

3. Шляпин, А.Д., Порошин, В.В., Зябрев, И.А. Лазерная наплавка со сканированием излучения / Сб. науч. тр. Евразийский союз ученых. Междунар. научно-практическая конф. «Современные концепции научных исследований». Ч. 2, – 2015. – №6(15). – С. 89–91.

4. Богданов, А.В. Особенности оценки технологических возможностей промышленных лазеров // Технология машиностроения. – 2011. – № 11. – С. 34–36.

5. Богданов, А.В., Грезев, Н.В., Шмелев, С.А. Применение волоконных лазеров для повышения износостойкости и контактно-усталостной прочности железнодорожных колес // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2015. – № 6 (48). – С. 30–4.

## REFERENCES

1. Shishkovsky, I.V., Shcherbakov, V.I., Petrov, L.A. Laser synthesis of refractory ceramics of Al and CrO<sub>2</sub> powders //

*Physics and Chemistry of Material Processing*. – 2001. – № 3. – pp. 45–48.

2. Fedotov, A.V. *New Techniques of Aerospace Material and Alloy Manufacturing* // RITM. – 2011. – №5. – pp. 32–35.

3. Shlyapin, A.D., Poroshin, V.V., Zybrev, I.A. Laser surfacing with radiation scanning / *Proceedings of Eurasian Union of Scientists. Inter. Scient.-Pract. Conf. "Modern Concepts in Scientific Researches"*. Part 2, – 2015. – №6(15). – pp. 89–91.

4. Bogdanov, A.V. Estimate peculiarities of engineering laser technological potentialities // *Engineering Techniques*. – 2011. – № 11. – pp. 34–36.

5. Bogdanov, A.V., Grezev, N.V., Shmelev, S.A. Fiber laser application for increase of wear resistance and contact fatigue of railway wheels // *Science intensive technologies in Mechanical Engineering*. – 2015. – № 6 (48). – pp. 30–4.

Рецензент д.т.н. В.В. Васильцов

УДК 621.9.529

DOI: 10.12737/20599

С.В. Курынцев, к.э.н.,

К.Ю. Нагулин, к.ф.-м.н.,

А.И. Горунов, к.т.н.

(ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ»

420111, Россия, г. Казань, ул. К.Маркса, 10)

E-mail: kuryntsev16@mail.ru

## Аддитивные технологии – третья промышленная революция\*

Представлен обзор отечественной и зарубежной литературы на тему аддитивные технологии – третья промышленная революция. Подробно рассмотрены два основных метода аддитивных технологий: технология послойного спекания или плавления, технология на основе металлической наплавки.

**Ключевые слова:** аддитивные технологии; 3D-принтинг; спекание; плавление; лазерный луч; электронный луч; наплавка.

S.V. Kuryntsev, Can.Eng.,

K.Yu. Nagulin, Can. Ph-Math.,

A.I. Gorunov, Can.Eng.

(FSBEI HE "Tupolev National Research Technical University of Kazan –KAI"

10, K Marx Str., Kazan 420111, Russia)

## Additive Techniques – the third industrial revolution \*

This paper reports two basic methods of additive techniques, a method of layer-by-layer agglomeration or metal powder melting and a method based on metal surfacing technique. A thorough description of the routine methods of additive techniques their advantages and disadvantages, a product range and field of product application are presented. Basic problems arising at the use of additive techniques and produce manufactured such as the certification of initial material, technology certification, production process control in its development, test procedure of parts manufactured are touched upon. The peculiarities of behavior of blanks obtained through additive techniques at further technological operations, for example, at laser welding are described. Basic trends in researches carried out by leading scientists in the field mentioned are emphasized.

**Keywords:** additive techniques; 3D printing; agglomeration; melting; laser beam; electronic beam; surfacing.

В 21 веке в постиндустриальных странах традиционное субтрактивное производство,

\*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства Образования и Науки Российской Федерации Грант РФФИ ОФИ-М №14-29-10281.

