

ЧЕБЫШЕВСКИЙ СБОРНИК

Том 20. Выпуск 3.

УДК 539.52:669.14.018

DOI 10.22405/2226-8383-2019-20-3-453-477

Особенности материалов и технологий аддитивного производства изделий¹

А. Н. Кубанова, А. Н. Сергеев, Н. М. Добровольский,
А. Е. Гвоздев, П. Н. Медведев, Д. В. Малий

Кубанова Анастасия Николаевна — начальник отдела исследований и развития АО «ПО-ЛЕМА», инженер кафедры технологии и сервиса, Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого (г. Тула).

e-mail: chupeychik@mai.ru

Сергеев Александр Николаевич — доктор педагогических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии и сервиса, старший научный сотрудник кафедры технологии и сервиса, Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого (г. Тула).

e-mail: ansergueev@gmail.com

Добровольский Николай Михайлович — доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой алгебры, математического анализа и геометрии, Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого (г. Тула).

e-mail: dobrovol@tsput.ru

Гвоздев Александр Евгеньевич — доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник кафедры технологии и сервиса, Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого (г. Тула).

e-mail: gwozdew.alexandr2013@yandex.ru

Медведев Павел Николаевич — кандидат педагогических наук, доцент кафедры технологии и сервиса, Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого (г. Тула).

e-mail: medvedeff_82@mail.ru

Малий Дмитрий Владимирович — старший преподаватель кафедры технологии и сервиса, Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого (г. Тула).

e-mail: maliydmitriy@yandex.ru

Аннотация

В работе представлены сравнительные схемы классического производства изделий сложной формы и их получения с применением аддитивных технологий с указанием основных положительных и отрицательных аспектов применения аддитивных технологий. Перечислены основные технологии аддитивного производства изделий, с указанием специфики их применения. Рассказано о способах получения и свойствах порошковых материалов. Описана технология сфероидизации порошковых материалов и ее пост-процессы. Представлена концепция полного цикла аддитивного производства. Приведены основные программные пакеты для моделирования процессов аддитивного получения изделий из различных металлических систем.

Ключевые слова: аддитивные технологии, порошковые материалы, сфероидизация, горячее изостатическое прессование, моделирование.

Библиография: 37 названия.

¹Работа выполнена в рамках реализации федеральной целевой программы «Исследование и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» (уникальный идентификатор проекта RFMEF 157717X0271)

Для цитирования:

А. Н. Кубанова, А. Н. Сергеев, Н. М. Добровольский, А. Е. Гвоздев, П. Н. Медведев, Д. В. Малий Особенности материалов и технологий аддитивного производства изделий // Чебышевский сборник. 2019. Т. 20, вып. 3, с. 453–477.

CHEBYSHEVSKII SBORNIK

Vol. 20. No. 3.

UDC 539.52:669.14.018

DOI 10.22405/2226-8383-2019-20-3-453-477

Materials and technologies for production products by additive manufacturing²

A. N. Kubanova, A. N. Sergeev, N. M. Dobrovolskii,
A. E. Gvozdev, P. N. Medvedev, D. V. Maliy

Kubanova Anastasia Nikolaevna — Head of Research and Development Department of JSC "POLEMA", Engineer of the Department of Technology and Service, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University (Tula).

e-mail: chupeychik@mail.ru

Sergeev Aleksander Nikolaevich — Doctor of Pedagogical Sciences, Professor, Head of the Chair of Technology and Service, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University (Tula).

e-mail: ansergueev@gmail.com

Gvozdev Aleksander Evgenievich — Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief researcher of the Chair of Technology and Service, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University (Tula).

e-mail: gvozdev.alexandr2013@yandex.ru

Dobrovolskii Nikolai Mihailovich — Doctor of Physical and Mathematical sciences, professor, Head of the Department of Algebra, Mathematical Analysis and Geometry, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University (Tula).

e-mail: dobrovol@tsput.ru

Medvedev Pavel Nikolaevich — Candidate of Pedagogical Science, Associate Professor of the Chair of Technology and Service, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University (Tula).

e-mail: medvedeff_82@mail.ru

Maliy Dmitriy Vladimirovich — Senior Lecturer of the Chair of Technology and Service, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University (Tula).

e-mail: maliydmitsriy@yandex.ru

Abstract

The paper presents comparative schemes of classical production of complex products and their manufacturing with using additive technologies, including the main positive and negative aspects of using additive technologies. The article lists the main technologies of additive manufacturing of products, indicating the specifics of their application. The paper describes the methods of production and properties of powder materials. The spheroidization technology of powder materials and its post-processes is described. The article presents the concept of full cycle additive manufacturing. The basic software packages for modeling the processes of additive production of products from various metal systems are presented.

²The work was carried out within the framework of the Federal Program "Research and development in priority areas of development of the scientific and technological complex of Russia for 2014–2020" (unique identifier of the project RFMEF 157717X0271)

Keywords: additive technologies, powder materials, spheroidization, hot isostatic pressing, modeling.

Bibliography: 37 titles.

For citation:

A. N. Kubanova, A. N. Sergeev, N. M. Dobrovolskii, A. E. Gvozdev, P. N. Medvedev, D. V. Maliy, 2019, "Materials and technologies for production products by additive manufacturing", *Chebyshevskii sbornik*, vol. 20, no. 3, pp. 453–477.

1. Тенденции к возникновению и развитию аддитивных технологий

Аддитивные технологии (АТ) привлекают все большее внимание не только исследователей, но и промышленных производителей с мировым именем благодаря возможности создания изделий сложной по геометрии формы, которую зачастую невозможно получить традиционными методами [1].

Основное развитие аддитивные технологии получили за счет быстроты наладки производственного процесса. Получение прототипа даже простой формы традиционными способами (литье, деформация, термообработка, механическая обработка) занимает от нескольких недель до нескольких месяцев. При этом необходимо учитывать большие затраты на изготовление требуемой технологической оснастки. При использовании же современных методов аддитивного производства в первую очередь требуется лишь наличие оборудования, позволяющего производить печать изделия, и открытого программного обеспечения, дающего возможность корректировки технологических параметров печати для подбора наиболее оптимального режима.

Современные методы консолидации порошковых материалов, а также развитие последующих процессов механической и термической обработки, позволяют изготавливать изделия с сопоставимыми свойствами, а порой и существенно превышающими свойства изделий, получаемых традиционными способами. В настоящее время в РФ одним из наиболее востребованных направлений является развитие технологий послойного синтеза [2]. Они позволяют изготавливать из металлических порошков со сферической или близкой к ней формой частиц изделия с повышенной износостойкостью, долговечностью, коррозионной стойкостью, при снижении трудоемкости и металлоемкости машин и механизмов.

Так, например, традиционная технология получения инструмента из слитков быстрорежущих марок сталей включает в себя целый перечень технологических переделов, требующих на каждом этапе отдельный подбор технологии и режима (рис. 1).

Получение расплава быстрорежущих марок стали, как правило, проводят в открытых плавильных печах индукционного типа. Непрерывное литье слитков осуществляется путем вытяжки охлажденного расплава через кристаллизатор. Порезка на мерные заготовки проводится с помощью передвижных газового резака и/или металлической пилы.

Горячая обработка позволяет уменьшить отрицательные последствия литья – снизить неоднородность распределения карбидов в готовом материале. Высокая вторичная твердость и большие различия физико-механических свойств отдельных фаз в быстрорежущих сталях затрудняют их горячую обработку и приводят к значительным потерям металла (до 50 % от массы литья), поэтому их стоимость примерно в 15-17 раз выше стоимости производства углеродистой стали и примерно в 3-4 раза выше стоимости производства коррозионно-стойкой хромоникелевой стали [3]. Проведение горячей деформации быстрорежущих марок стали по классической технологии осуществляется путем различных методов, причем режим проведения каждого из них разрабатывается отдельно под каждый размер и профиль заготовки.



Рис. 1: Схема традиционной технологии изготовления инструмента из слитков быстрорежущей стали

Основными методами горячей деформации являются: ковка, прокатка, экструзия, правка на молоте. Далее следует целый перечень механической и термической обработок полученных заготовок: обрезка концов заготовки для удаления концентраторов трещин, промежуточные отжиги для снятия внутренних термических напряжений, шлифовка и полировка заготовок, контроль готовых изделий (металлографический и химический анализы, контроль физико-механических свойств). Необходимо отметить, что быстрорежущим сталям, полученным по традиционной технологии, присущ ряд недостатков, сдерживающих дальнейшее развитие этого класса инструментальных материалов [3]. Такими недостатками являются:

- карбидная ликвация в слитке, не устранимая полностью даже после многократной пластической деформации и значительно снижающая технологическую пластичность заготовок;
- значительная деформация инструмента при термической обработке;
- плохая шлифуемость и др.

С конца 80-ых годов XX века традиционная технология получения заготовок быстрорежущих сталей для инструмента из слитков претерпела некоторые изменения, связанные с изучением и развитием порошковой отрасли металлургии (рис. 2).

