

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ЛАЗЕРНОГО СПЕКАНИЯ НА ТОЛЩИНУ СПЕЧЕННОГО СЛОЯ ПОРОШКА DSK-F75

*Н.А. САПРЫКИНА, канд. техн. наук, доцент
(ЮТИ НИТПУ, г. Юрга)*

Поступила 26 января 2015

Рецензирование 10 февраля 2015

Принята к печати 15 февраля 2015

Сапрыкина Н.А. – 652055, г. Юрга, Кемеровская обл., ул. Ленинградская, 26,
Юргинский технологический институт (филиал) Национального исследовательского Томского
политехнического университета,
e-mail: nat_anat_sapr@mail.ru

В современной экономике для сокращения сроков выпуска нового изделия на этапах проектирования и изготовления применяют технологии послойного лазерного спекания. Развитие технологии идет по пути внедрения новых порошковых материалов и определения рациональных технологических режимов формирования поверхностного слоя заданного качества. Создание функционального изделия возможно только в определенном диапазоне лазерного воздействия, который подбирается экспериментально для порошкового материала, на точность изделия большое влияние оказывает толщина слоя. В работе представлены результаты экспериментальных исследований воздействия технологических режимов спекания порошкового материала (мощности лазерного излучения, скорости перемещения луча лазера, шага сканирования, предварительной температуры подогрева) на толщину спеченного слоя из кобальтхроммолибденового порошка DSK-F75. Исследования проводились на технологическом лазерном комплексе формирования поверхностей деталей сложной пространственной формы. Толщина спеченного слоя определялась по специально разработанной методике с применением инструментального цифрового микроскопа. Получена математическая зависимость толщины спеченного поверхностного слоя от режимов спекания кобальтхроммолибденового порошка на основе теории планирования эксперимента и статической обработки результатов, позволяющая выявить значимые параметры. По математической зависимости построены графики с наложением экспериментальных значений толщины спеченного слоя в зависимости от режимов спекания. Анализ графических зависимостей позволяет выявить значимые параметры режима - мощность лазерного излучения, скорость перемещения луча лазера, шаг сканирования, влияющие на толщину спеченного слоя, а также пределы ее изменения с 0,65 до 1 мм за счет увеличения мощности лазера с 10 до 20 Вт; с 0,65 до 0,88 мм за счет уменьшения скорости перемещения луча лазера с 300 до 100 мм/мин; с 0,9 до 1,27 мм за счет уменьшения шага сканирования с 0,15 до 0,1 мм; с 0,88 до 0,91 мм за счет увеличения температуры подогрева порошкового материала с 26 до 200 °С.

Ключевые слова: послойное лазерное спекание, режимы спекания, толщина спеченного слоя, порошковый материал.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-1-27-32

Введение

В современном производстве самым перспективным и быстрорастущим сектором является сектор аддитивных технологий, ежегодный прирост рынка превышает 25 %. По данным аналитиков, к 2020 году он вырастет до 12 млрд долларов США [1, 2]. Одной из интенсивно развива-

ющихся технологий аддитивного производства изделий является технология послойного лазерного спекания металлических порошков [3]. Применение данной технологии позволяет сократить сроки выпуска нового изделия на этапах проектирования и изготовления. Для создания изделий применяется порошковый материал, послойно спеченный лучом лазера на основе 3D

CAD-модели [4, 5]. Наряду с преимуществами данной технологии выявлено, что получаемое качество изделий на установках быстрого прототипирования в ряде случаев не соответствует целям изготовления даже с рекомендуемым порошком и на заданных режимах спекания для конкретной установки.

Развитие технологии идет по пути внедрения новых порошковых материалов и определения рациональных технологических режимов формирования поверхностного слоя заданного качества, улучшения физико-механических свойств изделий, повышения качества и точности формируемых изделий [6, 7]. Создание функционального изделия возможно только в определенном диапазоне лазерного воздействия, который подбирается экспериментально для нового порошкового материала, а на точность прототипа значительное влияние оказывает толщина слоя [8, 9, 10].

