



Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности

Сайт журнала: <http://www.openaccessscience.ru/index.php/ijcse/>



УДК 621.396

ТЕХНОЛОГИИ 3D-ПЕЧАТИ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ: МЕТОДЫ, ПРЕИМУЩЕСТВА И НЕДОСТАТКИ

¹ Соловьев В.А., ²Канюков А.Р., ³Сапунов Д.М., ⁴Булыгин И.В.

ФГБОУ ВО "МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Э. БАУМАНА (НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)", Москва, Россия, (105005, город Москва, 2-Я Бауманская ул, д. 5 стр. 1), e-mail: ¹volodimer@bmstu.ru, ²kanyukovar@student.bmstu.ru, ³kolegovdm@student.bmstu.ru, ⁴bulyginiv@student.bmstu.ru

В данной статье представлен обзор и анализ методов для 3D-печати печатных плат. Было проведено исследование ряда научных трудов и статей на эту тему. Выявлено отсутствие всестороннего сравнения технологий 3D-печати печатных плат. В связи с этим основной целью данной статьи является анализ и сравнение широкого спектра возможностей в этой области. В ней рассматриваются различные технологии, на основе которых создаются современные печатные платы, широко используемые во многих областях деятельности человека. Была реализована классификация методов изготовления печатных плат по принципу их работы и отличительным характеристикам. Подробно описан механизм работы каждой рассматриваемой технологии, выявлены общие преимущества и недостатки. В статье описаны пять технологий для изготовления печатных плат: аэрозольное нанесение материала, капельное нанесение материала, непрерывное нанесение материала, послойное нанесение материала, многофункциональное нанесение материала. Рассмотренные в статье технологии являются наиболее популярными и распространенными на современном рынке. В рамках статьи обсуждается потенциал масштабирования такого типа производства.

Ключевые слова: аддитивные технологии, печатная плата, 3D-печать, 3D-принтер, прототипирование.

TECHNOLOGIES OF 3D-PRINTING FOR MANUFACTURING PRINTED CIRCUIT BOARDS: METHODS, ADVANTAGES AND DISADVANTAGES

¹ Solovyov V.A., ²Kanyukov A.R., ³Sapunov D.M., ⁴Bulygin I.V.

BAUMAN MOSCOW STATE TECHNICAL UNIVERSITY (NATIONAL RESEARCH UNIVERSITY), Moscow, Russia, (105005, Moscow, 2nd Baumanskaya ul, 5 bld. 1), e-mail: ¹volodimer@bmstu.ru, ²kanyukovar@student.bmstu.ru, ³kolegovdm@student.bmstu.ru, ⁴bulyginiv@student.bmstu.ru

This article provides an overview and analysis of methods for 3D-printing printed circuit boards. A study of a number of scientific papers and articles on this topic was realized. The absence of a comprehensive comparison of technologies for the 3D-printing printed circuit boards is revealed. In this regard, the main objective of this article is to analyze and compare a wide range of solutions in this area. It considers various technologies on the basis of which modern printed circuit boards that are widely used in many areas of human activity are being created. The classification of technologies of making printed circuit boards by the principle of their work has been realized. The mechanism of working of each technology under consideration is described in detail, the general advantages and disadvantages are identified. The article describes five technologies for making printed circuit boards: aerosol jet printing, drop on demand, continuous inkjet, fused deposition modeling, multi-functional additive manufacturing. The technologies considered in the article are the most popular and common in the current market. The article discusses the potential of scaling such a type of production.

Keywords: Additive technologies, printed circuit boards, 3D-printing, 3D-printer, prototyping.

Введение.

Аддитивные технологии в изготовлении печатных плат имеют преимущество перед субтрактивными: снижение отходов при производстве, в том числе вредных для человека и природы, уменьшение числа производственных этапов – нет необходимости в нанесении масок. А в случае с 3D-печатью печатную плату возможно полностью изготовить на одной установке. В целях прототипирования, а, возможно, в недалеком будущем – изготовления мелкосерийных партий, такие технологии позволяют обеспечить быстрое, недорогое и конфиденциальное производство печатных плат, что обуславливает актуальность изучения современных аддитивных технологий. Суть использования 3D технологий в изготовлении ПП заключается в формировании ПП либо с нуля, либо с использованием диэлектрического основания и нанесения на него проводящего рисунка.

