

УДК: 621.762.07

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА 3-D ПЕЧАТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕСФЕРИЧЕСКИХ ГИДРИРОВАННЫХ - ДЕГИДРИРОВАННЫХ ПОРОШКОВ ТИТАНА

ОВЧИННИКОВ А. В.¹, *д.т.н, проф.*,
ДЖУГАН А. А.^{2*}, *асп.*,
ШЕВЧЕНКО А. В.¹, *м.н.с.*,
ЯНКО Т. Б.³, *заведующий лабораторией*,
СИДОРЕНКО М. В.¹, *к.т.н.*,
СЕЛИВЕРСТОВ А. Г.⁴, *нач. бюро сварки*

Кафедра механики, Запорожский национальный технический университет, ул. Жуковского, 64, 69063, Запорожье, Украина.

^{2*} Кафедра физического материаловедения, Запорожский национальный технический университет, ул. Жуковского, 64, 69063, Запорожье, Украина, тел. +38(061)7698362, o.a.dzhugan@gmail.com.

³ ГП «Государственный научно-исследовательский и проектный институт титана», пр. Ленина, 180, 69035, Запорожье, Украина.

⁴АО «Мотор Сич», пр. Моторостроителей, 15, 69068, Запорожье, Украина.

Аннотация. Целью работы было определение возможности применения несферических титановых порошков неправильной формы для аддитивных технологий. **Методика:** моделирование процесса послойного построения детали осуществляли по технологии, аналогичной технологии селективного лазерного спекания. В качестве исходного сырья был взят порошок марки ПТ, полученный при механическом дроблении титановой губки ТГ100 и последующем расфасовке по фракциям. Для проведения исследований был выбран порошок фракцией 50...150 мкм, который предварительно подвергался процессам гидрирования и дегидрирования с целью очистки от вредных примесей и уплотнения его структуры, и приближения к сферической форме для моделирования процесса 3-D печати по технологии SLS (Selective Laser Sintering - селективное лазерное спекание). В качестве источника энергии для послойного спекания порошков использовали импульсный лазер с мощностью излучения 900 Вт/сек при частоте воздействия 20 Гц (беспрерывное воздействие). **Результаты:** при исследовании полученных образцов установлено, что толщина полученных слоев в первом случае составляла 200...300 мкм, а во втором случае 50...100 мкм. При использовании, для построения деталей, слоя с меньшей толщиной получаемая структура характеризуется высокой плотностью и отсутствием пор, что позитивно повлияет на свойства деталей получаемых методами послойного построения. **Научная новизна:** установлены закономерности формирования структуры в наплавленном слое в процессе лазерного сплавления по технологии, аналогичной SLS, при использовании опытных гидрированных и дегидрированных порошков титана. **Практическая ценность** работы состоит в возможности применения в аддитивных технологиях менее дорогостоящих порошков титана, которые имеют неправильную форму порошков взамен используемым в настоящее время сферическим порошкам, что позволит существенно снизить стоимость изделий при сохранении свойств получаемых деталей.

Ключевые слова: аддитивные технологии; титановый порошок; форма; слой; лазер; спекание; структура; свойства

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ 3-D ДРУКУ З ВИКОРИСТАННЯМ НЕСФЕРИЧНИХ ГІДРОВАННИХ - ДЕГІДРОВАННИХ ПОРОШКІВ ТИТАНУ

ОВЧИННИКОВ О. В.¹, *д.т.н, проф.*,
ДЖУГАН О. А.^{2*}, *асп.*,
ШЕВЧЕНКО А. В.¹, *м.н.с.*,
ЯНКО Т. Б.³, *завідуючий лабораторією*,
СИДОРЕНКО М. В.¹, *к.т.н.*,
СЕЛІВЕРСТОВ О. Г.⁴, *нач. бюро зварювання*

¹Кафедра механіки, Запорізький національний технічний університет, вул. Жуковського, 64, 69063, Запоріжжя, Україна.

^{2*} Кафедра фізичного матеріалознавства, Запорізький національний технічний університет, вул. Жуковського, 64, 69063, Запоріжжя, Україна, тел. +38(061)7698362, o.a.dzhugan@gmail.com.

³ ДП «Державний науково-дослідний та проектний інститут титану», пр. Леніна, 180, 69035, Запоріжжя, Україна.

⁴АТ «Мотор Січ», пр. Моторобудівників, 15, 69068, Запоріжжя, Україна.