Определение значений толщины единичного спеченного слоя является сложной задачей. Если спеченный слой имеет недостаточную толщину, то возникают сложности с нанесением следующего слоя порошка из-за возможности разрушения предыдущего. Увеличение толщины слоя наносимого порошка приводит к расслоению изделия после спекания [11]. Толщина слоя оказывает влияние и на качество боковой поверхности, имеющей ступенчатый вид. Высота каждой ступеньки примерно равна толщине спеченного слоя. Режимы спекания необходимо назначать таким образом, чтобы изделие получилось требуемых размеров в пределах допуска заданного качества. Необходимо знать толщину спеченного единичного слоя и при рассечении CAD-модели на слои. В патенте на изобретение 2262741 РФ [12] предложен метод высокой точности разбиения виртуальной объемной модели будущего изделия на слои, толщиной меньше поля допуска на номинальный профиль поверхности модели, при этом номинальный профиль поверхности модели проходит через среднюю линию поперечных слоев, и получают фактический профиль. Толщина слоя назначается в диапазоне

$$Z_{\min} \leq Z \leq Z_{\max}, \quad (1)$$

где Z_{\min} и Z_{\max} – минимальная и максимальная толщина слоя соответственно, которую можно получить на технологическом оборудовании.

Целью данной работы является установление пределов, в которых можно изменять толщину Z спеченного поверхностного слоя из кобальт-хроммолибденового порошка за счет изменения технологических режимов лазерной обработки.

Методика экспериментального исследования

Эксперименты проводились по лазерному спеканию кобальтхроммолибденового порошка DSK-F75. Химический состав порошка: кобальт – 66,4 %, хром – 28 %, молибден – 3 %, кремний, марганец, никель, углерод – менее 1 %. Этот класс сплавов характеризуется хорошими механическими свойствами (прочностью, твердостью и пр.), коррозионной и температурной стойкостью. Рассматриваемый материал применяется для создания изделий, функционирующих при высоких температурах.

Экспериментальная установка состоит из иттербиевого волоконного лазера ЛК-100-В (длина волны 1,07 мкм), трехкоординатного стола, персонального компьютера, системы ЧПУ и оригинального программного обеспечения [13].

Результаты и обсуждения

Поисковые эксперименты показали, что основными параметрами режима, оказывающими наибольшее влияние на толщину спеченного слоя, являются мощность лазерного излучения, скорость перемещения луча лазера, шаг сканирования, предварительная температура подогрева порошкового материала.

Создание математической модели толщины спеченного поверхностного слоя от режимов спекания позволяет управлять процессом с целью получения качественного изделия. Для создания математической модели зависимости толщины спекаемого слоя от режимов спекания проведен четырехфакторный эксперимент [14]. Уровни и интервалы варьирования выбирались по результатам предварительных поисковых экспериментов таким образом, чтобы спеченный образец обладал некоторой прочностью и не рассыпался от прикосновения. Для этого мощность P изменялась от 10 до 20 Вт, скорость перемещения лазера V от 100 мм/мин до 300 мм/мин, температура порошкового материала t от 26 до 200 °С, шаг сканирования s от 0,1 до 0,15 мм (рис. 1).

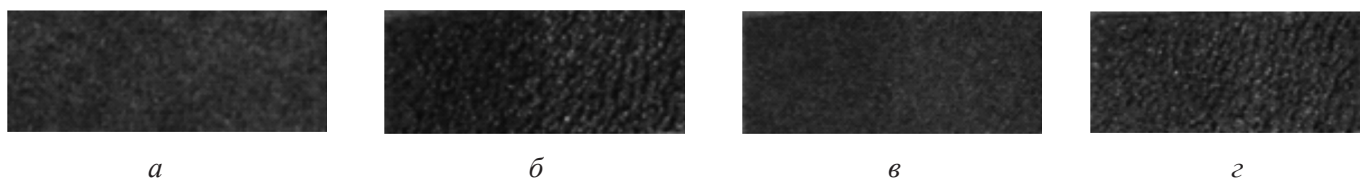


Рис. 1. Фотографии спеченных образцов из кобальтхроммолибденового порошкового материала, полученные на разных режимах (×2):

a – $P = 10$ Вт, $V = 100$ мм/мин, $t = 200$ °С, $h = 0,1$ мм; *б* – $P = 20$ Вт, $V = 100$ мм/мин, $t = 200$ °С, $h = 0,1$ мм; *в* – $P = 10$ Вт, $V = 100$ мм/мин, $t = 200$ °С, $h = 0,15$ мм; *г* – $P = 20$ Вт, $V = 100$ мм/мин, $t = 200$ °С, $h = 0,15$ мм

Диаметр пятна лазера при спекании составлял 0,5 мм. Эксперимент поставлен по программе центрального планирования второго порядка. Реализованы шестнадцать опытов полного факторного эксперимента 2^4 и семь опытов в центре плана, дополненные восьмью опытами в «звездных» точках. Толщина слоя измерялась на цифровом микроскопе ИМЦ 100×50 по специально разработанной методике с точностью 0,01 мм [15].