Целью настоящего исследования является сбор и обобщение знаний о современных возможностях технологии 3D-печати печатных плат и представление сравнительного анализа методов на основе общих характеристик данной технологии.

Методы исследований.

В работе были формализованы и обобщены современные знания о технологиях 3D-печати печатных плат, был выполнен их качественный сравнительный анализ для выявления ключевых преимуществ и недостатков, что позволяет говорить об эффективности технологий в производстве.

Предметом исследования является сравнение технологий 3D-печати печатных плат на основе современных научных исследований.

Объектом исследования является повышение применимости технологий 3D-печати для эффективного серийного производства печатных плат.

Перед непосредственным переходом к методам, необходимо рассмотреть ряд важных вопросов. Одна из особенностей ПП, полученных 3D-печатью, заключается в возможности получения “3D-структуры” печатной платы. В случае пересечения соединений не требуется наносить полноценный диэлектрический слой поверх уже сформированных проводников, достаточно изолировать участок пересечения диэлектриком (Рисунок 1). Переходные отверстия могут быть исполнены как классически, так и по-новому: диэлектрический слой в местах соединения слоев не наносится, тем самым формируется контакт между различными слоями [1].

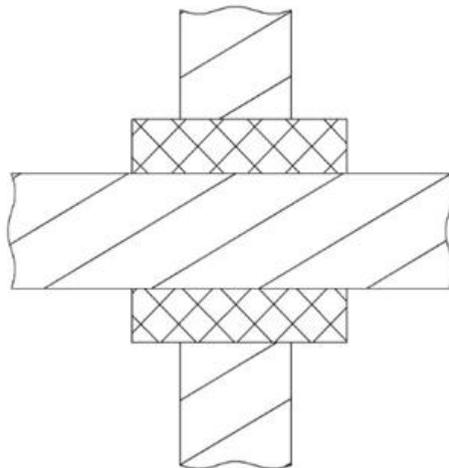


Рисунок 1. - 3D-структура взаимного расположения проводников

Ещё один важный аспект - монтаж компонентов, монтируемых поверхностно на ПП 3D-производства, схож с печатными платами, произведенными конвенциональными методами: во время печати проводников формируются контактные площадки, затем на них наносится дополнительный слой проводящих чернил, компонент устанавливается, чернила отверждаются. Дополнительно поверх установленного компонента может быть нанесен диэлектрический защитный слой, обеспечивающий большую адгезию к поверхности и защиту от окружающей среды. Возможно и использование низкотемпературных паяльных паст [2].

Одна из полезнейших апробированных возможностей рассмотренных методов - получение встроенных в коммутационную систему пассивных компонентов за счет различных чернил и геометрических форм. Например, при помощи метода АНМ были получены полимерные тонкопленочные резисторы номиналом от 100 Ом до 10 кОм с точностью до 10 % и установочной площадью 0,05 мм² [3]. В то же время напечатанные углеродистые резисторы имеют диапазон от 50 Ом до 1 МОм. Конденсаторы имеют емкость от 1 пФ до 1 нФ. Возможна печать катушек индуктивности, антенн [4]. Доступнее становится установка микросхемы «прямо на плату» (chip on board). Были получены и активные компоненты – транзисторы, светодиоды, батареи, фотоэлементы, однако в настоящее время их изготовление осуществимо только гибридным методом – сочетанием аддитивных и субтрактивных технологических операций [5].

Моделирование методом плавленого осаждения (Fused Deposition Modeling).

Метод плавленого осаждения (МПО) — это процесс аддитивного производства, при котором печатные платы изготавливаются путем нанесения материала слой за слоем. Это один из нескольких аддитивных процессов, включая стереолитографию (SL) и селективное лазерное спекание (SLS). Разработанный С. Скоттом Крампом в конце 1980-х годов и коммерциализированный в 1990 году компанией Stratasys, МПО широко используется для моделирования, создания прототипов и производственных приложений.

