



Оригинальная статья

УДК 621.762.277

DOI 10.17073/0368-0797-2021-10-721-727



ПОЛУЧЕНИЕ МАГНИТОВ ИЗ МАТЕРИАЛА СИСТЕМЫ Fe – Cr – Co МЕТОДАМИ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЕКАНИЯ

Д. Б. Ефремов, А. А. Герасимова

■ Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (Россия, 119049, Москва, Ленинский пр., 4)

Аннотация. Приведены результаты исследования возможностей селективного лазерного плавления. Это так называемые аддитивные технологии для производства постоянных магнитов. Процесс позволяет производить не только модели изделий и прототипы, но и готовые функциональные изделия путем послойного добавления материала и связывания частиц и слоев друг с другом. В качестве материала для оценки сравниваемых технологий производства постоянных магнитов выбран сплав на основе системы Fe–Cr–Co. Рассмотрены области применения селективного лазерного плавления: исследованы порошки, полученные разными методами. Проанализирована классическая технология литья магнитного сплава: проведены исследования магнитных материалов и сравнения свойств порошковых магнитов и магнитов со стандартными характеристиками. На основе порошка сплава 25Х15КА, распыленного методом газовой атомизации, на установке селективного лазерного плавления можно изготовить постоянные магниты с плотностью материала 7,59 – 7,55 г/см³ (по ГОСТ 24897 – 81). Характеристики магнитов, полученных на установке селективного лазерного плавления, достигают показателей магнитов, изготовленных по классическим металлургическим технологиям. Для исследования магнитных и физических свойств было выпущено четыре образца с одинаковой геометрией в форме куба. При производстве каждого из испытуемых образцов были выбраны разные режимы работы установки. Образцы были изготовлены на базе Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» Центрального научно-исследовательского института конструкционных материалов «Прометей» (НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей») в составе технологического комплекса НИО-35. Установлено, что характеристики порошков, полученных методом газовой атомизации, качественно превосходят характеристики порошков, полученных другими методами. Изготовленные магниты отвечают требованиям ГОСТ 24897 – 81.

Ключевые слова: аддитивные технологии, магнит, порошковый материал, лазерное плавление, структура, механообработка, газовая атомизация

Для цитирования: Ефремов Д.Б., Герасимова А.А. Получение магнитов из материала системы Fe – Cr – Co методами селективного лазерного спекания // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 10. С. 721–727. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-10-721-727>

Original article

PRODUCTION OF MAGNETS FROM THE MATERIAL OF Fe – Cr – Co SYSTEM BY SELECTIVE LASER SINTERING

D. B. Efremov, A. A. Gerasimova

■ National University of Science and Technology “MISIS” (MISIS) (4 Leninskii Ave., Moscow 119049, Russian Federation)

Abstract. The article presents results of the study of possibilities of selective laser melting (SLM), or so-called additive technologies, for production of permanent magnets. This process makes it possible to produce not only product models and prototypes, but also finished functional products using layer-by-layer addition of material and binding of particles and layers to each other. An alloy based on Fe–Cr–Co system has been chosen as the material for evaluation of the compared technologies for permanent magnets production. The application fields of selective laser melting (SLM/SLP) were considered. The powders obtained by different methods are taken for the research. Classical technology of magnetic alloy casting also was analyzed. The studies of magnetic materials and comparisons of the properties of powder magnets with standard data were carried out. On the basis of 25Kh15KA alloy powder sprayed by gas atomization, permanent magnets with a material density of 7.59 – 7.55 g/cm³ can be manufactured at the SLP plant. They meet the requirements recommended by the state standard GOST 24897 – 81, and achieve characteristics of magnets made by classical metallurgical technologies. To study the magnetic and physical properties, four samples were produced with the same geometry in the shape of a cube. During production of each of the test samples, different operating modes of the plant were selected. Samples were made on the basis of the “Kurchatov Institute” NRS enterprise (the “Prometheus” Central Research Institute of Construction Materials) as part of the NIO-35 technological complex. It was established that characteristics of the powders obtained by gas atomization qualitatively exceed characteristics of the powders obtained by other methods, and the produced magnets meet all the requirements for magnets.

