

УДК 621.763
DOI: 10.12737/21236

В.В. Васильцов, д.т.н., **Э.Н. Егоров**, инженер,
И.Н. Ильичев, м.н.с., **А.В. Соловьев**, инженер,
(Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН,
140700, Россия, МО, г. Шатура, ул. Святоозерская, 1)
А.В. Богданов, к.т.н., **А.И. Мисюров**, к.т.н.,
Н.А. Смирнова, к.т.н.
(МГТУ им. Н.Э.Баумана, 105005, 2-я Бауманская ул., д.5, стр.1)
E-mail: v.vasiltsov@mail.ru; mtbmstu@mail.ru

Аддитивные лазерные технологии спекания металлических порошков для получения изделий авиационной и космической промышленности

Представлена отечественная лазерная технологическая установка для аддитивных лазерных технологий. Установка создана на базе мощного волноводного CO₂-лазера. Проведены эксперименты по спеканию жаропрочных сплавов для авиационной промышленности. Выполнены металлографические исследования полученных структур.

Ключевые слова: лазер; аддитивные технологии; технологический комплекс; металлические порошки; металлографический анализ.

V.V. Vasiltsov, D.Eng., **E.N. Yegorov**, Engineer,
I.N. Ilichyov, M.Sc., **A.V. Soloviyov**, Engineer,
(Institute of Problems of Laser and Information Techniques of RAS,
1, Svyatoozerskaya Str., Shatura, MR 140700, Russia)
A.V. Bogdanov, Can.Eng., **A.I. Misuyurov**, Can.Eng.,
N.A. Smirnova, Can.Eng.
(Bauman STU of Moscow, Building 1, 5, 2-d Baumanskaya Str., 105005 Russia)

Additive laser techniques of metal powder fritting to manufacture products of aerospace industry

A domestic plant for additive techniques of different materials fritting is presented. The plant in its basis has a high-powered (up to 2.5 kW) waveguide CO₂-laser possessing a unique in the uniformity of emission power density distribution on a target. The results of nickel-based heat-resistant alloy fritting of TCNA-IVR, VZhL12U and VZh159 types developed for manufacturing complex contoured parts of gas turbine engines (GTE) by a method of layered laser alloying and for complex contoured parts GTE repair by a method of gas powder laser surfacing are shown. During laser remelting of these powders it is possible to grow a billet with a homogeneous fine-grain structure which manufacturing is impossible at common techniques of casting.

Keywords: additive techniques; technological complex; metal powders; metallographic analysis.

В настоящее время весьма интенсивно развиваются аддитивные лазерные технологии быстрого прототипирования. Одним из наиболее перспективных методов получения изделий сложной формы из широкого спектра порошков является селективная лазерная наплавка /селективное лазерное спекание СЛН/СЛС [1–5].

СЛН как перспективная, многообещающая технология позволяет осуществлять послойное нанесение материала, что дает возможность создавать 3D металлообъекты любой степени сложности. На основе СЛН появился новый способ лазерной обработки, предназначенный для создания однородных и прочных

деталей произвольной пространственной формы.

На практике СЛН технология синтеза материалов осуществляется как методом прямого сканирования лазерным лучом поверхности слоя частиц порошка, так и методом коаксиальной инжекции частиц в зону воздействия лазерного излучения (ЛИ).

В первом случае лазерный пучок не пересекается с потоком порошка, который заранее наносится на поверхность деталей (подложку) в виде слоя. При этом для получения металлических деталей со сложной геометрией используется компьютерное управление лазерным лучом,двигающимся над определенными

областями образца с нанесенным слоем порошка.

Трехмерная деталь, произведенная по технологии СЛН, представляет собой набор слоев, сплавленных из металлического порошка, и нанесенных последовательно один на другой. Технология СЛН в таком варианте становится похожей на лазерную стереолитографию, в которой используется полимеризация жидкого полимера под воздействием интенсивного ЛИ [2].

Во втором методе нанесения порошка, лазерный луч оплавляет изделие, образуя локальную микроскопическую ванну расплава [3–5]. Струей инертного транспортирующего газа (например, аргона) в расплав вдуваются частицы порошка. После смещения лазерного луча жидкий металл затвердевает, а за счет введенного в расплав порошка на поверхности изделия появляется локальное утолщение. Таким образом, в результате сканирования поверхности изделия лазерным лучом с одновременной инжекцией порошка формируется первый и все последующие слои синтезируемого объекта.