Принцип работы. В процессе МПО используется порталный робот, оснащенный экструдированной головкой, которая перемещается в направлениях X, Y и Z, в то время как рабочий стол перемещается вдоль осей Y и Z. Слои наносятся последовательно, при этом экструдер поднимается в соответствии с толщиной слоя.

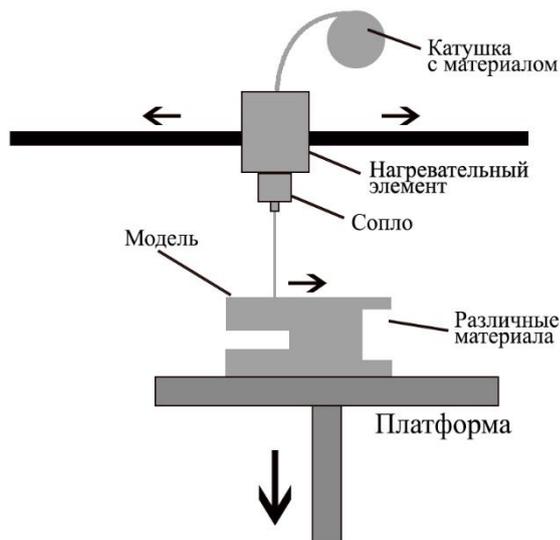


Рисунок 2. - Принцип работы МПО [6]

Используемые материалы. Для изготовления печатной платы в качестве изоляционных материалов используются полиамиды, керамика, высокотемпературные полимеры, термопластичный полиуретан, в то время как токопроводящим материалом является композитное углеродное волокно. Эти материалы выпускаются в виде нитей.

Этапы создания модели. Первоначально требуется САД-модель печатной платы, которая сохраняется в формате Stereolithography (STL). Далее файл поступает в специальную программу для дальнейшего нарезания, а затем отправляется в МПО-станок. Дальнейшие параметры печати устанавливаются оператором станка, а по завершении деталь отсоединяется от стола сборки для последующих обработок.

