УДК 621.791.9

СПОСОБЫ ПОСЛОЙНОГО СИНТЕЗА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

Д.Д. КАКОРИН, магистрант, А.Ю. ЛАВРЕНТЬЕВ, к.т.н.

Тверской государственный технический университет,
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22, e-mail: lavr_ay@mail.ru

© Какорин Д.Д., Лаврентьев А.Ю., 2021

В статье описаны наиболее широко применяемые способы послойного синтеза металлических деталей. Рассмотрена технология послойного синтеза с помощью электродуговой наплавки проволочной присадкой. Показаны возможности электронно-лучевого и лазерного послойного синтеза изделия. Приводятся сравнительные характеристики различных способов получения деталей послойной наплавкой. Обосновано, что применение проволочных присадок в качестве исходного материала для серийного изготовления деталей в производстве обеспечит снижение себестоимости изделия, несмотря на необходимость использования механической обработки наиболее точных поверхностей.

Ключевые слова: аддитивные технологии, послойный синтез, наплавка, спекание, металлы.

DOI: 10.46573/2658-5030-2021-24-33

ВВЕДЕНИЕ

Развитие современного производства требует внедрения новых высокопроизводительных и экономичных технологий для производства деталей, моделей и прототипов. Применяемые на производстве технологии получения деталей литьем и обработкой давлением (ковка, штамповка и прессование) отличаются большой трудоемкостью подготовительных работ (например, созданием модельного комплекта при литье деталей), которая может составлять до 80 % времени от производства деталей. В связи с этим их применение при штучном и мелкосерийном производстве, а также при создании моделей и прототипов нецелесообразно.

Известные технологии механической обработки и производства деталей резанием характеризуются меньшими затратами времени на подготовительные работы, однако в их основе лежит нерациональный принцип «вычитания», т.е. поэтапного удаления слоев материала до придания заготовке требуемых формы и размеров, что делает производственный процесс малоэффективным вследствие значительного перерасхода материала и, соответственно, экономически невыгодным [1].

В конце 20-го века постепенно развиваются технологии создания заготовок методом послойного синтеза, которые в дальнейшем дают начало внедрению в науку и производство методов быстрого прототипирования RP (Rapid Prototyping). Технологии послойного выращивания основаны на принципе «добавления», т.е. нанесении слоев одинаковой толщины на исходную подложку (основу) с целью получения объекта, соответствующего заданной конфигурации. Интенсивное изучение и развитие аддитивных технологий обусловлено совершенствованием вычислительной техники и разработкой 3D-моделирования, при помощи которого за короткое время можно создать цифровое описание модели и воспроизвести реальный физический образец.

Возникший в последнее время массовый интерес к аддитивным технологиям, доступность материалов и технологий для проведения исследований привели к

разработке множества способов технической реализации послойного синтеза, постоянному обновлению информации и изменению ее актуальности. Поэтому целью данной работы является анализ современных способов послойного синтеза, определение их достоинств и недостатков, а также выбор наиболее доступного и производительного способа послойного синтеза для проведения научных исследований.

ТЕХНОЛОГИИ ПОСЛОЙНОГО СИНТЕЗА С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ НАПЛАВКИ ПРОВОЛОЧНОГО МАТЕРИАЛА

Наиболее широкое применение технологии послойного синтеза с применением способа электродуговой наплавки с механизированным способом подачи проволоки (Wire and Arc Additive Manufacturing – WAAM) нашли при производстве деталей больших размеров и сложной конфигурации из различных сталей и сплавов [2].

Данный процесс отличается высокой производительностью послойного спекания, доступностью технологий, материалов и относительно невысокой стоимостью оборудования. Однако применение данной технологии при производстве моделей небольших размеров из титановых и алюминиевых сплавов нецелесообразно по причине высокой трудоемкости осуществления технологического процесса и отсутствия на рынке достаточного разнообразия расходных материалов.

Проводятся различные научные исследования на тему усовершенствования технологии электродуговой наплавки проволочного материала. Разработаны такие методы, как наплавка металлическим электродом в среде защитного газа (Gas Metal Arc Welding, GMAW), наплавка вольфрамовым электродом в среде защитного газа (Gas Tungsten Arc Welding, GTAW) и наплавка с применением плазменной дуги (Plasma Arc Welding, PAW) [3].