Keywords: additive technologies, magnet, powder material, laser melting, structure, mechanical processing, gas atomization

For citation: Efremov D.B., Gerasimova A.A. Production of magnets from the material of Fe – Cr – Co system by selective laser sintering. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 10, pp. 721–727. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-10-721-727>

ВВЕДЕНИЕ

Процесс селективной лазерной плавки является одним из многообещающих в технологии производства. Процессы селективного лазерного плавления (СЛП) позволяют производить не только модели и прототипы изделий, но и готовые функциональные изделия путем слоистого добавления материала и связывания частиц и слоев друг с другом известными методами. Способ изготовления является приоритетным, если геометрия детали не может быть выполнена ни одним из существующих методов обработки материалов или время подготовки производства значительно замедлит производство прототипа, а также при необходимости устранения потерь дорогостоящего исходного сырья.

Аддитивные технологии считаются альтернативой для механических, электрофизических и электрохимических. В сравнении с классическими методами формообразования, где от заготовки «отрезаются или отшлифовываются» дефекты литья при создании детали, с использованием технологии СЛП деталь «наращивается» из предварительно произведенного порошкового материала. Он послойно наносится: частицы расплавляются, образуя слой. Между собой скрепляются частицы и слои. Такая технология позволяет синтезировать уникальные продукты с внутренней полостью, например, теплообменные механизмы со сложной структурой каналов для охлаждения, литейные формы для создания различных моделей, фильтры с сетчатой структурой. При помощи этой технологии можно получать изделия с прямоугольной или другой сложной формой внутренних полостей, например, спирального типа.

Качество деталей, изготовленных по такой технологии, определяется пористостью, прочностью и другими механическими характеристиками. Они, в свою очередь, определяются параметрами процесса: мощностью лазера, длительностью импульсов, составом используемого материала, толщиной насыпного слоя порошка, скоростью подачи. Для имеющихся технологических параметры традиционных операций, включая термобработку, подбираются из многолетней практики.

В настоящее время СЛП является одним из перспективных и активно развивающихся методов аддитивного производства. Этот метод появился вследствие ускоренного развития технологий прототипирования в конце XX в. [1 – 5].

Исследования продемонстрировали, что по физико-механическим свойствам образцы, полученные с помощью СЛП технологии, не уступают деталям, которые изготовлены по классическим литейным технологиям [6 – 12].

С помощью технологии СЛП можно изготовить детали прямоугольной или другой форм внутренних полостей (например, спиральных) или любой формы с сетчатой начинкой. Современное развитие этих технологий позволяет предположить, что вскоре появится

оборудование, позволяющее производить многокомпонентные изделия различного химического и гранулометрического составов. Например, корпус (таких деталей, как теплообменники) может быть изготовлен из конструкционной стали, а внутренняя полость – из медных сплавов [13, 14].

Целью настоящей работы является исследование возможности получения постоянных магнитов из материала системы Fe–Cr–Co методами селективного лазерного спекания.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Принцип работы установки для аддитивного производства с помощью лазерного излучения можно проиллюстрировать следующим образом. Устройство для порошкового покрытия и выравнивания удаляет слой порошка из подачи и равномерно распределяет его по поверхности подложки. После этого лазерный луч избирательно сканирует поверхность этого слоя порошка и образует продукт путем плавления или спекания. После сканирования порошкового слоя платформу с изготовленным продуктом опускают на нанесенный слой, а платформу с порошком поднимают. Процесс нанесения порошкового слоя и сканирование повторяют вновь. После окончания процесса движущийся механизм с продуктом приподнимают и изделие очищают от неиспользованного порошкового материала. На рис. 1 приведена технологическая схема аддитивного производства: послойное спекание порошковых материалов с помощью луча лазера по математическим CAD-моделям.

При помощи этой технологии возможно получать готовые изделия сложных форм (рис. 2).

