

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОСНОВАННОЙ НА ГАЗОВОЙ РЕЦИРКУЛЯЦИИ СИСТЕМЫ ФОРМИРОВАНИЯ НА ПЛАТФОРМЕ 3D-ПЕЧАТИ СЛОЕВ ИЗ РАЗЛИЧНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ ДЛЯ ИХ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ

А. Ф. Ильющенко¹, А. И. Лецко¹, О. И. Карпович²,
Е. О. Вишнеvский², О. О. Кузнечик¹, Т. А. Николайчук¹

¹Институт порошковой металлургии имени академика О. В. Романа,
г. Минск, Беларусь

²Белорусский государственный технологический университет,
г. Минск, Беларусь

В работе приведена разработанная на основе анализа конструкций устройств, использующих формирование порошкового слоя из разных материалов схемы, методика проектирования системы, позволяющей осуществлять совмещение порошковых слоев. Основу разработанной методики составляют необходимые для проектирования и конструирования функциональные схемы селективного лазерного сплавления порошков двух металлических сплавов, 3D-печати методом SLM. Отмечается, что применение различных порошковых слоев при трехмерной печати позволит добиться композитных структур в изделиях, получаемых методом селективного лазерного сплавления. Кроме того, предложено устройство подачи порошка, позволяющего реализовать метод совмещения порошков из различных материалов для их дальнейшей термообработки методом селективного лазерного сплавления.

Введение. В настоящее время [1–4] в аддитивном производстве, использующем технологии трехмерной цифровой (3D) печати методом послойного селективного отверждения расплавленной полимерной, к которой относятся методы FDM и FFF, достаточно широко используются 3D-принтеры, конструкционные возможности которых позволяют получать изделия из различных, как минимум двух, полимеров. Однако аналогичных имеющих широкое распространение 3D-принтеров для получения изделий из порошков разных (хотя бы двух) металлических сплавов с помощью 3D-печати методом селективного лазерного сплавления (Selective Laser Melting (SLM)) пока нет в аддитивном производстве. Проектирование и изготовление таких перспективных 3D-принтеров позволило бы на промышленном уровне

получать изделия из композиционных и конструкционных материалов имеющих по меньшей мере биметаллическую слоистую или каркасную структуру. Такие структуры позволяют придавать получаемым 3D-печатью изделиям уникальные градиентно-направленные физико-механические свойства, способствующие приданию им новых функциональных возможностей. Поэтому проектирование и создание методами SLM 3D-принтеров с такими возможностями для 3D-печати – актуальная задача для аддитивного производства. Ее решению может способствовать разработка методики проектирования, основанной на газовой рециркуляции системы формирования на платформе 3D-печати слоев из различных металлических порошков, с целью их селективного лазерного сплавления для металлургического 3D-принтера ProX DMP 300. Разработка такой методики и является целью данной работы.

Анализ 3D-печати металлическими порошками методом SLM и проектирование технологической схемы послойного сплавления порошковых слоев различных металлических сплавов. Известно [1–4], что в основе 3D-печати методом SLM лежит реализация функционально-технологической схемы (рис. 1).