основанное на удалении исходного материала (резание и пр.), уже не справляется с неуклонно усложняющимися технологическими требованиями, особенно в случае сложноконфигурированных конструкций и изделий из ком-

позитных материалов. Так, при изготовлении сложнопрофильных фильтров и теплообменников приходится задействовать десятки различных технологических операций, для каждой необходима своя оснастка, изделие получается составным, с остаточными напряжениями и увеличенной себестоимостью. Зачастую возможности традиционной технологии тормозят простор конструкторской мысли и, в конечном итоге, получаем изделие, технологически оптимальное в ущерб его функциональным свойствам.

На помощь традиционным методам приходят инновационные аддитивные технологии [1], в которых процесс «вычитания» вещества из исходной заготовки заменяется его послойным наращиванием. Преимущества этого подхода очевидны – снижение материалоемкости, стоимости (особенно для деталей сложной формы) и, что самое главное, широчайшие возможности создания изделий из градиентных композитных материалов с заранее заданными свойствами.

Структурно аддитивные технологии можно классифицировать на несколько основных групп:

– послойное спекание порошка, лазерным либо электронным лучом, (PBS – Powder Bed System, SLM – Selective Laser Melting, SLS – Selective Laser Sintering);

– послойное выращивание лазерной наплавкой с использованием металлического порошка (PFS – Powder Feed System, LC – Laser cladding);

– послойное выращивание лазерной наплавкой с использованием металлической проволоки либо ленты (WFS – Wire Feed System).

Высокую востребованность результатов исследований в области ЛА технологий наглядно демонстрирует ежегодный устойчивый 25...30 %-ный рост рынка 3D-принтеров, использующих методы SLM. По прогнозам Wohlers Associates к 2017 г. объем мировых продаж 3D-принтеров составит порядка 6 млрд. долл. [1].

Непрерывно растут не только объемы реализации ЛА технологического оборудования, но и расширяются области его применения. Лидерами являются производство потребительских товаров и электроники (24 %), автомобилестроение (19 %), медицина (14 %) и машиностроение (10 %), аэрокосмическая промышленность (8 %).

Прогресс в этой области существенно заторможен крайне узким перечнем рабочих материалов, развитие столь важного направле-

ния происходит в большинстве случаев «вслепую» – технологии, показавшие прекрасные результаты с одним веществом, напрочь отказываются работать с другим, казалось бы «родственным» материалом [1]. Такое состояние дел недопустимо при серийном производстве деталей и относится больше к области «технологического искусства».

Поэтому глобальная цель многочисленных исследований, проводимых научным сообществом – сделать ЛА технологии более «прозрачными» и доступными для рядового пользователя и, что самое главное, они должны быть адаптированы для серийного производственного цикла.

Весь широкий спектр научных исследований в области ЛА технологий можно условно классифицировать на несколько основных групп:

- экспериментальные и теоретические исследования физико-химических процессов, протекающих в газовой фазе и в ванне расплава в ходе процесса создания изделия;

- экспериментальные исследования, связанные с обработкой различных технологических режимов и комбинаций «подложка – наращиваемый материал»;

- разработка нового и модификация существующего оборудования, реализующего ЛА технологии.

### 1. Аддитивные технологии на основе послойного спекания

Технологии, основанные на использовании лазерных и электронно-лучевых технологий невысокой мощности, имеют общее название PBS – Powder Bed System (система с порошковой емкостью) [1]. Однако последние модели подобных установок оснащены многолучевой системой сканирования и мощность, например, лазеров доходит до 1000 Вт, тогда как, используя однолучевые системы можно получать удовлетворительные результаты при мощности 50 Вт.

На рис. 1 представлена принципиальная схема послойного лазерного спекания, реализующая технологию по следующей схеме: на предварительно подогретую поверхность наносится слой порошка, затем роликом выравнивается до заданной толщины (20...50 мкм), лучом порошок спекается или плавится только в заданных программой точках, таким образом, получается один слой. На следующем этапе бункер с подложкой опускается на 20... 50 мкм, а бункер с порошком поднимается на соответствующую высоту, роликом порошок выравнивается, луч его спекает и так

десятки или сотни раз. В некоторых случаях слой уже спеченного порошка спекается лучом повторно. Это влияет на пористость и механические свойства [3, 4].