Данные методы послойной наплавки могут осуществляться способами капельного переноса с замыканием и без замыкания дугового промежутка, а также струйным переносом расплавленного металла.

Технология GMAW (рис. 1) осуществляется с помощью непрерывной автоматической подачи твердого плавящегося электрода в среде защитного инертного газа. По сравнению с WAAM-наплавкой, данный процесс отличается лучшей стабильностью горения дуги, чистотой поверхности наплавленного слоя и возможностью полной автоматизации процесса. В GMAW-процессе также возможно достижение струйного переноса наплавляемого металла, т.е. переноса металла с конца проволоки на поверхность сварочной ванны в виде непрерывной струи мельчайших капель. При таком переносе металла практически не возникает разбрызгивания материала и обеспечивается глубокое проплавление основного материала, благодаря чему повышается связность наплавленных слоев.

Технология GTAW (рис. 2) основана на подогреве расплавляемого и основного материала с помощью электрической дуги между неплавящимся вольфрамовым электродом и подложкой в среде защитного инертного газа. По сравнению с наплавкой плавящимся электродом данная технология обеспечивает более высокое качество поверхности наплавляемого слоя и отсутствие в структуре материала инородных включений, однако производительность процесса значительно снижена, чем при применениии GMAW-технологии, а возможности автоматизации ограничены.

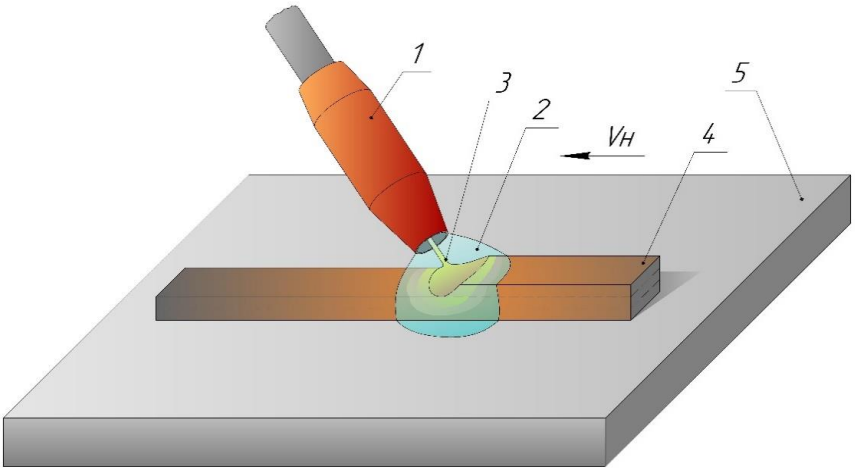

Рис. 1. Схема электродуговой наплавки с механизированной подачей проволочного материала в защитной газовой атмосфере: 1 – сопло горелки; 2 – защитная газовая атмосфера; 3 – присадочная проволока; 4 – построенный образец; 5 – подложка

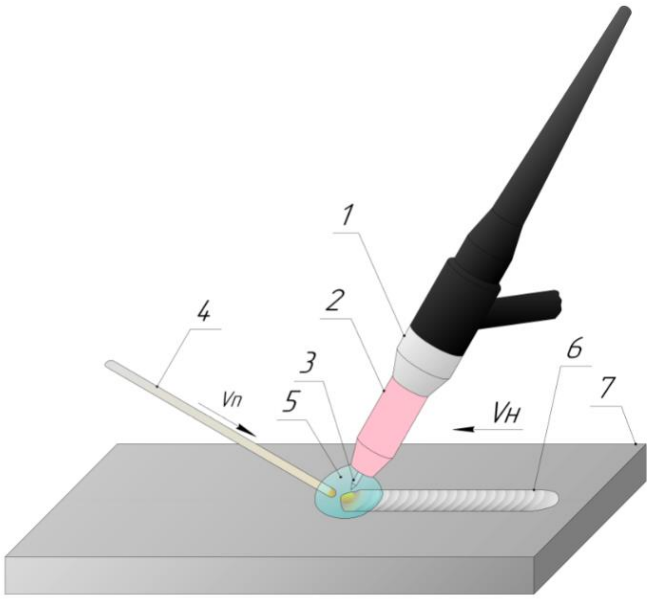

Рис. 2. Схема электродуговой наплавки неплавящимся вольфрамовым электродом: 1 – горелка; 2 – керамическое сопло; 3 – неплавящийся вольфрамовый электрод; 4 – присадочный материал; 5 – защитная газовая атмосфера; 6 – наплавленный слой; 7 – подложка

