

## МЕТОДЫ 3D-ПЕЧАТИ МЕТАЛЛАМИ

*Муканов Э.М.*

*Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
Нижний Новгород*

**Ключевые слова:** аддитивное производство, 3D-печать, послойное нанесение металла, лазерное спекание, лазерное сплавление, WAAM, DMD, LBDMD, EBAM, DMLS, SLM.

**Аннотация.** Настоящая работа посвящена использованию технологий аддитивного производства металлических изделий. Рассмотрены основные используемые методы 3D-печати металлами, такие как послойное нанесение металла (WAAM, DMD, LBDMD, EBAM), лазерное спекание (DMLS) и лазерное сплавление (SLM). Выявлены их достоинства и недостатки, приведены таблицы ключевых характеристик данных методов, представлен их сравнительный анализ и сделаны выводы.

## METHODS OF 3D PRINTING WITH METALS

*Mukanov E.M.*

*Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev,  
Nizhny Novgorod*

**Keywords:** additive manufacturing, 3D printing, layer-by-layer metal deposition, laser sintering, laser fusion, WAAM, DMD, LBDMD, EBAM, DMLS, SLM.

**Abstract.** This work is devoted to the use of additive manufacturing technologies for metal products. The main methods used for 3D printing with metals are considered, such as layer-by-layer metal deposition (WAAM, DMD, LBDMD, EBAM), laser sintering (DMLS) and laser fusion (SLM). Their advantages and disadvantages are identified, tables of key characteristics of these methods are given, their comparative analysis is presented and conclusions are drawn.

### **Введение**

В настоящее время научные исследования и открытия в области аддитивных технологий особенно популярны и актуальны. Это объясняется возможностью с их помощью существенно сократить затраты на производство изделий, такие как трудоемкость, используемые ресурсы, а также улучшением механических свойств изготавливаемой продукции: прочности, жесткости, устойчивости к вибрациям и повышенным температурам и пр. Более того, благодаря таким технологиям есть возможность производить детали и приспособления сложной формы и конфигурации, изготовление которых традиционными способами (обработка резанием, давлением) трудно или в принципе невозможно. Использование САПР позволяет полностью автоматизировать процесс аддитивного производства от этапа проектирования до изготовления изделий [1].

В данной статье будет рассмотрено такое направление аддитивного производства, как 3D печать металлами. Основными видами такого направления являются послойное нанесение металла, лазерное спекание и сплавление металла.

### **Методы послойного нанесения металла**

Сегодня наиболее популярными и эффективными технологиями

изготовления изделий из металлов методами послойного нанесения являются следующие: WAAM (GMAW, PAW, CMT), DMD, LBDMD, EBAM [2].

### Технология WAAM

WAAM – Wire Arc Additive Manufacturing (с англ. проволочно-дуговое аддитивное производство) [3]. Это один из видов аддитивных технологий, в основе которого лежит процесс электродуговой сварки в среде защитного газа (MIG/MAG). Схематичное изображение системы WAAM приведено на рисунке 1. WAAM базируется на следующих технологических процессах: GMAW, GTAW, PAW, CMT.

