



## Сравнительный анализ аддитивных технологий, используемых для формирования электромеханических конструкций функциональных устройств

*С.В. Волков, С.П. Тимошенко*

*Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*

**Аннотация:** В работе произведен сравнительный анализ аддитивных технологий в области формирования электромеханических конструкций функциональных устройств. В частности, рассматривается проблематика использования аддитивных технологий, их актуальность по отношению к современным потребностям в разных областях науки и техники, раскрывается суть аддитивных технологических процессов для производства различного рода изделий и определяется конкретный конструктивно-технологический подход для создания модульного изделия на основе данных технологий.

**Ключевые слова:** аддитивные технологии, печатная плата, 3D-печать, моделирование методом послойного наплавления, селективное лазерное спекание, стереолитография, цифровая обработка света, прямое лазерное спекание металлов, селективное лазерное плавление, метод робокастинга.

### Введение

Темпы развития промышленности нового поколения требуют выбора современных технологий производства, обладающих наименьшими трудозатратами и выполнимые в сжатые сроки. В ряд новых технологий, которые активно внедряются в производство, можно отнести аддитивные технологии (АТ), позволяющие изготавливать изделия путем послойного синтеза с использованием 3D-моделей. Данные технологии играют важную роль в изготовлении новых технических решений в различных областях науки и техники: машиностроение, авиапромышленность, медицина, энергетика и электротехника [1].

Уже с 1990-х годов их начали применять при изготовлении электронных устройств. Особенно заметное ускорение темпов распространения технологий 3D-печати в электронике наблюдается в последние 5-10 лет.

Мировые эксперты прогнозируют, что к 2027 году мировой рынок АТ достигнет объема в \$41,6 миллиарда, и услуги 3D-печати будут иметь высокий спрос во временной перспективе (рис. 1).

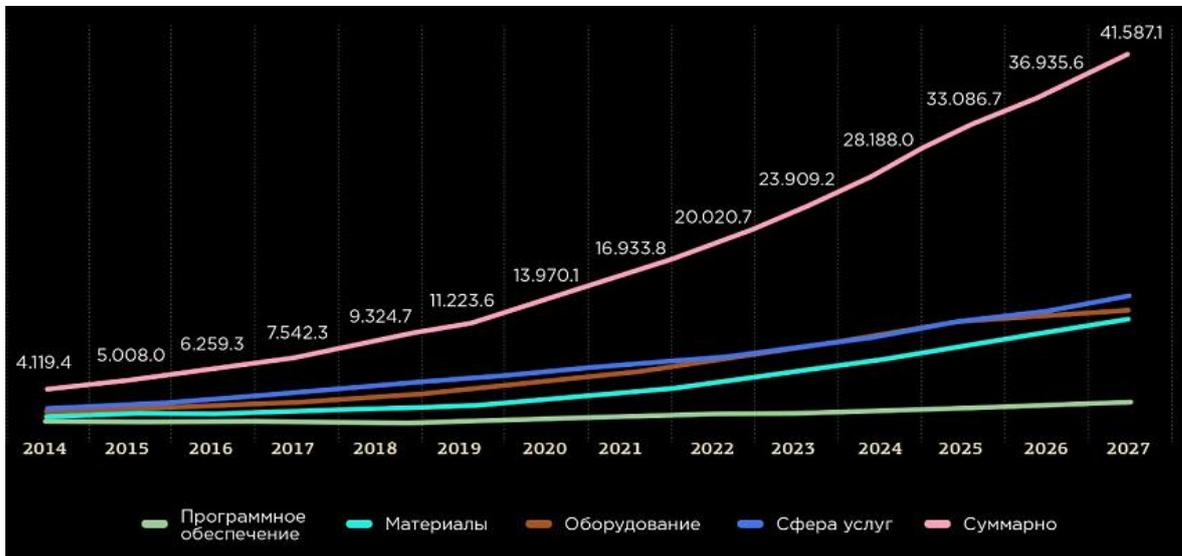


Рис. 1. – Динамика и прогноз объема рынка АТ, млрд долларов [2]

Согласно рис. 1 рынок АТ складывается из нескольких сегментов, включая оборудование, материалы, программное обеспечение и услуги для 3D-печати. Основными трендами мирового и российского рынка АТ является определение соответствующих сфер применения 3D-печати. Это, в свою очередь, стимулирует процесс возникновения новых высокоэффективных материалов, например, термопластиков.