В процессе послойного синтеза при помощи плазменной наплавки PAW (рис. 3) дуга, в отличие от GTAW-технологии, горит между неплавящимся вольфрамовым электродом и медной горелкой. При этом инертный газ, проходя через сопло горелки, фокусирует электрическую дугу, что приводит к увеличению плотности тепловой энергии, росту тепловложения и температуры дуги, а следовательно, повышает эффективности теплопередачи и увеличивает скорость наплавки.

Технология холодного переноса металла (Cold Metal Transfer – CMT) позволяет расширить область применения аддитивных технологий. Отличительной чертой

процесса является значительно меньшее тепловложение по сравнению с другими процессами WAAM.

Осуществляется CMT-процесс следующим образом: при первоначальном обнаружении короткого замыкания, в момент подачи сварочной проволоки в ванну расплавленного металла, происходит снижение тока до минимально допустимого значения и одновременно осуществляется перенос капли расплавленного материала за счет обратного движения сварочной проволоки.

Таким образом, процесс переноса идет при минимальном значении тока, что существенно снижает количество передаваемой теплоты. Затем проволока снова подается в сварочную ванну и процесс повторяется. С помощью технологии CMT возможно получение тонких слоев наплавляемого материала со скоростью, в 1,5–2 раза превосходящей скорость GMAW-процесса. Процесс является автоматическим и не зависит от скорости наплавки. Недостатком данной технологии является отсутствие прогрева предыдущих слоев заготовки, а следовательно, ограниченное применение в аддитивном производстве изделий.

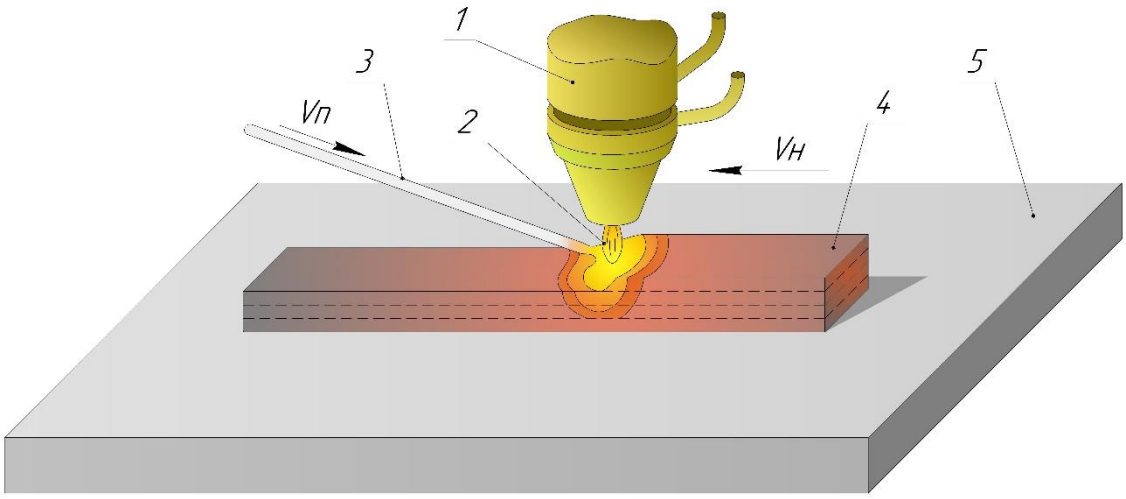

Рис. 3. Схема наплавки с применением плазменной дуги:
1 – плазматрон; 2 – плазменная дуга; 3 – присадочный материал;
4 – построенный образец; 5 – подложка

ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО СПЕКАНИЯ ПРОВОЛОЧНЫХ И ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Технология EBM (Electron Beam Melting) основана на электронно-лучевом спекании металлических порошков. Ванна расплавленного металла создается путем разравнивания порошкового материала, поступающего из бункера, по рабочей зоне, расположенной на рабочем столе. Источником тепловой энергии является электронный луч, который оплавляет слой нанесенного порошка по заданной траектории, создавая тем самым модель слой за слоем. После оплавления и спекания слоя оставшуюся часть порошка удаляют с рабочей зоны, и рабочий стол опускают на величину, равную толщине одного наплавленного слоя. Затем процесс повторяют в той же последовательности до тех пор, пока деталь не будет изготовлена полностью.