Метод СЛН с инжекцией порошков позволяет вести обработку изделий со значительной производительностью с минимальным проплавлением основы и термическим влиянием на деталь, с возможностью точного контроля режимов обработки, геометрических и физико-механических характеристик и высоким качеством наплавленных слоев.

Важным этапом является выбор оптимальных параметров обработки, как экспериментальным путем, так и методами математического моделирования, что позволит усовершенствовать процесс создания материалов с заданным комплексом требований.

Разработка комплекса аддитивных технологий на базе мощного CO₂-лазера

Экспериментальный лазерный комплекс СЛС (рис. 1) состоит из излучателя волноводного CO₂-лазера «Гибрид» со средней мощностью излучения до 2,5 кВт. Он имеет следующие технические характеристики: длина материала. волны излучения – 10,6 мм; мощность излучения – 2500 Вт [6]; апертура – 45 мм; расходимость оси луча (полный угол на выходе сужающего телескопа, не более) ≥ 45 мрад; потребляемая электрическая мощность ≤ 25 кВт; главное преимущество – однородное (модуляция не более 8 %) распределение плотности мощности на мишени 3-координатного манипулятора,

внешнего оптического тракта, фокусирующих систем и систем подачи порошкового материала.

Имеется следующее программное обеспечение: программы управления 3-координатным столом; программы для послойного изготовления деталей сложного топологического профиля.



Рис. 1. Комплекс СЛС, (справа – технологическая кабина с работающими операторами; слева – выходящая часть лазера «Гибрид»)

Разработан, изготовлен и испытан фокусирующий блок с коаксиальным соплом для подачи порошка в зону спекания. На рис. 2 показан фокусирующий блок типа косегрен, позволяющий с большой надежностью транспортировать к изделию мощное, более 2 кВт излучение. На рис. 3 представлено коаксиальное сопло.

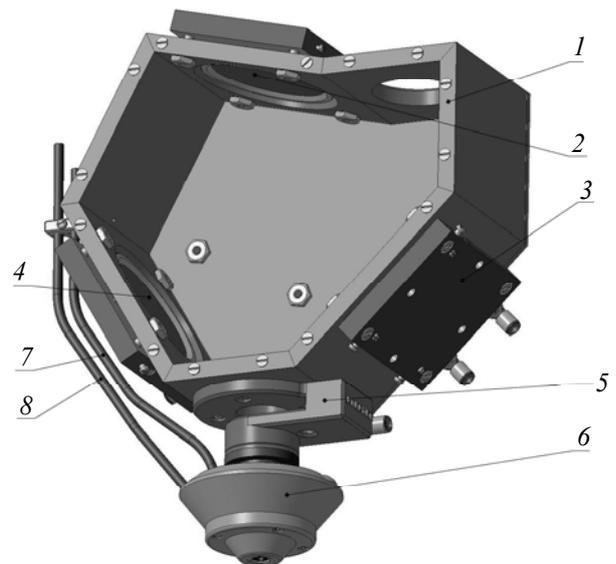


Рис. 2. Фокусирующий блок:

1 – корпус; 2 – зеркало вогнутое $R = 700$ мм; 3 – охладитель; 4 – зеркало плоское; 5 – переходник; 6 – сопло; 7 – трубка подвода порошка; 8 – трубка подвода газа

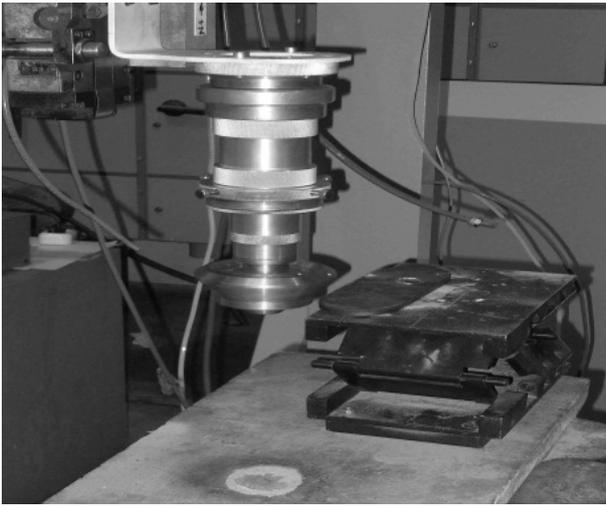


Рис. 3. Фотография коаксиального сопла (верхняя часть – фокусирующий блок с линзой, нижняя – коаксиальное сопло)

