

# Построение математической модели тепловых процессов лазерной обработки с применением дифракционных оптических элементов

С.П. Мурзин<sup>а</sup>, А.Ю. Тисарев<sup>а</sup>, М.В. Блохин<sup>а</sup>, С.А. Афанасьев<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королёва, 443086, Московское шоссе 34, Самара, Россия

## Аннотация

Проведён расчёт распределения интенсивности лазерного излучения в фокальной плоскости дифракционного оптического элемента. Для расчёта применяется программный комплекс TracePro. Построена математическая модель тепловых процессов лазерной обработки с применением дифракционных оптических элементов. Для определения на суперкомпьютере «Сергей Королёв» температурных полей, имеющих место в процессе лазерной обработки материала, использовалась программа вычислительной газодинамики CFX версии 15.0. Определена зависимость теплопроводности от температуры для покрытий из Ni-Al сплава, полученных плазменным напылением на воздухе. Расчёт теплоёмкости сплава проводился на основе правила аддитивности. Определена температурная зависимость коэффициента поглощения при воздействии CO<sub>2</sub>-лазерного излучения.

*Ключевые слова:* дифракционный оптический элемент; лазерное воздействие; математическая модель; тепловой источник; температура

## 1. Введение

При нанесении срабатываемого покрытия на корпусные детали газотурбинного двигателя используют подслои, т.е. промежуточное связующее покрытие, компенсирующее различия в коэффициенте линейного расширения материалов, а также обеспечивающее более высокую прочность сцепления. В качестве такого материала между основной рабочей кольца и срабатываемым покрытием применяют экзотермически реагирующий или терморреагирующий никель-алюминиевый порошок. Терморреагирующий порошок наносят на основу методом плазменного напыления, при котором составляющие его частицы взаимодействуют с высокотемпературной плазменной струёй [1-3]. При напылении экзотермически реагирующего порошка происходит взаимодействие его компонентов с образованием новых соединений, при этом выделяется значительное количество тепла, что позволяет дополнительно разогреть порошок. Для интенсификации диффузии составных компонентов материала, по крайней мере, один компонент должен пребывать в жидкой или газообразной фазе.

Для улучшения характеристик покрытий достаточно широкое распространение получила термическая обработка нанесённого покрытия [4-6]. Термическую обработку целесообразно проводить для улучшения характеристик покрытия за счёт следующих факторов: увеличение площади контакта покрытия и основы; уменьшение пористости материала; увеличение прочности межчастичных связей [7, 8]. Лазерное воздействие на нанесённые покрытия является одним из методов улучшения их свойств [9-12]. Термическая обработка нанесённого покрытия может вызвать растрескивание материала вследствие увеличения уровня напряжений при фазовых превращениях, однако возможна реализация режимов лазерного воздействия, приводящих к уменьшению остаточных напряжений. С целью снижения остаточных напряжений в отсутствие образования трещин при выборе режимов обработки должны быть определены скорость перемещения лазерного пятна по поверхности основы и плотность мощности излучения.

Для формирования лазерного излучения применяются различные оптические системы. Однако ни одна из них не может обеспечить одновременного сочетания таких свойств, как создание требуемого распределения мощности, концентрация всей энергии лазерного излучения в зоне воздействия заданной формы и высокая надёжность. Перспективно применение дифракционных оптических элементов (ДОЭ) [13-17]. Осуществляя выбранное на этапе их расчёта преобразование лазерной энергии, такие оптические элементы предоставляют возможность сформировать заранее заданный профиль интенсивности излучения в фокальной плоскости. Применение ДОЭ в технологии лазерной обработки материалов открывает принципиально новые возможности управления свойствами и эксплуатационными характеристиками обрабатываемых деталей [18-21].

Целью работы является построение математической модели тепловых процессов лазерной обработки подслоя при нанесении срабатываемого покрытия на корпусные детали газотурбинного двигателя с применением дифракционных оптических элементов. Известно, что температура может являться фактором, в значительной степени определяющим характер протекания процессов в обрабатываемых материалах. Аналогичные подходы к построению математической модели могут быть использованы при исследовании процессов формирования наноструктурированных материалов лазерным воздействием.