Установка для электронно-лучевого синтеза объектов состоит из электронно-лучевой пушки, нити накала, блока астигматической, фокусирующей и отклоняющей

линз, вакуумной камеры, бункера, теплозащитного экрана, рабочей зоны, рабочего стола, рейки и механизма вертикального перемещения рабочего стола.

Данная технология позволяет получать образцы с большей плотностью структуры и увеличивать скорость печати в 3–4 раза по сравнению с технологиями, основанными на лазерном спекании слоев. Полная свобода геометрии форм дает возможность создавать изделия различных конструкций и размеров, уменьшить затраты на последующую механическую обработку [4].

Недостатком данной технологии является высокая стоимость материалов и большое количество вспомогательного оборудования: систем подготовки порошка, его удаления и восстановления, системы подогрева рабочей зоны, устройства откачки воздуха и др.

Система откачки воздуха обеспечивает остаточное давление в вакуумной камере не менее 1 Па на протяжении всего цикла. В процессе плавления в камеру подается гелий и давление повышается до 200 Па. Тем самым создается окружающая среда, благоприятная для сохранения однородности химического состава порошкового материала.

Система подогрева порошкового материала обеспечивает оптимальную температуру перед спеканием, в результате чего получают детали, свободные от остаточных напряжений, и микроструктуру без закалочных включений мартенсита.

Технология EBAM (Electron Beam Additive Manufacturing) осуществляется электронно-лучевым оплавлением проволочного строительного материала. Использование проволоки вместо порошка позволяет значительно ускорить, упростить и удешевить процесс производства деталей, особенно крупных размеров. Однако при этом заметно снижается качество поверхности изделия, что предполагает значительную последующую механическую обработку.

Такая установка (рис. 4) состоит из электронно-лучевой пушки 1, электронного луча 2, расплавляющего проволочный материал 3, системы подачи проволоки 4, построенного образца 5 и подложки 6. Перемещение пушки, рабочего стола и системы подачи проволоки задается на компьютерной модели изделия и обеспечивает формирование изделия заданной формы.