Производство быстрорежущей стали методами порошковой металлургии позволяет эффективно воздействовать на состав и свойства получаемого материала. Методы порошковой металлургии включают в себя получение порошка с размером частиц в интервале от 0-1000 мкм путем плавки, как правило, в индукционных печах открытого типа под слоем шлака, и последующего распыления расплава потоком газа (азота) под давлением 1-1,5 МПа (расход газа на 1 кг жидкого металла варьируется в интервале 0,6-1,0 м³) или потока воды под давлением 3,5-5 МПа [3]. Далее необходима обязательная классификация порошкового материала методами ситовой и/или воздушной классификации для выделения фракции 40-150 мкм для компактирования порошка методом горячей экструзии. Предварительное время нагрева заготовок рассчитывается исходя из их удельной толщины и габаритов и, как правило, для капсул весом 0,5-1,0 тонн составляет порядка 12-15 часов. Время выдержки заготовки в печи перед проведением экструзии составляет порядка 5-8 часов. Компактирование порошка методом горячей экструзии проводят при температуре 1100-1140 °С со степенью деформации



Рис. 2: Схема изготовления инструмента из быстрорежущей стали методом порошковой металлургии

80-88 %. Для снятия внутренних напряжений после экструзии и подготовки структуры сплава к последующим механической и термической обработкам ее подвергают отжигу согласно следующим параметрам: нагрев до 850-870 °С, выдержка 2 ч, охлаждение с печью до 750-770 °С, выдержка 6 ч (для заготовок весом 0,5-1,0 тонн) и дальнейшее охлаждение с печью.

Для проведения компактирования методом ГИП проводят классификацию порошка на фракцию 40-500 мкм. ГИП проводят при температуре 1000-1200 °С и давлении рабочего газа (аргон) 100-200 МПа. Для эффективности проведения процесса ГИП, а также с целью сокращения его продолжительности, проводят предварительное компактирование порошка методом холодного изостатического прессования с усилием порядка 0,4 МПа для увеличения значения плотности. Проведение дополнительной горячей деформации методами проката иликовки применяется с целью доуплотнения, а также с целью изменения геометрии сечения заготовки.

Основным отличием традиционного метода от метода порошковой металлургии является получение заготовки быстрорежущей стали для дальнейшей механической обработки путем компактирования порошкового материала методом горячей экструзии или посредством горячего изостатического прессования. Данный технологический процесс обладает следующими преимуществами:

- обеспечивает более высокую стойкость режущего инструмента (в 1,5-2 раза);
- позволяет получить изотропные свойства по сечению изделия и повышенную конструктивную прочность за счет применения компактирования порошка методом горячего изостатического прессования (ГИП);
- позволяет получить более высокий уровень технологических свойств (повышенную технологическую пластичность, незначительную склонность к росту зерна и деформации при закалке, хорошую шлифуемость, пониженную склонность к скалыванию и микровыкрашиванию режущей кромки инструмента).

Однако, из-за низкого коэффициента использования металла (КИМ) и высокой трудоемкости многопереходной технологии деформации, механической и термической обработок изделия инструментального производства из, например, быстрорежущих сталей имеют высокую себестоимость. Кроме того, эти стали являются весьма дорогими материалами.

Непрерывное развитие различных сфер производств диктует требования по модернизации технологических процессов с целью эффективного получения готовых изделий как по временным затратам, так и с точки зрения экономической целесообразности. Внедрение аддитивных технологий в традиционные схемы производств напрямую относится к данной модернизации. Аддитивный метод производства позволяет на первом этапе получить из порошкового материала изделие с геометрией близкой к конечной форме, значительно сократив тем самым как временные издержки, так и снизив влияние человеческого фактора за счет сокращения количества технологических операций. На рис. 3 продемонстрирована схема производства инструмента из порошковой быстрорежущей стали с применением аддитивных технологий.



Рис. 3: Перспективная схема изготовления изделий с применением методов аддитивных технологий

Основой данной схемы является построение конечной геометрии изделия методом аддитивных технологий. Выбор того или иного способа АТ зависит от целого ряда факторов:

- природа материала (его химический состав);
- фракционный состав материала;
- наличие текучести порошкового материала;
- геометрия конечного изделия;
- требования к физико-механическим характеристикам конечного изделия и др.

Технология и режимы термической обработки в первую очередь зависят от самого материала (сплава), а также от предъявляемых свойств к конечному изделию. В связи с этим, на примере изделий из быстрорежущих марок стали, в качестве режимов термической обработки (как отжига, так и специальной термической обработки для получения требуемых физико-механических свойств) возможно использование стандартных режимов, отработанных при проведении традиционных схем производства.

Сложностью данной производственной схемы, помимо подбора режимов самой технологии построения изделия, является двухстадийная проверка геометрии изделия с применением особо чувствительных контрольно-измерительных машин (КИМ). Данную проверку необходимо проводить дважды: после построения изделия и в процессе финишного контроля качества.

Аддитивные методы производства позволяют получить изделия с низкой анизотропией свойств по сечению детали. Это объясняется тем, что в процессе 3D-печати из металлического порошка за один раз расплавляется небольшое количество материала. Для сплавов некоторая

сегрегация легирующих элементов происходит, но в гораздо меньшем масштабе, чем, например, при классическом способе получения изделий методом литья. Быстрое затвердевание приводит к более равномерному химическому составу и микроструктуре по всей детали. При литье же металлических сплавов элемент с самой высокой температурой плавления начинает затвердевать первым. По мере того как отливка охлаждается от периферии к центру, зерна представляют собой значительно различную концентрацию легирующих элементов. Концентрация будет варьироваться по всей части, и зерна будут формироваться в определенных ориентациях, в связи с чем свойства материала не будут однородными или изотропными.

Применение же аддитивных способов производства позволяет получить равномерное распределение не только химических элементов, но и физико-механических характеристик по сечению изделия.

2. Основные технологии построения изделий в аддитивном производстве

Технологии аддитивного производства подразделяются в первую очередь по используемому материалу. Для получения прототипа с целью проверки геометрической сопоставимости используют фотополимеры и, соответственно, технологию стереолитографии (Stereolithography - SLA). Для получения же опытного образца для испытаний используют металлические порошки и соответственно следующие технологические процессы [4]:

- селективное лазерное плавление (selective laser melting - SLM);
- селективное лазерное спекание (selective laser sintering - SLS);
- прямое лазерное спекание металла (direct metal laser sintering - DMLS);
- электронно-лучевое плавление (electron beam melting - EBM);
- аддитивное производство дуговой сваркой (wire-arc additive manufacturing - WAAM);
- прямое лазерное напыление (direct laser deposition - DLD);
- прямое осаждение металла (direct metal deposition - DMD);
- лазерное напыление металлов (laser metal deposition - LMD).

Одним из самых перспективных методов в аддитивном производстве сегодня является метод селективного лазерного плавления (selective laser melting - SLM), суть которого заключается в послойном последовательном расплавлении порошкового материала при помощи лазерного излучения (рис. 4) [5].



Рис. 4: Принципиальная схема построения изделий методом SLM

Метод SLM состоит из двух основных этапов – моделирование изделия и его непосредственная печать. На первом этапе создается цифровая трехмерная модель изделия, которая затем с помощью специальной программы дифференцируется на тонкие слои. На втором этапе происходит непосредственная печать изделия. Сначала на поверхности рабочей платформы с помощью выравнивающего устройства формируется равномерный слой порошка. Затем лазер высокой мощности через систему управляющих зеркал строит на этом слое сечение модели, соответствующее текущему слою. Мощность лазера устанавливается таким образом, что частицы металлического порошка сплавляются в полностью однородную массу. После формирования слоя рабочая платформа смещается вниз на высоту одного слоя, а платформа подачи порошка поднимается. Далее все действия повторяются до тех пор, пока изделие не будет построено полностью [1]. Метод SLM обладает значительными преимуществами, в том числе сокращает число необходимых постобработочных этапов, обладает контролем пространственного распределения состава и микроструктуры путем печати с оптимизированными параметрами, а также проектированием сложных конструктивных элементов в сочетании с компьютерной системой [6].

Еще одним из наиболее распространенных методов в аддитивном производстве является метод селективного лазерного сплавления (selective laser sintering – SLS). Его принципиальная схема сопоставима со схемой изготовления изделий методом SLM (рис. 5) [7].