Экспериментальное исследование СЛС порошков для изготовления различных материалов

Рассмотрим наплавку материалов из порошков ВКНА -1ВР, ВЖЛ12У и ВЖ159 (Рис. 4).

Приведем химический состав:

ВКНА 1ВР: основа Ni, Al 8...9, Cr 5...6, Hf 0,4...0,6, Mo 2,5...4,5, Ti 1...2, W 2...4, Si ≤ 0,4, Fe ≤ 0,5;

ВЖЛ 12У: основа Ni, Co 5...14,5, Cr 9...10, Al 5,1...5,7, Ti 4,2...4,7, L₁₀ 2,7...3,4, V 0,5...1, Nb 0,5...1, W 1...1,8;

ВЖ 159: основа Ni, Al 1,25...1,55, Mo 7...8, Nb 2,5...3,5, Si ≤ 0,8, B ≤ 0,005, Fe ≤ 3,0, P ≤ 0,013, Mn ≤ 0,5, Mg ≤ 0,03.

Металлические порошки из жаропрочных сплавов на никелевой основе марки ВКНА 1ВР, ВЖЛ12У и ВЖ159 разработаны для изготовления сложнопрофильных деталей ГТД (газотурбинных двигателей) методом послойного лазерного сплавления и для ремонта сложнопрофильных деталей ГТД методом лазерной газопорошковой наплавки. По мнению ВИАМ, при лазерном переплаве данных порошков можно вырастить заготовку с однородной мелкозернистой структурой, получение которой при традиционных технологиях литья невозможно.

Анализ макрошлифов показывает, что на указанных режимах наблюдается удовлетворительное формирование отдельных наплавленных валиков. В качестве примера на рис. 5 показаны поперечные сечения валиков, полученных при переплаве порошка ВКНА1ВР.

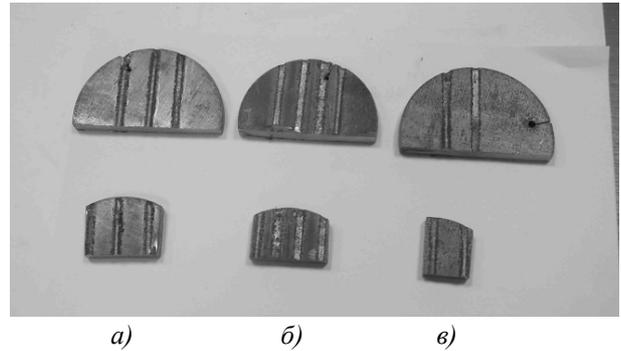
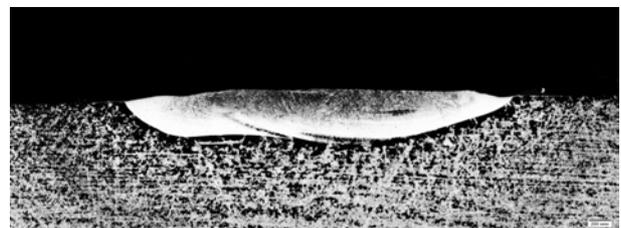
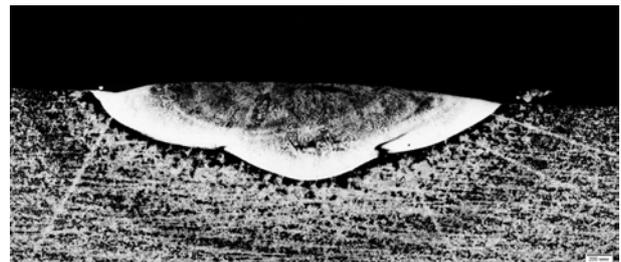