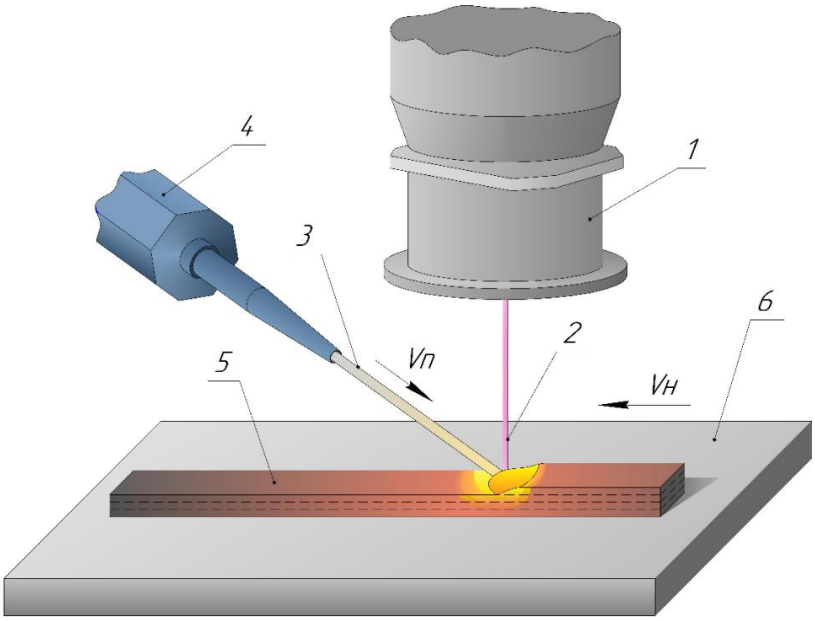

Рис. 4. Схема наплавки по технологии EBAM

ТЕХНОЛОГИИ ЛАЗЕРНОГО СПЕКАНИЯ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Технология селективного лазерного спекания (Selective Laser Sintering – SLS) осуществляется по принципу формирования слоя материала с последующим его сплавлением лазерным лучом, который связывает частицы порошка в соответствии с заданным контуром изделия (рис. 5) [5]. Перед лазерным спеканием слой порошка полностью прогревают до температуры близкой к температуре плавления, облегчая тем самым плавление материала в предыдущем слое и снижая температурные деформации и напряжения. После построения слоя рабочий стол с заготовкой опускается на величину толщины наплавленного слоя и происходит нанесение нового порошкового материала.

Предварительный подогрев заготовки значительно снижает скорость производства изделий, однако несмотря на это данный процесс является одним из наиболее популярных способов аддитивного производства методом спекания порошкового материала и обеспечивает высокую точность и качество поверхности изготовленных деталей.

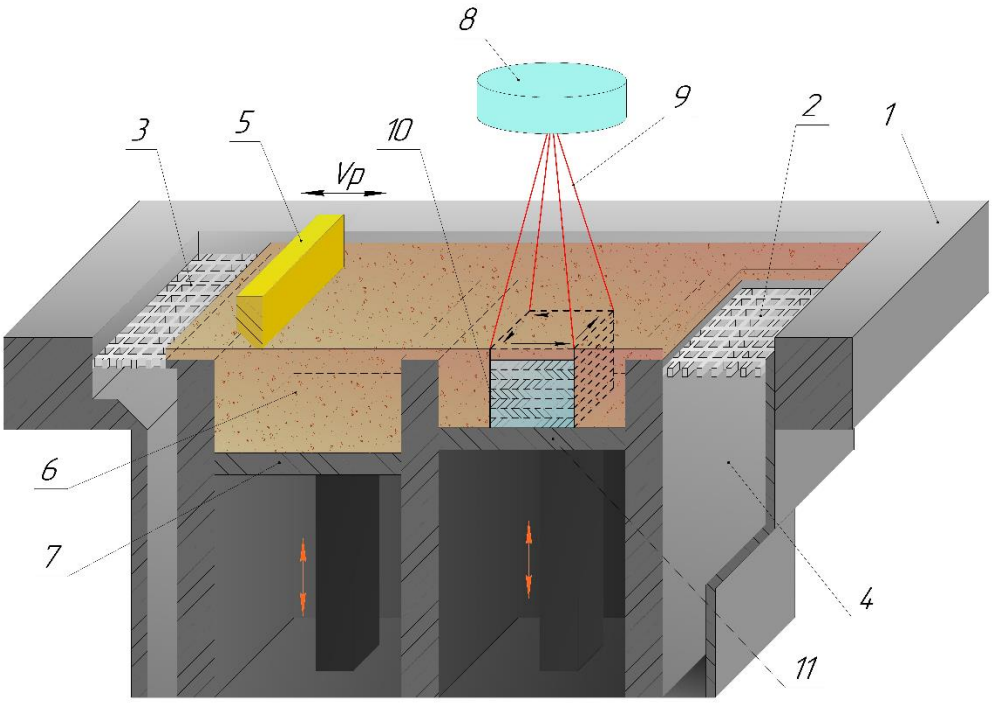

Рис. 5. Схема технологии селективного лазерного спекания SLS

Схема технологии селективного лазерного спекания состоит из рабочего стола 1, на котором расположены ячейки 2, 3, просеивающие излишки порошкового материала в бункер 4, рейки 5, разравнивающей порошковый строительный материал 6, который подается при подъеме подающей платформы 7, фокусирующей линзы 8 и сканирующего лазерного луча 9, с помощью которого происходит расплавление порошкового строительного материала и постепенное построение образца 10. После наплавления нового слоя образец опускается на глубину последующего слоя при помощи подвижной платформы построения 11.

Селективное лазерное плавление порошковых материалов (Selective Laser Melting – SLM) – процесс, аналогичный процессу лазерного сплавления (SLS), но отличающийся плавлением порошка без предварительного подогрева вследствие повышенной мощности лазера (как правило, используются иттербиевые волоконные лазеры), уменьшенного диаметра фокусированного пятна и нанесения более тонкого слоя порошка.