Анотація. Ціллю роботи було визначення можливості застосування несферичних титанових порошків неправильної форми для аддитивних технологій. **Методика:** моделювання процесу пошарової побудови деталі здійснювали за технологією, аналогічною технології селективного лазерного спікання. В якості вихідної сировини було взято порошок марки ПТ, отриманий при механічному дробленні титанової губки ТГ100 та подальшому розсіві по фракціях. Для проведення досліджень був вибраний порошок фракцією 50...150 мкм, який попередньо піддавався процесам гідрування і дегідрування з ціллю очищення від шкідливих домішок і ущільнення його структури, і наближення до сферичної форми для моделювання процесу 3-D друку за технологією SLS (Selective Laser Sintering – селективне лазерне спікання). В якості джерела енергії для спікання порошків між собою використовувався імпульсний лазер з потужністю випромінювання 900 Вт/сек при частоті впливу 20 Гц (бесперервний вплив). **Результати:** при дослідженні отриманих зразків установлено, що товщина отриманих шарів у першому випадку складала 200...300 мкм, а у другому випадку 50...100 мкм. При використанні для побудови деталей шару з меншою товщиною одержувана структура характеризується більшою щільністю та відсутністю пор, що позитивно впливає на властивості деталей, одержуваних методами пошарової побудови. **Наукова новизна:** встановлені закономірності формування структури в наплавленому шарі в процесі лазерного сплавлення за технологією, аналогічною SLS, при використанні дослідних гідрованих і дегідрованих порошків титану. **Практична цінність** роботи полягає у можливості застосування в аддитивних технологіях менш дорогих порошків титану, які мають неправильну форму порошків на заміну використовуваним сьогодні сферичним порошкам, що дозволить значно знизити вартість виробів при збереженні властивостей одержуваних деталей.

Ключові слова: аддитивні технології; титановий порошок; форма; шар; лазер; спікання; структура; властивості

MODELING OF 3-D PRINTING USING NON-SPHERICAL HYDROGENATED - DEHYDROGENATED TITANIUM POWDERS

OVCHINNIKOV A. V.¹, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
 DZHUGAN A. A.^{2*}, *gr. st.*,
 SHEVCHENKO A. V.¹, *j.r.*,
 YANKO T. B.³, *head of laboratory*,
 SIDORENKO M.V.¹, *Cand. Sc. (Tech.)*,
 SELIVERSTOV A. G.⁴, *Head of Welding Bureau*

¹Department of Mechanics, Zaporizhzhya National Technical University, Zhukovskoho st, 64, 69063, Zaporizhzhya, Ukraine.

^{2*} Department of Physical Materials Science, Zaporizhzhya National Technical University, Zhukovskoho st, 64, 69063, Zaporizhzhya, Ukraine, тел. +38(061)7698362, o.a.dzhugan@gmail.com.

³SE «State Titanium Research and Design Institute», Lenina ave, 180, 69035, Zaporizhzhya, Ukraine.

⁴JSC «Motor Sich», pr. Motorostroitelei, 15, 69068, Zaporizhzhya, Ukraine.

Abstract. The purpose of research was to determine the possibility of using non-spherical titanium powders of irregular shape for additive technologies. **Methodology:** modeling of layering of a part was carried out by technology, similar to selective sintering technology. Powder brand PT was used as a raw material, that was obtained by mechanical crushing of titanium sponge TG100 and subsequent sieving by fractions. Powder with a fraction of 50...150 μm was chosen for research. It was previously hydrogenated and dehydrogenated with a view to cleaning of contaminants, sealing its structure and bringing it closer to a spherical shape for modeling the 3-D printing process by SLS technology (Selective Laser Sintering). The pulsed laser with emission power of 900 W/s at a frequency of 20 Hz exposure (continuous exposure) was used as a source of energy for the sintering powder particles with each other. **Findings:** in the study of the obtained samples there was found that the thickness of the layers obtained in the first case was 200...300 μm and in the second case 50...100 μm. When the thinner layer was used for the construction of parts the resulting structure is characterized by a higher density and a lack of pores that will positively affect the properties of the parts obtained by layering methods. **Originality:** the regularities of formation of structure in the deposited layer during laser fusion technology similar to SLS using hydrogenated and dehydrogenated experimental titanium powders were found. **The practical value** of the research consists in the possibility of using less expensive titanium powders with irregular shape of the powder particles in additive technologies, instead of spherical powders, which are being used today, which will significantly reduce manufacturing costs while maintaining the properties of the resulting parts.