Рис. 4. Образцы наплавки порошков:

a – ВЖ159, скорость 4 мм/с, расход 8 г/мин, $P = 1,8$ кВт; *б* – ВКНА 1ВР, скорость 4 мм/с, расход 8 ...12 г/мин, $P = 1,8$ кВт; *в* – ВЖ 12У, скорость 4 мм/с, расход 8...12 г/мин, $P = 1,8$ кВт



a)



б)

Рис. 5. Поперечные сечения валиков, наплавленных порошком ВКНА 1ВР на различных скоростях: *a* – 2 мм/с; *б* – 6 мм/с

С увеличением скорости наплавки уменьшается ширина и высота наплавленных валиков, глубина подплавления основы растет, а протяженность зоны термического влияния (ЗТВ) уменьшается (табл. 1).

1. Зависимости ширины, высоты валиков и глубины

Скорость наплавки, мм/с	Ширина, мм	Высота наплавки, мм	Глубина подплавления, мм	Максимальная по глубине ЗТВ, мкм
2	3,43	0,17	0,31	1476
4	3,23	0,14	0,36	1094
6	2,80	0,12	0,60	731

Второй и каждый последующий наплавленный валик формируется за счет перемешивания расплавленного металла предыдущего с металлом, полученным при плавлении порошка. Поэтому по мере увеличения количества валиков их химический состав стабилизируется. Для лазерной наплавки выравнивание состава происходит после выполнения 3 – 5 слоев. Исходя из этих соображений, анализ микроструктуры проводили в 3-м валике.

В литом наплавленном металле наблюдается ячеистая или ячеисто-дендритная транскристаллитная структура (рис. 6). Рост кристаллов происходит в направлении от подложки к поверхности. В микроструктуре литого металла многопроходного слоя не наблюдаются существенных отличий по сравнению с единичным валиком.

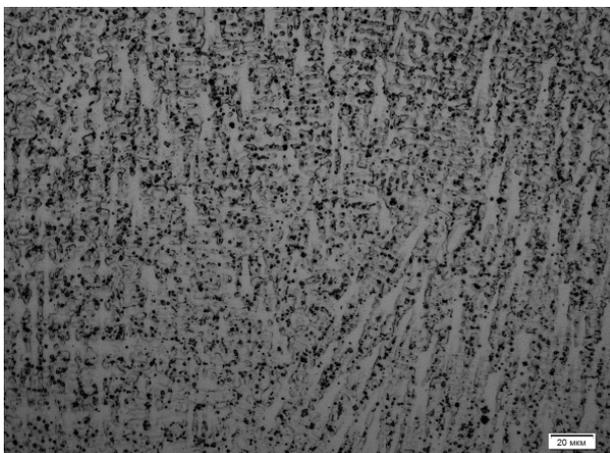


Рис. 6. Микроструктура наплавленного металла (валик, наплавленный порошком ВКНА 1ВР за три прохода на скорости 2 мм/с)

Рост твердой фазы начинается от оплавленных элементов структуры предыдущего наплавленного слоя. На линии сплавления между отдельными наплавленными валиками наблюдается рост твердой фазы от оплавленных элементов первичной структуры, что говорит об установлении прочной металлической связи между наплавленным металлом предыдущего и последующего валиков. На оптимальных режимах в многослойных наплавках не наблюдается снижения травимости зон сплавления последующего и предыдущего наплавленных валиков.

В месте контакта наплавленных валиков микротвердость не изменяется (рис. 7). Это свидетельствует о том, что в зоне термического влияния последующего валика диффузионные процессы не успевают развиваться из-за высоких скоростей нагрева и охлаждения при лазерном воздействии.