Существенное влияние на широкое распространение SLM-технологии оказывает процесс сфероидизации порошка, который проявляется в формировании отдельно лежащих друг от друга капель материала (эффект Марангони), а также повышенное порообразование по границам капель, вследствие затягивания в каплю окружающих ее частиц порошка под действием сил поверхностного напряжения. Процесс сфероидизации напрямую зависит от поверхностного натяжения и вязкости материала, что ограничивает использование различных металлов и сплавов. Кроме того, невозможность использования таких металлов, как медь, олово и свинец, объясняется наличием кислорода, который, растворяясь в металле, повышает вязкость расплава, ухудшает его растекание и ограничивает смачиваемость нижележащего слоя.

На качество получаемого слоя оказывает влияние как подбор оптимальной зависимости параметров процесса – мощности лазерного излучения и скорости сканирования, так и появление внутренних напряжений и деформация изделия, которые зависят от скорости нагрева и охлаждения, коэффициента теплового расширения материала, а также структурно-фазовых превращений в металле [6]. Снизить негативное влияние напряжений и деформаций можно применением нагревательных элементов, устанавливаемых внутри заготовки и вокруг подложки, и проведением послеоперационного отжига. Предварительный подогрев порошкового материала позволяет уменьшить степень окисления металла, удаляя избыток влаги.

Изделия, полученные методом селективного лазерного плавления, характеризуются анизотропией свойств, повышенной прочностью и нередко пониженной пластичностью вследствие наличия остаточных напряжений. Прочность получаемых изделий обусловлена мелкозернистой структурой материала, образующейся вследствие высокой скорости охлаждения.

Высокая скорость охлаждения приводит к увеличению числа зародышей кристаллов и уменьшению их критического размера. Зародышами кристаллов, как правило, являются различные неметаллические включения, пузырьки газов или частицы ограниченной растворимости, выделившиеся из расплава. С уменьшением размера зерна увеличивается прочность вследствие развитой сети границ зерен, которая препятствует движению дислокаций.

Технология прямого нанесения материала (Direct Metal Deposition – DMD), схожая с ранее рассмотренными процессами, использует промышленный лазерный луч под роботизированным управлением, сканирующий плоскость заготовки трехмерной детали, спекая и расплавляя порошковый материал, который вместе с инертным газом подается несколькими форсунками непосредственно на обрабатывающую головку. Данная технология позволяет получать изделия с геометрией повышенной сложности, однако значительно повышается стоимость оборудования и усложняется процесс наладки роботизированного комплекса (рис. 6) [7].

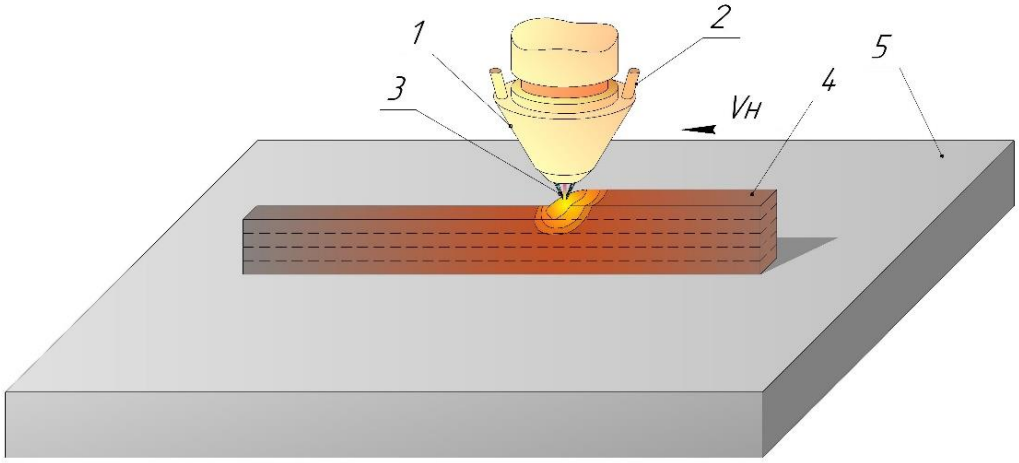

Рис. 6. Схема технологии прямого нанесения порошкового материала DMD:
1 – обрабатывающая головка; 2 – отверстие для подачи порошкового строительного материала; 3 – прямая подача порошкового материала; 4 – построенный образец; 5 – подложка