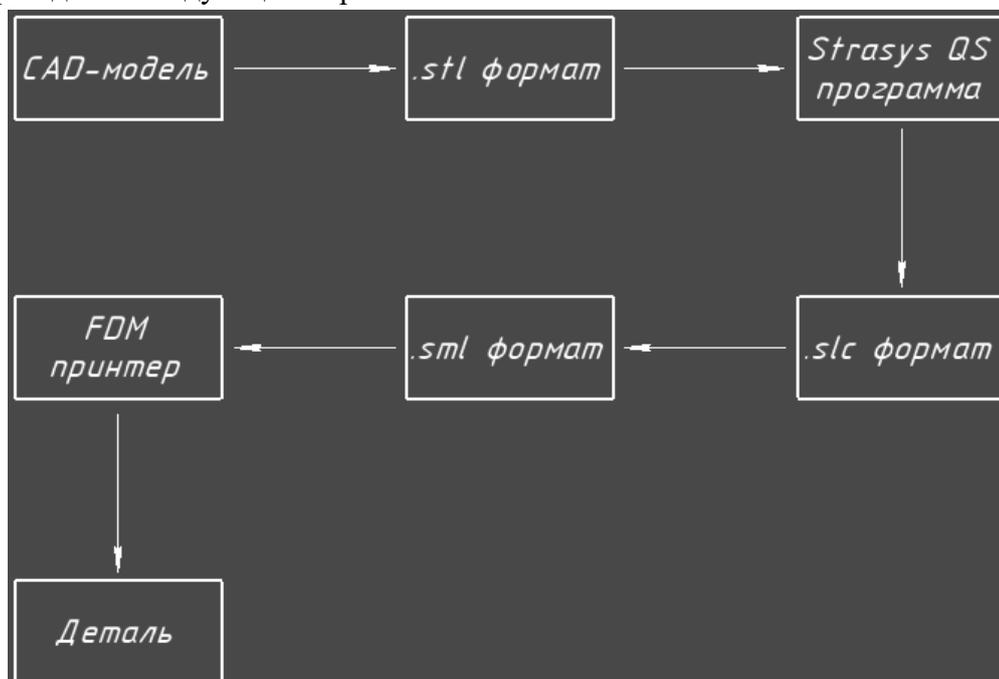


Рисунок 3. - Этапы по созданию физической модели методом МПО

Основные параметры, влияющие на качество МПО [7]. Ориентация: угол наклона детали по отношению к рабочей платформе влияет на точность размеров и использование материала. Толщина слоя: более толстые слои могут увеличить шероховатость поверхности. Угол растра: направление растра относительно оси X влияет на прочность и качество детали. Скорость нанесения: скорость, с которой материал наносится на сопло, может повлиять на общее качество детали.

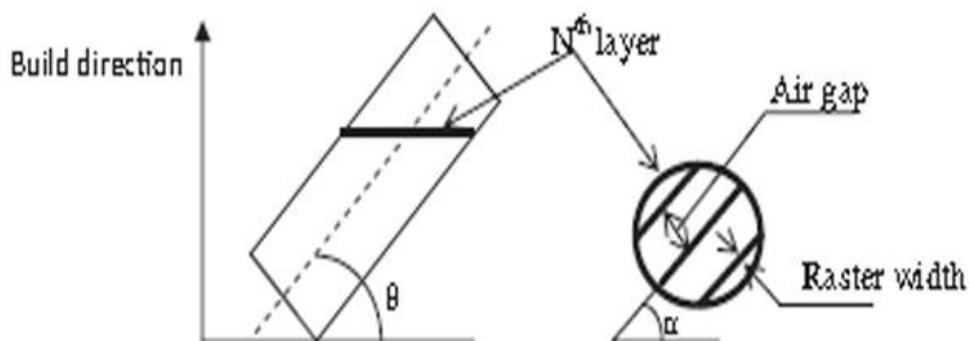


Рисунок 4. - Представление параметров процесса [7]

Характеристики деталей из МПО-материала. Точность размеров: степень соответствия между фактическими размерами и идеальными размерами изделия.

Шероховатость поверхности зависит от толщины слоя и эффекта лестницы, который возникает в результате послойного наращивания [8].

Механическая прочность зависит от сцепления между отдельными растрами и плотности используемого наполнителя.

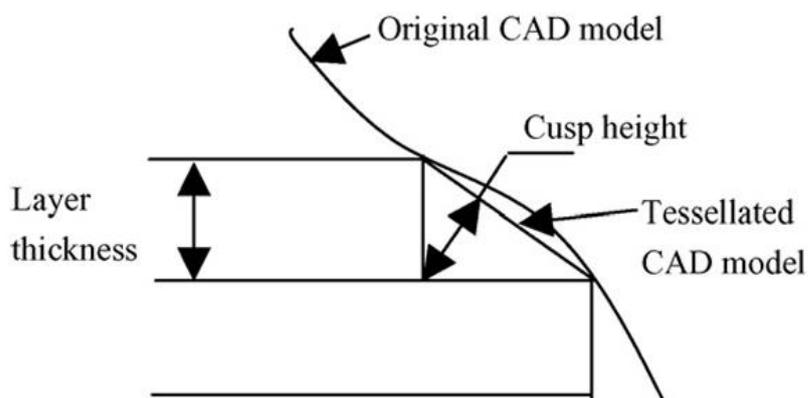


Рисунок 5. - Представление высоты острия в эффекте лестницы [8]

Аэрозольное нанесение материала (АНМ) (Aerosol Jet Printing).

Установки аэрозольного нанесения материала используют поток аэрозоля для фокусирования струи материала и его осаждения на подложку, затем следует спекание осажденного материала, либо его отверждение ультрафиолетом.