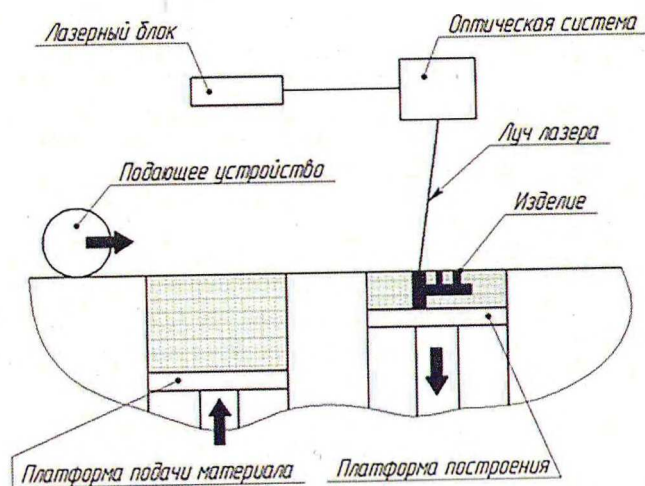


Рис. 1. Функционально-технологическая схема 3D-печати методом SLM

По приведенной на рис. 1 схеме такая послойная 3D-печать происходит согласно разделенной на отдельные слои 3D-модели определенного формата (как правило, STL) изделия или группы изделий. Толщина слоев определяется исходя из фракционного состава металлического порошка и точности позиционирования платформы построения. Алгоритм данной печати следующий.

Сначала (рис. 1) на определенную высоту поднимается платформа подачи металлического порошка и подающее устройство смещает его на платформу построения, формируя порошковый слой заданной толщины.

Затем включается лазерный блок и лазерное излучение с помощью оптической системы, основу которой составляет гальванометрический сканатор F-Theta (φ - θ). Линза попадает на поверхность сформованного на платформе порошкового слоя и начинает избирательно перемещаться по поверхности, сплавляя его частицы.

После завершения процесса сплавления порошкового слоя платформа построения опускается вниз на величину сплавленного порошкового слоя, а платформа подачи порошка, наоборот, поднимается на определенную высоту, и весь этот цикл длится до тех пор, пока не будет напечатано изделие.

Вышеприведенные функционально-технологическая схема 3D-печати методом SLM и алгоритм такой печати реализованы в конструкции 3D-принтера ProX DMP 300 (рис. 2). Отличительной особенностью этой модели 3D-принтера от других аналогичных является то, что в нем, кроме автоматической процедуры сброса неизрасходованного порошка в бункер с виброситом, существует автоматическая процедура его рециркуляционного возврата газовым потоком в бункер с металлическим порошком. Технические характеристики 3D-принтера приведены в таблице.

Технические характеристики 3D-принтера ProX DMP 300

Показатель	Значение
Регулируемая мощность лазерного излучения	0–500 Вт
Длина волны лазерного излучения	1070 ± 10 нм
Предельные размеры рабочей зоны 3D-печати	250×250×300 мм
Фракционный состав металлических порошков	Не более 100 мкм
Рекомендуемая форма частиц	0,8–1,0 FF



Рис. 2. Внешний вид 3D-принтера ProX DMP 300

Если бы конструкция приведенного на рис. 2 3D-принтера позволяла осуществлять 3D-печать методом SLM хотя бы двумя различными металлическими сплавами, то этот процесс можно было бы осуществить, как показано на рис. 3.

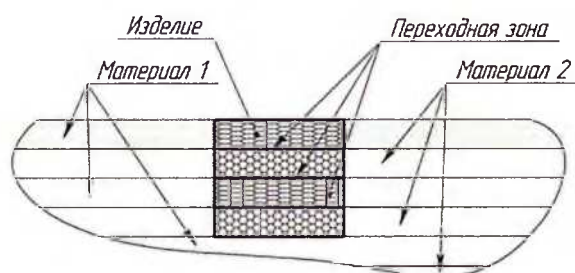


Рис. 3. Схема селективного лазерного сплавления порошков двух металлических сплавов

На основе вышеизложенного материала, если 3D-принтер ProX DMP 300 взять за основу для проектирования с целью обеспечения ему технической возможности 3D-печати порошками различных металлических сплавов, то эта задача первоначально будет сведена к разработке методики проектирования, основанной на газовой рециркуляции системы формирования на платформе 3D-печати слоев из различных металлических порошков для их селективного лазерного сплавления.

Проектирование возможных условий и выбор схемы формирования на платформе построения порошковых слоев различных металлических сплавов. Условно все конструкции технологических камер в металлургических 3D-принтерах можно классифицировать по способу формирования порошкового слоя и способу перемещения лазерного излучения в требуемую точку.