Большую роль в производстве изделий играет смачиваемость, поверхностное натяжение и вязкость расплава [15 – 18]. Фактором, препятствующим использованию различных металлов и сплавов для СЛП, является эффект «сфероидизации», который проявляется в виде образования отдельно лежащих капель, а не твердого плавильного следа. Причиной этого является поверхностное натяжение, при котором расплав стремится уменьшить свободную поверхностную энергию, образуя форму с минимальной поверхностью, то есть сферу. В этом случае наблюдается эффект плавления полосы Марангони, который проявляется как конвективные токи из-за градиента поверхностного натяжения как функции температуры. Если конвективные токи достаточно сильны, то плавильная полоса делится на отдельные капли. Под воздействием поверхностного натяжения капля расплава может «вытягивать» отдельные частицы порошка, расположенные вблизи, из-за чего происходит образование лунок на поверхности тела и пористость увеличивается. Сфероидизация обусловлена наличием окислителей, которые растворимы в металлах. Они увеличивают вязкость расплава, из-за

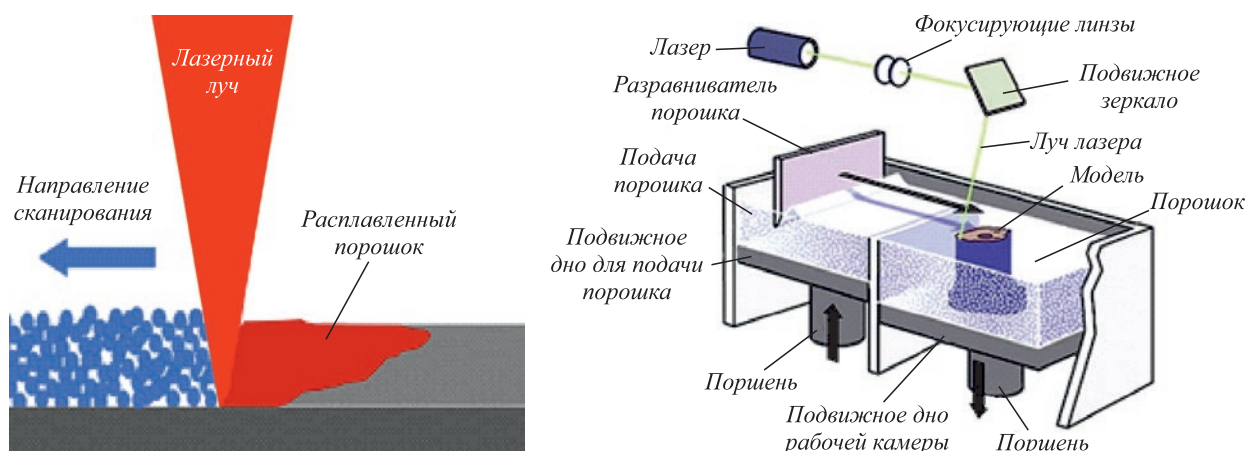


Рис. 1. Технологическая схема процесса селективного лазерного сплавления

Fig. 1. Technological scheme of SLM process

чего ухудшается распространение расплава и уменьшается его растекание по нижележащему слою. По этим причинам невозможно получить изделия из таких металлов, как медь, олово, самарий, свинец, цинк. Нужно отметить, что создание высококачественной плавильной полосы связано с поиском оптимального диапазона параметров процесса (прежде всего мощности лазера и скорости сканирования), которые находятся обычно в довольно узком интервале.

Углеродистая сталь – один из наиболее интересных материалов для аддитивного производства, она имеет невысокую стоимость и обладает хорошими механическими свойствами. С увеличением содержания растворимого углерода в стали улучшаются ее жидкотекучесть и смачиваемость. Это позволяет использовать порошковые материалы, содержащие 0,6 – 1,0 % С, с плотностью 94 – 99 % от рекомендованной ГОСТ 24897 – 81 [19 – 21], причем в случае использования чистого железа плотность составляет

около 83 %. Во время селективной лазерной плавки углеродистой стали след плавления затвердевает при быстром охлаждении и образуется структура сорбита или троостита. При этом из-за тепловых напряжений и структурных преобразований в металле возникают значительные напряжения, которые могут привести к образованию трещин или «поводку» изделия. Геометрия изделия важна, потому что причиной трещин являются резкие переходы, небольшие радиусы скругления и острые края. Если после «печати» сталь не обладает определенным уровнем механических свойств и нуждается в дополнительной термической обработке, то необходимо учитывать ранее установленные ограничения формы изделия, чтобы избежать возникновения дефектов закалки. Это в какой-то степени снижает перспективу использования СЛП для углеродистых сталей.