После статистической обработки получена эмпирическая зависимость толщины спеченного слоя кобальтхроммолибденового порошка от технологических режимов спекания:

$$z = 1,9 + 0,04P - 0,027V + 0,0000057V^2 + 0,000001t^2 + 0,0029t - 120S^2 - S - 0,000294Pt + 0,25VS. \quad (2)$$

На основании этой зависимости построены графики с наложением экспериментальных значений толщины спеченного слоя в зависимости от режимов спекания. Анализ графических зависимостей выявил значимые параметры режима – мощность лазерного излучения, скорость перемещения луча лазера, шаг сканирования, влияющие на толщину спеченного слоя, а также пределы ее изменения от 0,65 до 1,27 мм за счет комбинации технологических режимов лазерной обработки.

На рис. 2–4 показаны графики, построенные по зависимости (2). Изменение мощности в диапазоне от 10 до 20 Вт приводит к увеличению толщины спеченного слоя z с 0,65 до 1,0 мм, таким образом, мощность оказывает значительное влияние на толщину спеченного слоя (рис. 2). Варьирование скорости от 100 до 300 мм/мин приводит к уменьшению толщины слоя с 0,88 до 0,65 мм. Температура подогрева порошкового материала и шаг перемещения луча лазера

оказывают незначительное влияние на толщину спеченного слоя.

Изменение шага сканирования также оказывает влияние на толщину спеченного слоя (рис. 3). Изменяя величину шага от 0,1 до 0,15 мм толщина слоя уменьшается с 1,27 до 0,9 мм при $P = 20$ Вт, $V = 100$ мм/мин, $t = 26$ °С. Увеличение шага сканирования приводит к уменьшению толщины спеченного слоя.

На рис. 4 показано влияние мощности и температуры подогрева порошкового материала на толщину спеченного слоя. При увеличении мощности от 10 до 20 Вт и $t = 26$ °С, $V = 100$ мм/мин, $S = 0,1$ мм толщина спеченного слоя увеличивается с 0,88 до 1,27 мм. Увеличение подогрева порошкового материала t с 26 до 200 °С при $P = 10$ Вт, $V = 100$ мм/мин, $S = 0,1$ мм незначительно увеличивает толщину спеченного слоя с 0,88 до 0,91 мм при $P = 20$ Вт с 1,27 до 1,3 мм.

Анализ графических зависимостей, представленных на рис. 2–4, показывает значительное влияние мощности лазерного излучения

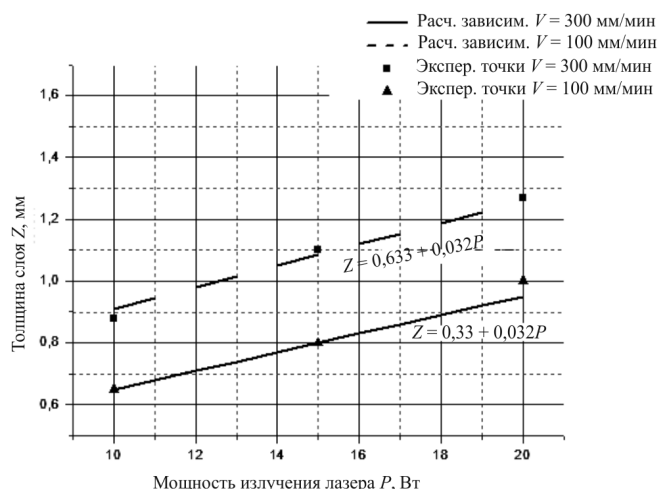


Рис. 2. Расчетные зависимости и экспериментальные точки толщины Z спеченного слоя кобальтхроммолибденового порошка от мощности P и скорости V при $S = 0,1$ мм, $t = 26$ °С