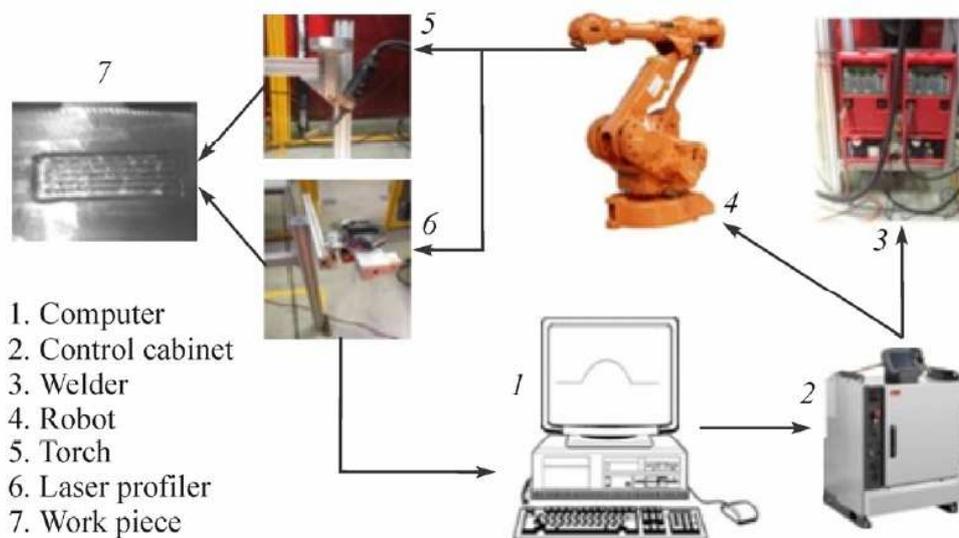


Рис. 1. Схема роботизированной системы WAAM

GMAW – Gas Metal Arc Welding (с англ. газовая дуговая сварка металлом). Это процесс сварки / наплавки металлическим электродом в среде инертного газа (аргона или гелия).

Модифицированным вариантом GMAW является технология CMT – Cold Metal Transfer (с англ. холодный перенос металла), т.е. процесс позволяет осуществлять «холодный» перенос металла при сварке. Технология отличается высокой скоростью осаждения металла и низким потреблением тепла, в отличие от GMAW.

GTAW – Gas Tungsten Arc Welding (с англ. газовая вольфрамовая дуговая сварка). Это процесс дуговой сварки / наплавки вольфрамовым электродом в инертном газе. Дополнительным материалом для образования сварного шва является автоматически подающаяся проволока.

Модифицированным вариантом GTAW является технология PAW – Plasma Arc Welding (с англ. плазменная дуговая сварка). В данной технологии используется специальная фокусирующая насадка, благодаря которой получается более точная, тонкая и длинная электрическая дуга, чем в процессе GTAW-сварки. За счет этого существенно повышается эффективность теплопередачи и увеличивается скорость прохода лазера.

Материалы, используемые в WAAM, зависят от области применения и свойств, требуемых для конечного объекта. Чаще всего применяется низко- и высоколегированные, конструкционные стали. Нередко применяют такие металлы, как титан, алюминий, медь, никель, а также сплавы на их основе.

## Технология DMD и LBDMD

DMD – Direct Metal Deposition (с англ. прямое осаждение металлом) [4]. Это один из видов аддитивного производства, в котором в роли строительного материала выступает металлический порошок, за счет которого происходит наращивание детали. Нагрев производится промышленным лазерным лучом под числовым программным или роботизированным управлением. В целом этапы процесса DMD ничем не отличаются от WAAM. Схема процесса приведена на рисунке 2,а.

Одной из вариаций данного метода является технология LBDMD. Основным отличием этих двух технологий является использование в LBDMD 8-осевого рабочего оборудования, в отличие от 5-осевого в DMD [5]. Это упрощает планирование процесса осаждения для сложных деталей и сокращает время производства. Схема процесса приведена на рисунке 2,б.

