

DOI 10.37539/2949-1991.2025.28.5.003
УДК 681.6, 681.9, 004.356

Чугунов Александр Сергеевич, студент,
Государственный университет аэрокосмического
приборостроения, г. Санкт-Петербург

Чугунова Полина Вячеславовна, студентка,
Государственный университет аэрокосмического
приборостроения, г. Санкт-Петербург

**АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ТРЕНДОВ В ОБЛАСТИ
ТЕХНОЛОГИЙ 3D-ПЕЧАТИ В ЭЛЕКТРОНИКЕ
ANALYSIS OF MODERN TRENDS IN 3D PRINTING
TECHNOLOGIES IN ELECTRONICS**

Аннотация: В данной статье представлен обзор современных технологий 3D-печати, применяемых в производстве электронных устройств.

Abstract: This article provides an overview of modern 3D printing technologies used in the production of electronic devices.

Ключевые слова: 3D-печать, аддитивные технологии, электроника, микроэлектроника, пассивные компоненты, активные компоненты, сенсоры, гибкая электроника, конформная печать, технологии печати FDM, SLA, AJP, LMP, LIFT.

Keywords: 3D printing, additive technologies, electronics, microelectronics, passive components, active components, sensors, flexible electronics, conformal printing, FDM, SLA, AJP, LMP, LIFT printing technologies. radio-electronic equipment, diagnostic support, diagnostics, health monitoring.

Введение:

Аддитивные технологии производства, широко известные как 3D-печать, в последние десятилетия претерпевают интенсивное развитие и находят всё более широкое применение в различных сферах промышленности, включая высокотехнологичный сектор электроники. Указанные технологии обеспечивают возможность создания изделий сложной геометрии и высокой точности, что, в свою очередь, открывает новые горизонты для разработки и серийного производства электронных устройств. Интеграция 3D-печати с системами автоматизированного проектирования (САПР) способствует не только ускорению и оптимизации процессов проектирования и производства, но и повышает функциональные характеристики и качество конечной продукции. В настоящей статье рассматриваются актуальные тенденции развития 3D-печати и анализируется их влияние на процессы проектирования в области электроники.

Исходные предпосылки.

Наиболее распространённые технологии 3D-печати начали формироваться в конце 1980-х – начале 1990-х годов. Впоследствии они подвергались постоянным усовершенствованиям – преимущественно в направлении повышения технических характеристик оборудования и расширения номенклатуры применяемых материалов. В последние годы наблюдается появление ряда инновационных подходов, в результате чего сегодня известно несколько десятков технологий 3D-печати, различающихся принципами формирования объектов, конструктивными особенностями 3D-принтеров и физикохимическими свойствами используемых материалов [1,2].



Изложение материала исследования

Одним из фундаментальных параметров, определяющих применимость технологий 3D-печати в электронике, является разрешающая способность оборудования. Данный показатель определяется минимально достижимыми размерами структурных элементов электронных устройств, которые, в свою очередь, зависят от ширины и толщины наносимого материала за один печатный проход. Разрешение процесса во многом зависит от аппаратных характеристик 3D-принтеров, а также от технологических особенностей конкретного метода печати – например, таких, как размер частиц порошка, ограничивающий толщину слоёв при использовании метода селективного лазерного спекания (SLS).

Большинство существующих 3D-технологий обеспечивают типовое разрешение в диапазоне 50–100 микрон, однако при использовании высокоточных промышленных установок этот параметр может быть улучшен до 20 микрон и ниже. Наивысшее разрешение демонстрируют технологии Aerosol Jet Printing (AJP) – до 10 микрон, а также Direct Laser Writing (DLW) и Laser-Induced Forward Transfer (LIFT), которые позволяют формировать структуры с элементами нанометрового масштаба (менее 1 мкм) [2].

Inkjet Printing (IJP), Multi-Jet Modeling (MJM), PolyJet – Струйная печать

Струйная технология основана на использовании «чернил» в виде жидкого фотополимера, расплавленного термопластичного материала или суспензии, которые точечно подаются через микросопла в зону построения. После нанесения фотополимеры отверждаются под воздействием ультрафиолетового излучения, а термопласты – путём принудительного охлаждения. При использовании суспензий происходит агломерация твёрдых частиц, обеспечивающая формирование слоистой структуры. Этот метод отличается высокой точностью и позволяет создавать изделия с высокой детализацией, что делает его востребованным в прототипировании и микроэлектронике.

Direct Ink Writing (DIW), Robocasting – Робокастинг

Робокастинг представляет собой технологию, при которой вязкая пастообразная суспензия подаётся через экструдер непосредственно в зону построения. В процессе формирования изделия происходит агломерация частиц суспензии, что позволяет создавать трёхмерные объекты без применения поддержки. Полученные изделия, как правило, обладают высокой пористостью и требуют последующего высокотемпературного обжига для достижения прочностных характеристик – по аналогии с обжигом керамических изделий. Эта технология обеспечивает высокую гибкость в выборе геометрии и масштабов, включая возможность изготовления микромасштабных конструкций, таких как архитектуры биоматериалов или структурные опоры.