При традиционном изготовлении изделий избежать трещин и полостей при закаливании сложных форм возможно при применении легированных сталей, в которых легатура, помимо повышения физико-химических и механических свойств, замедляет переход в аустенит при охлаждении, что приводит к снижению критической скорости отверждения и к повышению прокаливания легированной стали. Из-за низкой критической скорости закалки сталь может быть залита в масло или охлаждаться на воздухе, что уменьшает внутренние напряжения. Однако из-за быстрого рассеивания теплоты, неспособности регулировать охлаждение и присутствия углерода в легированных сталях этот метод не дает возможности избежать появления существенных внутренних и внешних напряжений при СЛП.

Из-за вышеуказанных характеристик мартенситные стали (MS 1, GP 1, PH 1) используются для СЛП, где отверждение и увеличение твердости достигается за счет высвобождения диспергированных интерметаллических фаз во время термической обработки. Эти стали



Рис. 2. Изделие, изготовленное методом СЛП

Fig. 2. The product made by SLM method

содержат небольшое количество углерода (сотые доли процента), в результате чего образуется мартенситная решетка, она характеризуется низкой степенью искажения и, следовательно, имеет низкую твердость. Низкая твердость и высокая пластичность мартенсита обеспечивают релаксацию собственных напряжений при затвердевании, а высокое содержание легирующих элементов позволяет охлаждать сталь на большой глубине практически при всех скоростях. Это позволяет делать сложные продукты с помощью СЛП и подвергать изделие термической обработке, не опасаясь трещин или деформации [22 – 24]. Следует отметить, что методы изготовления различных типов магнитов принципиально различаются.

Магниты железо-хром-кобальтового сплава изготавливаются обычно по технологии литья. Наиболее распространенным методом формования таких магнитов является литье по выплавляемым моделям или литье в керамические модели. В зависимости от требуемых свойств эти магниты получают со столбчатой (зерна растянуты по одному направлению) или одноосной структурой. После предварительной обработки магниты подвергают специальным тепловым операциям: высокотемпературной обработке, закалке, термомагнитной обработке и отпуску. В результате получают структуру магнитного материала. Заготовки становятся постоянными магнитами после окончательного шлифования и намагничивания.

Порошки сплава 25X15КА для изготовления постоянных магнитов методом СЛП были получены из смеси порошков железа, кобальта и хрома методом газовой атомизации.

Свойства порошков, полученных в результате распыления газом (высокая сферичность, гранулометрический состав), превосходят свойства порошков, полученных другими методами, и отвечают требованиям для СЛП.

В вакуумной плавильной камере с донным сливом проводится расплавление и перегрев металла до температуры распыления (рис. 3), после создания избыточного давления в плавильной камере и подъема стопора металл сливается через подогреваемую трубку в камеру распыления. Попадая в рабочую часть форсунки, металл распыляется потоком аргона (от 4,053 до 7,093 МПа) с образованием дисперсных гранул сферической формы. Пролетая в потоке газа через объем распылительной колонны, частицы порошка охлаждаются. Порошок попадает в приемный конус, далее через шаровой вентиль ссыпается в первичный бункер. Часть дисперсного порошка, находящегося во взвешенном состоянии, не успевает осесть на стенках конуса и камеры и вместе с потоком аргона вылетает по выпускной трубе. Затем частицы попадают в циклон, отделившийся порошок ссыпается во вторичный бункер. Полученный порошок подвергают газодинамической сепарации и ситовому рассеву с целью