Технология спекания порошка в свою очередь подразделяется на спекание электронным лучом, спекание лазерным лучом.

Как постоянно конкурирующие технологии электронно-лучевые и лазерные имеют свои преимущества и недостатки [1 – 5]. Лазерное спекание порошка не требует вакуума, но имеет небольшую скорость сканирования лучом, осуществляемое механически оптикой скорость сканирования 200 мм/с, что является одной из причин низкой производительности (15...70 см<sup>3</sup>/ч). Электронно-лучевое спекание требует вакуум (1x10<sup>4</sup> Бар), а производительность около 60...90 см<sup>3</sup>/ч за счет высокой скорости сканирования лучом 300... 400 мм/с и большего диаметра луча, до 1 мм<sup>2</sup>.

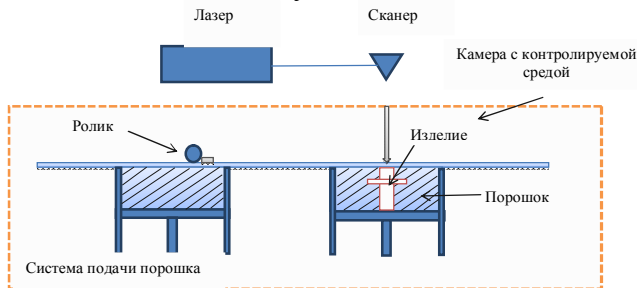


Рис. 1. Принципиальная схема аддитивной технологии на основе послойного лазерного спекания

В настоящее время основным производителем электронно-лучевых машин аддитивного производства является шведская компания «ARCAM», а лазерных – немецкая компания «SLM Solutions GmbH», которая выпустила установку SLM 500, оснащенную четырехлучевой системой сканирования и достаточно мощным лазером, что позволяет увеличить производительность с 15 (SLM 125) до 70 (SLM 500) см<sup>3</sup>/ч. Следует отметить, что современные машины оснащены герметичными камерами с защитной средой, заданной температурой охлаждения и сопутствующего подогрева до 1000 °С [5, 6].

Обе технологии имеют множество приемов и решений. Для спекания и плавления лучом большое значение имеет размер и форма (гранулометрия) частиц используемого порошка, так как в некоторых случаях размер частицы совпадает с диаметром луча в фокусе. В случае крупных частиц (200...300 мкм), лазерный луч может расплавить их не полностью, что приведет к несплошностям и ухудшению механических свойств. Механические свойства

образцов полученных аддитивными технологиями сравнимы с литыми или штампованными образцами из соответствующих сплавов [1 – 3], а в некоторых случаях могут быть выше, ввиду высоких скоростей охлаждения и стабильной мелкодисперсной структуры.

В работе [1] представлен обзор по теме металлическое аддитивное производство, где затронуты вопросы сертификации изделий и оборудования, аттестации персонала и технологии производства. Подняты вопросы потенциала аддитивных технологий на уровне бизнес-сообществ, проведено сравнение заготовок, полученных литьем и аддитивными технологиями, по себестоимости в зависимости от размера партии, проанализированы зависимости усталостной прочности от шероховатости поверхности и пористости изделий, механических свойств от скорости охлаждения.

В работе [2] авторами проведены подробные исследования процесса DMLS (Direct Metal Laser Sintering – точное металлическое лазерное спекание) разных порошков: мартенситностареющей стали, никелевого сплава Inconel 718 и сплава на основе кобальта, мощность лазера 200 Вт. Изготовленные лазерным спеканием образцы, подвергали термической обработке при разных температурах (650, 850, 1000 °С), времени выдержки (2 ч) и охлаждению в разных средах (азот, вакуум, воздух). После спекания структура представляла так называемые «ногтевидную структуру» (finger nails), после термической обработки подобная неоднородная структура исчезала, т.е. происходила её гомогенизация.