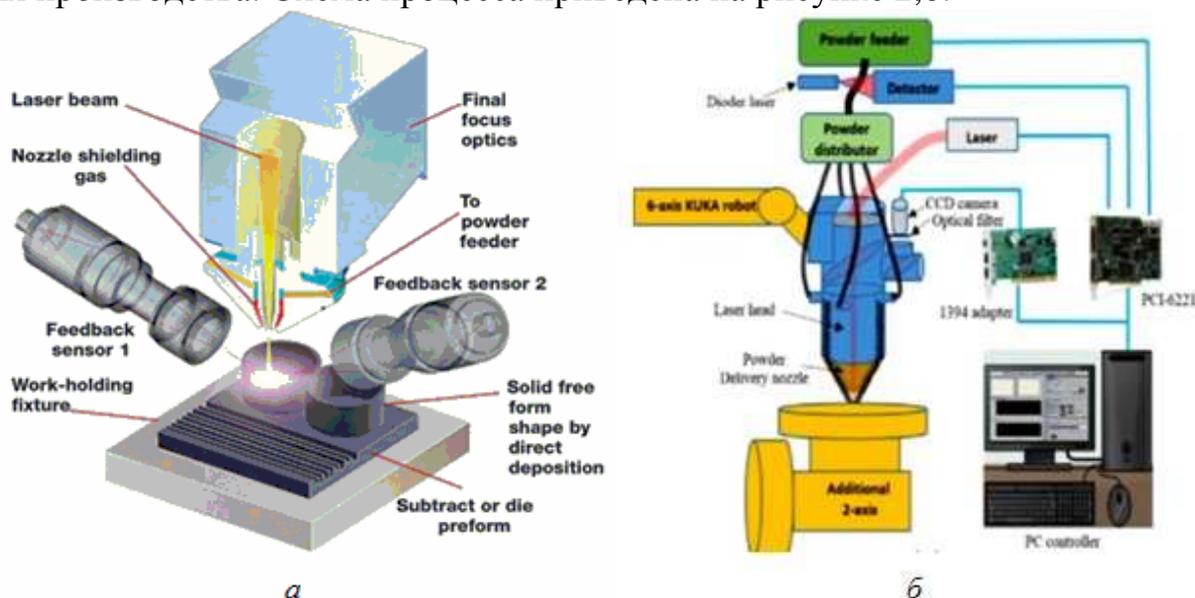


Рис. 2. Схемы процессов: а – DMD; б – LBDMD

## Технология EBAM

EBAM – Electron Beam Additive Manufacturing (с англ. электронно-лучевое производство) [6]. Данный метод основан на электронно-лучевой плавке металлической проволоки. Особенностью является то, что печать осуществляется в жестком вакууме. Это позволяет добиваться высокой плотности и однородности изделия, а также работать с самыми разными металлами и сплавами: титаном, вольфрамом, никелевыми сплавами, нержавеющей сталью, танталом, ниобием и др. Скорость наращивания при этом может достигать до 10 кг/ч [7]. Более того оборудование для печати может быть оснащено сразу несколькими соплами подачи проволоки, что позволяет одновременно и независимо подавать 2 или более различных металлических сплавов в общую сварочную ванну. Это повышает не только производительность, но качество получаемых изделий. Схема процесса приведена на рисунке 3.

## Сравнительная характеристика методов послойного нанесения металла

Основные характеристики методов WAAM, лазерной и электронно-лучевой наплавки приведены в таблицах 1, 2. Достоинствами данных методов являются

кратно меньшие затраты материала и времени на изготовление изделия, возможность построения изделий сложной геометрической формы и определенная гибкость, позволяющая быстро перестраиваться под новые задачи без изменения всего цикла производства. Основным преимуществом методов DMD, LBDMD перед методами WAAM является высокая производительность и точность печати (в некоторых случаях не требуется постобработка). Недостатком является высокая стоимость металлических порошков по сравнению с проволокой.

### Методы лазерного спекания и сплавления металла

В этом разделе речь пойдет о таких методах, как DMLS и SLM.

### Технология DMLS

DMLS – Direct Metal Laser Sintering (с англ. прямое лазерное спекание металла). Это разновидность аддитивного производства из металлов, разработанная компанией EOS из Мюнхена [8]. Она используется как для быстрого прототипирования, так и для массового производства металлических деталей.