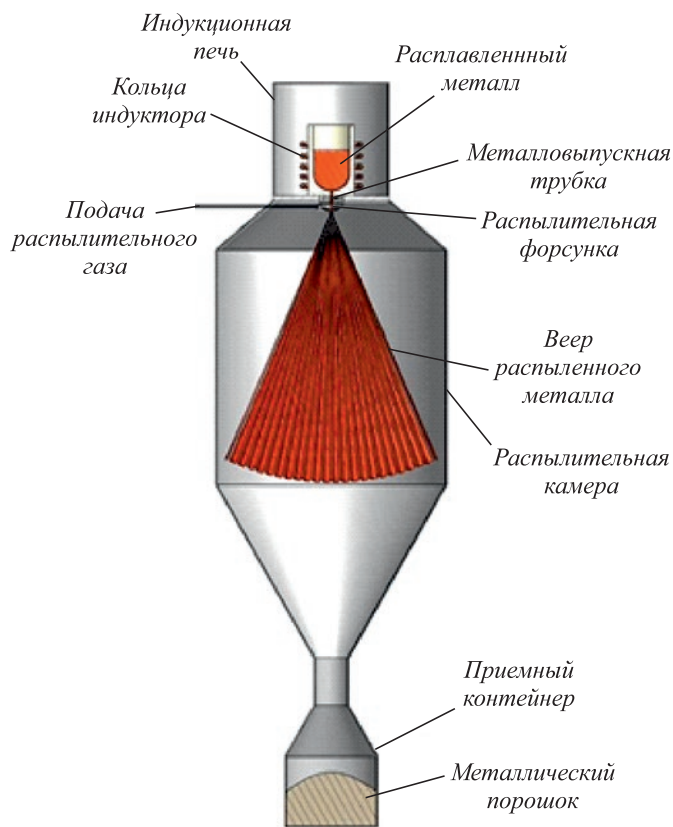


Рис. 3. Схема процесса газовой атомизации

Fig. 3. Diagram of gas atomization

выделения необходимой фракции в зависимости от назначения порошка.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Предварительные эксперименты показали, что на основе порошка сплава 25X15КА, полученного методом газовой атомизации, на установке СЛП можно изготовить постоянные магниты с плотностью материала 7,59 – 7,55 г/см³. Они удовлетворяют требованиям ГОСТ 24897 – 81 и соответствуют характеристикам магнитов, полученных по классическим металлургическим технологиям.

Образцы были изготовлены на базе НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей» в составе технологического комплекса НИО-35. Образцы магнитотвердого вещества на основе системы Fe–Cr–Co получены на установке селективного лазерного сплавления (СЛП) типа EOSint M270 (рис. 4).

Для исследования магнитных и физических свойств было выпущено четыре образца с одинаковой геометрией в форме куба. При производстве образцов были выбраны разные режимы работы установки по скорости сканирования v , мм/с и мощности излучения лазера P , Вт. Исследованы следующие режимы: $v = 1100$ мм/с, $P = 195$ Вт; $v = 1013$ мм/с, $P = 189,5$ Вт; $v = 800$ мм/с, $P = 150$ Вт; $v = 906$ мм/с, $P = 170$ Вт.



Рис. 4. Установка для прямого лазерного спекания металлов

Fig. 4. Installation for direct laser sintering of metals

Внешний вид образцов до механической обработки представлен на рис. 5. Для придания требуемой геометрии образцов применяли механообработку.

Плотность образцов согласно гидростатическому взвешиванию составила $7,587 - 7,554 \text{ г/см}^3$ (99 % от рекомендованной ГОСТ 24897 – 81).

Измерения параметров магнитотвердого материала проводили на гистерезисграфе постоянного тока ЭМ8-6 по методике ГОСТ 8.268 – 77.

Измерения магнитной индукции B_r проводили миллитесламетром РШ1-10 в измерительном приспособлении ЕсИ.659.00-43.

Результаты измерений коэрцитивной силы по индукции (H_c), остаточной индукции (B_r), максимальной магнитной энергии $(BH)_{\max}$ представлены в таблице.

Выводы

Характеристики порошков, полученных методом газовой атомизации (высокая сферичность, заданный granulometric состав), превосходят характеристики



Рис. 5. Вид образцов на основе системы Fe–Cr–Co

Fig. 5. SLS samples based on the Fe–Cr–Co system

Результаты измерения магнитных свойств материала

Results of measuring the material magnetic properties

Образец	Режим		H_c , кА/м	B_r , Тл	$(BH)_{\max}$, кДж/м ³
	v , мм/с	P , Вт			
1	1100	195,0	45,4	1,020	24,0
2	1013	189,5	45,9	0,981	22,1
3	800	150,0	46,1	0,997	23,6
4	906	170,0	44,8	0,944	21,2
ГОСТ 24897 – 81			40,0	1,200	32,0

порошков, полученных другими методами, и отвечают требованиям, предъявляемым для СЛП.

На основе порошка сплава 25X15КА, полученного методом газовой атомизации, на установке СЛП можно изготовить постоянные магниты с плотностью материала $7,59 - 7,55 \text{ г/см}^3$. Эти магниты удовлетворяют требованиям ГОСТ 24897 – 81 и соответствуют характеристикам магнитов, полученных по классическим металлургическим технологиям.