## 2. Расчёт распределения интенсивности лазерного излучения в фокальной плоскости ДОЭ

Проведём расчёт распределения интенсивности лазерного излучения в фокальной плоскости ДОЭ, имеющего следующие параметры:  $f = 0,2241$  м;  $L_0 = 5,6 \cdot 10^{-3}$  м;  $R = 2,5 \cdot 10^{-2}$  м;  $r = 0,7R$ . Внешний вид рабочей поверхности ДОЭ представлен на рис. 1. Диаметр фокусируемого пучка излучения CO<sub>2</sub> слэб лазера Rofin DC 010, мощность излучения

которого регулируется в пределах 10...1000 Вт, составляя  $1,6 \cdot 10^{-2}$  м. Длина волны излучения  $\lambda = 10,6 \cdot 10^{-6}$  м. Распределение плотности мощности излучения слэб лазера представлено на рис. 2. Данное распределение близкое к гауссовскому: параметр качества пучка или параметр распространения пучка  $M^2 = 1,1$ . Для изменения размера лазерного луча, фокусируемого ДОЭ, возможно использовать телескопическую систему из двух линз.



Рис. 1. Внешний вид рабочей поверхности ДОЭ.

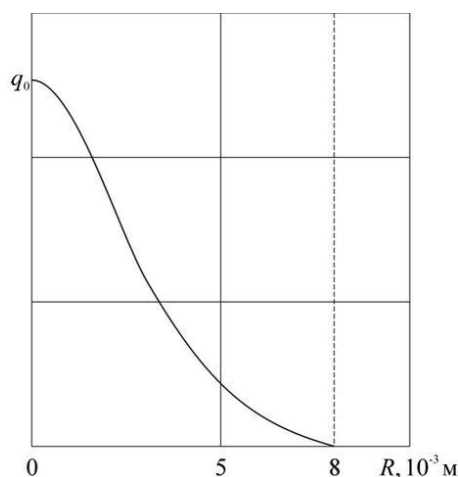


Рис. 2. Распределение плотности мощности излучения CO<sub>2</sub> слэб лазера Rofin DC 010.

Для расчета применяется программный комплекс TrasePro, предназначенный для трехмерного моделирования поверхностей оптических деталей, построения хода лучей в оптических системах и проведения оптического анализа. Программный комплекс TrasePro позволяет осуществлять построение оптических элементов по уравнениям их поверхностей. В TrasePro реализован метод обобщенной трассировки лучей. Расчет каждого луча, падающего на поверхность оптического элемента, проводится с учетом поглощения, отражения, рефракции, дифракции и рассеяния.

Построение поверхности дифракционного оптического элемента осуществляется с помощью встроенного в программный комплекс TrasePro макроязыка. Он относится к типу схемных языков программирования, позволяющих составлять макропрограммы с использованием операторов цикла и ветвления. Для построения оптической поверхности при  $f = 0,2241$  м;  $L_0 = 5,6 \cdot 10^{-3}$  м осуществлялось определение значения полинома, в виде которого можно представить соотношение:

$$P_n = \frac{\int_0^{\cos \theta} dU \int_0^{\sqrt{R^2 - U^2}} \exp\left(-\frac{U^2 + V^2}{r^2}\right) dV}{\pi f \left(g\left(\frac{R}{r}\right)\right)^*} \quad (1)$$

В результате вычислений в программе Matlab определено:

$$P_n = -2,3267 \cdot 10^{-18} \cdot x^6 + 5,7104 \cdot 10^{-15} \cdot x^5 - 5,8706 \cdot 10^{-12} \cdot x^4 + 2,4413 \cdot 10^{-9} \cdot x^3 + 1,0053 \cdot 10^{-6} \cdot x^2 + 4,4895 \cdot 10^{-5} \cdot x - 0,00086771.$$

Расчетное распределение плотности вдоль оси Oy в фокальной плоскости ДОЭ при мощности излучения  $Q = 500$  Вт представлено на рис. 3. Представим  $q(x, y)$  в виде уравнения:

$$q(\xi, \eta) = q_0 (a_{n_1} \bar{\xi}^{2n} + a_{n_1-1} \bar{\xi}^{2(n-1)} + \dots + a_2 \bar{\xi}^4 + a_1 \bar{\xi}^2 + a_0) \cdot (b_{n_2} \bar{\eta}^{-2m} + b_{n_2-1} \bar{\eta}^{-2(m-1)} + \dots + b_2 \bar{\eta}^{-4} + b_1 \bar{\eta}^{-2} + b_0) \quad (2)$$

где  $q_0$  – плотность мощности в центре теплового источника;  $\bar{\xi} = \xi/(10^{-3}\text{ м})$ ;  $\bar{\eta} = \eta/(10^{-3}\text{ м})$  – безразмерные координаты;  $a_{n_1}, a_{n_1-1}, \dots, a_2, a_1, a_0$ ;  $b_{n_1}, b_{n_1-1}, \dots, b_2, b_1, b_0$  – коэффициенты полиномов (степенных многочленов), где  $n$  и  $m$  целые числа;  $v(\xi, \eta)$  – дополнительная функция.