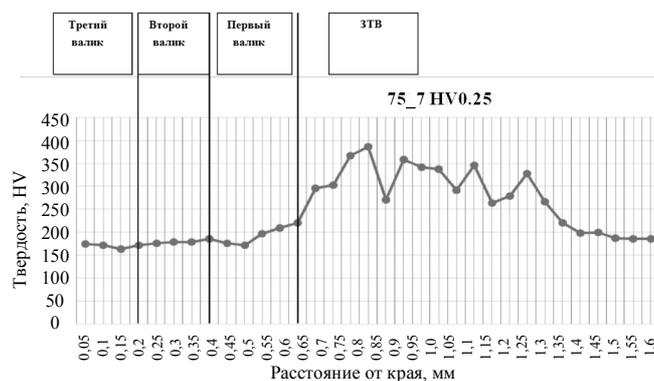


Рис. 7. Изменение микротвердости по высоте наплавленного слоя порошком ВКНА 1ВР за три прохода на скорости 2 мм/с

С увеличением скорости наплавки происходит измельчение элементов первичной структуры и появление ячеистых дендритов (рис. 8). Это свидетельствует о возрастании термодиффузионного переохлаждения, что полностью согласуется с современными представлениями о формировании первичной структуры в неравновесных условиях. Анализ литой структуры позволяет предположить повышение структурно-чувствительных свойств с ростом скорости наплавки, связанное с измельчением и «дендритизацией» первичной структуры.

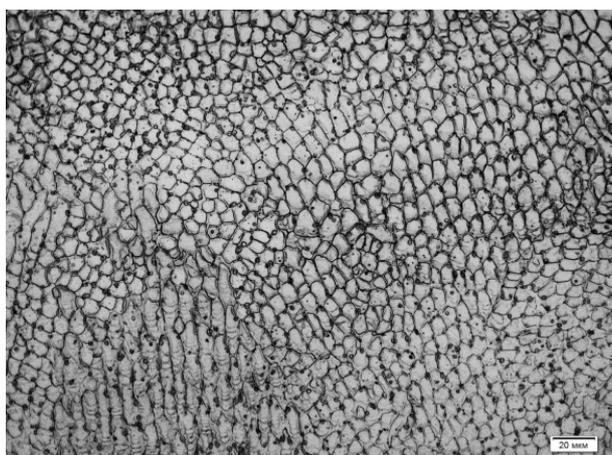
Уменьшение расхода порошка вызывает ее некоторое укрупнение и отклонение от ячеистого строения в сторону ячеистых дендритов (рис. 9). Значительного порообразования на металлографических шлифах не наблюдается. Первичная структура наплавленного металла имеет ячеисто-дендритное строение.

Исследование структуры металла, полученного переплавом порошка ВЖЛ 12У, и анализ макрошлифов наплавленных валиков показывает, что также как и при использовании порошка ВКНА 1ВР, наплавленные образцы имеют три ярко выраженные зоны.

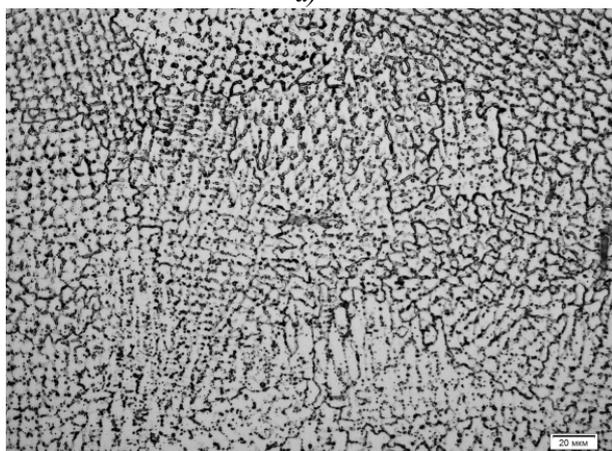
С увеличением скорости наплавки уменьшается ширина и высота наплавленных валиков, а глубина подплавления основы растет. При наплавке единичного валика на подложку наблюдается укрупнение структуры в ЗТВ. С увеличением скорости наплавки протяженность ЗТВ уменьшается (табл. 2).

Исследование структуры металла, полученного переплавом порошка ВЖ 159, показало следующее. При изменении скорости наплавки порошком ВЖ 159 наблюдаются те же тенденции, что и при использовании порошков ВКНА 1ВР и ВЖЛ12У. Точно также наплавленные образцы, имеют три ярко выра-

женные зоны: литую зону, металл, подвергшийся термическому влиянию (ЗТВ), основной металл, не испытывавший теплового воздействия. С увеличением скорости наплавки уменьшается ширина и высота наплавленных валиков, а глубина подплавления основы растет. При наплавке единичного валика на подложку наблюдается укрупнение структуры в ЗТВ, а с увеличением скорости наплавки протяженность ЗТВ уменьшается.