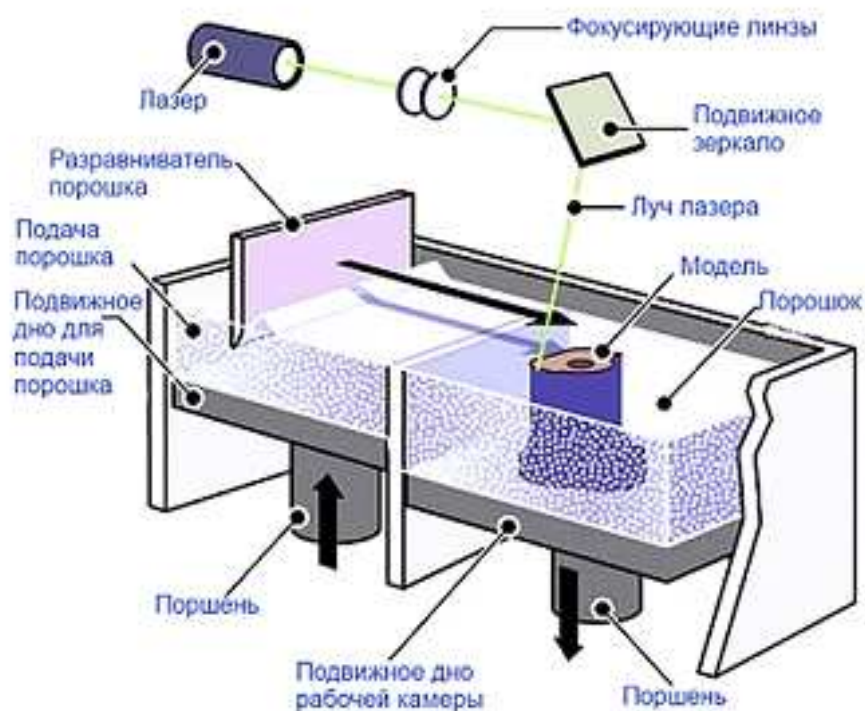


Рис. 5: Принципиальная схема построения изделий методом SLS

Особый интерес данный метод представляет для изготовления деталей из высокопрочных сталей, в числе которых мартенситностареющая сталь марки 03Н18К9М5Т. Образцы данного материала, полученные методом SLS показали высокие механические характеристики, сопоставимые с закаленным состоянием аналогичного материала, изготовленного классической технологией с использованием горячей деформации в виде проката. При высоких прочностных характеристиках были получены и высокие показатели пластичности [8]. Дополнительно

стоит отметить, что независимо от угла синтезирования образцов в 3D-принтере, разброс экспериментальных данных по механическим свойствам практически не наблюдался.

Для построения изделий методами SLS и SLM применяются порошки зернистостью 20-45 мкм. Для применения в технологии СЭЛС используются порошки размерами 100-200 мкм.

Метод прямого лазерного спекания металла (direct metal laser sintering – DMLS) аналогичен по схеме построения методам SLM или SLS. Пример оборудования данного метода представлен на рис. 6 [9].

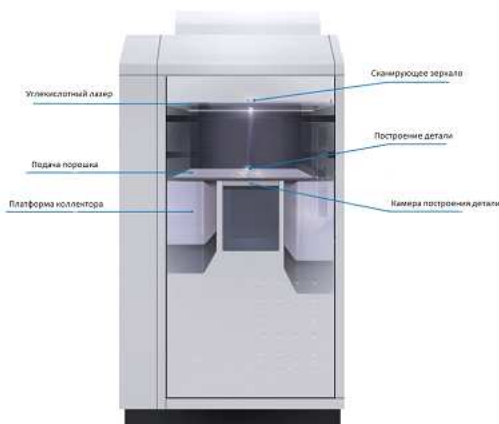


Рис. 6: Оборудование для построения изделий методом DMLS

Метод электронно-лучевого плавления (electron beam melting – EBM) применяется для тугоплавких материалов и сплавов (вольфрам, молибден, тантал), а также для высокоактивных материалов (титан и его сплавы). Его принципиальная схема представлена на рис. 7 [10]. Толщина слоя при построении данным методом составляет 50-100 мкм, что позволяет применять данный способ для изготовления изделий сложной формы.

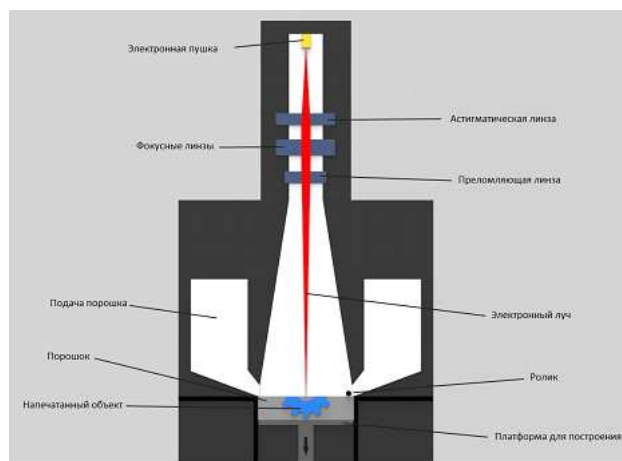


Рис. 7: Схема построения изделий по технологии EBM

Стоит отметить, что применение данного метода дает принципиальную возможность получить изделия из тугоплавких материалов и их сплавов. Согласно классических ранее освоенных технологических процессов в области порошковой металлургии, производство изделий из таких металлов, как вольфрам и молибден возможно лишь с применением:

— высокотемпературных печей для проведения спекания прессованных заготовок (плотность заготовки на уровне 40-60% от теоретической плотности металла) в восстановительной

атмосфере водорода (температура спекания варьируется в диапазоне 1950 – 2150°С);

— дуплекс-процесса, включающего в себя вакуумно-дуговой переплав ранее прессованных заготовок (плотность заготовки на уровне 40-60% от теоретической плотности металла) с последующим переплавом слитков в электронно-лучевой установке.

Наряду с современным методом ЕВМ в мире известен процесс получения компактных заготовок методом Spark Plasma sintering (SPS), основанном на процессе спекания порошкового материала (в том числе мелкодисперсных порошковых частиц) посредством прохождения через них постоянного тока [11]. В данном технологическом процессе в качестве технологической оснастки используется сложная комплексная графитовая форма, состоящая как из массивных блоков графита, так и графитовой бумаги. Применение графитовой оснастки обусловлено высокими свойствами графита обеспечивать «свободное» проведение импульсов постоянного тока, которые позволяют достичь локального нагрева порошкового материала до требуемой температуры спекания в течение нескольких минут. Применение метода SPS позволяет получать мелкозернистую структуру материала за счет быстрого изменения температуры как в процессе нагрева, так и в процессе охлаждения. Данный метод применяется в получении изделий и заготовок из графитовых материалов, тугоплавких металлов (вольфрам, хром, молибден), композиционных материалов, керамики. Однако, в связи с небольшими габаритами рабочей зоны данных установок, а также сложности изготовления графитовой оснастки, в большинстве случаев метод SPS получил распространение в лабораторных исследованиях.

Классические производственные цепочки сложны в исполнении не только за счет большого количество технологических операций, но также из-за низкой распространенности требуемого технологического оборудования в виду его высокой стоимости и сложности исполнения. Специфичность областей применения продукции из вольфрама, молибдена и их сплавов так же требует быстрой переналадки оборудования для оперативного изготовления опытных образцов новой продукции. Развитие аддитивной технологии ЕВМ может помочь решить данные задачи.

В настоящее время лазерная обработка материалов нашла широкое применение для проведения восстановительного ремонта изношенных деталей различных устройств (лопаток турбин, клапанов и т.д.) [12], для получения специальных защитных покрытий с особыми свойствами, а также для послойного выращивания детали путем послойного нанесения (напыления и/или наплавки) порошкового материала. Стоит заметить, что актуальной задачей так же является разработка новых порошковых материалов для нанесения покрытий на изделия из экономнолегированных сплавов, в том числе стойких к изнашиванию при высоких температурах. Известно, что модифицирование наплавленного сплава ультрадисперсными тугоплавкими частицами оказывает влияние на процессы кристаллизации в сварочной ванне, способствуя диспергированию структурных составляющих и инициируя выделение твердых фаз, что влияет на повышение механических и эксплуатационных свойств металла [13].

Аддитивное производство дуговой сваркой (wire-arc additive manufacturing - WAAM) применяется для различных видов сталей (марки нержавеющей и быстрорежущих сталей), для никелевых, титановых, алюминиевых и магниевых сплавов. В основе метода лежит плавление металлической проволоки с одновременным нанесением полученного подплавленного материала на рабочую платформу, которая, как правило, приводится в движение для получения изделий с осью вращения. Материал проволоки соответствует материалу требуемого изделия. Принципиальная схема изображена на рис. 8 [14]. Толщина слоя при построении составляет 1-3 мм (в зависимости от толщины направляемой проволоки), что в свою очередь делает данную технологию пригодной для изготовления крупногабаритных изделий.

Получение покрытий с высокими эксплуатационными свойствами, обеспечивающими повышение долговечности работы изделий в экстремальных условиях высокого износа, коррозии, механических нагрузок и температур, является важной фундаментальной задачей

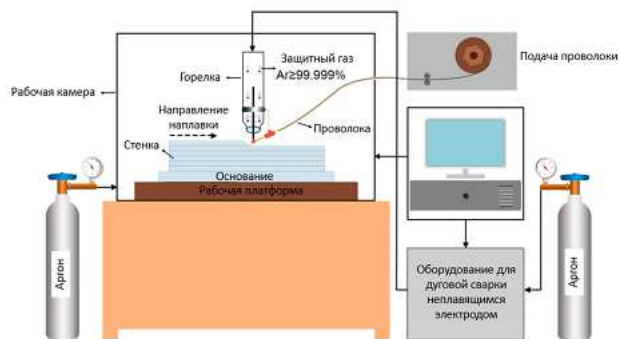


Рис. 8: Схема построения изделий по технологии WAAM

[15], справиться с которой позволяет технология прямого лазерного напыления (direct laser deposition – DLD). Она представляет собой послойное напыление порошкового материала на подложку. Данный метод нанесения применяется как для построения изделий «с нуля», так и для нанесения защитного покрытия на готовую деталь.