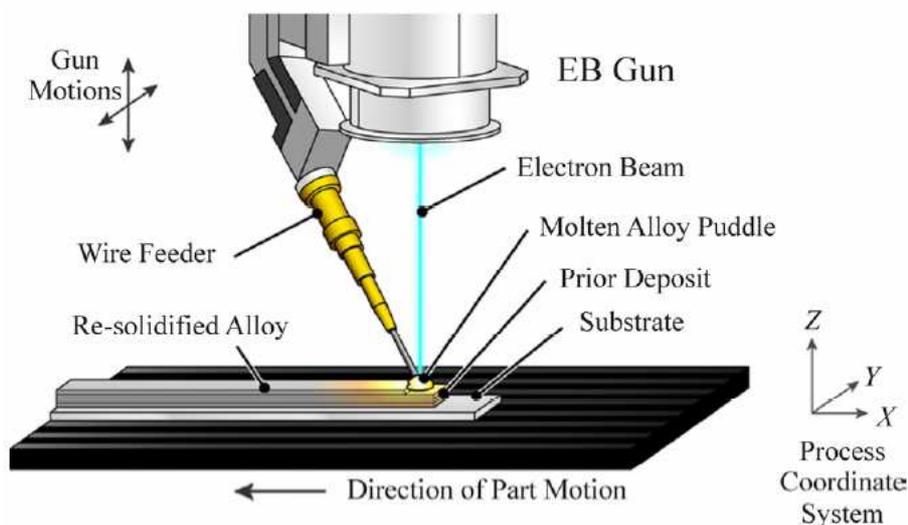


Рис. 3. Схема процесса EBAM

Табл. 1. Сравнительная характеристика основных методов печати WAAM

Характеристика	Метод печати		
	GMAW	PAW	CMT
Скорость осаждения металла, кг/ч	3-9	0,8-2,0	2,5-6,5
Металл	Алюминий	Алюминий, Титан	Алюминий, Сталь
Точность, мм	0,2	0,2	0,05
Скорость подачи проволоки, м/мин	5,7-6,0	2,4-4,0	6,0
Скорость подачи проволоки, м/мин	0,4-0,55	0,12-0,2	0,2-0,8
Метод подачи	Плавающий электрод	Проволока	Плавающий электрод

Табл. 2. Сравнительная характеристика методов лазерной и электронно-лучевой наплавки

Характеристика	Метод печати		
	DMD	LBDMD	EMAM
Скорость осаждения металла, кг/ч	1,8-2,9	2,9	3,0-9,0
Металл	Алюминий, сталь, никель, медь, титан, кобальт, свинец	Алюминий, сталь, никель, медь, титан, кобальт, свинец	Вольфрам, сталь, никелевые сплавы, титан, тантал, ниобий
Точность, мм	0,1	0,1	0,05
Скорость подачи проволоки, м/мин	-	-	-
Метод подачи материала	Порошок	Порошок	Проволока
Скорость подачи порошка	0,1-4,1 см <sup>3</sup> /мин	0,45 г/с	-

В качестве нагревательного элемента для спекания металлического порошка используются оптоволоконные лазеры относительно высокой мощности – порядка 200 Вт. Порошковый материал подается в рабочую камеру в количествах, необходимых для нанесения одного слоя. Специальный валик выравнивает поданный материал в ровный слой и удаляет излишний материал из камеры, после чего лазерная головка спекает частицы свежего порошка между собой и с предыдущим слоем согласно контурам, определенным цифровой моделью. После завершения вычерчивания слоя, процесс повторяется: валик подает свежий материал, и лазер начинает спекать следующий слой. Схема приведена на рисунке 4.

Строительной смесью являются металлические порошки на основе алюминиевых, титановых, кобальтовых сплавов, а также нержавеющей и инструментальной стали.

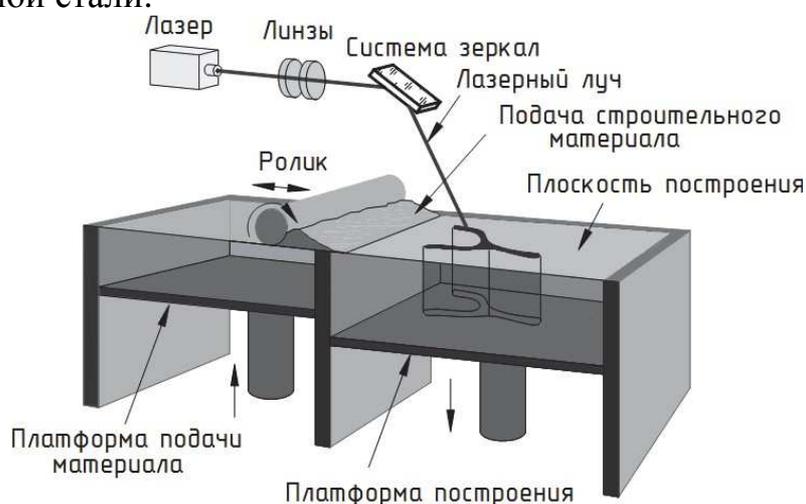


Рис. 4. Схема печати DMLS

### Технология SLM

SLM – Selective Laser Melting (с англ. селективное лазерное сплавление). Это технология изготовления металлических изделий сложных пространственных форм при помощи плавления порошковых составов лазером. В целом этапы процесса SLM ничем не отличаются от DMLS. Основное отличие сводится к процессу связывания частиц: SLM использует металлические порошки с единой температурой плавления и полностью плавит частицы, в то время как в DMLS порошок состоит из материалов с переменной температурой плавления, которые спекаются на молекулярном уровне при повышенных температурах. SLM производит детали из цельного металла, а DMLS – из металлических сплавов. [9].