Авторами работы [3] описана технология селективного лазерного плавления (СЛП) с применением иттербиевого волоконного лазера с непрерывным излучением при мощности  $P = 50$  Вт и диаметром лазерного пятна на поверхности порошкового слоя около 70 мкм. При подготовке эксперимента проводился гранулометрический анализ, с целью выявления формы частиц и частоты их поверхности.

Приведены различные стратегии сканирования лазерным лучом, что существенно влияет на пористость металла полученных деталей, а соответственно и на механические свойства. В некоторых машинах СЛП, емкость с порошком находится в закрытом состоянии и не контактирует с окружающей средой. Существенную роль, оказывающую влияние на механические свойства играет скорость кристаллизации, которая зависит от температуры окружающей среды, поэтому применяют камеры

для СЛП с контролируемой температурой (до 1000 °С).

В работе [5] описан процесс гибридной лазерно-дуговой сварки заготовки из кованой стали и заготовки полученной SLM-процессом (SLM – Selective Laser Melting – селективное лазерное плавление). Отмечены достаточно высокие механические свойства заготовок полученных данным способом, предел прочности сварного соединения из кованной стали 550...580 МПа, сварного соединения «кованная сталь – SLM-заготовка» 580...610 МПа, однако, пластичность последнего ниже на 50 %. Авторы делают вывод о возможности получения сварного соединения SLM-заготовки и кованой стали при помощи гибридной лазерно-дуговой сварки.

Авторы [4] акцентируют внимание на теплофизике процесса СЛП, в частности поглощающая способность лазерного излучения металлического порошка выше, чем у литого металла, зависит она так же от гранулометрического состава. По мнению авторов одной из проблем СЛП является фрагментация трека, так называемый процесс «каплеобразования» (balling-effect). Данный эффект зависит от мощности лазера, скорости сканирования, толщины слоя и природы порошка, материала подложки и его температуры.

Работа [6] посвящена отработке технологии формирования единичного трека, для этого авторы использовали порошок SS904L, изменяли мощность лазерного излучения ( $P = 25, 50$  Вт), скорость сканирования лучом (0,03...0,24 м/с), толщину слоя порошка на подложке (0...400 мкм). Отмечено, что скорость равномерного нагрева частицы порошка диаметром 25 мкм около 40 мкс, при некоторых режимах использованных в эксперименте, время облучения частицы составляет 2,3...1,1 мс, т.е. большее время облучению подвергается уже расплавленный металл.

Авторами [7] описаны результаты экспериментов по СЛП образцов из никелида титана, использовалось лазерное излучение мощностью 50 Вт, скорость сканирования изменялась в диапазоне 60...220 мм/с, применялся предварительный подогрев порошковой смеси ( $T_{\text{кам}} = 20, 300, 500$  °С), в результате эксперимента при определенных режимах были получены образцы с плотностью 97 %.

Описанные выше результаты позволяют сформировать представление о таком уникальном методе получения изделий как послойное лазерное спекание. Изучение лазерного спекания титанового порошка открывает

широкие возможности внедрения технологии 3D-прототипирования в современном авиастроении, а высокая точность изготовления изделий и получение тонких структур из порошковых материалов на основе никеля уже находят свое применение в производстве лопаток газовых турбин.

## 2. Аддитивные технологии на основе металлической наплавки

Основой технологии точного металлического осаждения (DMD – Direct Metal Deposition) является лазерная наплавка, где в качестве рабочего материала используется металлический порошок, либо проволока при мощности лазерного излучения 1000...5000 Вт. Сущность метода заключается в послойном выращивании заготовки лазерной или электронно-лучевой наплавкой, наплавочные валики выращивают в соответствии с компьютерной моделью (рис. 2). Производительность данного процесса по скорости расхода порошка гораздо выше, в сравнении с СЛП, однако точность, коэффициент использования порошка, качество поверхности изделия, плотность – ниже.