Технология DLD, как правило, основана на применении порошковых материалов на железной, никелевой и кобальтовой основах. Фракционный диапазон применяемых порошков варьируется от 40 до 150 мкм. Необходима хорошая сферичность порошка, позволяющая добиться постоянства текучести при подаче порошка в область построения. Принципиальная схема представлена на рис. 9 [16].

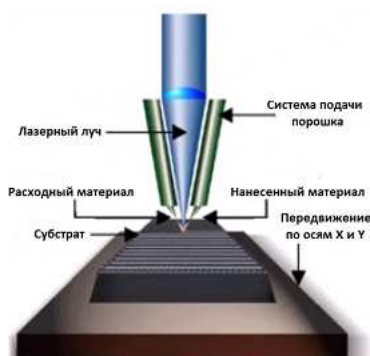


Рис. 9: Схема построения изделий по технологии DLD

Метод прямого осаждения металла (direct metal deposition – DMD) аналогичен методу DLD, что видно из его схемы (рис. 10) [17]. Применение данного метода также нашел при послойном построении изделий из порошковых материалов на железной, никелевой и кобальтовой основах.



Рис. 10: Схема построения изделий по технологии DMD

Метод лазерного напыления металлов (laser metal deposition - LMD) используется для нанесения различного рода покрытий (коррозионностойкие, износостойкие и др.) на готовые изделия из металлов и сплавов. Данный способ позволяет наносить покрытия толщиной в диапазоне 20-60 мкм, что в свою очередь значительно сокращает диапазон фракционного состава используемых порошковых материалов (рис. 11) [18].

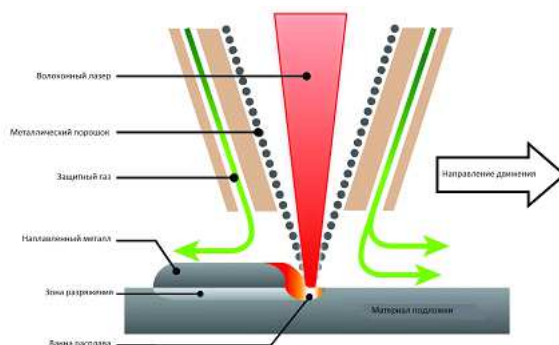


Рис. 11: Схема построения изделий по технологии LMD

Обозначение методы аддитивных технологий имеют между собой существенные отличия как в области применения, решаемых задачах, так и в особенностях каждой из технологий. Однако, неизменными для каждого метода являются основные требования, предъявляемые к применяемому порошковому материалу, в числе которых:

- качественный рассев по фракционному составу;
- стабильность текучести порошкового материала;
- требуемый химический состав;
- форма частиц близкая к сферической.

2.1. Порошковые материалы для аддитивных технологий

Развитие аддитивных технологии и их распространение в массовом производстве началось с их применения на классических и отчасти стандартных порошковых материалах. Среди них особое распространение получили:

- сплавы на железной основе марок 304L, 310S, 316L, 410, 430, 434, 904L, 17-7PH, различные марки быстрорежущих сталей и др.;
- сплавы на никелевой основе марок: Inconel 625, Inconel 718, Inconel 936 и др.;
- сплавы на кобальтовой основе марок: Co212, Co512, KX28M6 и др.;
- сплавы на основе меди: алюминиевые и фосфористые бронзы;
- сплавы на основе титана: Ti64 или VT6.

Так же известен опыт по получению опытных изделий из порошков чистых тантала, вольфрама, карбида вольфрама и молибдена высокой сферичности.

Для определения газообразующих примесей в металлах и сплавах применяются различные инструментальные методы: методы высокотемпературной экстракции в несущем газе, атомно-эмиссионная и массоспектрометрия с различными источниками возбуждения, ИК- спектрометрия, рентгенофлуоресцентный анализ, нейтронно-активационный анализ, активационный анализ заряженных частиц, оже- электронная спектрометрия [20].

Основными требованиями к порошковым металлическим материалам для аддитивных технологий являются [21]:

- стабильная текучесть на требуемом по технологии печати уровне;
- высокий уровень сферичности порошка;

- соответствие порошка требованиям по гранулометрическому распределению (как правило, применяемый фракционный интервал порошкового материала варьируется в диапазоне 20–150 мкм);
- соответствие порошка требованиям по химическому составу;
- низкое содержание кислорода;
- низкое содержание азота;
- высокий уровень насыпной плотности;
- высокий уровень плотности утряски;
- высокий уровень истинной плотности порошка, показывающий наличие внутренних пор и несплошностей в порошке.

2.2. Способы получения порошковых материалов для аддитивных технологий

В мировой практике существуют различные методы получения порошковых материалов из чистых металлов и сплавов на их основе. Наибольшее распространение получили следующие технологии изготовления металлических порошков [22]:

- 1) распыление расплава водой, применяемое для неактивных к кислороду материалов;
- 2) распыление расплава газом как из открытой плавильной печи, так и из вакуумной плавильной камеры;
- 3) распыление расплава плазмой;
- 4) центробежное распыление расплава, применяемое для сложнелегированных сплавов на основе никеля;
- 5) распыление заранее подготовленного распыляемого электрода, применяемая, в основном, для титана и его сплавов;
- 6) химико-термическое восстановление оксидов (магни- или кальциотермия);
- 7) самораспространяющийся высокотемпературный синтез.

Получение металлических порошков методом распыления водой является наиболее распространенным и экономичным способом. Высокое давление воды в сочетании с высокой скоростью охлаждения приводят к появлению частиц порошка неправильной формы, которая менее желательна для применения порошка в сфере аддитивного производства, поскольку она ухудшает свойство текучести и снижает насыпную плотность [22]. Однако, проведение дополнительных технологических процессов, например, плазменной сфероидизации, позволяет достичь требуемого уровня сферичности порошка, а соответственно повысить его текучесть и насыпную плотность.

Метод газовой атомизации позволяет получать сферические порошки различных материалов. Исходное сырье расплавляется в защитной атмосфере (вакуум или инертный газ) или под действием воздуха (при плавке в открытой печи). Затем полученный расплав сливается через распылитель, в котором производится разрушение потока расплава струей высокоскоростного инертного газа (азот, гелий, аргон), который разбивает расплав на мелкие капли [23]. При данном методе производства возможно образование сателлитов на отдельных порошковых частицах. Это связано с условиями получения порошка, при которых отдельные частицы разного размера сталкиваются друг с другом в процессе распыления.

В качестве материалов для применения в области аддитивных технологий возможно использовать порошки, полученные различными методами порошковой металлургии. Так, например, в работе [19] рассмотрено получение многокомпонентных жаропрочных сплавов на основе моно алюминида никеля NiAl путем трех интегральных технологий на основе протекания высокотемпературного химического синтеза:

- центробежное СВС-литье оксидного сырья с последующим вакуумно-индукционным переплавом для проведения плазменного центробежного распыления порошка;

— высокотемпературный элементный синтез (ЭС) механически активированной смеси сырьевых оксидов с последующим измельчением спека и плазменной сфероидизацией полученного порошка;

— гидридно-кальциевое восстановление смеси сырьевых оксидов с последующим гашением и измельчением спека и плазменной сфероидизацией полученного порошка.

После получения металлического порошка вышеописанными методами необходимо проводить:

— их ситовую и/или воздушную классификацию, позволяющей выделить целевую фракцию порошка для каждой отдельно взятой технологии аддитивного производства;

— проводить сфероидизацию порошка для достижения стабильного показателя по текучести, также с целью уменьшения содержания поверхностного кислорода на порошке.

2.3. Плазменная сфероидизация как процесс улучшения сферичности порошка и стабилизации его текучести

Разработка методов получения порошков металлов и сплавов со сферической формой частиц с заданными свойствами и их коммерциализации является одной из важнейших задач развития аддитивного производства [24]. Термическая плазма, генерируемая либо дугowymi разрядами, либо за счет индукционного нагрева, получила за последние годы широкое применение для осуществления целого ряда технологических операций, включающих поверхностное рафинирование порошкового материала. Она является удобным инструментом для получения высокого уровня сферичности порошковых материалов, полученных различными способами [25].