Самой ранней конструкцией, осуществляющей формирование порошкового слоя, является так называемая картриджная система. В данном исполнении формирование слоя происходит путем механического переноса приподнятого слоя порошка из бункера подачи в область построения с помощью специального устройства. Подающее устройство обычно представляет собой ролик или скребок. В такой схеме движение порошка осуществляется снизу вверх (рис. 4).

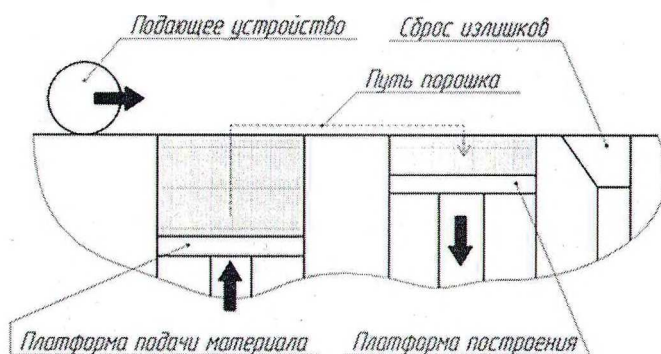


Рис. 4. Схема картриджной системы формирования порошкового слоя

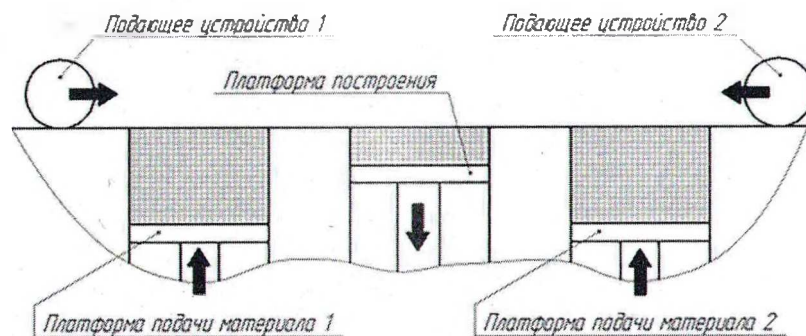


Рис. 5. Схема картриджной системы формирования порошкового слоя из разных материалов в плоскости

В целом данная система (рис. 4) в исходном виде не позволяет осуществлять последовательное формирование порошковых слоев из разных материалов. Однако некоторые модификации могут решить данную задачу. Пример такой схемы представлен на рис. 5. В данной схеме уже имеется возможность формирования слоистой структуры изделия, однако при расположении бункеров подачи в одной плоскости возникает проблема сброса излишнего порошка.

Если в классической схеме (рис. 4) подающее устройство могло продвинуть излишний материал в бункер сброса, расположенный за платформой построения, то в предложенной схеме (рис. 5) такая возможность отсутствует. Для решения данной проблемы без изменения компоновки можно осуществлять сброс материала в сторону, но для реализации данной идеи необходимо оснастить устройство поворотным механизмом. Усложнение конструкции устройства подачи порошка позволяет осуществить приемлемое функционирование данной системы, однако проблему сброса излишков материала можно решить путем изменения компоновки системы, как показано на рис. 6.

Схема позволяет наглядно рассмотреть процесс с применением двух материалов с учетом того, что реализация такой системы усложнит конструкцию технологической камеры и увеличит и без того крупногабаритное рабочее пространство. Кроме того,