Key words: additive technologies; titanium powder; shape; layer; laser; sintering; structure; properties

Внедрение в производство новых технологий, в основу которых положены принципы ресурсосбережения и повышения технологичности и экологичности, является, безусловно, актуальной задачей. Одним из наиболее благоприятных и перспективных решений в этом направлении являются технологии Additive Fabrication или Additive Manufacturing (AM-технологии), которые

предполагают изготовление изделия по данным цифровой модели методом послойного добавления материала [5,14].

Получение изделия происходит послойно, шаг за шагом путем формирования слоя материала в соответствии с конфигурацией трехмерной модели и соединения каждого последующего слоя с предыдущим [2,7].

К основным преимуществам аддитивных технологий можно отнести следующие:

1. Возможность изготовления деталей сложной формы.

2. Необходима только трёхмерная модель будущего изделия.

3. Возможность оперативно менять геометрию деталей.

4. Возможность использования различных материалов для печати на одной установке.

Все существующие аддитивные технологии по способу подачи материала, можно поделить на два основных типа: первый — это *Direct deposition*, метод при котором материал подаётся в конкретное место, куда в данный момент времени подводится энергия и где идёт процесс формирования детали. Особенностью данной технологии является то, что её можно использовать для восстановления и ремонта деталей с различной конфигурацией и обеспечить формирование закрытых полостей при послойном построении. Существенным недостатком такого способа печати можно назвать необходимость использования специальных поддержек и опор, которые удерживают деталь от деформации в процессе построения. Второй тип — это *Bed deposition*, метод при котором сначала формируют слой, например, насыпают на рабочую платформу дозу порошкового материала и разравнивают порошок с помощью ролика или «ножа», создавая таким образом ровный слой материала определённой толщины; затем выборочно (селективно) обрабатывают порошок в сформированном слое лазером или иным способом (электронным лучом), скрепляя частички порошка (сплавляя или склеивая) в соответствии с текущим сечением исходной трёхмерной модели [10]. К достоинствам данного метода необходимо отнести прежде всего возможность осуществлять печать объектов без использования поддерживающих структур, под нависающими поверхностями (в отличие от предыдущей технологии). В данном случае сам порошок служит поддержкой и не даёт модели разрушиться пока она окончательно не сформирована [11]. К недостаткам данного метода следует отнести тот факт, что эта технология неприменима для восстановления и ремонта деталей, так же она не позволяет получать изделия с закрытыми полостями.

Однако, независимо от их типа, основной проблемой на пути широкого распространения аддитивных технологий является отсутствие доступного отечественного сырья.

В разных машинах используются порошки различного фракционного состава, которые классифицируют по условному диаметру частиц, подразделяя их на нанодисперсные с диаметром частиц менее 0,1 мкм, ультрадисперсные с диаметром 0,1–1,0 мкм, высокодисперсные от 1,0 до 10 мкм, мелкие от 10 до 40 мкм, средние от 40 до 250 мкм и крупные от 250 до 1000 мкм. Одним из параметров, характеризующих порошок, является

величина d_{50} — средний диаметр частиц. Например, если d_{50} равно 40 мкм, это означает, что у 50% частиц порошка размер частиц меньше или равен 40 мкм [5,7].

Сегодня эти технологии успешно применяются для производства изделий из пластика. Но также ведутся активные работы по использованию в качестве сырья для аддитивных технологий различных металлических и керамических порошков, однако вызванные при этом сложности уменьшают номенклатуру металлических изделий, получаемых с помощью АМ-технологий [3,4]. Главной проблемой является высокая стоимость импортного металлического сырья, а именно необходимость использования порошков сферической формы (рисунок 1а). Наличие оборудования для АМ-технологий в Украине диктует свои условия для активного их внедрения в различные отрасли производства. Важной задачей является замена существующих дорогих импортных порошковых материалов отечественными аналогами.

Таким образом существует необходимость разработки порошков для АМ-технологий. Поэтому, целью работы являлось исследование возможности применения гидрированных - дегидрированных порошков неправильной формы отечественного производства (рисунок 1 б) для получения изделий при использовании аддитивных технологий, взамен применяемых сферических порошков зарубежного производства.