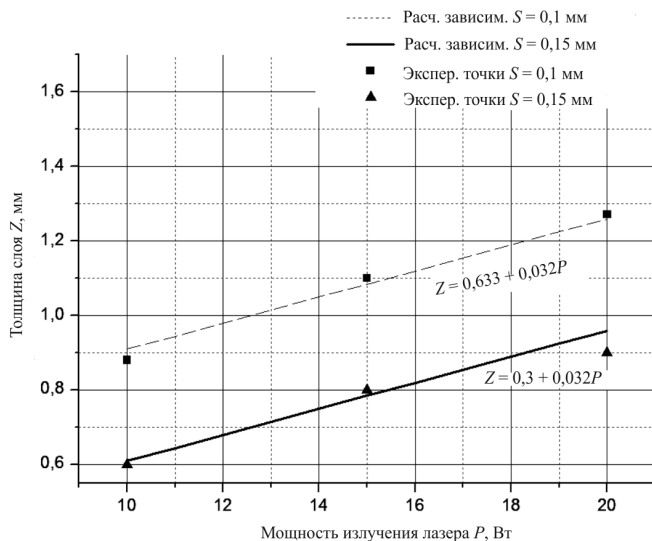


Рис. 3. Расчетные зависимости и экспериментальные точки толщины Z спеченного слоя кобальтхроммолибденового порошка от мощности P и шага сканирования S при $V = 100$ мм/мин, $t = 26$ °C

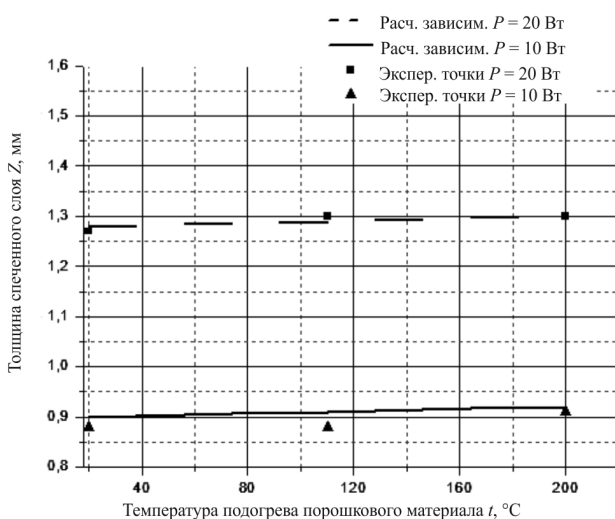


Рис. 4. Расчетные зависимости и экспериментальные точки толщины спеченного слоя Z кобальтхроммолибденового порошка от температуры подогрева порошкового материала и мощности лазера, $V = 100$ мм/мин, $S = 0,1$ мм

на толщину спеченного слоя. Следующими по значимости влияния являются скорость перемещения луча лазера и шаг сканирования. Незначительно на толщину спеченного слоя влияет температура подогрева порошкового материала. Таким образом, мощность излучения и скорость перемещения луча лазера являются основными параметрами, влияющими на толщину спеченного слоя порошка, но шаг и температура подогрева порошкового материала должны обязательно включаться в модель управления.

Выводы

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. На основе теории планирования эксперимента и статической обработки результатов получена математическая зависимость толщины спеченного поверхностного слоя от режимов спекания кобальтхроммолибденового порошка, позволяющая выявить наиболее значимые параметры, влияющие на толщину спеченного слоя.

2. Экспериментально доказано, что толщину спеченного поверхностного слоя можно изменять в значительных пределах за счет изменения технологических режимов лазерной обработки. При спекании кобальтхроммолибденового порошка толщину спеченного слоя можно изменить с 0,65 до 1 мм за счет увеличения мощности лазера с 10 до 20 Вт, с 0,65 до 0,88 мм за счет уменьшения скорости перемещения луча лазера с 300 до 100 мм/мин, с 0,9 до 1,27 мм за счет уменьшения шага сканирования с 0,15 до 0,1 мм, с 0,88 до 0,91 мм за счет увеличения температуры подогрева порошкового материала с 26 до 200 °C.

Список литературы

1. Wohlers report 2013: additive manufacturing and 3D printing state of the industry: annual worldwide progress report, May 23, 2013. – Fort Collins, Colorado: Wohlers Associates, 2013. – P. 4–8. – (Executive summary). – ISBN 0-9754429-9-6.
2. Additive fabrication terminology unraveled. – URL: <http://www.additive3d.com> (accessed: 26.01.2015).
3. Григорянц А.Г. Основы лазерной обработки материалов. – М.: Машиностроение, 1989. – 304 с. – ISBN 5-217-00432-0.
4. Кузнецов В.Е. Системы быстрого изготовления прототипов и их расширения // CAD/CAM/CAE Observer. – 2003. – № 4 (13). – С. 2–7.
5. Gibson I.B., Rosen D.W., Stucker B. Additive manufacturing technologies. Rapid prototyping to direct digital manufacturing. – New York, USA: Springer, 2009. – 459 p. – ISBN-10: 1441911197. – ISBN-13: 978-1441911193.
6. Balling processes during selective laser treatment of powders / N.K. Tolochko, S.E. Mozzharov, I.A. Yadroitsev, T. Laoui, L. Froyen, V.I. Titov, M.B. Ignatiev // Rapid Prototyping Journal. – 2004. – Vol. 10, iss. 2. – P. 78–87. – doi: <http://dx.doi.org/10.1108/13552540410526953>.
7. Maeda K., Childs T.H.C. Laser sintering (SLS) of hard metal powders for abrasion resistant coatings //