Порошковые материалы для аддитивных технологий должны обладать высоким уровнем сферичности, в виду того, что при сплавлении частиц самой энергетически выгодной формой является система «сфера-сфера» [26]. Не менее важным фактором является стабильная текучесть (сыпучесть) порошкового материала, обеспечивающая постоянство подачи порошка при печати изделий. Для обеспечения данных свойств применяется сфероидизация порошковых материалов в индукционно-связанной плазме либо в дуговой плазме. Как правило, оба метода применяются для обработки порошковых материалов на основах Co, Ni, Fe, Ti в диапазоне гранулометрического состава от 20 до 150 мкм. Однако, уже есть российские и мировые разработки по сфероидизации чистых тугоплавких порошковых материалов, таких как вольфрам, молибден и хром [27,28]. Степень сферичности порошков данных металлов достигает уровня 80-95%, а показатель текучести по ГОСТ 20899-98 (ИСО 4490-78) варьируется в пределах 10-20 секунд. Содержание поверхностного кислорода на порошке при проведении плазменной сфероидизации так же имеет тенденцию к снижению до уровня 90-150 ppm.

В качестве рабочей среды для создания плазмы применяется смесь газов, состав и соотношение которых напрямую зависит от порошкового материала, планируемого к сфероидизации. Так для порошков на основе Ti используется смесь Ar, He и H в соотношениях 89:10:1, а для сплавов на основах Fe, Ni или Co используется смесь Ar и H в соотношениях 10:1. Состав плазмы напрямую влияет на характер и эффективность сфероидизации. При некорректном подборе газового состава, а также при использовании газов, не отвечающих техническим требованиям, возможны:

- выход из строя всей газовой системы оборудования сфероидизации;
- не зажигание плазмы, что делает невозможным сам процесс сфероидизации;
- загрязнение металлического порошка по химическому составу в процессе сфероидизации;
- некачественная сфероидизация, отражающаяся в виде низкого уровня сферичности порошкового материала.

Подготовка, проведение и постобработка металлического порошка в процессе сфероидизации проводится согласно следующим этапам:

- подготовка исходного порошка путем предварительной ситовой и/или воздушной классификации;
- химический, гранулометрический и ситовой анализы исходного порошка;
- определение физических свойств исходного порошка: насыпной плотности, плотности утряски, текучести, сферичности металлографическим методом;
- засыпка исходного металлического порошка в специальные загрузочные емкости;
- настройка скорости подачи исходного порошкового материала в рабочую зону плазмотрона (горящую плазму);
- настройка высоты подачи исходного порошкового материала в рабочую зону плазмотрона (горящую плазму);
- проведение проверки герметичности (как газовой, так и жидкостной системы) установки сфероидизации;
- зажигание плазмы, включение подачи порошка, старт процесса сфероидизации;
- выгрузка металлического сфероидизированного порошка;
- проведение металлографического экспресс-анализа для определения показателя сферичности и корректности настроек процесса сфероидизации;
- проведение химического анализа порошка для определения содержания газовых включений с целью определения корректности настроек процесса сфероидизации;
- проведение ультразвуковой промывки сфероидизированного порошка для удаления наночастиц, образованных в результате частичного испарения сфероидизируемого порошкового материала;
- проведение сушки порошкового материала в среде инертного (Ar) газа с принудительным нагревом (при необходимости);
- гранулометрический и ситовой анализы сфероидизированного отмытого порошка;
- проведение ситовой и/или воздушной классификации сфероидизированного отмытого порошкового материала;
- химический, гранулометрический и ситовой анализы полученного порошка с целью определения соответствия заявленным требованиям;
- определение физических свойств полученного порошка: насыпной плотности, плотности утряски, текучести, сферичности металлографическим методом, с целью определения соответствия заявленным требованиям.

Сфероидизация порошков основана на интенсивном нагреве исходных частиц, подаваемых в плазменный поток, их плавлении и приобретении каплями расплава сферической формы за счет сил поверхностного натяжения. Плазменная струя формируется в результате пропускания плазмообразующего газа через дуговой разряд или индукционное поле. Исходный порошок подается в рабочую зону плазмотрона или реактора (рис. 12), а после выносится системой фильтрации в приемные бункера целевого продукта.

В завершении процесса сфероидизации необходимо предусмотреть ультразвуковую промывку полученного порошка. Данная операция позволяет убрать nano- и микрочастицы порошка, образовавшиеся в процессе сфероидизации за счет конденсации паров расплавленных частиц. Данный вид промывки проводится в несколько циклов в специальной обессоленной (деонизированной) воде. Количество циклов зависит от фракционного состава полученного порошка после сфероидизации, а также от его химического состава. Как правило, количество циклов промывки варьируется в пределах 5-8 циклов. После промывки порошок представляет собой пульпу (смесь порошка с водой). Для его обезвоживания необходимо проводить ряд циклов сушки в защитной атмосфере (вакуум и/или аргон). Возможно применение сушки с нагревом технологической емкости с порошком до 50–80°C. За счет операций ультразвуковой

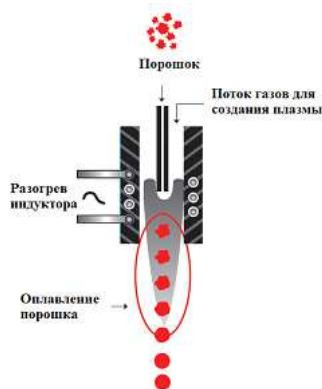


Рис. 12: Схема процесса сфероидизации порошкового материала

промывки и сумки удается дополнительно повысить текучесть порошка, а также снизить в нем содержание кислорода.

Как правило, после проведения процессов сфероидизации и ультразвуковой промывки порошка необходимо провести повторную классификацию порошкового материала для получения целевого фракционного состава. Для этого, как правило, используют установки воздушной классификации, позволяющие с высокой производительностью провести тщательный рассев порошкового материала.

В завершении технологического процесса получения порошка для аддитивных технологий, включающего пост процесс плазменной сфероидизации, необходимо предусмотреть защитную упаковку готового порошка во влагостойкие контейнеры. Чистый титан и сплавы упаковываются под аргоном, в то время как другие материалы обычно упаковываются под нормальной воздушной атмосферой [22].

3. Аддитивное производство под ключ. Решения мировых производителей

В основе технологий аддитивного производства находится оборудование для печати: 3D-принтеры и/или установки напыления и наплавки. Однако, если рассматривать полностью процесс получения изделия методом аддитивного производства, то процесс окажется очень сложным за счет большого наличия пост-процессов, к которым относятся:

- обязательное проведение отжига напечатанных изделий для снижения термических напряжений;
- проведение механической обработки (как правило электроэрозионная или лентопильная обработка) для удаления детали с площадки построения;
- горячее изостатическое прессование готовых изделий;
- сложная 3х- и/или 5-ти координатная механическая обработка готового изделия за счет исходной сложной геометрии;
- проверка геометрических размеров полученных изделий с помощью особо чувствительных контрольно-измерительных машин (КИМ).

3.1. Метод горячего изостатического прессования как гарант увеличения уровня физико-механических свойств

Многokратное получение аддитивно изготовленных материалов со 100% эталонной плотностью, несомненно, является сложной задачей. Технологии производства присадок к металлам

позволяют получать плотность, превышающую 99% [22]. Плотность зависит от развития пор в процессе печати, а также наличия неметаллических (в том числе газовых) включений. Даже при использовании традиционных технологий, например, литье, для получения изделий сложной формы, практически невозможно избавиться от пористости в сплавах, которая, как правило, является основной причиной низких механических характеристик готовых изделий. Широко используемым приемом, позволяющим практически полностью устранить пористость любого происхождения и тем самым повысить качество отливок, является применение горячего изостатического прессования (ГИП) [29-33]. Суть ГИП заключается в одновременном воздействии на изделие высокой температуры и давления. При этом происходит уплотнение материала по механизму пластической деформации с последующей диффузионной сваркой сомкнувшихся внутренних поверхностей пор. Более высокая плотность и однородность заготовок после ГИП улучшает механические свойства с соответствующим повышением прочности на растяжение и текучести, ковкости и сопротивления разрушению. Проведение процесса ГИП так же уменьшает разброс данных характеристик по сечению и длине заготовки [34].

Согласно работе [19] механические свойства компактных образцов из порошковых материалов фракции 20-45 мкм на основе моно алюминиды никеля способны за счет проведения цикла горячего изостатического прессования (ГИП) обеспечить следующий рекордный уровень: предел прочности на сжатие порядка 3200 МПа, предел текучести на сжатие составляет 1300 МПа, относительное сжатие на уровне 17% [19]. Достичь данный уровень свойств так же удалось за счет проведения предварительной сфероидизации порошкового материала, позволившей увеличить насыпную плотность порошка, которая в свою очередь способствовала более плотной засыпке порошкового материала в капсулу для процесса ГИП. Установлено, что без применения предварительной сфероидизации порошкового материала уровень свойств компактного образца из моно алюминиды никеля, полученного методом ГИП, характеризуется следующими значениями: $\sigma_{сж} = 2850$ МПа, $\sigma_{0,2} = 1250$ МПа, $v = 12\%$.