Наиболее востребованные зоны применения в области 3D-печати приходятся на аэрокосмическую и автомобильную индустрии, где требуются термопластичные эргономичные и коррозионностойкие материалы для решения объемных задач, связанных с созданием функциональных прототипов или организацией серийного производства [3].

Применение легких, гибких и пластичных материалов с высокими прочностными показателями с помощью АТ становится возможным изготовление различного рода конструкций с уменьшенными массогабаритными показателями.

Зачастую, ставятся различные задачи по разработке и изготовлению изделий электронной техники. Одной из актуальных задач является составление подхода для формирования электромеханической конструкции функционального устройства, в частности, модульный блок специального назначения, который постоянно нуждается в модернизации конструкции.

В ходе разработки и создания подобного модульного устройства возможно провести исследование процессов формирования термопластичных материалов для изготовления механического каркаса устройства, а также металлических соединений, образующих топологические структуры.

Ключевой целью обзора является проведение сравнительного анализа существующих решений в области АТ для формирования электромеханической конструкции модульного блока специального назначения заданной сложности с целью определения наиболее оптимального конструктивно-технологического подхода.

Под аддитивными технологиями (АТ) подразумевается процесс создания изделий на основе трехмерных компьютерных моделей. АТ позволяют формировать каркас будущего изделия из различных термопластичных материалов, которые обладают полезными характеристиками для дальнейшего применения (рис. 2).

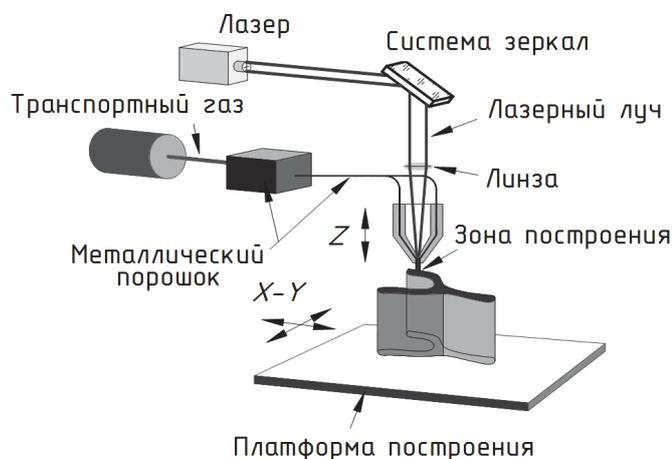


Рис. 2. – Схема формирования детали путем прямого осаждения материала по АТ

---

Согласно рис. 2 происходит формирование деталей путем прямого осаждения материала, разогретого до необходимой температуры, который поступает на платформу из распределяющего устройства (экструдера). Состав материалов для печати можно формировать в разных соотношениях, например, путем использования полимеров или введения суспензий, например, на основе частиц (Ag, Sc) и т.д.

В ряде случаев новые технологии могут внести существенные улучшения в традиционное производство. Можно вывести следующие ключевые достоинства применения АТ по сравнению с традиционными:

1) Вариативность в изготовление изделий различной сложности, за счет использования пластичных материалов. Традиционные методы, такие как литье или штамповка, ограничены в возможности создания сложных по форме изделий и обычно требуют значительного времени для завершения производственного процесса.

2) Экономия расходных материалов и низкая себестоимость. В традиционных методах производства, потери расходных материалов составляют более 80%). Выгода использования АТ относительно традиционных технологий заключается в задействовании оборудования с программным обеспечением, которое позволяет точно определять и регулировать количество требуемых материалов [4].

3) Мобильное производство. За счет использование 3D моделей достигается наиболее ресурсоемкое производство, поскольку не требуется обязательное наличие чертежей, габаритных моделей и т.п.

