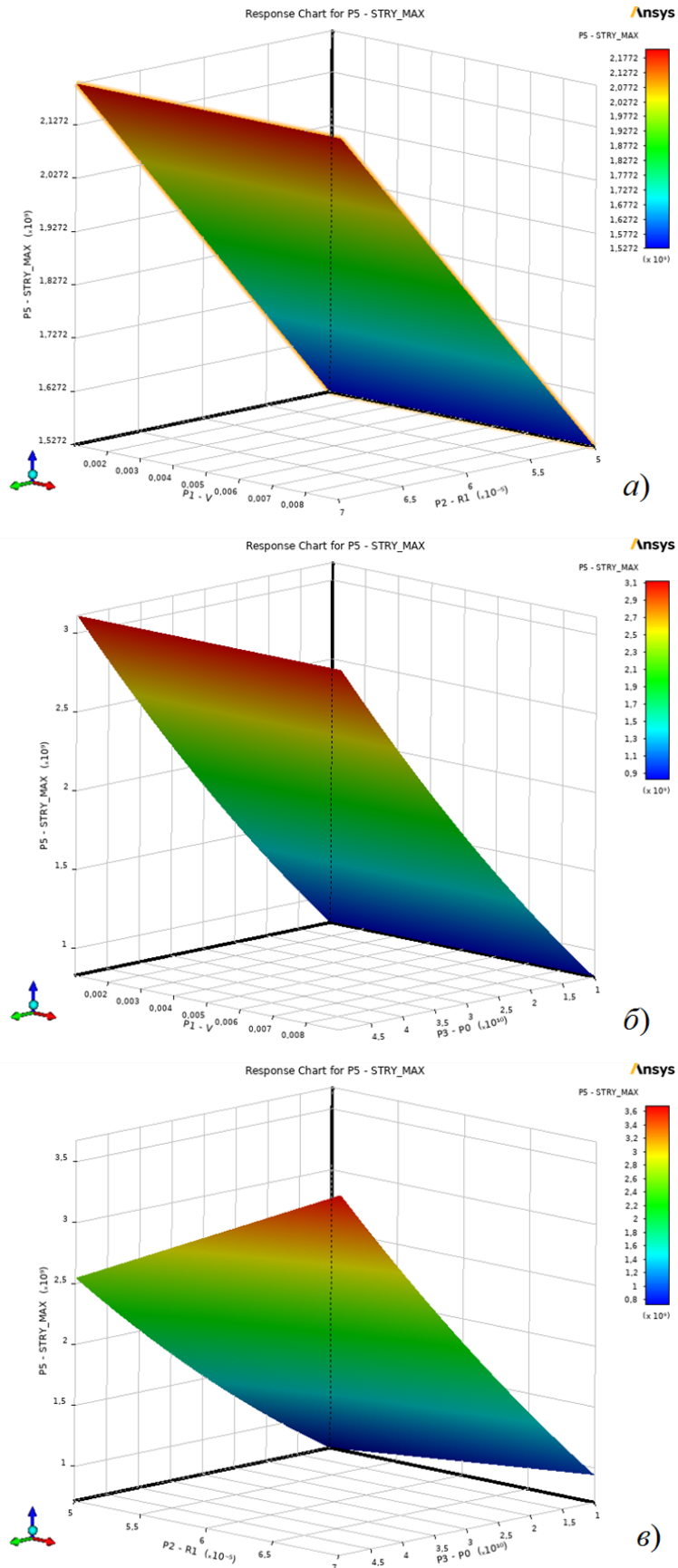


Рисунок 1.4 – Зависимость максимальных напряжений σ_1 от параметров обработки:
 а) P_0 – const, б) R – const, в) V – const

2 Результаты оптимизации

Результаты оптимизации приведены в таблице 2.1. В скобках приведены значения параметров, полученные в результате конечно-элементного моделирования, при этом максимальная относительная погрешность результатов, полученных при использовании алгоритма MOGA, не превысила 9% при определении температур и 15% при определении термоупругих напряжений.

Таблица 2.2 – Результаты оптимизации

№	1	2
P_1 V , м/с	0,0078	0,0088
P_2 R , м	0,00006	0,00007
P_3 P_0 , Вт/м ²	$1,63 \cdot 10^{10}$	$1,59 \cdot 10^{10}$
P_4 T , К	2305 (2237)	2329 (2545)
P_5 σ_1 , Па	$9,08 \cdot 10^8$ ($1,00 \cdot 10^9$)	$9,94 \cdot 10^8$ ($1,16 \cdot 10^9$)

Заключение

В работе показана возможность оптимизации параметров лазерной обработки алмазов с использованием генетического алгоритма MOGA модуля DesignXplorer. С использованием гранцентрированного варианта центрального композиционного плана эксперимента была получена регрессионная модель лазерной резки алмазов. Установлено наличие необходимого соответствия регрессионной модели результатам конечно-элементного анализа. В результате численного эксперимента определены оптимальные параметры лазерной обработки алмазов, с хорошей точностью согласующиеся с результатами экспериментальных исследований [3], которые могут быть использованы в технологических процессах обработки алмазов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Митягин, А.Ю. Технология и оборудование для обработки алмазных материалов современной техники / А.Ю. Митягин, А.А. Алтухов, А.Б. Митягина // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2009. – № 1. – С. 53–58.
2. Физические основы лазерной обработки алмазов: в 15 кн.: учеб. пособие для ВТУЗов / А.И. Шкадов; под ред. А.М. Бочарова. – Смоленск, 1997. – Кн. 3: Физические основы лазерной обработки алмазов. – 288 с.
3. Ретюхин, Г.Е. Размерная обработка ювелирных алмазов излучением YAG:ND лазера с модулированной добротностью / Г.Е. Ретюхин, А.Г. Кошечев, И.В. Файн, Е.Б. Шершнева // Весці

НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэх. навук. – 2001. – № 1. – С. 73–77.