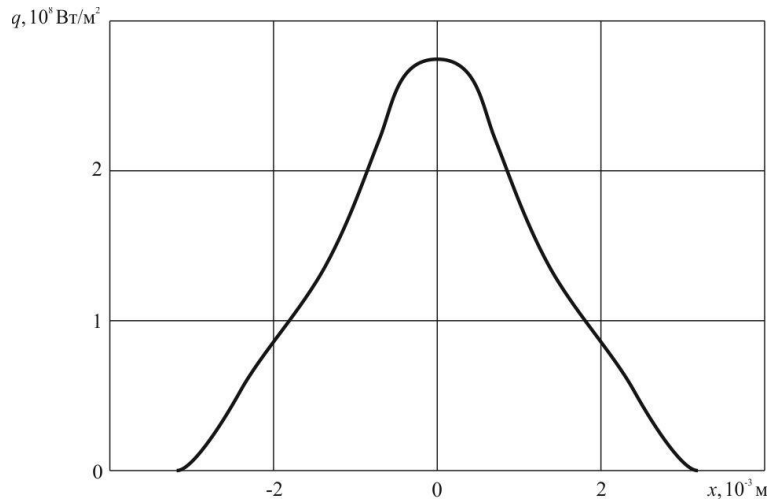


Рис. 3. Распределение интенсивности вдоль оси  $Ox$  в фокальной плоскости ДОЭ при мощности излучения  $Q=500$  Вт;  $q_0 = 2,6504 \cdot 10^8$  Вт/м<sup>2</sup>.

Примем  $a = 6,25 \cdot 10^{-3}$  м;  $b = 1,25 \cdot 10^{-3}$  м;  $n_1 = 5$ ;  $n_2 = 2$ ;  $a_5 = -4,7423 \cdot 10^{-5}$ ;  $a_4 = 1,6906 \cdot 10^{-3}$ ;  $a_3 = -2,2028 \cdot 10^{-2}$ ;  $a_2 = 0,13326$ ;  $a_1 = -0,44559$ ;  $a_0 = 1$ ;  $b_2 = 15,13$ ;  $b_1 = -7,2412$ ;  $b_0 = 1$ ;  $q_0 = 2,6504 \cdot 10^8$  Вт/м<sup>2</sup>,  $v(\xi, \eta) = 1,0$ .  $\xi = x$ ;  $\eta = y$ .

Получим выражение, описывающее распределение плотности мощности  $q(x, y)$  в виде уравнения для полосового теплового источника при мощности излучения  $Q=500$  Вт:

$$q(x, y) = q_0 \left( -4,7423 \cdot 10^{-5} \cdot x^{10} + 1,6906 \cdot 10^{-3} \cdot x^8 - 2,2028 \cdot 10^{-2} \cdot x^6 + 0,13326 \cdot x^4 - 0,44559 \cdot x^2 + 1 \right) \cdot (15,13 \cdot y^4 - 7,2412 \cdot y^2 + 1) \text{ [Вт/м}^2\text{]}.$$

при  $q_0 = 2,6504 \cdot 10^8$  Вт/м<sup>2</sup>;  $x \in [-3,125 \text{ мм}; 3,125 \text{ мм}]$ ;  $y \in [-0,625 \text{ мм}; 0,625 \text{ мм}]$ .

Выполнено экспериментальное определение распределения плотности мощности лазерного пучка с использованием ДОЭ. Для измерения распределения плотности мощности в световом пятне  $\text{CO}_2$  слэб лазера Rofin DC 010 с использованием стандартного измерителя мощности, снабженного квадратной диафрагмой размером  $10^{-4} \text{ м} \times 10^{-4} \text{ м}$ , применен способ механического сканирования. Определено, что результаты экспериментальных исследований хорошо коррелируют с расчетными данными. Относительная погрешность определения плотности мощности  $q$  не превысила 5...7 %.