Технология лазерного сплавления порошков (Laser Engineered Net Shaping – LENS) основана на расплавлении лазерным лучом металлического порошка, который подается коаксиально через лазерную головку. Порошок распределяется по лазерной головке по окружности под действием силы тяжести или при использовании инертного газа. Лазерный луч создает небольшую ванну расплава на подложке или ранее созданном слое, куда подают расплавленный порошок, наращивая тем самым новый слой изделия. Таким методом могут создаваться изделия значительных размеров, но с относительно низкой точностью и невысоким качеством поверхности.

Существуют методы непрямого (Indirect Metal Laser Sintering – IMLS) и прямого (Direct Metal Laser Sintering – DMLS) лазерного спекания, основанные на сплавлении связанного по конфигурации изделия порошка.

В IMLS-процессе в качестве связующего выступает полимер, который также обеспечивает необходимую прочность для дальнейшей термической обработки. Во время термообработки полимер выводится и происходит спекание каркаса изделия и окончательная пропитка пористого каркаса связующим металлом. Главным недостатком процесса IMLS является сложность регулировки содержания тугоплавкой фазы, так как ее процентное содержание определяется насыпной плотностью порошка, которая в несколько раз меньше теоретической плотности материала порошка.

Основное отличие DMLS-процесса от непрямого лазерного спекания заключается в использовании сплавов или легкоплавких соединений вместо полимера, а также в отсутствии операции пропитки. В процессе прямого лазерного спекания изделие формируется в результате затекания расплава-связки в пространство между частицами основного металла под действием капиллярных сил. Порошок-связующее имеет меньший размер частиц по сравнению с материалом основы, благодаря чему увеличивается насыпная плотность порошковой смеси и ускоряется процесс образования расплава.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования были изучены наиболее распространенные способы послойного синтеза металлических изделий, проведен анализ технологий, выявлены их основные достоинства и недостатки. В настоящее время наиболее широко распростра-

нены электронно-лучевые и лазерные технологии с использованием порошковых материалов, которые позволяют получать точные изделия сложных конфигураций.

Однако порошковый строительный материал значительно усложняет процесс и повышает стоимость производимых изделий вследствие необходимости использования специального дорогостоящего оборудования, рабочей камеры, а также установки для создания вакуума.

Кроме того, стоимость порошковых материалов превышает стоимость проволочных присадочных материалов как минимум в 10 раз. В связи с этим широкое распространение получили способы электродуговой наплавки проволочного материала (за счет относительной простоты процесса и применяемого оборудования).

Отличительными чертами электродуговой наплавки проволочным материалом являются высокая производительность, сравнительно высокое качество поверхности наплавляемого слоя и отсутствие несплавлений в структуре материала и межслойной зоне. Механическая обработка рабочих и присоединительных поверхностей обеспечивает требуемый эксплуатационный уровень точности размеров и формы поверхности.

Для внедрения технологии послойного синтеза металлических заготовок с использованием послойной электродуговой наплавки в защитном газе с присадочным материалом в виде проволоки необходимо решить ряд задач, в частности, исследовать изменение структуры и свойств различных металлических сплавов при многократном термическом цикле. Картина распределения внутренних напряжений в изделии также заслуживает внимания. Особый интерес вызывают металлургические процессы при многослойной наплавке, управление которыми обеспечит получение упрочняющих фаз в металле изделия с учетом эксплуатационных воздействий.

ЛИТЕРАТУРА

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

2. Жаткин С.С., Никитин К.В., Деев В.Б., Панкратов С.С., Дунаев Д.А. Применение электродуговой наплавки для создания трехмерных объектов из стали // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2020. Т. 63. № 6. С. 443–450.

3. Осколков А.А., Матвеев Е.В., Безукладников И.И., Трушников Д.Н., Кротова Е.Л. Передовые технологии аддитивного производства металлических изделий // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение*. 2018. Т. 20. № 3. С. 90–104.