### Сравнительная характеристика методов лазерного спекания и сплавления

В таблице 3 приведено сравнение основных характеристик методов DMLS и SLM.

Табл. 3. Сравнительная характеристика методов DMLS и SLM

Характеристика	Метод печати	
	DMLS	SLM
Диаметр лазерной точки	40 мкм	80-160 мкм
Количество лазеров	4	1, 4, 12
Охлаждение после печати	Требуется	Требуется
Детали нуждаются в опорных конструкциях	Да	Да
Наибольший объем печати	400×400×400мм	600×600×600мм
Мощность применяемых лазеров	До 400 Вт	До 1000 Вт
Детали нуждаются в постобработке	Да	Да

Как видно из таблицы, точность обработки DMLS выше, чем у SLM, однако SLM может изменять размер лазера для оптимизации разрешения или скорости печати. Мощность применяемых лазеров в DMLS ниже по сравнению с SLM, следовательно, скорость печати у них меньше и они не в состоянии печатать толстые слои. Но SLM – процесс печати с более высокой температурой, чем DMLS, поэтому печатные детали часто подвергаются внутренним напряжениям. Также машины SLM предназначены для крупномасштабного промышленного использования, поэтому они чрезвычайно дороги. DMLS могут работать с более широким спектром материалов, чем SLM.

### Выводы

Исходя из перечисленных в статье данных, можно сделать следующие выводы. Наибольшую распространенность приобрели методы послойного нанесения металлов, т.к. в их основе лежит популярный принцип сварки MIG/MAG. Поэтому количество методов послойного нанесения металла больше, чем лазерного спекания и сплавления. Общими преимуществами данных методов являются производственная гибкость, возможность получения деталей крайне сложной геометрической формы при существенно меньших затратах. Общим же недостатком является необходимость в постобработке изделий, т.е. потребность в

дополнительном оборудовании. Применение методов послойного нанесения металлов чаще обходится дешевле методов лазерного спекания и сплавления. Это объясняется тем, что процессы первых методов просты по своей структуре по сравнению с последними и, как следствие, требуют применения менее сложного и дорогого оборудования. Также в методах спекания и сплавления в роли строительного материала применяется более дорогой металлический порошок, в отличие от проволоки в методах послойного нанесения. Однако DMLS и SLM технологии имеют большую точность обработки и позволяют получить более прочную структуру материала. Поэтому применение того или иного метода на производстве зависит от необходимых требований к готовой продукции, а также исходного оборудования и материала.

### Список литературы

1. Гибсон Я., Розен Д., Стакер Б. Технологии аддитивного производства. Трехмерная печать, быстрое прототипирование и прямое цифровое производство. – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2016. – 656 с.
2. 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. 90-105.
3. Ding Donghong, Pan Zengxi, Cuiuri Dominic, Li Huijun. Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2015, vol. 811, no. 4, pp. 465-481.
4. Ravi K.R., Jayanth N. Modeling of laser based direct metal deposition process // International Journal of Engineering & Technology Sciences. 2. 2015, pp. 95-101.
5. Ding Y., Dwivedi R., Kovacevic R. Process planning for 8-axis robotized laser-based direct metal deposition (LBDMD) system: a case on building revolved parts // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 2017, no. 44, pp. 67-76.
6. All About Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM) 3D Printing [Electronic resource]. – Access mode: URL: <https://www.thomasnet.com/articles/custom-manufacturing-fabricating/electron-beam-additive-manufacturing-ebam-3d-printing/>
7. Аддитивные технологии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <http://additivemanufacturing.com/2015/10/14/electron-beam-additive-manufacturing-ebam-advantages-of-wire-am-vs-powder-am/>
8. Прямое лазерное спекание металлов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: [https://3dtoday.ru/wiki/DMLS\\_print](https://3dtoday.ru/wiki/DMLS_print).
9. 3D печать металлом: технологии, принцип работы 3D принтеров, постобработка [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <https://3dradar.ru/post/48136/>.
10. DMLS vs. SLM: Differences and Comparison | Xometry [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <https://www.xometry.com/resources/3d-printing/dmls-vs-slm-3d-printing/>

### Сведения об авторе:

Муканов Эрик Маратович – студент.