Также, за счет применения АТ, появляется возможность придания изделиям необходимой формы и размеров, что позволит найти новые применения и усовершенствовать уже существующие.

Важно подчеркнуть, что применение 3D-печати в электронике можно разделить на два основных направления [5]:

---

- Производство электронных компонентов (таких как ЭКБ, проводящих дорожек и т.п.) на печатных платах (ПП).
- Изготовление корпусов и механических деталей для электронных модулей.

Возможность 3D-печати электронных устройств на ПП стала доступной относительно недавно и представляет собой новый подход в сравнении с привычными методами печати, такими как печать термопластами и металлическими порошками. Данная технология требует использования сложных многокомпонентных материалов (например, термочувствительных полимеров) и технологии их отверждения, обеспечивая при этом оптимальные конструктивно-технологические характеристики (предел прочности, модуль упругости и т.п.), близкие к традиционным методам производства [6].

Материалы, используемые в процессе 3D-печати, обычно имеют форму нити, смолы или порошка. Среди материалов для 3D-печати можно выделить две основные категории: полимеры (пластмассы) и металлы. Кроме того, существует и ряд других материалов (например, керамика или композиты). Полимеры могут быть разбиты на термопласты и терморезистивные материалы. Так, по типу применяемые материалы различаются:

- сыпучие (полимеры, песок, металлический порошок);
- жидкие (фотополимеры акриловые и эпоксидные);
- прутковые, нитевидные (полимеры, металлы);
- листовые, пленочные (ПВХ-пленки, фольга, листовой прокат).

Касательно выбора материалов, меняется характер их применения относительно технологий 3D-печати (рис. 3).

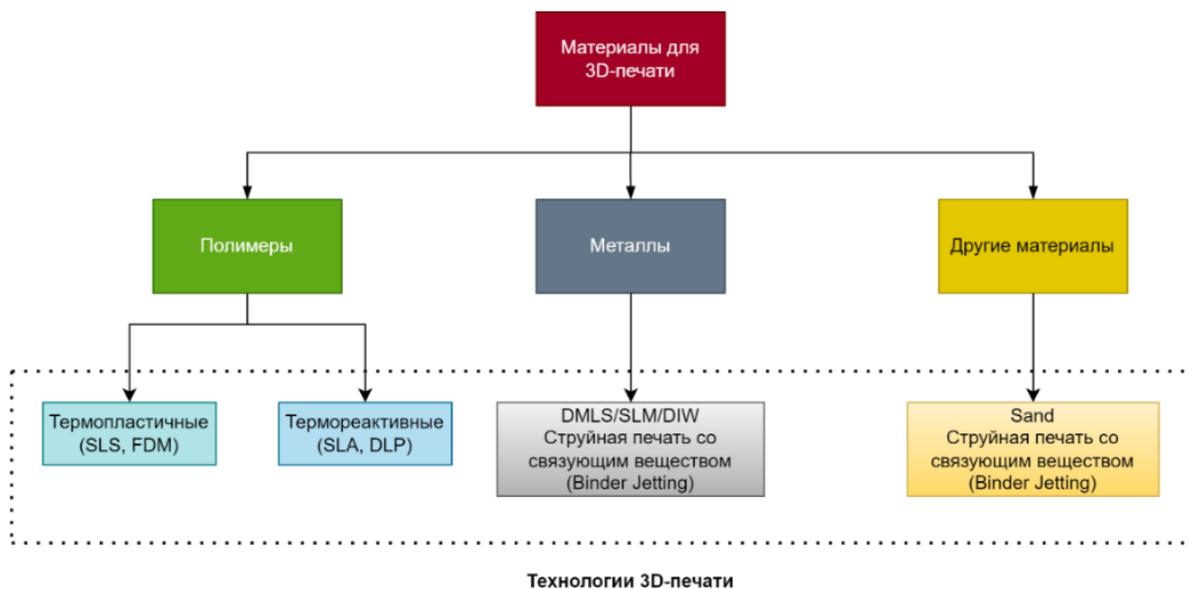


Рис. 3. – Схема используемых материалов и технологий в 3D-печати [7]