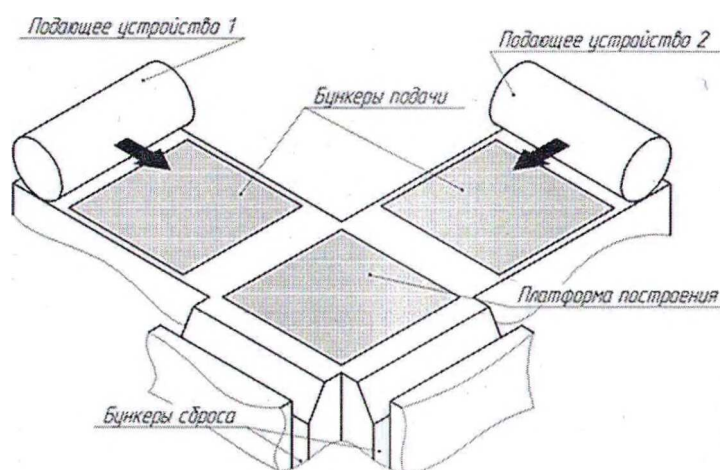


Рис. 6. Схема картриджной системы совмещения порошковых слоев

как и в случае с предыдущей схемой (рис. 4), возникают вопросы с компоновкой функциональных элементов, таких как привод подающего устройства, расположение шлюзов доступа и увеличения рабочего пространства, что в целом снижает надежность системы и повышает сложность ее ремонта и обслуживания.

Реализация многокомпонентной 3D-печати с применением картриджной системы формирования порошкового слоя может быть реализуемой технической задачей, однако имеет ряд нежелательных особенностей. По этой причине при проектировании необходимо рассмотреть другой принципиальный подход к формированию совмещенного порошкового слоя. Такие системы предполагают формирование слоя путем высыпания порошкового материала из подвижного устройства раздатчика (бункерные системы). Схема такой системы подачи показана на рис. 7.

В бункерной системе (рис. 7) движение порошка происходит под действием сил тяжести, следовательно, при формировании порошкового слоя необходимо учитывать сыпучесть материала, так как в процессах выборочного лазерного сплавления применяются порошки тонких фракций, границы которых, как правило, лежат в пределах 15–100 мкм. Несмотря на округлую форму

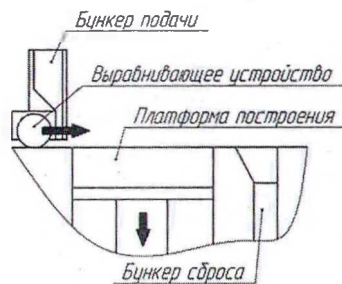


Рис. 7. Схема бункерной системы формирования порошкового слоя

частиц, обеспечивающую лучшую, чем у порошков аналогичной фракции, но имеющих частицы другой формы, текучесть, в 3D-принтере ProX DMP 300 используются пьезоэлектрические вибраторы для прохождения порошка не только через встроенное в его конструкцию вибросито, но и через соединенный с газопроводом щелевой транспортировочный канал сброса газовым потоком частиц в бункер подачи порошка (рис. 1). Также стоит заметить, что модификация бункерной системы (вариант которой показан на рис. 6) позволит формировать слои из разных материалов проще, чем в схеме, представленной на рис. 7.

Как видно из рис. 7, реализация задачи формирования слоев из различных материалов не приводит к значительному усложнению конструкции технологической камеры (в сравнении с картриджными системами (см. рис. 3–5)).

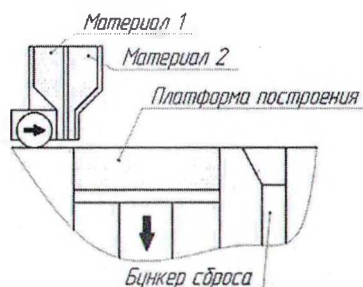


Рис. 7. Схема бункерной системы формирования порошкового слоя из разных материалов

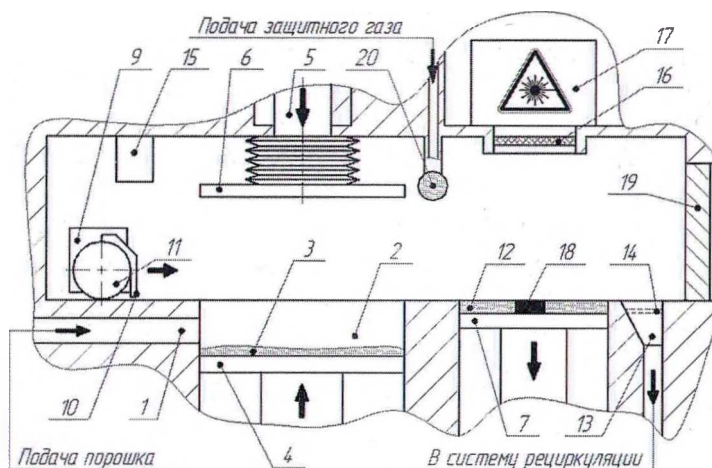


Рис. 8. Функциональная схема технологической камеры 3D-печати принтера ProX DMP 300