Коэрцитивная сила для постоянных магнитов, синтезированных методом СЛП, составляет 45,4 кА/м (113 % от значения ГОСТ 24897 – 81), остаточная индукция – 1,02 Тл (86 % от значения ГОСТ 24897 – 81), максимальная магнитная энергия – 24 кДж/м³.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Смуров И.Ю., Мовчан И.А., Ядройцев И.А. и др. Аддитивное производство с помощью лазера // Вестник МГТУ «Станкин». 2011. № 4. С. 144–146.
2. Григорьев С.Н., Козочкин М.П., Сабиров Ф.С., Синопальников В.А. Проблемы технической диагностики станочного оборудования на современном этапе развития // Вестник МГТУ «Станкин». 2010. № 4. С. 27–36.
3. Liu Y., Wang R., Peng C., Cai Z., Zhou Z., Li X., Cao X. Microstructural evolution and mechanical performance of in-situ $\text{TiB}_2/\text{AlSi10Mg}$ composite manufactured by selective laser melting // Journal of Alloys and Compounds. 2021. Vol. 853. Article 157287. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.157287>
4. Doubenskaia M., Pavlov M., Chivel Yu. Optical system for on-line monitoring and temperature control in selective laser melting technology // Key Engineering Materials. 2010. Vol. 437. No. 1. P. 458–461. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.437.458>
1. Smurov I.Yu., Movchan I.A., Yadroitsev I.A., Okun'kova A.A., Tsvetkova E.V., Cherkasova N.Yu. Laser additive manufacturing. *Vestnik MGTU "Stankin"*. 2011, no. 4, pp. 144–146. (In Russ.).
2. Grigor'ev S.N., Kozochkin M.P., Sabirov F.S., Sinopal'nikov V.A. Problems of technical diagnostics of machine tool equipment at the present development stage. *Vestnik MGTU "Stankin"*. 2010, no. 4, pp. 27–36. (In Russ.).
3. Liu Y., Wang R., Peng C., Cai Z., Zhou Z., Li X., Cao X. Microstructural evolution and mechanical performance of in-situ $\text{TiB}_2/\text{AlSi10Mg}$ composite manufactured by selective laser melting. *Journal of Alloys and Compounds*. 2021, vol. 853, article 157287. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.157287>
4. Doubenskaia M., Pavlov M., Chivel Yu. Optical system for on-line monitoring and temperature control in selective laser melting technology. *Key Engineering Materials*. 2010, vol. 437, no. 1, pp. 458–461. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.437.458>