Известно, что термопластичные материалы являются наиболее предпочтительными для прототипирования и производства конечных изделий. Так, детали, выполненные на основе полимерных материалов (PLA ABS и т.д.) по технологиям моделирования методом послойного наплавления (Fused Deposition Modeling - FDM) и селективного лазерного спекания (Selective Laser Sintering - SLS) обладают оптимальными механическими свойствами, высокой ударопрочностью (порядка 30-80 МПа) и имеют достаточную износостойкость. Данные свойства ставятся под задачи производства корпусов и механической оснастки (например, механических деталей модульного блока).

С использованием технологий стереолитографии (Stereolithography - SLA) и цифровой обработки света (Digital Light Processing - DLP) можно формировать структуры на основе жидких фотополимеров (например, акриловых и эпоксидных смол), которые обладают высокой надежностью, но в силу низкой устойчивости к механическим нагрузкам характеризуются более высокой хрупкостью по сравнению с термопластами, что делает их менее подходящими для функционального применения.

Материалы на основе металлических соединений обладают более высокой ударопрочностью (например, порошок системы Al-Mg-Sc имеет предел прочности 300 МПа) и могут работать при высоких нагрузках и температурах (теплопроводность порядка 155 Вт/м\*К). Таким образом, возможности 3D-печати по технологиям прямого лазерного спекания металлов (Direct Metal Laser Sintering - DMLS) и селективного лазерного плавления (Selective Laser Melting - SLM) позволяют добиться превосходных механических свойств, что делает их пригодным решением для промышленного внедрения.

Наиболее интересным решением в вопросе формирования структуры ПП может выступить метод робокастинга (Direct Ink Writing - DIW), который заключается в послойном формировании исходного 3D-объекта путем экструзии «чернил» на основе серебра Ag через формирующее отверстие головки 3D-принтера [8] (рис. 4).

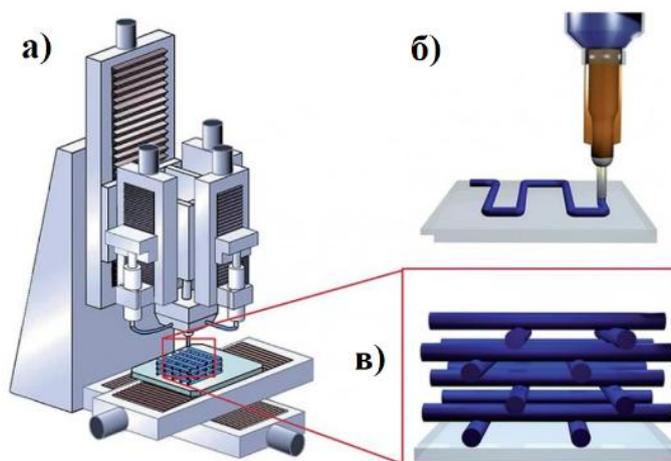


Рис. 4. – Схема принципа работы методом робокастинга:

- а) 3D-принтер с резервуарами для подачи материалов в печатающую головку, б) сопло с подачей материала, в) структура слоев изделия

Этот подход включает в себя использование проводящих чернил, содержащих наночастицы серебра (Ag) для создания межсоединений на подложках ПП. Базовая структура ПП создается методом FDM, а затем на

поверхности платы формируется электропроводящий рисунок (рис. 5). Процесс изготовления ПП классическим методом занимает достаточно длительное время, поэтому если структура топологии ПП носит многостадийный уровень производства, АТ могут выступить альтернативным подходом быстрого прототипирования с целью оперативной отладки схемы прямо на месте разработки.