Следовательно, применение такой системы предпочтительнее за счет малогабаритности устройства, при этом она характеризуется большей сложностью (относительно картриджных систем). Однако в рамках работы производится модификация уже имеющейся модели металлургического 3D-принтера ProX DMP 300, который оснащен картриджной системой формирования слоя. Схема работы 3D-принтера представлена на рис. 8.

Рассматривая схему (рис. 8), можно увидеть, что порошок, транспортируемый потоком защитного газа через шлюз 1, попадает в бункер подачи 2, закрытый крышкой 6. Неравномерный слой порошка 3 выравнивается при помощи подъема платформы подачи 4 и опускающейся при помощи поршня 5 крышки 6. Под некоторым усилием порошковый слой выравнивается, после чего крышка 6 возвращается в исходное положение. Далее платформа построения 7 опускается на высоту, соответствующую высоте слоя печатаемого изделия 8. Перед началом движения подающего устройства 9 платформа подачи 4 поднимается на максимальную высоту, при которой весь ранее сформированный порошок будет подан на платформу построения 7. Подающее

устройство состоит из двух функциональных узлов: скребка 10 и ролика 11. Скребок предназначен для первоначальной подачи порошка и формирования порошкового слоя 12 на платформе построения 7. При обратном движении каретки подающего устройства ролик 11 служит для более точного выравнивания сформированного слоя порошка.

Стоит заметить, что при применении ролика небольшие излишки сформированного слоя порошка 12 на платформе построения 7 попадут обратно в бункер для подачи порошка 2, что при печати разными материалами приведет к смешиванию применяемых материалов. Для предотвращения перемешивания материалов необходимо увеличить зазор между роликом и плоскостью порошка, что возможно, так как в конструкции подающего устройства предусмотрен механизм калибровки ролика и скребка

После прохождения подающим устройством 11 края платформы построения 7 оно продолжает движение до шлюза сброса лишнего порошка 13. Излишний порошок, попадая в данный шлюз, отправляется в систему рециркуляции. Для предотвращения попадания в данную систему крупных элементов, которые могут привести к ее поломке, перед шлюзом 13 установлена решетка 14. После возвращения подающего устройства 11 в исходное положение система автоматического контроля технологического процесса считывает показания с блока датчиков 15 показатели температуры и содержания кислорода в камере. При удовлетворительных значениях необходимых параметров система, предварительно открыв защитный кожух 16, активирует блок лазерного сканирования 17. Лазерный луч, попадая на порошковый слой 12, сплавляет его, формируя профиль, соответствующий слою выращиваемого изделия 18. После завершения сканирования слоя изделия лазерный блок 17 отключается и защитный кожух 16 возвращается в исходное положение.

Вышеописанный алгоритм циклически выполняется до полного построения изделия. Также для доступа в технологическую камеру, кроме лобовой крышки, предусмотрен дополнительный боковой шлюз 19 – обеспечивает оперативный доступ в камеру.