### 3. Построение математической модели тепловых процессов лазерной обработки подслоя при нанесении срабатываемого покрытия на корпусные детали газотурбинного двигателя с применением ДОЭ

Для определения на суперкомпьютере «Сергей Королёв» температурных полей в основе и покрытии, имеющих место в процессе лазерной обработки материала использовалась программа вычислительной газодинамики CFX версии 15.0. С целью решения задачи построена конечно-объемная модель всего рабочего кольца с покрытием. Для моделирования охлаждения за счёт радиационного и конвективного теплообмена построена модель воздушной области. Расчётная схема представлена на рис. 4.

Модели покрытия и основы для сектора в  $30^\circ$  были разбиты упорядоченной гексагональной сеткой с размером ребра элемента  $2,5 \cdot 10^{-4}$  м (рис. 5,а), тогда как остальной объём колец состоял из тетраэдральных элементов. Объём воздушной области также был разбит тетраэдральной сеткой. Область пристеночного слоя воздушной области содержала гексагональные элементы, представленные на рис. 5,б. Непосредственно в области лазерного воздействия размер элементов конечно-объёмной стенки был уменьшен.

Определим граничные условия. Мощность теплового потока составляет 500 Вт. В расчётной модели тепловой поток от лазерного источника определялся 125-ью точечными тепловыми источниками с шагом  $2,5 \cdot 10^{-4}$  м. Для расчёта конвективного охлаждения технологического объекта осуществлено моделирование открытой границы воздушной области, представленной на рис. 4. В расчётной модели имелась возможность изменять скорость перемещения технологического объекта. С целью определения теплового состояния технологического объекта при расчёте в нестационарной постановке необходимо задать следующие физические свойства материалов покрытия и основы: плотность, теплопроводность и теплоёмкость. Кроме того, для моделирования поглощения теплового потока и охлаждения технологического объекта необходимо определить радиационные характеристики поверхности.

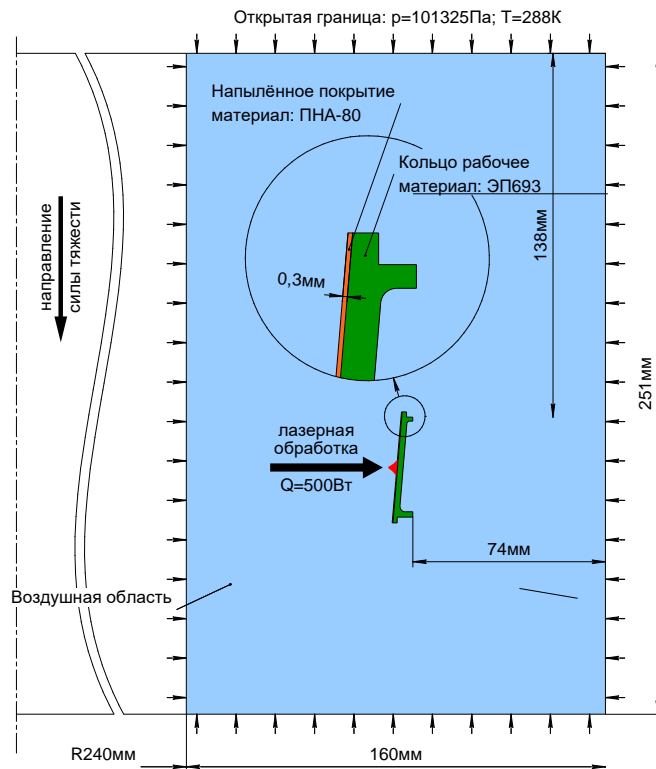
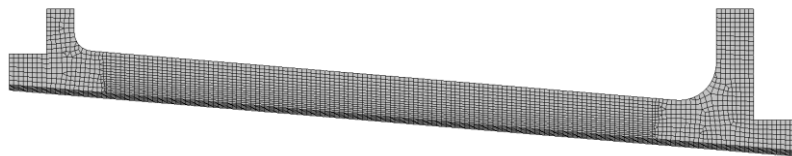
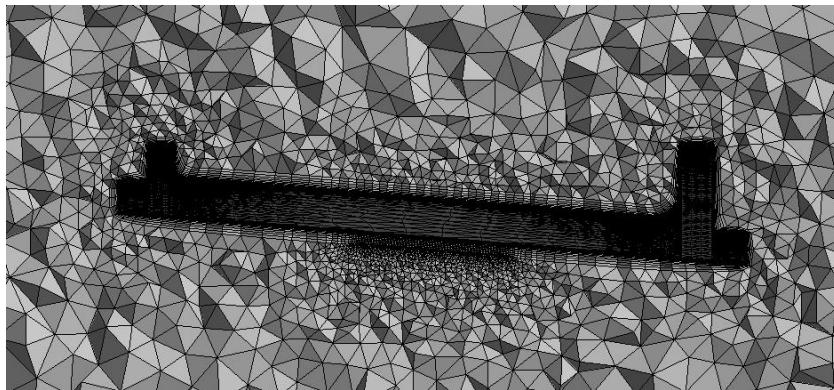