3.2. Мировые предложения по развитию аддитивного производства

За последние 10 лет аддитивное производство получило наиболее активное развитие как в России, так и в мире. Появились мировые производители, предлагающие технологические решения под ключ. Среди них следующие:

1) 3D systems - предоставляет профессиональные онлайн-услуги 3D-печати и производства готовых изделий методами: стереолитография и литье в уретановые формы для изделий из полимеров, технологии SLS и DMP для металлических порошков, литье под давлением для легкоплавких сплавов, а также финишная механическая обработка высокой точности [35].

2) SMS group - предлагает законченную концепцию производства (рис. 12), позволяющую реализовать серийную производственную цепочку аддитивного производства, которая включает в себя [36]:

- установку распыления расплава из вакуумной плавильной камеры;
- систему контроля и классификации металлического порошка;
- 3d-принтеры для печати заготовок и изделий близких к конечной форме;
- оборудование для снятия напечатанных заготовок с подложки;
- оборудование для проведения промежуточной (отжиг для снятия напряжений) и конечной термообработки для получения целевых свойств в изделии;
- комплекс металлообрабатывающих станков с числовым программным управлением ЧПУ для проведения финишной механической обработки;
- оборудование для сканирования исходной (целевой) геометрии модели (образца готового изделия), а также для проверки и анализа полученного изделия.

Дополнительно компания SMS group предлагает в рамках технологической цепочки аддитивного производства использовать:

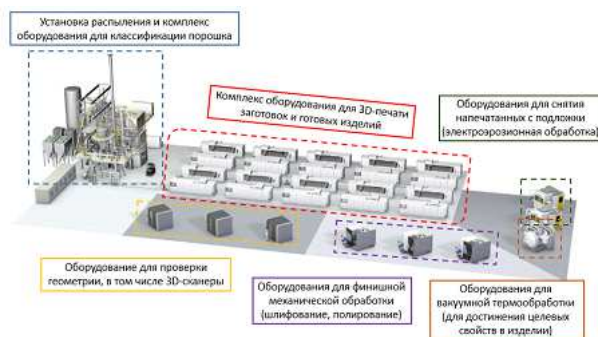


Рис. 13: Концепция аддитивного производства от SMS Group

- оборудование для проведения циклов горячего изостатического прессования для повышения плотности напечатанных изделий;
- оборудование для защитной упаковки и хранения порошковых материалов;
- лабораторное оборудование для анализа порошковых материалов, включающее как проверку химического и гранулометрического составов, так и проверку физических свойств порошка;
- лабораторное оборудование для проверки физико-механических свойств готовых изделий и/или образцов-свидетелей в целях проведения аттестации продукции.

4. Моделирование в аддитивном производстве

В случае, когда мы имеем дело не с промышленным производством, подразумевающим заданный технологический процесс, а с изготовлением штучных деталей или восстановлением узлов, физические свойства материала и геометрические размеры готового изделия будут каждый раз новые. Соответственно, для успешного получения изделия необходимо либо проведение ряда экспериментов для определения допустимых и оптимальных параметров процесса аддитивной технологии, что довольно дорого, либо использование некоторого математического аппарата, позволяющего провести предварительные расчеты этих параметров [12].

В настоящее время совместно с развитием аддитивных технологий активно растет рынок и программных продуктов для этой сферы. В большом количестве на мировом рынке представлены программные продукты для подготовки изделия к 3D-печати: форматирование файла, построение поддержек, выбор параметров печати. Наиболее распространенными программными продуктами являются следующие [37]:

- Cura: является программным обеспечением, подходящим для большинства 3D-принтеров. Это полностью открытый исходный код, который при необходимости может быть расширен. Данное программное обеспечение очень просто в использовании и позволяет управлять наиболее важными настройками 3D-печати в понятном интерфейсе. Возможен запуск на стандартных режимах, и, если необходим более точный контроль над настройками, то возможно использование программы в режиме “пользовательский”, позволяющем в ручном режиме изменять требуемые параметры.

- MatterControl: программное обеспечение для CAD-систем и 3D-печати.

Интерфейс замечательно хорошо структурирован. Соответствующие расширенные настройки печати позволяют рассматривать MatterControl в качестве комплексного программного обеспечения для большинства аспектов процесса 3D-печати, от подготовки поддержки до нарезки и управления.

- 3DPrinterOS: Облачное решение для управления 3D-принтером, которое включает в себя

очередь заданий для печати, управление принтером и систему плагинов на основе приложений, которая позволяет анализировать и восстанавливать файлы формата STL.

— KISSlicer: это довольно сложный программный инструмент для 3D-печати. Бесплатная версия программы будет достаточна для большинства пользователей печати, но доступна только с одним экструдером. Платная же версия позволяет запрограммировать печатать с несколькими головками.

— Slic3r: это программное обеспечение с открытым исходным кодом с возможностью добавления функций bleeding edge, которые больше не встречаются ни в одном из программных модулей.

— IceSL: это удобное программное обеспечение для 3D-печати, включающий элемент моделирования.

— Octoprint: это программное обеспечение, имеющее специальный блок, позволяющий управлять принтером удаленно посредством соединения через интерфейс OctoPrint. Это позволяет отнести данное программное обеспечение к одной из лучших для 3D-печати в настоящее время на рынке.

Однако, несмотря на великое многообразие программных комплексов в сфере аддитивных технологий, в настоящее время мало известно программ для моделирования самого процесса 3D-печати, которые позволяли бы в ходе процесса послойного лазерного синтеза прогнозировать стратегию построения изделия, а также анализировать напечатанный образец по целому ряду свойств и характеристик: процесса распространения тепла, напряженно-деформированного состояния, многопараметрической оптимизации структуры, периодических пористых и ячеистых структур с переменными теплофизическими и механическими свойствами, оценки остаточной прочности и предельных нагрузок, формирования микроструктуры материала.

Именно для решения задач по расчету и прогнозированию напряженно-деформированного состояния изделий и конструкций было разработано уникальное инженерно-программное обеспечение.

СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Калайда Т. А. Метод селективного лазерного плавления для создания изделий со сложной геометрией // *Материалы XV Российской ежегодной конференции молодых научных сотрудников и аспирантов «Физико-химия и технология неорганических материалов»*. Москва, 2018. С. 55–56.
2. Дежина И. Г., Пономарев А. К., Фролов А. С. Новые производственные технологии: публичный аналитический доклад. М.: Издательский дом «Дело» РАНХиГС, 2015. 272 с.
3. Гвоздев А. Е. Производство заготовок быстрорежущего инструмента в условиях сверхпластичности. М.: Машиностроение, 1992. 176 с.
4. Powders for 3D Printing / MKNANO [электронный ресурс]. - URL: <https://mknano.com/3-D-Printing-Additive-Manufacturing-Materials/Metal-Powders/Spherical-Metal-Powders/Powders-for-3D-Printing> (дата обращения 24.10.2019 г.).
5. Additive manufacturing. Different kinds of additive manufacturing / ScanAndMake [электронный ресурс]. URL: <https://scanandmake.com/additive-manufacturing#collapse3> (дата обращения 24.10.2019 г.).
6. Капкан М. А. Исследование структуры сферического порошка коррозионностойкой стали 316L для аддитивного производства // *Материалы XV Российской ежегодной конферен-*

- ции молодых научных сотрудников и аспирантов «Физико-химия и технология неорганических материалов». Москва, 2018 г. С. 468–469.
7. Назад из виртуальности [электронный ресурс]. URL: https://hi-tech.mail.ru/review/nazad_iz_virtualnosti/ (дата обращения 24.10.2019 г.).
 8. Владиславская Е. Ю. Исследование механических характеристик образцов из мартенситностареющей стали 08X18K9M5T, синтезированных методом селективного лазерного сплавления // Материалы XV Российской ежегодной конференции молодых научных сотрудников и аспирантов «Физико-химия и технология неорганических материалов». Москва, 2018. С. 38–39.
 9. The Types Of 3D Printing / All About 3D Printing [электронный ресурс]. – URL: <http://allabout3dprinting.com/types-of-3d-printing/> (дата обращения 24.10.2019г.)
 10. Laser sintering, melting and others – SLS, SLM, DMLS, DMP, EBM, SHS / 3D Printing and Design [электронный ресурс]. – URL: <https://www.additive.blog/knowledge-base/3d-printers/laser-sintering-melting-sls-slm-dmls-dmp-ebm-shs/> (дата обращения 24.10.2019г.)
 11. Spark plasma sintering system / Systeme GmbH (FCT) [электронный ресурс]. – URL: http://www.fct-systeme.de/en/content/Spark_Plasma_Sinteranlagen/ nm.12 нс.26 (дата обращения 24.10.2019г.)
 12. Манцыбора А. А., Полоник М. В. Расчет методом конечных элементов процесса обработки оптоволоконным лазером материала заданной конфигурации // Сборник материалов VII международной конференции «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов». М.: ИМЕТ РАН, 2017, 951 с.
 13. Антонов А. А., Артемьев А. А., Соколов Г. Н. Разработка порошковой проволоки для дуговой наплавки износостойкого сплава системы Fe-Cr-C-Mo-Ni-Ti-B // Сборник материалов VII международной конференции «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов». М.: ИМЕТ РАН, 2015, 953 с.
 14. Jing G., Yong Zh., Changmeng L., Qianru W., Xianping Ch. and Jiping L. Wire Arc Additive Manufacturing of AZ31 Magnesium Alloy: Grain Refinement by Adjusting Pulse Frequency // Metals for Additive Manufacturing. 2016, vol. 9(10), p.823. URL: <https://doi.org/10.3390/ma9100823>
 15. Капралов Е. В., Будовских Е. А., Капралов Е. В., Будовских Е. А., Громов В. Е., Райков С. В., Иванов Ю. Ф. Структура и свойства композиционных износостойких наплавов на сталь: монография. Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2014. 109 с.
 16. 3D-принтер порошковый металл. Принципы, возможности, расходные материалы / Компьютерная помощь [электронный ресурс]. – URL: <https://128gb.ru/3d-powder-metal-printer-principles-opportunities-supplies-prices.html> (дата обращения 24.10.2019 г.).
 17. Механик А. 3D-фанам стоит немного успокоиться. Наука и технологии // Стимул [электронный ресурс]. – URL: <https://stimul.online/articles/science-and-technology/3d-fanam-stoit-nemnogo-uspokoitsya/> (дата обращения 24.10.2019 г.).
 18. Laser Metal Deposition Resolution [электронный ресурс]. URL: <https://www.auroralilys.com/index5.php?yhsw=laser-metal-deposition-resolution> (дата обращения 24.10.2019г.).