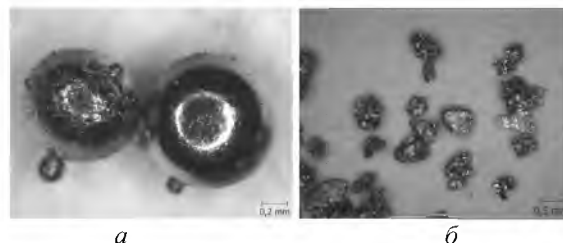


Рисунок 1 — Внешний вид: а — сферических порошков, б — порошков несферической формы / Appearance: a - spherical powders, b - powders of irregular shape

Отечественные титановые порошки могут подойти в качестве альтернативного сырья для АМ-технологий.

Термомеханический порошок титана, марок ПТ получается при дроблении блоков титана губчатого и последующего отсева дроблённой части по фракциям (ПТ5, ПТ4, ПТ3 и др.). Мелкие частички губки, которыми является рассматриваемый порошок, имеют собственную пористость и могут состоять из нескольких зёрен. Частичка имеет высокоразвитую структуру, а также насыщена сопутствующими примесями, такими как хлор и железо. Именно это и увеличивает хрупкость материала и способствует его дроблению.

Порошок титана можно получать пользуясь гидридными технологиями [12]. Так, блоки титана

губчатого подвергают гидрированию для повышения хрупкости титана. Хрупкий титановый блок дробят механическим путём и отсеивают по фракциям. Главным недостатком технологии является необходимость в использовании дорогого и сложного оборудования для гидрирования. К тому же гидрирование блока титана губчатого требует применение крупногабаритного оборудования. Несмотря на перечисленные недостатки таких порошков, их использование позволяет получать заготовки высокого качества.

Анализ технологических показателей производства порошков и их преимуществ с недостатками показал, что наиболее перспективным материалом для АМ- технологий является порошок полученный по гидридной технологии. Такой материал имеет низко развитую структуру порошинок, контуры которых приближены к сферическому порошку. Он менее, чем остальные, загрязнён примесями, ведь водород способствует очищению титана при дегидрировании [8,9]. Поэтому предложено использование порошков марок ПТ, которые подвергнуты операциям из технологической цепочки производства гидрированных порошков для получения изделий различными методами аддитивных технологий.

Совокупность технологических решений производства гидрированных и дегидрированных порошков титана позволяет получать более плотный материал с меньшим содержанием вредных примесей, повышая качество порошка и улучшая его морфологию [1,6].

Моделирование процесса послойного построения осуществляли по технологии, аналогичной SLS (Selective Laser Sintering - селективное лазерное спекание) которая относится ко второму типу - *Bed deposition*, с использованием гидрированного дегидрированного порошка титана фракцией 50-150 мкм. производства ГП «Государственного научно-исследовательского и проектного института титана», суть которого состояла в насыпании небольшого слоя порошка на подложку из того же материала (предварительно спрессованного и спеченного) и последующего воздействия импульсным YAG-лазером с плотностью мощности излучения 900 МВт/м² при частоте следования импульсов 20 Гц. Основной задачей являлось определение возможности и качества спекания титанового порошка лазерным лучом как между собой, так и с материалом подложки, с целью получения плотной безпористой структуры. В первом случае толщина слоя составляла 200-300 мкм. (рисунок 3 а,б), во втором 50-100 мкм (рисунок 3 в,г). Внешний вид заготовок до и после процесса наплавки приведён на рисунке 2, а микроструктура полученных слоёв приведена на рисунке 3.

Проанализировав приведенные выше рисунки, можно сделать вывод, что при моделировании процесса послойного построения с использованием слоя толщиной 200...300 мкм (рисунок а,б)

порошинки хорошо спеклись как между собой, так и с материалом подложки, но в слое ещё наблюдалась остаточная пористость. Наличие пор в построенном слое ухудшает механические свойства получаемых изделий и негативно сказывается на общем качестве получаемых деталей. При использовании меньшего слоя толщиной 50...100 мкм образуется менее пористая и более однородная структура, что в свою очередь будет положительно сказываться на механических свойствах получаемых изделий.