Binder Jetting, BJ/Binder Jet Printing, BJP/Powder Bed and Inkjet Printing/Аддитивная технология Binder Jetting

Жидкое связующее впрыскивается через сопло на порошковый слой в место построения, где связывает частицы порошка. Эта технология позволяет создавать детали с высокой степенью детализации и разнообразными механическими свойствами. Binder Jetting применяется для производства металлических, керамических и пластиковых изделий, а также используется для создания моделей и прототипов.

Fused Deposition Modeling, FDM/ Fused Filament Fabrication, FFF Моделирование методом послойного наплавления

Волокно (filament) из термопластичного полимера протягивается через подогреваемый экструдер, где нагревательный элемент его расплавляет, а затем подается в место построения, где выдавленный материал затвердевает.

FDM широко используется для быстрого прототипирования и производства. Быстрое прототипирование позволяет ускорить процесс тестирования и модернизации изделий,



обеспечивая возможность многократного улучшения конструкции на каждом этапе. Быстрое производство, в свою очередь, является экономически эффективной альтернативой традиционным методам изготовления, особенно при создании мелкосерийных партий продукции.

Лазерная стереолитография

Исходным материалом для создания изделий методом лазерной стереолитографии служит жидкая смесь фотополимера и отвердителя.

Существует два основных типа SLA-принтеров, а именно конструкции «снизу вверх» и «сверху вниз». В принтерах типа «снизу вверх» платформа для построения опускается на высоту одного слоя от дна ванны, и первый слой отверждается источником света через прозрачное дно емкости. Затем платформа поднимается, и отверждается следующий слой.

В конструкции «сверху вниз» рабочая платформа начинает движение с поверхности фотополимера в ванне, опускается под него на высоту одного слоя, а затем постепенно движется вниз, пока слои отверждаются под воздействием источника света, расположенного над ванной.

Такая конструкция позволяет создавать большие модели и использовать меньшее количество поддержек. Такая конструкция типична для аппаратов промышленного класса

Аналог IJP, отличается тем, что «чернила» в виде суспензии переводятся в состояние аэрозоля, который распыляется через сопло плотной струей, сфокусированной обволакивающим газом, в место построения, где твердые частицы аэрозоля агломерируются. Технология AJP позволяет создавать высокоточные и сложные структуры, особенно подходящие для нанесения функциональных покрытий и микроэлектроники.

Печать легкоплавким металлом (Liquid Metal Printing, LMP)

Технология печати с использованием легкоплавких металлов основана на подаче расплава металлов, таких как сплав галлия и индия (GaIn), в зону построения. Подача материала осуществляется двумя способами: либо впрыскиванием (по принципу струйной печати, IJP), либо выдавливанием из подогреваемого экструдера (аналогично методу DIW). Данная технология позволяет формировать металлические структуры с высокой точностью и детализированностью, что делает её актуальной для производства прочных и функциональных металлических элементов сложной формы, в том числе в гибкой электронике и микроустройствах.

Прямая лазерная запись (Direct Laser Writing, DLW)

Метод Direct Laser Writing (DLW) является высокоточной лазерной технологией, родственной стереолитографии (SLA), однако отличается механизмом воздействия: на поверхности жидкого фотополимера осуществляется многофотонная полимеризация, индуцированная фокусированным лазерным излучением определённой длины волны. Благодаря высокой локализации и контролю над процессом отверждения, DLW позволяет создавать структуры с микронной и субмикронной точностью, что делает её незаменимой в производстве микрооптических компонентов, фотонных кристаллов и микроэлектромеханических систем (МЭМС).

Лазерно-индуцированный перенос материала (Laser-Induced Forward Transfer, LIFT)

Технология Laser-Induced Forward Transfer (LIFT) основана на лазерной абляции тонкого слоя материала, нанесённого на прозрачную подложку. При воздействии высокоэнергетического лазерного импульса материал локально испаряется или плавится, после чего мелкодисперсные капли расплава переносятся на приёмную подложку, расположенную ниже. Там они затвердевают под воздействием охлаждающей среды или температуры основания.



Для управления процессом применяется точная настройка фокусировки лазера и регулировка светового пятна, что позволяет изменять разрешающую способность, объём и форму передаваемого материала. Также возможно регулирование частоты и скорости сканирования лазерного луча, что обеспечивает гибкий контроль над эффективностью переноса вещества. Метод LIFT применяется для формирования тонких, сложных и уникальных структур, включая биосенсоры, микролинзы и микрооптические элементы. Одним из ключевых преимуществ данной технологии является её совместимость с широким спектром материалов, включая органические соединения, биоматериалы и функциональные полимеры, обладающие высокими разрешающими характеристиками [3].

Элементы электронных устройств

Технологии аддитивного производства находят широкое применение при создании различных конструктивных элементов электронных устройств, включая корпусные детали, токопроводящие элементы, а также активные и пассивные компоненты схем. Методы 3Dпечати, такие как FDM, SLS, SLA, DLP, Binder Jetting, позволяют формировать как отдельные элементы корпусов, так и цельные корпусные конструкции. Это делает их перспективной основой для развития производства электроники на 3D-MID-подложках, где монтаж осуществляется на трёхмерные пластиковые основания с интегрированными функциональными элементами.