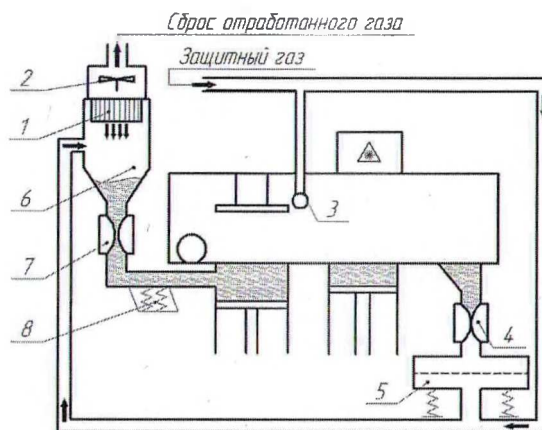


Рис. 9. Схема исходной системы газовой-порошковой подачи

Наполнение технологической камеры защитным газом осуществляется с помощью газоразбрызгивающего устройства 20.

Для полного понимания того, как в бункер подачи попадают различные требуемые порошки, необходимо рассмотреть принцип работы системы газовой-порошковой подачи и рециркуляции. Данная система изображена на рис. 9.

Защитный газ (аргон или азот), попадая в систему, нагнетается в газоразбрызгивающее устройство 3 и зону транспортирования порошка из вибросита 5. Подача отработанного порошка из технологической камеры в вибросите регулируется с помощью пневматического клапана 4. После открытия клапана порошок просеивается через сито и попадает в газовый транспортный поток, который переносит его в бункер 6. Дальнейшему переносу порошка в зону сброса защитного газа препятствует набор фильтров грубой и тонкой очистки. Для точной управляемости процессом транспортирования порошка газом необходимо обеспечивать постоянный отток газа. С целью интенсификации вывода газа из системы за системой фильтров устанавливается вентилятор 2. Для возвращения порошка в бункер подачи открывается пневматический клапан 7 – порошок попадает в канал, где транспортируется не только газовым потоком, но и под воздей-

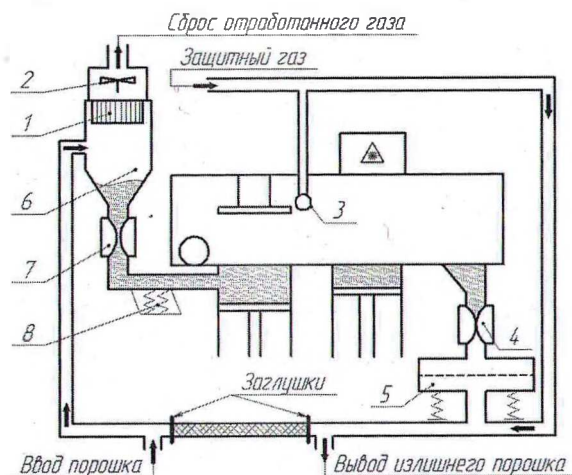


Рис. 10. Схема модифицированной системы газопошковой подачи

ствием вибрации, создаваемой устройством 8. Это устройство предусмотрено для облегчения транспортирования больших объемов порошка, однако при его малом количестве для полной транспортировки достаточно применения только газовой струи. Добиться последовательного формирования слоев из различных материалов можно при помощи некоторой модификации (рис. 10). В систему могут быть поочередно введены дозированные порции необходимого порошка.

Как видно из схемы на рис. 10, в газопровод «врезается» канал системы подачи порошка, по которому подается необходимый тип порошка при помощи потока защитного газа. Такая модификация с точки зрения технической реализации не требует изменения конструкции имеющейся установки DMP ProX 300, так как транспортировка порошка проводится по эластичным гофрированным патрубкам. Кроме того, для вывода излишков порошка, попадающих в систему по завершении формирования слоя, предусмотрен канал для вывода, через который излишний порошок будет попадать в устройство сортировки. Также предусмотрено устройство подачи, которое представляет собой модуль с емкостями для используемых порошков, осуществля-