19. Левашов Е. А., Капланский Ю. Ю., Курбаткина В. В., Пацера Е. И., Самохин А. В., Фадеев А. А., Мартынов Д. А., Гурских А. В., Чупеева А. Н. Новое поколение жаропрочных никелевых сплавов с иерархической структурой и их применение в аддитивных технологиях // *Материалы 13-й международной научно-технической конференции*. Минск, 2018. С. 62–65.
20. Григорович К. В. Современные возможности методом определения газообразующих примесей и неметаллических включений в металлах и сплавах // *Материалы XV Российской ежегодной конференции молодых научных сотрудников и аспирантов «Физико-химия и технология неорганических материалов»*. Москва, 2018. С. 24–25.
21. Additive Manufacturing. With Amperprint for 3D-Printing you Have the Powder to Create / Höganäs [электронный ресурс]. – URL: <https://www.hoganas.com/en/powder-technologies/additive-manufacturing/3d-printing-powders/> (дата обращения 24.10.2019 г.).
22. A look into powder materials for metal 3d printing / 3D-Printing Industry (3DPI) [электронный ресурс]. – URL: <https://3dprintingindustry.com/news/a-look-into-powder-materials-for-metal-3d-printing-57788/> (дата обращения 24.10.2019 г.).
23. Кирсанкин А. А. Получение сферических порошков методом газовой атомизации для аддитивного производства // *Материалы XV Российской ежегодной конференции молодых научных сотрудников и аспирантов «Физико-химия и технология неорганических материалов»*. Москва, 2018. С. 58–59.
24. Фадеев А. А. Сфероидизация металлических порошков системы W-Ni-Fe в термической плазме электродугового разряда // *Материалы XV Российской ежегодной конференции молодых научных сотрудников и аспирантов «Физико-химия и технология неорганических материалов»*. Москва, 2018. С. 311–313.
25. Зленко М. А., Нагайцев М. В., Довбыш В. М. Аддитивные технологии в машиностроении. ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015. 220 с.
26. Барахтин Б. К., Васильева О. В., Жуков А. С., Кузнецов П. А. Физико-химические процессы при консолидации порошка в методе селективного лазерного сплавления // VII Международная конференция «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов». М: ИМЕТ РАН, 2017. 951 с.
27. Tungsten / TEKNA [электронный ресурс]. URL: <http://www.tekna.com/spherical-powders/tungsten> (дата обращения 24.10.2019 г.).
28. Сферичные порошки тугоплавких металлов для аддитивных технологий / АО «ПОЛЕМА» [электронный ресурс]. URL: [http://www.polema.net/userfiles/files/сферичные%20порошки%20тугоплавких%20металлов%20производства%20АО%20ПОЛЕМА\(1\).pdf](http://www.polema.net/userfiles/files/сферичные%20порошки%20тугоплавких%20металлов%20производства%20АО%20ПОЛЕМА(1).pdf) (дата обращения 24.10.2019 г.).
29. Строганов Г. Б. Высокопрочные литейные алюминиевые сплавы. М., Metallurgia, 1985. 216 с.
30. Zoheir F. The influence of porosity and hot isostatic pressing treatment on wear characteristics of cast and P/M aluminum alloys // *Wear*. 2011, vol. 271, pp. 1594–1601. DOI: 10.1016/j.wear.2011.01.037

31. Падалко А. Г. Практика горячего изостатического прессования неорганических материалов. М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. 267 с.
32. James T. Staley Jr, Murat Tiryakioglu, John Campbell. The effect of increased HIP temperatures on biofilms and tensile properties of A206-T71 aluminum castings // *Materials Science and Engineering A* 460-461, 2007, pp. 324–334. DOI: 10.1016/j.msea.2007.01.049
33. Белов А. Ф., Бондарев Б. И., Шмаков Ю. В. Свойства заготовок из алюминиевых сплавов после горячего изостатического прессования // *Цветные металлы*: 1983, № 5, С. 65–67.
34. Акоюн Т. К. Влияние горячего изостатического прессования на структуру и свойства высокопрочных литейных алюминиевых сплавов нового поколения — никалинов АЦ6Р0,5Ж и АЦ6Н4 // *Сборник материалов XI Российской ежегодной конференции молодых научных сотрудников и аспирантов «Физико-химия и технология неорганических материалов»*. М.: ИМЕТ РАН, 2014, 619 с.
35. 3D Systems the Power of on Demand / 3D SYSTEMS [электронный ресурс]. URL: <https://www.3dsystems.com/on-demand-manufacturing> (дата обращения 24.10.2019 г.).
36. Frontrunner for New Production Process. Powder Production and 3D Printing / SMS group [электронный ресурс]. URL: <https://www.sms-group.com/plants/all-plants/powder-production-and-3d-printing/> (дата обращения 24.10.2019 г.).
37. 3D Printing Software for Beginners and Pros / ALL3DP [электронный ресурс]. URL: <https://all3dp.com/1/best-free-3d-printing-software-3d-printer-program/> (дата обращения 24.10.2019 г.).

REFERENCES

1. Kalaida, T. A., 2018, “The method of selective laser melting for the creation of products with complex geometry” [Metod selektivnogo lazernogo plavleniya dlya sozdaniya izdelij so slozhnoj geometrije], Proceedings of the XV Russian annual conference of young researchers and postgraduates “Physico-chemistry and technology of inorganic materials”, Moscow, 2018, pp. 55-56.
2. Dezhina, I. G., Ponomarev, A. K., Frolov, A. S., 2015, “New production technologies: public analytical report”, Moscow, “Delo” RANHiGS, 272 p.
3. Gvozdev, A. E., 1992, “Production of high-speed tool blanks in conditions of superplasticity”, Moscow, Mashinostroenie, 176 p.
4. Powders for 3D Printing / MKNANO [electronic resource]: URL: <https://mknano.com/3-D-Printing-Additive-Manufacturing-Materials/Metal-Powders/Spherical-Metal-Powders/Powders-for-3D-Printing> (accessed 24.10.2019).
5. Additive manufacturing. Different kinds of additive manufacturing / ScanAndMake [electronic resource]: URL: <https://scanandmake.com/additive-manufacturing#collapse3> (accessed 24.10.2019).
6. Kaplan, M. A., 2018, “Research of structure of spherical powder of corrosion-resistant steel 316L for additive production” [Issledovanie struktury sfericheskogo poroshka korrozionnostojkoj stali 316L dlya additivnogo proizvodstva], Proceedings of XV Russian annual conference of young scientists and postgraduates "Physical chemistry and technology of inorganic materials Moscow, pp. 468-469.