а)



б)

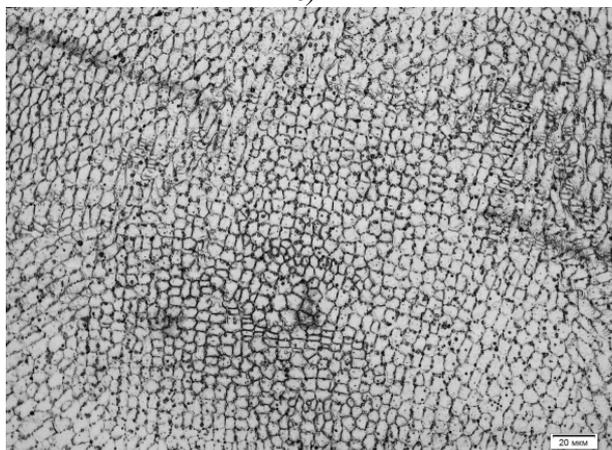
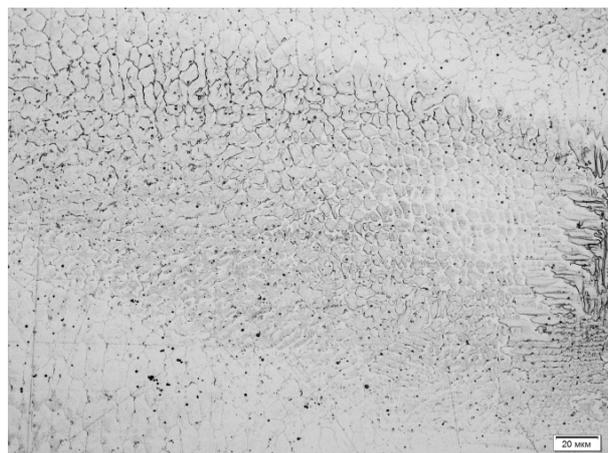


Рис. 8. Первичная структура литого металла валика, наплавленного порошком ВЖЛ 12У на различных скоростях:

а – 2 мм/с; б – 4 мм/с; в – 6 мм/с



а)



б)

Рис. 9. Влияние расхода порошка на формирование первичной структуры литого металла наплавленных валиков:

а – 11 г/мин; б – 8 г/мин

2. Скорость наплавки максимальная ЗТВ

Образец	Скорость наплавки, мм/с	Максимальная по глубине ЗТВ, мкм
Рис. 8,а	2	990
Рис. 8,б	4	850
Рис. 8,в	6	717

Выводы:

1. При лазерном переплаве порошков из жаропрочных сплавов на никелевой основе марок ВКНА 1ВР, ВЖЛ 12У и ВЖ 159 образуется прочноплотная структура, строение которой позволяет прогнозировать высокие структурно-чувствительные свойства. В литом металле отсутствуют поры и трещиноподобные дефекты. В микроструктуре литого металла многопроходного слоя не наблюдаются существенные отличия по сравнению с единственным валиком.

2. В распределении микротвердости по толщине наплавленного валика в ЗТВ имеется провал пластичности. Это может свидетельствовать о сравнительно мощном термическом воздействии на подложку в процессе наплавки, что следует учитывать при назначении режимов лазерной обработки в случае выращивания объемной детали. Поэтому в дальнейшей работе следует провести исследования с целью уточнения параметров лазерного излучения.

3. При выборе режима наплавки следует провести оптимизацию параметров процесса лазерной наплавки, так как наблюдается некоторое противоречие между объемом наплавленного металла, а, следовательно, производительностью процесса, и предполагаемыми свойствами литого металла.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Панченко, В.Я., Васильцов, В.В., Грезев, А.Н., Галушкин, М.Г., Егоров, Э.Н., Ильичев, И.Н., Мисюров, А.И., Павлов, М.Н., Соловьев, А.В. Лазерное спекание металлических порошков для изготовления изделий машиностроения с градиентными свойствами // Сварочное производство. – 2011. № 12. – С. 10–14.