5. Xing X., Duan X., Jiang T., Wang J., Jiang F. Ultrasonic peening treatment used to improve stress corrosion resistance of AlSi10Mg components fabricated using selective laser melting // *Metals*. 2019. Vol. 9. No. 1. P. 103. <https://doi.org/10.3390/met9010103>
6. Шишковский И.В. Лазерный синтез функционально-градиентных мезоструктур и объемных изделий. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. 421 с.
7. Гегузин Я.Е. Физика спекания. М.: Наука, 1984. 311 с.
8. Технологии лазерного аддитивного производства металлических изделий. URL: <http://geektimes.ru/post/218271/> (дата обращения 01.08.2021).
9. Герасимова А.А., Радюк А.Г., Глухов Л.М. Нанесение покрытий на узкие стенки кристаллизаторов МНЛЗ для повышения качества поверхности слывов // *Металлург*. 2014. № 5-6. С. 64–66.
10. Гришаев Р.В., Мирзаде Ф.Х., Хоменко М.Д. Моделирование фазовых переходов при селективном лазерном спекании методом инъекции порошков // *Перспективные материалы*. 2013. № S14. С. 241–248.
11. Buluk I.I. Application of hydrogen in the production of sintered anisotropic nanostructured magnets from alloys of rare-earth and transition metals // *Materials Science*. 2019. Vol. 54. No. 6. P. 761–775. <http://doi.org/10.1007/s11003-019-00262-7>
12. Dong L., Makradi A., Ahzi S., Remond Y. Three-dimensional transient finite element analysis of the selective laser sintering process // *Journal of Materials Processing Technology*. 2009. Vol. 209. No. 2. P. 700–706. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.02.040>
13. Matsumoto M., Shiomi M., Osakada K., Abe F. Finite element analysis of single layer forming on metallic powder bed in rapid prototyping by selective laser processing // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2002. Vol. 42. No. 1. P. 61–67. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(01\)00093-1](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(01)00093-1)
14. Nelson J.C., Xue S., Barlow J.W., Beaman J.J., Marcus H.L., Bourell D.L. Model of the selective laser sintering of bisphenol-A polycarbonate // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 1993. Vol. 32. No. 10. P. 2305–2317. <https://doi.org/10.1021/ie00022a014>
15. Xiong B.W., Xu Z.F., Yan Q.S., etc. Progress on metal powder materials used for direct selective laser sintering // *Hot Working Technology*. 2008. Vol. 33. No. 9. P. 92–94.
16. Simchi A., Pohl H. Effects of laser sintering processing parameters on the microstructure and densification of iron powder // *Materials Science and Engineering: A*. 2003. Vol. 359. No. 1-2. P. 119–128. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(03\)00341-1](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(03)00341-1)
17. Buschow K.H.J. Rare earth-cobalt intermetallic compounds // *Philips Research Report*. 1971. Vol. 26. No. 1. P. 49–64.
18. Keropyan A., Gerasimova A., Goloshapov K. Influence of the track gradient on the contact temperature at the wheel-rail zone for open-pit locomotives. In book: *MATEC Web of Conferences*. 2017. Vol. 129. Article 06009. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201712906009>
19. Naumova M.G., Morozova I.G., Borisov P.V. Investigating the features of color laser marking process of galvanic chrome plating in order to create a controlled color image formation at given marking. In book: *Materials Today: Proceedings*. 2019. Vol. 19. Part 5. P. 2405–2408. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.08.044>
20. Kobelev O., Valeeva L., Gerasimova A. Forging process flow development for plate production // *Solid State Phenomena*. 2021. Vol. 316. P. 240–245. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.316.240>
21. Gorbatyuk S., Pashkov A., Chichenev N. Improved copper-molybdenum composite material production technology // *Materials Today: Proceedings*. 2019. Vol. 11. Part 1. P. 31–35. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.12.102>
22. Pan L., Zhang C., Wang L., Liu Q., Wang G. Crack formation law and mechanism in selective laser melting of 316L stainless steels // *Laser and Optoelectronics Progress*. 2019. Vol. 56. No. 9. Article 101401. <https://doi.org/10.3788/LOP56.101401>
5. Xing X., Duan X., Jiang T., Wang J., Jiang F. Ultrasonic peening treatment used to improve stress corrosion resistance of AlSi10Mg components fabricated using selective laser melting. *Metals*. 2019, vol. 9, no. 1, p. 103. <https://doi.org/10.3390/met9010103>
6. Shishkovskii I.V. *Laser Synthesis of Functional-Gradient Mesostuctures and Bulk Products*. Moscow: FIZMATLIT, 2009, 421 p. (In Russ.).
7. Geguzin Ya.E. *Physics of Sintering*. Moscow: Nauka, 1984, 311 p. (In Russ.).
8. *Technologies of laser additive manufacturing of metal products*. Available at URL: <http://geektimes.ru/post/218271/> (Accessed 01.08.2021). (In Russ.).
9. Gerasimova A.A., Radyuk A.G., Glukhov L.M. Applying coatings to the narrow walls of continuous-caster molds to improve the quality of the surface of slabs. *Metallurgist*. 2014, vol. 58, no. 5-6, pp. 397–400. <https://doi.org/10.1007/s11015-014-9922-2>
10. Grishaev R.V., Mirzade F.Kh., Khomenko M.D. Modeling of phase transitions in selective laser sintering by powder injection. *Perspektivnye materialy*. 2013, no. S14, pp. 241–248. (In Russ.).
11. Buluk I.I. Application of hydrogen in the production of sintered anisotropic nanostructured magnets from alloys of rare-earth and transition metals. *Materials Science*. 2019, vol. 54, no. 6, pp. 761–775. <http://doi.org/10.1007/s11003-019-00262-7>
12. Dong L., Makradi A., Ahzi S., Remond Y. Three-dimensional transient finite element analysis of the selective laser sintering process. *Journal of Materials Processing Technology*. 2009, vol. 209, no. 2, pp. 700–706. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.02.040>
13. Matsumoto M., Shiomi M., Osakada K., Abe F. Finite element analysis of single layer forming on metallic powder bed in rapid prototyping by selective laser processing. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2002, vol. 42, no. 1, pp. 61–67. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(01\)00093-1](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(01)00093-1)
14. Nelson J.C., Xue S., Barlow J.W., Beaman J.J., Marcus H.L., Bourell D.L. Model of the selective laser sintering of bisphenol-A polycarbonate. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 1993, vol. 32, no. 10, pp. 2305–2317. <https://doi.org/10.1021/ie00022a014>
15. Xiong B.W., Xu Z.F., Yan Q.S., etc. Progress on metal powder materials used for direct selective laser sintering. *Hot Working Technology*. 2008, vol. 33, no. 9, pp. 92–94.
16. Simchi A., Pohl H. Effects of laser sintering processing parameters on the microstructure and densification of iron powder. *Materials Science and Engineering: A*. 2003, vol. 359, no. 1-2, pp. 119–128. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(03\)00341-1](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(03)00341-1)
17. Buschow K.H.J. Rare earth-cobalt intermetallic compounds. *Philips Research Report*. 1971, vol. 26, no. 1, pp. 49–64.
18. Keropyan A., Gerasimova A., Goloshapov K. Influence of the track gradient on the contact temperature at the wheel-rail zone for open-pit locomotives. In: *MATEC Web of Conferences*. 2017, vol. 129, article 06009. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201712906009>
19. Naumova M.G., Morozova I.G., Borisov P.V. Investigating the features of color laser marking process of galvanic chrome plating in order to create a controlled color image formation at given marking. In: *Materials Today: Proceedings*. 2019, vol. 19, part 5, pp. 2405–2408. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.08.044>
20. Kobelev O., Valeeva L., Gerasimova A. Forging process flow development for plate production. *Solid State Phenomena*. 2021, vol. 316, pp. 240–245. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.316.240>
21. Gorbatyuk S., Pashkov A., Chichenev N. Improved copper-molybdenum composite material production technology. *Materials Today: Proceedings*. 2019, vol. 11, part 1, pp. 31–35. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.12.102>
22. Pan L., Zhang C., Wang L., Liu Q., Wang G. Crack formation law and mechanism in selective laser melting of 316L stainless steels. *Laser and Optoelectronics Progress*. 2019, vol. 56, no. 9, article 101401. <https://doi.org/10.3788/LOP56.101401>