4. Dependence of the diamond laser processing efficiency on crystallographic directions / S.V. Shalupaev, E.B. Shershnev, Y.V. Nikitjuk, V.V. Sviridova // SPIE. – 2001. – Vol. 4358. – P. 329–333.

5. Шершнева, Е.Б. Моделирование лазерной обработки кристаллов алмаза / Е.Б. Шершнева, Ю.В. Никитюк, А.Е. Шершнева // Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины. – 2011. – № 6 (69). – С. 164–168.

6. Особенности формирования термоупругих полей при лазерной обработке кристаллов алмаза / Е.Б. Шершнева, Ю.В. Никитюк, А.Е. Шершнева, С.И. Соколов // Проблемы физики, математики и техники. – 2015. – № 1 (22). – С. 38–40.

7. Особенности применения лазерного излучения с длинами волн 1064 нм, 532 нм и 266 нм для обработки кристаллов алмаза / Е.Б. Шершнева, Ю.В. Никитюк, А.Е. Шершнева, С.И. Соколов // Проблемы физики, математики и техники. – 2017. – № 1 (30). – С. 22–24.

8. Емельянов, В.А. Изучение влияния примесей на процессы формообразования синтетического алмаза в зоне термического влияния лазерного излучения / В.А. Емельянов, Е.Б. Шершнева, А.Н. Купо, С.И. Соколов // Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины. – 2022. – № 3 (132). – С. 117–120.

9. Сокращение размерности данных в задачах имитационного моделирования / Ю.Г. Агалаков, А.В. Бернштейн // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2012. – № 3. – С. 3–17.

10. Koziel, S. Surrogate-based modeling and optimization / S. Koziel, L. Leifsson. – New York: Springer, 2013.

11. Jiang, P. Surrogate model-based engineering design and optimization / P. Jiang, Q. Zhou, X. Shao. – Berlin / Heidelberg, Germany: Springer, 2020.

12. Планирование и анализ результатов эксперимента: учеб. пособие / А.П. Моргунов, И.В. Ревина; Минобрнауки России, ОмГТУ. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2014. – 343 с.

13. Адлер, Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – Москва: Наука, 1976. – 278 с.

14. Бессмельцев, В.П. Оптимизация режимов лазерной микрообработки / В.П. Бессмельцев, Е.Д. Булушев // Автометрия. – 2014. – Т. 50, № 6. – С. 3–21.

15. 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.

16. Nikityuk, Y.V. Optimization of two-beam laser cleavage of silicate glass / Y.V. Nikityuk,

A.N. Serdyukov, I.Y. Aushev // J. Opt. Technol. – 2022. – № 89. – P. 121–125.

17. *Оптимизация параметров обработки стали 12Х18Н9Т круглыми лазерными пучками* / Ю.В. Никитюк [и др.] // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого: научно-практический журнал. – 2022. – № 2. – С. 17–24.

18. *Никитюк, Ю.В.* Оптимизация параметров лазерного раскалывания кварцевого стекла / Ю.В. Никитюк, А.Н. Сердюков, И.Ю. Аушев // Проблемы физики, математики и техники. – 2021. – № 4 (49). – С. 21–28.

19. *Емельянов, В.В.* Теория и практика эволюционного моделирования / В.В. Емельянов, В.В. Курейчик, В.М. Курейчик. – Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 432 с.

20. *Красновская, С.В.* Обзор возможностей оптимизационных алгоритмов при моделировании конструкций компрессорно-конденсаторных агрегатов методом конечных элементов / С.В. Красновская, В.В. Напрасников // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2016. – № 2. – С. 92–98.

21. *Fonseca, C.* Genetic algorithms for multiobjective optimization: Formulation discussion and generalization / C. Fonseca, P. Flemingz // In Proceedings of The 5th International Conference on Genetic Algorithms. CA, USA. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers Inc. – 1993. – P. 416–423.

22. *Multi-objective optimization of microstructure of gravure cell based on response surface method* / S. Wu, J. Xing, L. Dong, H. Zhu // Processes. – 2021. – Vol. 9, № 403. – P. 1–15.

23. *Griffiths, J.* Optimization of process parameters in laser transmission welding for food packaging applications / J. Griffiths, C. Dowding // Procedia CIRP. – 2018. – № 74. – P. 528–532.

24. *Официальный сайт компании ANSYS.* – Режим доступа: <https://www.ansys.com>. – Дата доступа: 04.05.2022.

25. *Коваленко, Л.Д.* Основы термоупругости / Л.Д. Коваленко. – Киев: Наукова думка, 1970. – 307 с.

26. *Природные и синтетические алмазы* / Г.Б. Бокий [и др.]. – Москва: Наука, 1986. – 221 с.

27. *Физические свойства алмаза* / Н.В. Новиков [и др.]. – 1987. – 201 с.

Поступила в редакцию 10.11.2022.

Информация об авторах

Емельянов Виктор Андреевич – чл.-корр. НАН Беларуси, д.т.н., профессор

Шеринев Евгений Борисович – к.т.н., доцент

Никитюк Юрий Валерьевич – к.ф.-м.н., доцент

Соколов Сергей Иванович – ст. преподаватель

Аушев Игорь Юрьевич – к.т.н., доцент