Journal of Materials Processing Technology. – 2004. – Vol. 149, iss. 1–3. – P. 609–615. – doi: 10.1016/j.jmatprotec.2004.02.024.

8. Direct selective laser sintering of iron- graphite powder mixture / K. Murali, A.N. Chatterjee, P. Saha, R. Palai, S. Kumar, S.K. Roy, P.K. Mishra, A.R. Choudhury // Journal of Materials Processing Technology. – 2003. – Vol. 136, iss. 1–3. – P. 179–185. – doi: 10.1016/S0924-0136(03)00150-X.

9. *Olevsky E.A., German R.M.* Effect of gravity on dimensional change during sintering–I. Shrinkage anisotropy // Acta Materialia. – 2000. – Vol. 48, iss. 5. – P. 1153–1166. – doi: 10.1016/S1359-6454(99)00368-7.

10. An experimental design approach to selective laser sintering of low carbon steel / A.N. Chatterjee, S. Kumar, P. Saha, P.K. Misha, A.R. Choudhury // Journal of Materials Processing Technology. – 2003. – Vol. 36, iss. 1–3. – P. 151–157. – doi: 10.1016/S0924-0136(03)00132-8.

11. Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок: монография / В.Я. Панченко, В.С. Голубев, В.В. Васильцов,

М.Г. Галушкин, А.Н. Грезев. – М.: Физматлит, 2009. 664 с. – ISBN 978-5-9221-1023-5.

12. Патент на изобретение 2268493 Российская Федерация, МПК⁷ G 06 T 17/20, G 06 T 17/40. Способ лазерно-компьютерного макетирования / А.А. Сапрыкин, С.И. Петрушин, Н.А. Сапрыкина; патентообладатель Томский политехнический университет. – № 2004119122/09; заявл. 24.06.2004; опубл. 20.01.2006, Бюл. № 02. – 5 с.

13. *Saprykina N.A., Saprykin A.A.* Engineering support for improving quality of layer-by-layer laser sintering // The 7th International Forum on Strategic Technology IFOST2012, September 18–21, 2012. – Tomsk: TPU Press, 2012. – P. 129–132.

14. *Спиридонов А.А.* Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. – М.: Машиностроение, 1981. – 184 с.

15. *Saprykina N.A., Saprykin A.A.* Improvement of surface layer formation technology for articles produced by layer-by-layer laser sintering // Applied Mechanics and Materials. – 2013. – Vol. 379. – P. 56–59. – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.379.56.

OBRAHOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 1(66), January – March 2015, Pages 27–32

The research of the effect of laser sintering modes on the thickness of the sintered cobalt-chromium-molybdenum powder layer

Saprykina N.A., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: nat_anat_sapr@mail.ru

Yurga Institute of Technology, TPU Affiliate, 26 Leningradskaya Street, Yurga, 652055, Russian Federation

Abstract

In the modern economic paradigm to reduce the term of the new product launch the technology of layer-by-layer laser sintering is used. Technological development is moving towards the introduction of new powder materials and definition of rational technological modes of formation of the surface layer of a given quality. The creation of applicative product is possible only within a certain range of laser exposure, which is chosen experimentally for particulate material. The accuracy of the product is greatly influenced by the layer thickness. The results of experimental studies of the effect of technological modes of powder materials sintering (the laser power, the velocity of the laser beam scanning step, pre-heating temperature of the powder material) on the thickness of the sintered cobalt-chromium-molybdenum powder layer. The studies are conducted using the technological laser complex for formation of the surfaces of the parts with a complex spatial form. The thickness of the sintered layer is determined by a specially developed technique using a digital engineer microscope. The mathematical dependence of the thickness of the sintered surface layer on cobalt-chromium-molybdenum powder sintering conditions based on the theory of experimental design and statistical treatment of results is obtained. Graphs with superposition of experimental values of the sintered layer thickness depending on the sintering conditions are plotted using mathematical relationship. Characteristic curves analysis identifies the relevant modes parameters: lasing power, laser beam traversing speed, laser beam scanning step. All these parameters affect the thickness of the sintered layer and also limits its change from 0,65 to 1 mm by increasing the laser power from 10 to 20 watts; from 0,65 to 0,88 mm by reducing the moving

speed of the laser beam from 300 to 100 mm/min; from 0,9 to 1,27 mm by reducing the laser beam scanning step from 0,15 to 0,1 mm; from 0,88 to 0,91 mm by increasing the heating temperature of the powder material from 26 to 200°C.