23. Li L., Tirado A., Nlebedim I.C., etc. Big area additive manufacturing of high performance bonded NdFeB magnets // *Scientific Reports*. 2016. No. 6. Article 36212. <https://doi.org/10.1038/srep36212>
24. Mapley M., Pauls J.P., Tansley G., Busch A., Gregory S.D. Selective laser sintering of bonded magnets from flake and spherical powders // *Scripta Materialia*. 2019. No. 172. P. 154–158. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2019.07.029>
23. Li L., Tirado A., Nlebedim I.C., etc. Big area additive manufacturing of high performance bonded NdFeB magnets. *Scientific Reports*. 2016, no. 6, article 36212. <https://doi.org/10.1038/srep36212>
24. Mapley M., Pauls J.P., Tansley G., Busch A., Gregory S.D. Selective laser sintering of bonded magnets from flake and spherical powders. *Scripta Materialia*. 2019, no. 172, pp. 154–158. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2019.07.029>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Дмитрий Борисович Ефремов, к.т.н, доцент кафедры «Инжиниринг технологического оборудования», Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

ORCID: 0000-0002-5706-8685

E-mail: defremov@list.ru

Алла Александровна Герасимова, к.т.н, доцент, ученый секретарь кафедры «Инжиниринг технологического оборудования», Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

ORCID: 0000-0002-1317-9025

E-mail: allochka@rambler.ru

Dmitrii B. Efremov, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair “Engineering of Technological Equipment”, National University of Science and Technology “MISIS” (MISIS)

ORCID: 0000-0002-5706-8685

E-mail: defremov@list.ru

Alla A. Gerasimova, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof., Academic Secretary of the Chair “Engineering of Technological Equipment”, National University of Science and Technology “MISIS” (MISIS)

ORCID: 0000-0002-1317-9025

E-mail: allochka@rambler.ru

Поступила в редакцию 15.03.2021

После доработки 30.03.2021

Принята к публикации 11.05.2021

Received 15.03.2021

Revised 30.03.2021

Accepted 11.05.2021