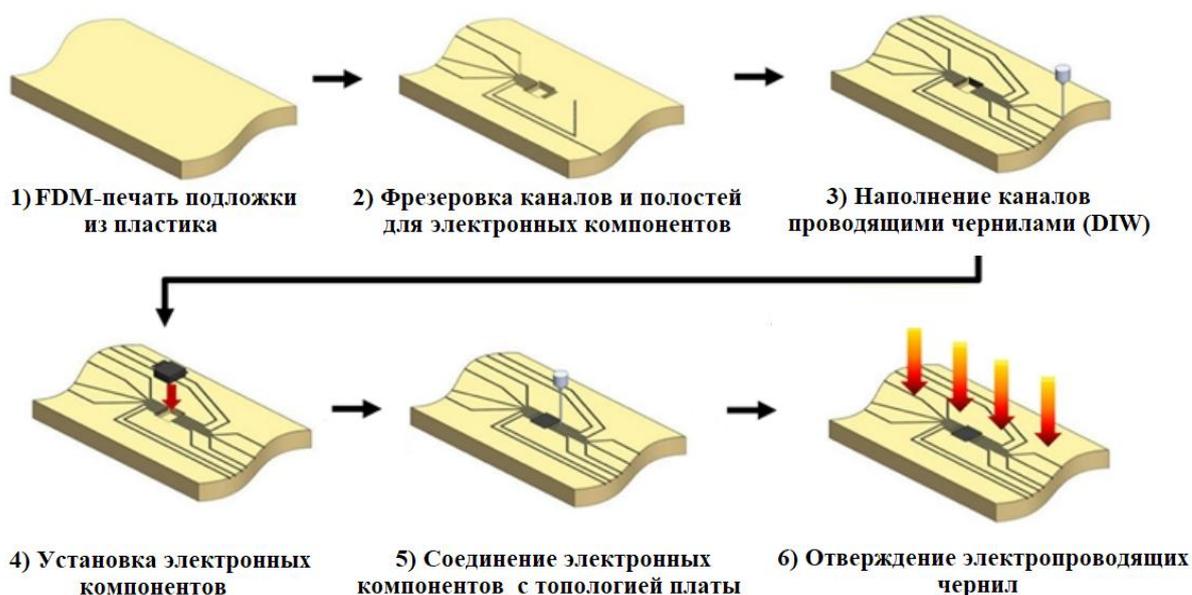


Рис. 5. – Основные стадии формирования ПП по АТ (FDM/DIR)

Другие материалы могут быть также использованы в 3D-печати, но их зона применения ограничена. Здесь применяется технология 3D-печати Binder Jetting, которая заключается в послойном нанесении связующего вещества на сыпучий материал (например, металлический порошок системы Al-Mg-Sc).

Выбор основной технологии для реализации предполагаемого изделия будет сводиться к возможности достижения заданных конструктивно-технологических характеристик, которые можно достигнуть с применением той или иной АТ. В таблице 1 представлены основные виды печати и критерии, по которым возможен выбор детали под технические задачи разработки конечного изделия.

Таблица № 1

Виды 3D-печати и характеристики их применения [9, 10]

Вид 3D-печати	Предельное отклонение размеров детали, мм	Максимальный размер платформы 3D-принтера, мм		Необходимость поддержек в 3D-печати
FDM	± 0,5 мм	300x300x400	настольных принтеров	Не всегда требуется
		1000x1000x1000	профессиональных 3D принтеров	
SLA/DLP	± 0,1 мм	200x200x200	для настольных принтеров	Требуется
		500x550x500	для промышленных принтеров	
DMLS/SLM	± 0,1 мм	до 500x280x360		Требуется

Исходя из данных, приведенных в таблице 1, можно отметить, что размер платформы определяет максимальные размеры детали, которую может изготовить 3D принтер. Необходимость в поддержках определяется уровнем свободы проектирования. Несмотря на то, что технология FDM не требует поддержек и позволяет формировать изделия различной сложности, её составляющий материал не обладает достаточной ударопрочностью. По данному критерию удовлетворяет технология SLM, по которой может быть получена структура на основе металлических соединений, обладающая такими преимущественными показателями, как высокая ударопрочность, износостойкость в сравнение с материалами технологий FDM (термопластиками) и SLA/DLP (фотополимерами).