Рис. 4. Расчётная схема при определении температурных полей в основе и покрытии.



а



б

Рис. 5. Дискретизация расчётной области: сечение модели покрытия и основы (а); сечение модели воздушной области (б).

В процессе нанесения покрытия взаимодействие его составных компонентов сопровождается химическими реакциями, которые приводят к формированию физических свойств материала, сильно отличающихся от характеристик исходных компонентов. В известных монографиях и справочниках данные по изменению свойств материала в зависимости от температуры не приведены с достаточной точностью, что приводит к необходимости их расчёта. Определена зависимость теплопроводности от температуры для покрытий из Ni-Al сплава, полученных плазменным напылением на воздухе. Расчёт теплоёмкости Ni-Al сплава проводился на основе правила аддитивности. Определена температурная зависимость коэффициента поглощения при воздействии CO<sub>2</sub>-лазерного излучения, необходимая для оценки количества поглощённой энергии.

#### 4. Заключение

Проведён расчёт распределения интенсивности лазерного излучения в фокальной плоскости ДОО. Для расчёта применяется программный комплекс TracePro, который позволяет осуществлять построение оптических элементов по уравнениям их поверхностей. Определено распределение плотности в фокальной плоскости ДОО при мощности излучения 500 Вт. Получено выражение, описывающее распределение плотности мощности в виде уравнения для полосового теплового источника. Выполнено экспериментальное определение распределения плотности мощности лазерного пучка с использованием ДОО. Использовался CO<sub>2</sub> слэб лазера Rofin DC 010, параметр распространения пучка которого равен 1,1. Определено, что результаты экспериментальных исследований хорошо коррелируют с расчётными данными. Относительная погрешность определения плотности мощности не превысила 5...7 %.

Построена математическая модель тепловых процессов лазерной обработки подслоя при нанесении срабатываемого покрытия на корпусные детали газотурбинного двигателя с применением ДОО. Для определения на суперкомпьютере «Сергей Королёв» температурных полей, имеющих место в процессе лазерной обработки материала, использовалась программа вычислительной газодинамики CFX версии 15.0. Определена зависимость теплопроводности от температуры для покрытий из Ni-Al сплава, полученных плазменным напылением на воздухе. Расчёт теплоёмкости сплава проводился на основе правила аддитивности. Определена температурная зависимость коэффициента поглощения при воздействии CO<sub>2</sub>-лазерного излучения.

#### Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках реализации федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 годы». Уникальный идентификатор ПНИЭР RFMEFI57815X0131.