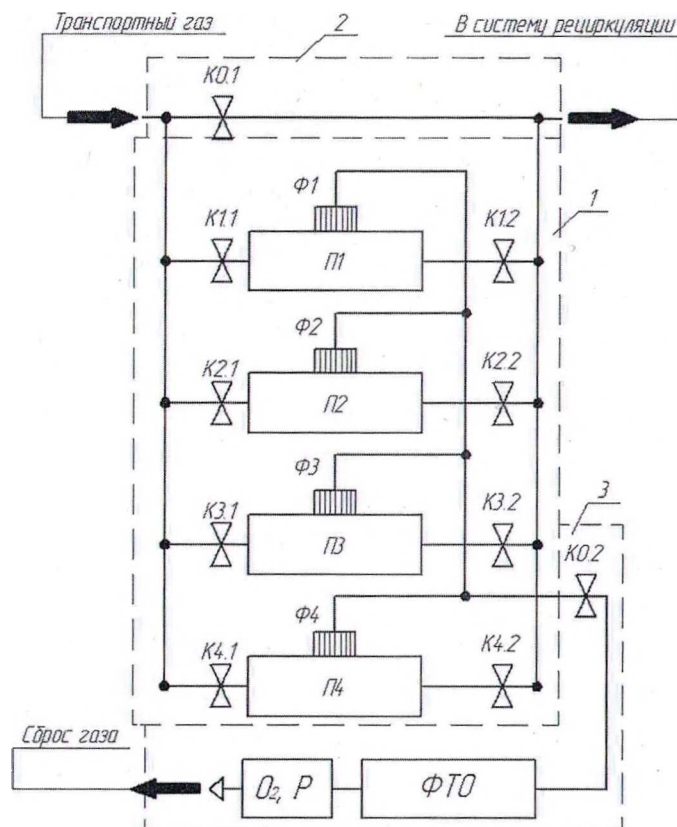


Рис. 11. Функциональная схема системы выбора порошка необходимого сплава и его рециркуляционной подачи на платформу 3D-печати: 1 – система подачи; 2 – система продувки; 3 – система дегазации

ющий их поочередную подачу по одному каналу, который подключается в систему газопошковой подачи по эластичной гофрированной трубке. Его схема представлена на рис. 11.

Проектируемая согласно представленной на рис. 11 схемы система подачи порошка на платформу построения имеет четыре емкости с порошками, обозначенные П1, П2, П3, П4 соответственно. Количество емкостей может варьироваться и в перспективе может быть увеличено в силу повторяемости элементов

системы. Благодаря этому после проектирования и изготовления такой системы, а также встраивания ее в 3D-принтер ProX DMP 300 последний сможет на практике реализовать послойную 3D-печать методом SLM порошками как минимум четырех различных металлических сплавов.

Алгоритм формирования с помощью газовой рециркуляции на платформе 3D-печати порошковых слоев из различных металлических сплавов. Алгоритм формирования на платформе 3D-печати порошковых слоев из различных металлических сплавов (как минимум четырех) с помощью системы, в конструктивном отношении соответствующей функциональной схеме, которая представлена на рис. 11, определяется тремя следующими режимами работы: дегазации, 3D-печати и продувания. Эти режимы обеспечиваются за счет перевода клапанов в определенные положения.

Режим дегазации является подготовительным шагом перед началом процесса 3D-печати. Так как загрузка порошка проводится механически (посредством засыпки порошка через воронку), следовательно, в емкость попадает воздух. Наличие кислорода при процессе выборочного лазерного сплавления недопустимо и в некоторых случаях даже может привести к пожару. Это говорит о необходимости дегазирования емкости с только что загруженным порошком. В данном случае под термином «дегазация» понимается не полное удаление газа из емкости, а вытеснение кислорода воздуха при помощи защитного газа.

Для реализации режима дегазации на соответствующую емкость с порошком необходимо подать поток защитного газа. Приведем пример с емкостью *III*: для этого необходимо открыть клапаны *K1.1* и *K0.2*. При открытии клапана *K1.1* поток газа проходит через емкость *III* и попадает в секцию сброса газа. Попаданию порошка в данную часть системы препятствует система фильтров (в нашем случае фильтр *Φ1*). При прокачке защитного газа через емкость с порошком он вытесняет собой кислород, затем с потоком выбрасывается в атмосферу через специальное устройство. Для определения концентрации кислорода в выходящем потоке газа перед устройством сброса установлен набор

датчиков. После того, как концентрация кислорода опустится ниже заданного значения, процесс дегазации завершается и клапаны возвращаются в исходное состояние.