4. Залесский В.Г., Поболь И.Л., Бакиновский А.А., Губко А.Д. Получение металлических изделий с применением электронно-лучевых аддитивных технологий // *Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук.* 2018. Т. 63. №. 2. С. 169–180.

5. Килина П.Н., Морозов Е.А., Ханов А.М., Сиротенко Л.Д. Исследование режимов селективного лазерного плавления металлических порошков // *Современные проблемы науки и образования*. 2014. № 6. URL: http://science-education.ru /ru/article/view?id=16035 (дата обращения: 28.05.2021).

6. Смуров И.Ю., Жирнов И.В., Дубенская М.А. Оптический мониторинг селективного лазерного плавления: влияние скорости сканирования и мощности лазерного излучения на геометрию ванны расплава на поверхности слоя металлического порошка INOX 316 L // *Вестник МГТУ «Станкин»*. 2015. № 3. С. 52–56.

7. Чемодуров А.Н. Применение аддитивных технологий в производстве изделий машиностроения // *Известия Тульского государственного университета. Серия: «Технические науки»*. 2016. Вып. 8. Ч. 2. С. 210–217.

Для цитирования: Какорин Д.Д., Лаврентьев А.Ю. Способы послойного синтеза металлических изделий // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2021. № 3 (11). С. 24–33.

METHODS OF LAYER-BY-LAYER SYNTHESIS OF METAL PRODUCTS

D.D. Kakorin, undergraduate, A.Yu. Lavrentev, Cand. Sc.

Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb., 170026, Tver,
Russian Federation, e-mail: lavr_ay@mail.ru

The article describes the most widely used methods of layer-by-layer synthesis of metal parts. The technology of layer-by-layer synthesis using electric arc surfacing with a wire additive is considered. The possibilities of electron-beam and laser layer-by-layer synthesis of the product are shown. Comparative characteristics of various methods of producing parts by layer-by-layer surfacing are given. The use of wire additives as a starting material for the serial production of parts in production is recommended. Such technologies will reduce the cost of the product despite the need to use mechanical processing of the most precise surfaces.

Keywords: additive technologies, layer-by-layer synthesis, surfacing, sintering of metals.

REFERENCES

1. Dovbysh V.M., Zabednov P.V., Zlenko M.A. Additive technologies and metal products. *Bibliotechka liteyshchika*. 2014. No 9, pp. 14–71. (In Russian).

2. Zhatkin S.S., Nikitin K.V., Deev V.B., Pankratov S.S., Dunaev D.A. The use of electric arc surfacing for the creation of three-dimensional objects from steel. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya.* 2020. V. 63. No 6, pp. 443–450. (In Russian).

3. Oskolkov A.A., Matveev E.V., Bezukladnikov I.I., Trushnikov D.N., Krotova E.L. Advanced technologies for the additive production of metal products. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatelskogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroyeniye, materialovedeniye.* 2018. V. 20. No 3, pp. 90–104. (In Russian).

4. Zalessky V.G., Pobol I.L., Bakinovsky A.A., Gubko A.D. Obtaining metal products using electron-beam additive technologies. *Izvestiya Natsionalnoy akademii nauk Belarusi. Seriya fiziko-tekhnicheskikh nauk.* 2018. V. 63. No 2, pp. 169–180. (In Russian).

5. Kilina P.N., Morozov E.A., Khanov A.M., Sirotenko L.D. Investigation of modes of selective laser melting of metal powders. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya.* 2014. No 6. URL: http://science-education.ru/ru/article/view?id=16035 (date accessed: 28.05.2021). (In Russian).

6. Smurov I.Yu., Zhirnov I.V., Dubenskaya M.A. Optical monitoring of selective laser melting: the effect of scanning speed and laser radiation power on the geometry of the melt pool on the surface of a layer of INOX 316 L metal powder *Vestnik MGTU Stankin*. 2015. No 3, pp. 52–56. (In Russian).

7. Chemodurov A.N. Application of additive technologies in the manufacture of mechanical engineering products. *Izvestiya Tulskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya "Tekhnicheskiye nauki".* 2016. Is. 8., Part 2, pp. 210–217. (In Russian).

Поступила в редакцию/received: 24.05.2021; после рецензирования/revised: 17.06.2021;
принята/accepted: 21.06.2021