7. Back from virtuality [electronic resource]: URL:
https://hi-tech.mail.ru/review/nazad_iz_virtualnosti/ (accessed 24.10.2019).
8. Vladislavskaya, E. Yu., 2018, "Investigation of mechanical characteristics of samples from martensitic aging steel 08X18K9M5T synthesized by selective laser fusion" [Issledovanie mekhanicheskikh harakteristik obrazcov iz martensitnostareyushchej stali 08H18K9M5T, sintezirovannyh metodom selektivnogo lazernogo splavleniya], Proceedings of the XV Russian annual conference of young researchers and postgraduates "Physical chemistry and technology of inorganic materials", Moscow, pp. 38-39.
9. The Types Of 3D Printing / All About 3D Printing [electronic resource]: URL:
<http://allabout3dprinting.com/types-of-3d-printing/> (accessed 24.10.2019).
10. Laser sintering, melting and others – SLS, SLM, DMLS, DMP, EBM, SHS / 3D Printing and Design [electronic resource]: URL:
<https://www.additive.blog/knowledge-base/3d-printers/laser-sintering-melting-sls-slm-dmls-dmp-ebm-shs/> (accessed 24.10.2019).
11. Spark plasma sintering system / Systeme GmbH (FCT) [electronic resource]: URL:
http://www.fct-systeme.de/en/content/Spark_Plasma_Sinteranlagen/ nm.12 nc.26 (accessed 24.10.2019).
12. Mantsybora, A. A., Polonik, M. V., 2017, "Calculation by finite element method of optical fiber laser processing of a material of a given configuration" [Raschet metodom konechnyh elementov processa obrabotki optovolokonnym lazerom materiala zadannoj konfiguracii], Proceedings of the VII international conference "Deformation and destruction of materials and nanomaterials", Moscow, IMET RAN, 951 p.
13. Antonov, A. A., Artemyev, A. A., Sokolov, G. N., 2015 "Development of cored wire for arc surfacing of wear-resistant alloy of Fe-Cr-C-Mo-Ni-Ti-B system" [Razrabotka poroshkovoj provoloki dlya dugovoj naplavki iznosostojkogo splava sistemy Fe-Cr-C-Mo-Ni-Ti-B], Proceedings of the VII international conference "Deformation and destruction of materials and nanomaterials", Moscow, IMET RAN, 953 p.
14. Jing, G., Yong, Zh., Changmeng, L., Qianru, W., Xianping, Ch. and Jiping L., 2016, "Wire Arc Additive Manufacturing of AZ31 Magnesium Alloy: Grain Refinement by Adjusting Pulse Frequency", Metals for Additive Manufacturing, vol. 9(10), p. 823. URL:
<https://doi.org/10.3390/ma9100823>
15. Kapralov, E. V., Budovskikh, E. A., Kapralov, E. V., Budovskikh, E. A., Gromov, V. E., Raikov, S. V., Ivanov, Yu. F., 2014, "Structure and properties of composite wear-resistant surfacing on steel" [Struktura i svojstva kompozicionnyh iznosostojkikh naplavok na stal'], Novokuznetsk Izd. centr SibGIU, 109 p.
16. 3D printer powder metal. Principles, capabilities, supplies / Computer help [electronic resource]: URL:
<https://128gb.ru/3d-powder-metal-printer-principles-opportunities-supplies-prices.html> (accessed 24.10.2019).
17. Mechanic, A. 3D fans should calm down a bit. Science and technology // Stimulus [electronic resource]: URL:
<https://stimul.online/articles/science-and-technology/3d-fanam-stoit-nemnogo-uspokoitsya/> (accessed 24.10.2019).

18. Laser Metal Deposition Resolution [electronic resource]: URL: <https://www.auroralilys.com/index5.php?yhs=w=laser-metal-deposition-resolution> (accessed 24.10.2019).
19. Levashov, E. A., Kaplansky, Yu. Yu., Kurbatkina, V. V., Patsera, E. I., Samokhin, A. V., Fadeev, A. A., Martynov, D. A., Gurskikh, A. V., Chupeeva, A. N., 2018 “A new generation of heat-resistant Nickel alloys with hierarchical structure and their application in additive technologies” [Novoe pokolenie zharoprochnykh nikelovykh splavov s ierarhicheskoy strukturoj i ih primenenie v additivnykh tekhnologiyah], Proceedings of the 13th international scientific and technical conference, Minsk, pp. 62–65.
20. Grigorovich, K. V., 2018, “Modern possibilities by the method of determination of gas-forming impurities and nonmetallic inclusions in metals and alloys” [Sovremennye vozmozhnosti metodom opredeleniya gazoobrazuyushchih primesej i nemetallicheskih vklyuchenij v metallah i splavah], Proceedings of the XV Russian annual conference of young researchers and postgraduates “Physico-chemistry and technology of inorganic materials”, Moscow, pp. 24–25.
21. Additive Manufacturing. With Amperprint for 3D-Printing you Have the Powder to Create / Höganäs [electronic resource]: URL: <https://www.hoganas.com/en/powder-technologies/additive-manufacturing/3d-printing-powders/> (accessed 24.10.2019).
22. A look into powder materials for metal 3d printing / 3D-Printing Industry (3DPI) [electronic resource]: URL: <https://3dprintingindustry.com/news/a-look-into-powder-materials-for-metal-3d-printing-57788/> (accessed 24.10.2019).
23. Kirsankin, A. A., 2018 “Obtaining spherical powders by gas atomization for additive production” [Poluchenie sfericheskikh poroshkov metodom gazovoj atomizacii dlya additivnogo proizvodstva], Proceedings of the XV Russian annual conference of young researchers and postgraduates “Physico-chemistry and technology of inorganic materials”, Moscow, pp. 58–59.
24. Fadeev, A. A., 2018, “Spheroidization of metal powders of W-Ni-Fe system in thermal plasma of electric arc discharge” [Sferoidizaciya metallicheskih poroshkov sistemy W-Ni-Fe v termicheskoj plazme elektrodugovogo razryada], Proceedings of the XV Russian annual conference of young researchers and postgraduates “Physico-chemistry and technology of inorganic materials”, Moscow, pp. 311–313.
25. Zlenko, M. A., Nagaytsev, M. V., Dovbysh, V. M., 2015, “Additive technologies in mechanical engineering” [Additivnye tekhnologii v mashinostroenii], GNC RF FGUP «NAMI», 220 p.
26. Barakhtin, B. K., Vasilyeva, O. V., Zhukov, A. S., Kuznetsov, P. A., 2017, “Physico-chemical processes in powder consolidation in the method of selective laser fusion” [Fiziko-himicheskie processy pri konsolidacii poroshka v metode selektivnogo lazernogo splavljeniya], Proceedings of the VII international conference “Deformation and destruction of materials and nanomaterials Moscow, IMET RAN, 951 p.
27. Tungsten / TEKNA [electronic resource]: URL: <http://www.tekna.com/spherical-powders/tungsten> (accessed 24.10.2019).
28. Spherical powders of refractory metals for additive technologies / JSC “POLEMA” [electronic resource]: URL: [http://www.polema.net/userfiles/files/сферичные%20порошки%20тугоплавких%20металлов%20производства%20АО%20ПОЛЕМА\(1\).pdf](http://www.polema.net/userfiles/files/сферичные%20порошки%20тугоплавких%20металлов%20производства%20АО%20ПОЛЕМА(1).pdf) (accessed 24.10.2019).

29. Stroganov, G. B., 1985, "High-Strength casting aluminum alloys" [Vysokoprochnye litejnye alyuminievye splavy], Moscow, Metallurgiya, 216 p.
30. Zoheir, F., 2011, "The influence of porosity and hot isostatic pressing treatment on wear characteristics of cast and P/M aluminum alloys", *Wear*, vol. 271, pp. 1594–1601. DOI: 10.1016/j.wear.2011.01.037.
31. Padalko, A. G., 2007, "Practice of hot isostatic pressing of inorganic materials" [Praktika goryachego izostaticheskogo pressovaniya neorganicheskikh materialov], Moscow, Akademkniga, 267 p.
32. James, T. Staley J., Murat, T., John, C., 2007, "The effect of increased HIP temperatures on biofilms and tensile properties of A206-T71 aluminum castings", *Materials Science and Engineering A* 460-461, pp. 324-334. DOI: 10.1016/j.msea.2007.01.049
33. Belov, A. F., Bondarev, B. I., Shmakov, Yu. V., 1983, "Properties of billets from aluminum alloys after hot isostatic pressing" [Svoystva zagotovok iz alyuminievykh splavov posle goryachego izostaticheskogo pressovaniya], *Non-Ferrous metals*, No. 5, pp. 65–67.
34. Akopyan, T. K., 2014, "Influence of hot isostatic pressing on structure and properties of high-strength casting aluminum alloys of new generation-nikalins AC6R0, 5J and AC6N4" [Vliyanie goryachego izostaticheskogo pressovaniya na strukturu i svoystva vysokoprochnykh litejnykh alyuminievykh splavov novogo pokoleniya – nikalinov AC6R0,5ZH i AC6N4], *Proceedings of XI Russian annual conference of young scientists and postgraduates "Physico-chemistry and technology of inorganic materials"*, Moscow, IMET RAN, 619 p.
35. 3D Systems the Power of on Demand / 3D SYSTEMS [electronic resource]: URL: <https://www.3dsystems.com/on-demand-manufacturing> (accessed 24.10.2019).
36. Frontrunner for New Production Process. Powder Production and 3D Printing / SMS group [electronic resource]: URL: <https://www.sms-group.com/plants/all-plants/powder-production-and-3d-printing/> (accessed 24.10.2019).
37. 3D Printing Software for Beginners and Pros / ALL3DP [electronic resource]: URL: <https://all3dp.com/1/best-free-3d-printing-software-3d-printer-program/> (accessed 24.10.2019).

Получено 17.10.2019 г.

Принято в печать 12.11.2019 г.