Таким образом, в результате анализа аддитивных технологий и их составляющих процессов было установлено, что использование технологий SLM (печать механической оснастки) и FDM/DIW (печать структуры ПП), позволит сформировать эргономичную конструкцию модульного блока путем многокомпонентной печати с использованием порошка на основе

металлических соединений, обеспечивающая оптимальный уровень надежности при снижении массогабаритных показателей конечного изделия.

### Литература

1. Литунов С.Н., Слободенюк В.С., Мельников Д.В. Обзор и анализ аддитивных технологий. Часть 1 // Омский научный вестник. 2016. №1. С. 12-17.
2. SmarTech. Отраслевой анализ и прогнозы рынка для индустрии 3D-печати. URL: [smartechnalysis.com/reports/ceramics-additive-manufacturing-markets-2017-2028](https://smartechnalysis.com/reports/ceramics-additive-manufacturing-markets-2017-2028).
3. Камалов Т.В., Истомин В.В. Применение аддитивных технологий в ракетно-космической технике // Наукосфера. 2022. №1. С. 207-213.
4. Manzhurov A.V., Lychev S.A. Mathematical modeling of additive manufacturing technologies // Lecture Notes in Engineering and Computer Science. London. 2014. pp. 1404-1409.
5. Толочко Н.К., Ланин В.Л. 3D-печать в электронике // Электроника: Наука, технология, бизнес. 2020. №6. С. 124-133.
6. Воруничев Д.С., Воруничева К.Ю. Текущие возможности технологии прототипирования многослойных печатных плат на 3D-принтере // Российский технологический журнал. 2021. Т.9. №4. С. 28-37.
7. Петров П.А., Дикарева В.В. Сравнение аддитивных технологий, позволяющих печатать воскоподобным материалом // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 2. С. 408-414.
8. Lu B., Lan H., Liu H. Additive manufacturing frontier: 3D printing electronics // Opto-Electronic Adv. 2018. V.1. №1. pp. 3-5.
9. Балашов А.В., Маркова М.И. Исследование структуры и свойств изделий, полученных 3D-печатью // Инженерный вестник Дона. 2019. № 1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5618](https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5618).



10. Гончарова О.Н., Бережной Ю.М., Бессарабов Е.Н., Кадамов Е.А., Гайнутдинов Т.М., Нагопетьян Е.М., Ковина В.М. Аддитивные технологии – динамично развивающееся производство // Инженерный вестник Дона. 2016. № 4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3931](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3931)

### References

1. Litunov S.N., Slobodenjuk V.S., Melnikov D.V. Omskij nauchnyj vestnik. 2016. №1. pp. 12-17.
2. SmarTech. Otrasleyoj analiz i prognozy rynka dlja industrii [Industry analysis and market forecasts for 3D printing industry]. URL: [smartechnalysis.com/reports/ceramics-additive-manufacturing-markets-2017-2028](http://smartechnalysis.com/reports/ceramics-additive-manufacturing-markets-2017-2028).
3. Kamalov T.V., Istomin V.V. Naukosfera. 2022. №1. pp. 207-213.
4. Manzhirov A.V., Lychev S.A. Lecture Notes in Engineering and Computer Science. London. 2014. pp. 1404-1409.
5. Tolochko N.K., Lanin V.L. Elektronika: Nauka, tekhnologiya, biznes. 2020. №6. pp. 124-133.
6. Vorunichev D.S., Vorunicheva K.Yu. Rossijskij tekhnologicheskij zhurnal. 2021. T.9. №4. pp. 28-37.
7. Petrov P.A., Dikareva V.V. Izvestiya Tulskogo gosudarstvennogo universiteta. Texnicheskie nauki. 2021. №2. pp. 408-414.
8. Lu B., Lan H., Liu H. Opto-Electronic Adv. 2018. V.1. №1. pp. 3-5.
9. Balashov A.V., Markova M.I. Inzhenernyj vestnik Dona. 2019. №1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5618](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5618).
10. Goncharova O.N., Berezhnoj Yu.M., Bessarabov E.N., Kadamov E.A., Gajnutdinov T.M., Nagopetyan E.M., Kovina V.M. Inzhenernyj vestnik Dona. 2016. № 4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3931](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3931).