Рисунок 2 — Внешний вид образцов до (а) и после (б) моделирования процесса 3-D печати / Appearance of the samples before (a) and after (b) the modeling of 3-D printing process

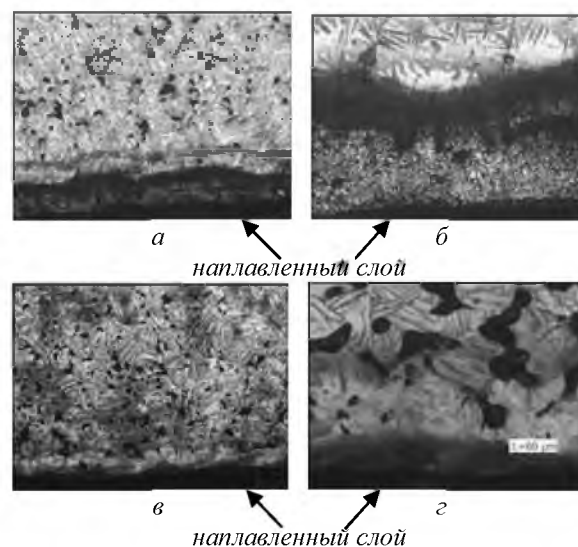


Рисунок 3 - Микроструктура основного материала и наплавленного слоя / The microstructure of the base material and the deposited layer:
а, б — толщина слоя 200-300 мкм / а, b - thickness of 200-300 microns
в, г — толщина слоя 50-100 мкм / в, d - thickness of 50-100 microns

Применение такого вида порошковых титановых материалов является перспективным направлением в развитии отечественного рынка аддитивных технологий, которое позволит в несколько раз снизить стоимость готовых изделий.

Для широкого использования этих порошков в различных методах аддитивных технологий необходимо проведение дальнейших исследований влияния фракционного состава и формы частиц на свойства изделий, получаемых методами послойного

построения, и дальнейшая обработка технологических режимов спекания объёмных заготовок на промышленных установках.

Выводы

1. Проведено моделирование процесса спекания титановых порошков несферической формы лазером по технологии SLS.

2. Исследовано влияние толщины слоя на структуру получаемых изделий. Установлено, что

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бережко П.Г. Гидрирование титана и циркония и термическое разложение их гидридов / П.Г. Бережко, А.И. Тарасов, А.А. Кузнецов [и др.] // Альтернативная энергетика и экология. - 2006. - №11. - С. 47 — 56.

P. Berezhko Hydrogenation of titanium and zirconium and their hydrides thermal decomposition / P. Berezhko, A. Tarasov, A. Kuznetsov [and others] // Alternative energy and Ecology. - 2006. - №11. - P. 47 — 56.

2. Балака Е.В. Основные факторы влияния на процесс формообразования деталей с помощью технологий послойного выращивания (rapid prototyping) / Е.В. Балака // Високи технології в машинобудуванні. - 2011. - №1. - С. 29 — 36.

E. Balaka Major factors of influence on forming process of details by rapid prototyping (RP) technology / E. Balaka // High technologies of machine-building. - 2011. - №1. - P. 29 — 36.

3. Волхонский А.Е. Методы изготовления прототипов и деталей агрегатов различных изделий промышленности с помощью аддитивных технологий / А.Е. Волхонский, К.В. Дудков // Образовательные технологии. — 2014. — №1. — С. 127 — 143.

Volkhonskiy A. E., Dudkov K.V. Metody izgotovleniya prototipov i detaley agregatov razlichnih izdeliy promyshlennosti s pomoschyu additivnykh tekhnologiy [Methods of prototyping of various units and parts of industrial products using additive technologies]. Obrazovatelnye tekhnologii [Educational technologies], 2014, No.1, pp 127-143.

4. Дежина И.Г. Публичный аналитический доклад по направлению «Новые производственные технологии» [Электронный ресурс]: Дежина И.Г., Пономарев А.К., Фролов А.С. и др. — Сколковский институт науки и технологий. — 2015 —Режим доступа: <https://reestr.extech.ru/docs/analytic/reports/new%20technologies2015.pdf>

Dezhina I.G. Publichniy analiticheskiy doklad po napravleniyu "Novye proizvodstvennyye tekhnologii" [Public analytical report on the subject "New production technologies"] [Electronic resource]: Dezhina I.G., Ponomaryov A.K., Frolov A.S. and others, Skolkovskiy institut nauki i tekhnologii [Skolkovo Institute of Science and Technology], 2015, Access mode: <https://reestr.extech.ru/docs/analytic/reports/new%20technologies2015.pdf>

5. Довбыш В.М. Аддитивные технологии и изделия из металла / В.М. Довбыш, П.В. Забеднов, М.А. Зленко // Библиотечка литейщика. — 2014. — № 9. — С. 14 — 71.