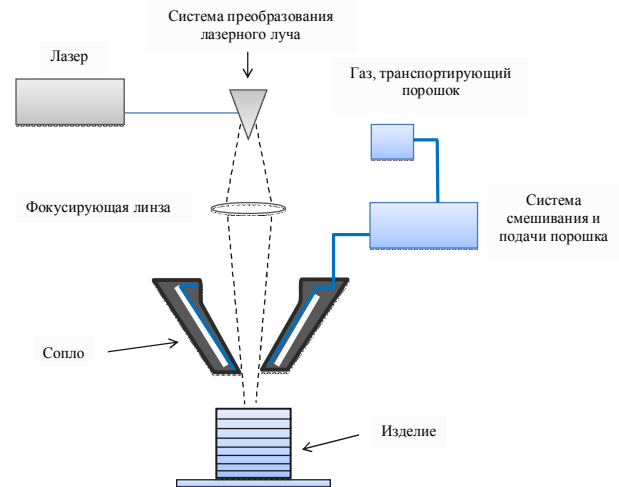


Рис. 2. Принципиальная схема аддитивной технологии на основе лазерной наплавки

Преимуществами является относительно большая ванна расплава и более низкие требования к гранулометрии порошка. Оборудование можно использовать, как для DMD-технологии, так и для классической наплавки, порошком, проволокой и лентой. Применяются установки, оснащенные модулями сканирования лазерным лучом, что так же имеет свои технологические преимущества, увеличение производительности [8, 9], возможность смешивать и наносить сложные металлические композиции, имеющие ограниченную растворимость в жидком состоянии.

Основными технологическими параметрами являются мощность лазерного излучения; скорость сканирования лучом; скорость подачи присадочного материала (порошка, проволоки, ленты); гранулометрический состав порошка; расход и давление газов (транспортный, защитный); диаметр лазерного пятна на поверхности подложки; температура подложки.

В работе [8] представлен пример проведения полного факторного эксперимента по определению зависимости между геометрией единичного валика (длина, ширина, коэффициент смешивания с подложкой) и основными технологическими параметрами: мощность лазера, скорость сканирования и расход порошка. Полученные валики имели длину 25 мм, слои получали наложением валиков с шагом 3 мм, заготовку – наложением слоев, использовались композиции порошков стали 14ХНЗМА и карбида титана в разных пропорциях. Ни технологии литья металла, ни порошковая металлургия не имеют технологических возможностей получения трехмерного изделия, имеющего заданную микроструктуру разного типа в одном объеме.

В работе [9] описаны исследования процесса наплавки с использованием мощного волоконного лазера (15 кВт). Наплавку производили порошком, используя щелевое сопло, проволокой используя сварочную горелку для подачи, так же использовался режим сканирования лучом по поверхности детали по разным траекториям (синусоидальной и треугольной). Проведены коррозионные испытания наплавленного и основного металла, сделаны выводы о высоких показателях производительности при использовании мощного волоконного лазера для наплавки. Порошковую лазерную наплавку лучше использовать для прецизионного нанесения (1...3 мм) с минимальным термическим влиянием на подложку или, например, на восстанавливаемую деталь и минимальным смешиванием наплавленного и основного металла с целью сохранения свойств металла детали, такой процесс можно проводить при мощности лазерного излучения 0,7...1,5 кВт.

В работе [10] исследованы трибологические свойства покрытий интерметаллидом на базе NiAl. Перед экспериментом (лазерной наплавкой) исследователи проводили анализ смешанного порошка (Ni+Al), наплавку производили на средних мощностях (2...4 кВт) с предварительным подогревом подложки до 300 °С и заданной скоростью охлаждения.

Производили оценку всех валиков, за исключением первого и последнего. Сделаны выводы: режимы наплавки (скорость и мощность лазера) имеют большое влияние на микроструктуру, адгезию, трибологию и поверхностное поведение покрытий на основе интерметаллида NiAl.

В работе [11] приведены результаты исследований процесса DMD (Direct Metal Deposition), то есть выращивание заготовок путем послойной наплавки лазером металлического порошка, сравнение с дуговым способом. Показано влияние термического воздействия и стратегии выращивания валиков на механические свойства заготовки.