Элементы электронных устройств

Технологии аддитивного производства находят широкое применение при создании различных конструктивных элементов электронных устройств, включая корпусные детали, токопроводящие элементы, а также активные и пассивные компоненты схем. Методы 3Dпечати, такие как FDM, SLS, SLA, DLP, Binder Jetting, позволяют формировать как отдельные элементы корпусов, так и цельные корпусные конструкции. Это делает их перспективной основой для развития производства электроники на 3D-MID-подложках, где монтаж осуществляется на трёхмерные пластиковые основания с интегрированными функциональными элементами.

Активные и пассивные компоненты

Наиболее распространёнными активными элементами, производимыми методом 3Dпечати, являются органические транзисторы и светодиоды. Формирование функциональных устройств осуществляется путём послойной интеграции структур, содержащих как активные, так и пассивные компоненты. Это позволяет создавать элементарные электронные модули, такие как делители напряжения, фильтры, реле, трансформаторы и генераторы сигналов. Более сложные схемы реализуются через комбинацию 3D-печатных активных и пассивных компонентов. Характерным примером служат схемы, созданные по технологии Aerosol Jet Printing, включающие логические элементы «И-НЕ» (на основе пары транзисторов и одного резистора) и инверторы.

Сенсоры

Наибольшее распространение технологии 3D-печати получили в области разработки и производства сенсорных систем. С их помощью формируются сенсоры различного назначения: давления, ускорения, температуры, влажности, расхода жидкости, газоанализаторы, антенны, анемометры, тактильные датчики, био- и хемосенсоры, а также устройства для контроля качества пищевых продуктов. Гибкость аддитивных технологий позволяет проектировать сенсоры, адаптированные под конкретные условия эксплуатации и подложки.

Формирование электронных схем на сложных поверхностях

Современные 3D-технологии обеспечивают возможность создания проводящих структур и функциональных схем не только на плоских, но и на криволинейных и наклонных



поверхностях. В частности, метод Direct Ink Writing позволяет наносить проводящие чернила, содержащие наночастицы серебра, на выпуклые поверхности, например, при формировании полусферических антенн. Регулируемая пространственная ориентация печатных головок делает возможной адаптацию к различным типам геометрии.

Особенно эффективной в этом контексте является технология AJP, которая благодаря высокой точности, возможности дистанционной печати и управляемому положению сопла идеально подходит для нанесения схем на сложные и нестандартные поверхности.

Гибкие подложки

Использование технологий FDM, Inkjet Printing и DLP позволяет формировать электронные компоненты и устройства, работающие на эластичных подложках, которые могут деформироваться (изгибаться, растягиваться) без утраты функциональности. Такие решения востребованы в области носимой электроники и гибких сенсорных систем. Подложки производятся из специальных полимерных материалов, устойчивых к механическим нагрузкам. Для нанесения проводящих дорожек на гибкие основы перспективным направлением является применение технологии Liquid Metal Printing (LMP), которая позволяет формировать токопроводящие структуры из жидких металлов, обладающих стабильными электрическими характеристиками.

Заключение.

Анализ современных технологий аддитивного производства, применяемых в электронике, показывает устойчивую тенденцию к их интеграции в проектноконструкторские и производственные процессы. 3D-печать обеспечивает не только ускоренное создание прототипов, но и возможность серийного выпуска функциональных элементов устройств с высокой степенью конструктивной и технологической адаптивности. Применение данных технологий способствует миниатюризации, повышению производительности и вариативности электронных компонентов, включая активные и пассивные элементы, сенсорные системы, а также гибкие и конформные схемы.

Особую значимость приобретают разработки в области печати с использованием проводящих чернил, жидких металлов и фотополимеров с заданными функциональными свойствами, что расширяет возможности аддитивного синтеза сложных интегрированных структур. Ведущие позиции по точности и разрешающей способности занимают такие методы, как DLW, LIFT и AJP, позволяющие формировать наноструктуры и микрооптические компоненты, востребованные в высокотехнологичных отраслях.

Несмотря на ряд технологических и экономических ограничений, в частности – в масштабируемости процессов и обеспечении воспроизводимости характеристик, потенциал 3D-печати в электронике остаётся высоким. Перспективными направлениями развития являются: унификация мульти-материальных платформ, совершенствование САДинтеграции, а также разработка новых типов полимерных и металлических композитов. В совокупности, эти факторы определяют стратегическую важность внедрения аддитивных технологий как ключевого инструмента инновационного развития современной электронной промышленности.

Список литературы:

1. Кокорев И.В. Анализ развития 3-D печати. // НИУ «Московский государственный строительный университет», Москва, Россия, E-Scio,2020.
2. Н.Толочко, В. Ланин. 3D-печать в электронике. // “Электроника: наука, технология, бизнес”, Москва, Россия, 2020.
3. Xizhou Gu. The Basic Concept and Application Status of Laser Induced Forward Transfer // Highlights in Science Engineering and Technology 76, стр.38-43, 2023.