Для подачи соответствующего порошка открывается последовательная пара клапанов, например, для подачи порошка из емкости *ПЗ* необходимо открыть клапаны *КЗ.1* и *КЗ.2*. После подачи необходимого количества порошка, которое нормируется временем открытия при соответствующем давлении и расходе газа, клапаны закрываются. Таким образом, устройство позволяет вводить различные виды порошков в систему газовой-порошковой подачи в любом заданном порядке и пропорциях, что в полной мере соответствует поставленной задаче формирования слоев из различных материалов.

Режим продувания может устанавливаться в рабочем пространстве между замыкающими клапанами (*К1.2*, *К2.2* и так далее) и емкостью, в которой скапливается остаточный порошок. Остаточный порошок при работе в режиме 3D-печати никак не влияет на технологический процесс. Однако в случае замены типа порошка перемешивание нового материала со старым нежелательно – нужно удалить остатки старого порошка. Решения этой задачи конечно можно добиться путем разборки устройства (что предусмотрено его конструкцией), однако является трудозатратным и далеко не самым практичным решением. Для решения данной задачи был предусмотрен режим продува. При работе этого режима открывается клапан *К0.1* вместе с замыкающим клапаном соответствующей емкости (на примере емкости *П2* будет открыт клапан *К2.2*). В таком положении через систему проходит поток газа, который затягивает за собой накопленный порошок и уносит его в систему газовой-порошковой подачи 3D-принтера. Также уместно открытие только одного клапана *К0.1* для продувки системы.

Стоит отметить, что режим продува можно применять при необходимости замены материала, а также при наличии пустых емкостей. Такой режим позволит проводить оперативную грубую очистку системы и будет уместен при замене исходного порошка на такой, в примеси с которым он будет образовывать

смачиваемую структуру и, следовательно, не окажет существенного влияния на комплекс физико-механических характеристик получаемого изделия.

Выводы

1. Разработана методика проектирования, на основании которой может быть сконструирована и изготовлена основанная на газовой рециркуляции система формирования на платформе 3D-печати слоев из различных металлических порошков для их селективного лазерного сплавления.

2. Основу разработанной методики составляют необходимые для проектирования и конструирования функциональные схемы селективного лазерного сплавления порошков двух металлических сплавов, 3D-печати методом SLM, выбора и подачи на эту платформу порошка необходимого сплава с помощью газовой рециркуляции.

3. Разработанная методика позволяет спроектировать основанную на газовой рециркуляции систему формирования на платформе 3D-печати слоев из различных металлических порошков для их селективного лазерного сплавления на платформе построения 3D-принтера ProX DMP 300, а также имеющих аналогичное с ним конструктивное сходство.

Список использованных источников

1. Зленко, М. А. Аддитивные технологии в машиностроении: пособие для инженеров / М. А. Зленко, М. В. Нагайцев, В. М. Довбыш. – М.: ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015. – 220 с.
2. Шишковский, И. В. Лазерный синтез функциональных мезоструктур и объемных изделий / И. В. Шишковский. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009 – 340 с.
3. Ильющенко, А. Ф. Аддитивные технологии и порошковая металлургия / А. Ф. Ильющенко; Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т порошковой металлургии им. акад. О. В. Романа. – Минск: Медисонт, 2019. – 260 с.
4. Вайнерман, А. Е. Плазменная наплавка металлов: пособие для инженеров / А. Е. Вайнерман; под ред. М. Х. Шоршорова. – М.: Машиностроение, 1969 – 192 с.
5. Кривилев, М. Д. Управление лазерным спеканием металлических порошковых смесей / М. Д. Кривилев // Управление большими системами. – 2015. – 322 с.