Dovbysh V.M., Zabednov P.V., Zlenko M.A. Additivnye tekhnologii i izdeliya iz metalla [Additive

при использовании слоя толщиной 50...100 мкм образуется менее пористая, более плотная и однородная структура, что в свою очередь будет положительно сказываться на механических свойствах получаемых изделий.

3. Показано, возможность применения в аддитивных технологиях несферических порошков титана которые прошли процесс гидрирования и дегидрирования.

technologies and metal products]. Bibliotekha liteyschika [Library of caster], 2014, Issue 9, pp 14-71.

6. Єршова О.Г. Дослідження процесів гідрування-дегідрування титанового дроту / О.Г. Єршова // Фізика і хімія твердого тіла. - 2011. - №3. - С. 785 — 790.

O. Ershova The investigation of Hydrogenation / dehydrogenation process of Ti-wire / O. Ershova // Physics and chemistry of solid state. - 2011. - №3. - P. 785 — 790.

7. Зленко М.А. Аддитивные технологии в машиностроении / Зленко М.А., Попович А.А., Мутьлина И.Н. — Санкт-Петербург: Издательство политехнического университета, 2013. — 221 с.

Zlenko. M.A., Popovich A.A., Mutylina I.N. Additivnye tekhnologii v mashinostroenii [Additive technologies in mechanical engineering]. Saint Petersburg, Polytechnic University Publ., 2013. 221 p.

8. Івасишин О.М. Поверхневі явища при нагріванні порошку гідриду титану / О. М. Івасишин, О.Б. Бондарчук, М.М. Гуменяк, Д.Г. Саввакін // Фізика і хімія твердого тіла. — 2011. — Т. 12, №4. — С. 900 — 907.

Ivashishyn O.M., Bondarchuk O.B., Gumenyak M.M., Savvakina D.G. Poverkhnevi yavyscha pry nagrivanii poroshku gidrydu tytanu [Surface phenomena by heating titanium hydride powder]. Phizyka i khimiya tverdogo tila [Physics and Chemistry of Solids], 2011, Vol. 12, Issue 4, pp 900-907.

9. Івасишин О.М. Производство титановых сплавов и деталей экономичным методом порошковой металлургии для широкомасштабного промышленного применения / О.М. Івасишин, Д.Г. Саввакин, К.А. Бондарева [и др.] // Наука та інновації. - 2005. - №2. - С. 44 — 57.

O. Ivashishin Production of titanium alloy and parts of economical method of powder metallurgy for large-scale industrial application / O. Ivashishin, D. Savvakina, K. Bondareva [and others] // Science and Innovation. - 2005. - №2. - P. 44 — 57.

10. ASM International Handbook Committee ASM Handbook, Vol. 7: Powder metal technologies and applications, In: P.W. Lee, Y. Trudel, R. Iacocca and others, editors. Powder metal technologies and applications, ASM International, 1998, ISBN-13: 978-0871703873

11. Bin xiao Partial melting and resolidification of metal powder in selective laser sintering / Bin Xiao and Yuwen Zhang // Journal of thermophysics and heat transfer. - 2006. - Vol. 20, No. 3. - P. 439 — 448.

12. Cokmak G. The processing of Mg-Ti for hydrogen storage; mechanical milling and plasma synthesis / G. Cokmak, Z. Karoly, I. Mohai, T. Ozturk, J. Szepvolguy // International journal of hydrogen energy. - 2010. - №35. - P. 118 — 125.

13. D.D. Gu Laser Additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms [Electronic resource] : Journal article / D. D. Gu, W. Meiners, K. Wissenbach, R. Poprawe / International Materials Reviews 57, 2012, No.3, pp.133-164 ISSN: 0950-6608, Access mode:

<http://www.maneyonline.com/doi/full/10.1179/1743280411Y.000000014>

14. Wei-Chin Huang Microstructure-controllable laser additive manufacturing process for metal products / Wei-Chin Huang, Chuan-Sheng Chuang,

Ching-Chih Lin, Chih-Hsien Wu, De-Yau Lin, Sung-Ho Liu, Wen-Peng Tseng, Ji-Bin Horng // Physics Procedia 8th International Conference on Laser Assisted Net Shape Engineering LANE 2014, Vol. 56, 2014, pp 58-63.

Статья рекомендована к публикации докт. техн. наук, проф. В. И. Большаковым (Украина); докт. техн. наук, проф. Д. В. Лаухиным (Украина)

Поступила в редколлегию 21.01.2015

Принята к печати 24.03.2015