Keywords:

layer-by-layer laser sintering, sintering conditions, quality of the sintered surface layer, powder material.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-1-27-32

References

1. Wohlers Report 2013: *Additive manufacturing and 3D printing state of the industry*. Fort Collins, Colorado, Wohlers Associates, 2013. ISBN 0-9754429-9-6
2. Additive fabrication terminology unraveled. Available at: <http://www.additive3d.com> (accessed 26.01.2015)
3. Grigoryants A.G. *Osnovy lazernoï obrabotki materialov* [Fundamentals of laser materials processing]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989. 304 p. ISBN 5-217-00432-0
4. Kuznetsov V.E. Sistemy bystrogo izgotovleniya prototipov i ikh rasshireniya [Rapid prototyping systems and their extensions]. *CAD/CAM/CAE Observer*, 2003, no. 4 (13), pp. 2–7.
5. Gibson I.B., Rosen D.W., Stucker B. *Additive manufacturing technologies: rapid prototyping to direct digital manufacturing*. New York, USA, Springer Publ., 2009. 459 p. ISBN-10: 1441911197. ISBN-13: 9781441911193
6. Tolochko N.K., Mozzharov S.E., Yadroitsev I.A., Laoui T., Froyen L., Titov V. I., Ignatiev M.B. Balling processes during selective laser treatment of powders. *Rapid Prototyping Journal*, 2004, vol. 10, iss. 2, pp. 78–87. doi: <http://dx.doi.org/10.1108/13552540410526953>
7. Maeda K., Childs T.H.C. Laser sintering (SLS) of hard metal powders for abrasion resistant coatings. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, vol. 149, iss. 1–3, pp. 609–615. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2004.02.024
8. Murali K., Chatterjee A.N., Saha P., Palai R., Kumar S., Roy S.K., Mishra P.K., Choudhury A.R. Direct selective laser sintering of iron-graphite powder mixture. *Journal of Materials Processing Technology*. 2003, vol. 136, iss. 1–3, pp. 179–185. doi: 10.1016/S0924-0136(03)00150-X
9. Olevsky E.A., German R.M. Effect of gravity on dimensional change during sintering–I. Shrinkage anisotropy. *Acta Materialia*, 2000, vol. 48, iss. 5, pp. 1153–1166. doi: 10.1016/S1359-6454(99)00368-7
10. Chatterjee A.N., Kumar S., Saha P., Mishra P.K., Choudhury A.R. An experimental design approach to selective laser sintering of low carbon steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, vol. 136, iss. 1–3, pp. 151–157. doi: 10.1016/S0924-0136(03)00132-8
11. Panchenko V.Ya., Golubev V.S., Vasil'tsov V.V., Galushkin M.G., Grezev A.N. *Lazernye tekhnologii obrabotki materialov: sovremennye problemy fundamental'nykh issledovaniï i prikladnykh razrabotok* [Laser materials processing technologies: modern problems of fundamental research and applications]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2009. 664 p. ISBN 978-5-9221-1023-5
12. Saprykin A.A., Petrushin S.I., Saprykina N.A. *Sposob lazerno-komp'yuternogo maketirovaniya* [A method of laser-computer prototyping]. Patent RF, no. 2268493, 2006.
13. Saprykina N.A., Saprykin A.A. Engineering Support for Improving Quality of Layer-by-layer Laser Sintering. *The 7th International Forum on Strategic Technology IFOST 2012*. Tomsk, TPU Press, 2012, pp. 129–132.
14. Spiridonov A.A. *Planirovanie eksperimenta pri issledovanii tekhnologicheskikh protsessov* [Design of experiment in the study of technological processes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981. 184 p.
15. Saprykina N.A., Saprykin A.A. Improvement of surface layer formation technology for articles produced by layer-by-layer laser sintering. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, vol. 379, pp. 56–59. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.379.56

Received 26 January 2015

Revised 10 February 2015

Accepted 15 February 2015