Исследователями [12] описан процесс дуговой наплавки в среде активных газов порошка из нитрида титана TiN на заготовку из сплава Ti-6Al-4V, приведены несколько моделей металлургического взаимодействия в процессе наплавки. Микротвердость заготовки 300...320 HV1.0, наплавленного слоя 700...720 HV1.0, коэффициент трения наплавленного слоя в 15 раз выше, чем заготовки.

В работе [13] представлен обзор аддитивных технологий, перспективы их применения и основные ограничения, приведены четыре основные технологии: выращивание из материала в жидкой фазе, ламинарное послойное спекание, выращивание лазерной наплавкой, послойное спекание порошка. Выделены технология на основе послойного спекания порошка и технология наплавки, рассматривается технология ламинарного 3D-принтинга (LOM – Laminated Object Manufacturing), т.е. когда в качестве рабочего материала используется лист толщиной 50..200 мкм, от которого лазерным лучом отрезается не нужная часть, в соответствии с CAD-моделью, а нужная спекается лазером, затем от рулона отмеряется следующий слой, процесс повторяется, аналогично послойному порошковому спеканию или плавлению.

#### Выводы:

1. Несомненно, аддитивные технологии являются перспективными для изготовления заготовок или практически готовых деталей, быстрое металлическое прототипирование по CAD-модели не имеет конкурентов.

2. Аддитивные технологии на сегодняшний день зарекомендовали себя в медицине и машиностроении, есть перспективы применения в авиации и космосе. Однако требуется время на полный цикл испытаний не только деталей и заготовок в имитационных условиях эксплуатации, но и конструкции со-

бранной из деталей, созданных посредством аддитивных технологий. Из этого следует, что понадобится время на использование аддитивных технологий при производстве ответственных изделий.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **William E. Frazier** Metal Additive Manufacturing: A Review Journal of Materials Engineering and Performance (2014) 23:1917 – 1928.
2. **Sanz, V. Garcia Navas** Structural integrity of direct metal laser sintered subjected to thermal and finishing treatments. Journal of Materials Processing Technology. 213 (2013) 2126–2136.
3. **Смуров И.Ю., Ядройцев И.А., Мовчан И.А., Окунькова А.А., Черкасова Н.Ю., Антоненкова Г.В.** Аддитивное производство с помощью лазера. Проведение экспериментальных работ // Вестник МГТУ «Станкин». № 1 (18). 2012. С. 36 – 39.
4. **Смуров И.Ю., Мовчан И.А., Ядройцев И.А., Окунькова А.А., Цветкова Е.В., Черкасова Н.Ю.** Аддитивное производство с помощью лазера // Вестник МГТУ «Станкин». № 4 (17). 2011. С. 144 – 146.
5. **Giuseppe Casalino, Sabina Luisa Campanelli, Antonio Domenico Ludovico.** Laser-arc hybrid welding of wrought to selective laser molten stainless steel International Journal of Advanced Technologies (2013) 68:209 – 216.
6. **Смуров И.Ю., Мовчан И.А., Ядройцев И.А., Окунькова А.А., Конов С.Г. Антоненкова Г.В.** Экспериментальное аддитивное прямое производство с помощью лазера // Вестник МГТУ «Станкин». № 2 (20). 2012. С. 48 – 50.
7. **Шишковский И.В., Ядройцев И.А., Смуров, И.Ю.** Создание объемных изделий из никелида титана методом послонного лазерного плавления // Письма в ЖТФ. 2013. Том 39, вып. 24. С. 15 – 21.
8. **Григорьянц А.Г., Новиченко Д.Ю., Смуров, И.Ю.** Лазерная аддитивная технология изготовления покрытий и деталей из композиционного материала // Известия высших учебных заведений. 2011. № 7. С. 38 – 46.
9. **Турчинин А.Г., Земляков Е.В., Поздеева Е.Ю., Туоминен, Я., Вуористо, П.** Технологические возможности лазерной наплавки с использованием мощных волоконных лазеров // MiTOM. 2012. № 3 (681). С. 35 – 40.
10. **Youjun Yu** and other Preparation, microstructure and tribological behavior of laser cladding NiAl intermetallic compound coatings. WEAR 274 – 275 (2012) 298 – 305.
11. **L. Thivillon, Ph. Bertrand, B. Laget, I. Smurov** Potential of direct metal deposition technology for manufacturing thick functionally graded coatings and parts for reactor components // Journal of Nuclear Materials 385 (2009) 236–241.
12. **Yu-Chi Lin, Yuan-Ching Lin, Yong-Chwang** Evolution of the microstructure and tribological performance of Ti-6Al-4V cladding with TiN powder Chen Materials and Design 36 (2012). 584 – 589.
13. **Yuwei Zhai, Diana A. Lados, Jane L. Lagoy** Additive