2. Евсеев, А.В., Новиков, М.М., Панченко, В.Я., Низьев, В.Г., Васильцов, В.В. Лазерные технологии быстрого прототипирования и прямой фабрикации трехмерных объектов. Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок / под. ред. акад. В.Я. Панченко. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 664 с. – ISBN 078-5-9221-1023-5. С. 333–397.

3. Васильцов, В.В., Галушкин, М.Г., Ильичев, И.Н., Мисюров, А.И., Панченко, В.Я. Послойная лазерная наплавка металлических порошков: аналитическая теория и эксперимент // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2012. № 5. – С. 69–77.

4. Panchenko V.Ya., Vasiltsov V.V., Galushkin M.G., Ilichev I.N., Misyurov A.I. Main Thermophysical Processes in Laser Beam Buildup Welding of Metal Powders// ISSN№2075-1133, Inorganic Materials: Applied Research. 2014, Vol.5, № 3. pp.199-203. Pleiades Publishing, Ltd., 2014.

5. Панченко, В.Я., Александров В.О., Васильцов, В.В., Галушкин, М.Г., Егоров, Э.Н., Соловьев, А.В., Ильичев, И.Н., Лебедев, Ф.В., Низьев, В.Г. Разработка оборудования и технологии селективного лазерного спекания (СЛС). Современные лазерно-информационные технологии: Колл. монография под ред. акад. В.Я. Панченко и проф. Ф.В. Лебедева. М.: Интерконтакт Наука, 2015. 959 с. стр. 324-348.

6. Пат. N 2410810 к заявке N 200814949496. Александров В.О., Васильцов В.В., Панченко В.Я. Электроразрядный многоканальный лазер с диффузионным охлаждением рабочей смеси, приоритет 15.12.2008, зарегистрирован 27.01.2011. Срок действия 15.12.2028.

REFERENCES

1. Panchenko, V.Ya., Vasiltsov, V.V., Grezev, A.N., Galushkin, M.G., Yegorov, E.N., Ilichyov, I.N., Misyurov, A.I., Pavlov, M.N., Soloviyov, A.V. Laser metal powder fritting for manufacturing engineering parts with gradient properties // *Welding Engineering*. – 2011. № 12. – pp. 10–14.

2. Yevseyev, A.V., Novikov, M.M., Panchenko, V.Ya., Niziyev, V.G., Vasiltsov, V.V. *Laser Techniques of Quick Prototyping and Direct Fabrication of 3D Objects. Laser Techniques of Material Processing: Modern Problems of Fundamental Researches and Applied Developments* / under the editorship of Acad. V.Ya. Panchenko. M.: FIZMATLIT, 2009. – pp. 664. – ISBN 078-5-9221-1023-5. pp. 333–397.

3. Vasiltsov, V.V., Galushkin, M.G., Ilichyov, I.N., Misyurov, A.I., Panchenko, V.Ya. Layered laser surfacing of metal powders: analytical theory and experiment // *Bulletin of Bauman STU of Moscow*. – 2012. № 5. – pp. 69–77.

4. Panchenko V.Ya., Vasiltsov V.V., Galushkin M.G., Ilichev I.N., Misyurov A.I. Main Thermophysical Processes in Laser Beam Buildup Welding of Metal Powders// ISSN№2075-1133, Inorganic Materials: Applied Research. 2014, Vol.5, № 3. pp.199-203. Pleiades Publishing, Ltd., 2014.

5. Panchenko, V.Ya., Александров В.О., Vasiltsov, V.V., Galushkin, M.G., Yegorov, E.N., Soloviyov, A.V., Ilichyov, I.N., Lebedev, F.V., Niziyev, V.G. *Development of Equipment and Techniques for Selective Laser Sintering (SLS), Modern Laser-Information Techniques*: collective monograph under the editorship of Acad. V.Ya. Panchenko and Prof. F.V. Lebedev. M.: Intercontact Science, 2015. 959 с. pp. 324-348.

6. Pat. N 2410810 to application N 200814949496. Александров В.О., Vasiltsov V.V., Panchenko V.Ya. Sputterion multichannel laser with diffusion cooling of working mixture, priority 15.12.2008, registered 27.01.2011. Period of validity 15.12.2028.

Рецензент к.т.н.Т.В. Тарасова