#### Литература

- [1] Tucker, R.C. Jr. Thermal spray coatings: Broad and growing applications / R.C. Jr Tucker // *Int. J. Powder Metall.* – 2002. – Vol. 38(7). – P. 45-53.
- [2] Batra, U. Thermal spray coating of abradable Ni based composite / U Batra // *Surf. Eng.* – 2009. – Vol 25(4). – P. 284-286.
- [3] Jin, Y. Process optimization of plasma spraying Ni-based alloy coating / Y. Jin, Z. Qian, C. Wang, J. Yue, K. Li // *Heat Treatment of Metals.* – 2013. – Vol. 38(4). – P. 104-108.
- [4] Molins, R. Interlamellar boundary characterization in Ni-based alloy thermally sprayed coating / R. Molins, B. Normand, G. Rannou, B. Hannoier, H. Liao // *Mat. Sci. Eng. A-Struct.* – 2003. – Vol. 351(1-2). – P. 325-333.
- [5] Wang, J-H. Microstructure of Ni-based self-fluxing alloy sprayed coating / J.-H. Wang, M. Friesel, M. Willander, R. Warren // *J. Iron Steel Res. Int.* – 2005. – Vol. 12(2). – P. 56-59.
- [6] Zhang, X.C. Porosity and effective mechanical properties of plasma-sprayed Ni-based alloy coatings / X.C. Zhang, B.S. Xu, F.Z. Xuan, S.T. Tu, H.D. Wang, Y.X. Wu // *Appl. Surf. Sci.* – 2009. – Vol. 255(8). – P. 4362-4371.
- [7] Skulev, H. Modifications of phases, microstructure and hardness of Ni-based alloy plasma coatings due to thermal treatment / H. Skulev, S. Malinov, P.A.M. Basheer, W. Sha // *Surface and Coatings Technology.* – 2004. – Vol. 185(1). – 18-29.
- [8] Kromer, R. Laser surface patterning to enhance adhesion of plasma sprayed coatings / R. Kromer, S. Costil, J. Cormier, D. Courapied, L. Berthe, P. Peyre, M. Boustie // *Surface and Coatings Technology.* – 2015. – Vol. 278. – P. 171-182.
- [9] Liu, F. Ni-based alloy cladding on copper crystallizer surface by laser. Dongbei Daxue Xuebao / F. Liu, C.-S. Liu, X.-Q. Tao, S.-Y. Chen // *Journal of Northeastern University.* – 2006. – Vol. 27(10). – P. 1106-1109.
- [10] Felgueroso, D. Parallel laser melted tracks: Effects on the wear behaviour of plasma-sprayed Ni-based coatings / D. Felgueroso, R. Vijande, J.M. Cueto, R. Tucho, A. Hernández // *Wear.* – 2008. – Vol. 264(4). – P. 257-263.
- [11] Kromer, R. Laser surface patterning to enhance adhesion of plasma sprayed coatings / R. Kromer, S. Costil, J. Cormier, D. Courapied, L. Berthe, P. Peyre, M. Boustie // *Surface and Coatings Technology.* – 2015. – Vol. 278. – P. 171-182.
- [12] Murzin, S.P. Formation of structures in materials by laser treatment to enhance the performance characteristics of aircraft engine parts / S.P. Murzin // *Computer Optics.* – 2016. – Vol. 40(3). – P. 353-59.
- [13] Doskolovich, L.L. Focusators into a ring / L.L. Doskolovich, S.N. Khonina, V.V. Kotlyar, I.V. Nikolsky, V.A. Soifer, G.V. Uspleniev // *Opt. Quant. Electron.* – 1993. – Vol. 25(11). – P. 801-814.
- [14] Khonina, S.N. Levelling the focal spot intensity of the focused Gaussian beam / S.N. Khonina, V.V. Kotlyar, R.V. Skidanov, V.A. Soifer // *J. Mod. Optic.* – 2000. – Vol. 47(5). – P. 883-904.
- [15] Doskolovich, L.L. A method of designing diffractive optical elements focusing into plane areas / L.L. Doskolovich, N.L. Kazansky, S.I. Kharitonov, V.A. Soifer // *J. Mod. Optic.* – 1996. – Vol. 43(7). – P. 1423-1433.
- [16] Soifer, V. *Computer Design of Diffractive Optics* / V. Soifer – UK, USA, India, Russia: Ed., Cambridge International Science Publishing Ltd. & Woodhead Pub. Ltd., 2012. – 896 p.
- [17] Kharitonov, S.I. Solving the inverse problem of focusing laser radiation in a plane region using geometrical optics / S.I. Kharitonov, L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy // *Computer Optics.* – 2016. – Vol. 40(4). – P. 439-450.
- [18] Murzin, S.P. The research of intensification's expedients for nanoporous structures formation in metal materials by the selective laser sublimation of alloy's components / S.P. Murzin // *Computer Optics.* – 2011. – Vol. 35(2). – P. 175-179.
- [19] Murzin, S.P. Local laser annealing for aluminium alloy parts / S.P. Murzin // *Laser. Eng.* – 2016. – Vol. 33(1-3). – P. 67-76.
- [20] Murzin, S.P. Microstructuring the surface of silicon carbide ceramic by laser action for reducing friction losses in rolling bearings / S.P. Murzin, V.B. Balyakin // *Opt. Laser Technol.* – 2017. – Vol. 88. – P. 96-98.
- [21] Murzin, S.P. Formation of nanoporous structures in metallic materials by pulse-periodic laser treatment / S.P. Murzin // *Opt. Laser Technol.* – 2015. – Vol. 72. – P. 48-52.