Manufacturing: Making Imagination the Major Limitation // The Journal of the Minerals, Metals & Materials Society JOM. Vol. 66. No. 5, 2014. Pp. 808 – 816.

## REFERENCES

1. **William E. Frazier** Metal Additive Manufacturing: A Review Journal of Materials Engineering and Performance (2014) 23:1917 – 1928.
2. **Sanz, V. Garcia Navas** Structural integrity of direct metal laser sintered subjected to thermal and finishing treatments. Journal of Materials Processing Technology. 213 (2013) 2126–2136.
3. **Smurov, I.Yu., Yadroitsev, I.A., Movchan, I.A., Okunkova, A.A., Cherkasova, N.Yu., Antonenkova, G.V.** Additive laser production. Experimental work carrying out // Bulletin of MSTU “Stankin”. № 1 (18). 2012. pp. 36 – 39.
4. **Smurov, I.Yu., Movchan, I.A., Yadroitsev, I.A., Okunkova, A.A., Tsvetkova, E.V., Cherkasova, N.Yu.** Additive laser production // Bulletin of MSTU “Stankin”. № 4 (17). 2011. pp. 144 – 146.
5. **Giuseppe Casalino, Sabina Luisa Campanelli, Antonio Domenico Ludovico.** Laser-arc hybrid welding of wrought to selective laser molten stainless steel International Journal of Advanced Technologies (2013) 68:209 – 216.
6. **Smurov, I.Yu., Movchan, I.A., Yadroitsev, I.A., Okunkova, A.A., Konov, S.G., Antonenkova, G.V.** Experimental additive direct production aided by laser // Bulletin of MSTU “Stankin”. № 2 (20). 2012. pp. 48 – 50.
7. **Shishkovsky, I.V., Yadroitsev, I.A., Smurov, I.Yu.** Creation of titanium nickelin volumetric products by method of layer-by-layer laser melting // Letters to JTF. 2013. Vol. 39, issue 24. pp. 15 – 21.
8. **Grigoriyants, A.G., Novichenko, D.Yu., Smurov, I.Yu.** Laser additive techniques for production of coatings and parts made of composite // Proceedings of Colleges. 2011. № 7. pp. 38 – 46.
9. **Turchinin, A.G., Zemlyakov, E.V., Posdeyeva, E.Yu., Tuominen, Ya., Vuoristo, P.** Technological Potentialities of Laser Surfacing with Use of Power Fider Lasers // MiTOM. 2012. № 3 (681). pp. 35 – 40.
10. **Youjun Yu** and other Preparation, microstructure and tribological behavior of laser cladding NiAl intermetallic compound coatings. WEAR 274 – 275 (2012) 298 – 305.
11. **L. Thivillon, Ph. Bertrand, B. Laget, I. Smurov** Potential of direct metal deposition technology for manufacturing thick functionally graded coatings and parts for reactor components // Journal of Nuclear Materials 385 (2009) 236–241.
12. **Yu-Chi Lin, Yuan-Ching Lin, Yong-Chwang** Evolution of the microstructure and tribological performance of Ti-6Al-4V cladding with TiN powder Chen Materials and Design 36 (2012). 584 – 589.
13. **Yuwei Zhai, Diana A. Lados, Jane L. Lagoy** Additive

Рецензент д.т.н. В.В. Непомилуев