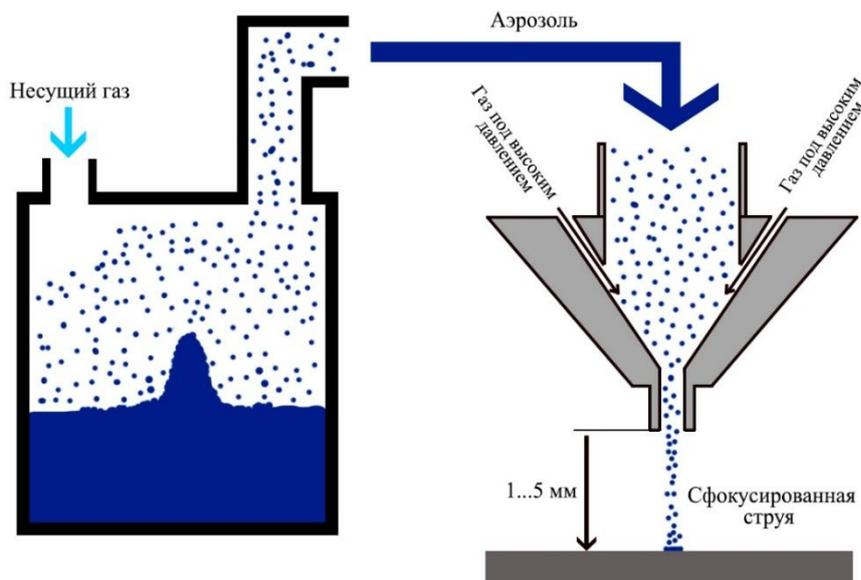


Рисунок 6. - Схема метода АНМ

Принцип печати. Жидкие чернила испаряют до частиц размером порядка 1–5 мкм, далее с помощью подачи несущего газа, например азота, формируется аэрозоль, который транспортируется в печатающую головку. Для наиболее точной печати необходимо обеспечить направленную струю аэрозоля диаметром менее 10 мкм через сопло, что достигается дополнительной подачей газа под высоким давлением. Это позволяет печатать мельчайшие структуры. Расстояние между соплом и подложкой составляет 1–5 мм - преимущество по сравнению с другими методами, так как позволяет наносить материал в канавки, печатать сложные объемные контуры, использовать основания различных форм, что было показано в работе [9], путем печати проводящего рисунка на сложных, изогнутых поверхностях из резины, отверждаемой ультрафиолетом – сформированных на том же принтере. Процесс проходит под контролем ЧПУ – CAD/CAM систем. Таким образом достигается стабильное и равномерное осаждение материала.

Напечатанные структуры находятся в размерном диапазоне от 10 мкм до нескольких миллиметров. Скорость подачи материала составляет до 10 мг/мин [10].

Взаимодействие между частицей и несущим газом описывается с помощью семи принципов: закона Стокса, описывающего силу трения на частицу в жидкости, Бассетова сила, которая описывает нестационарную силу вязкого сопротивления при ускорении частицы в жидкости, виртуальная масса, которая позволяет учесть инерцию жидкости вокруг частицы, градиент давления жидкости, сила тяжести, эффект Магнуса, который описывает силу, возникающую при обтекании жидкостью вращающейся частицы, сила Саффмана, которая описывает подъемную силу, возникающую из-за сдвигов в потоке жидкости. Сила Стокса и

Саффмана имеют наиболее значительный эффект на «прицельность» струи аэрозоля, обуславливают скорость выхода из сопла в 100 м/с [11].

Чернила. Теоретически, любой материал, взвешенный в газовой среде, подходит для метода АНМ. Это могут различные растворы, суспензии с наночастицами, содержащие металлы и их сплавы, полимеры, или даже биоматериалы. Современные коммерческие установки используют ультразвуковое или пневматическое дробление для получения жидкости вязкостью от 0,7 мПа·С до 2500 мПа·С [9]. Свойства полученных структур сильно зависят от размера частиц. Проводник, полученный спеканием при 200°С на 60 минут из чернил с содержанием наночастиц серебра 57-62% со средним их размером менее 50 нм, обладает сопротивлением 9,2 мОм/см, в то время как литой серебряный проводник имеет сопротивление 1,6 мОм/см [5]. Для печати методом АНМ на коммерческих принтерах используется дробление частиц до 1-5 мкм [12].

Для получения токопроводящих дорожек используются наночастицы серебра, меди, для диэлектрических слоев - акрилаты, фенольные, эпоксидные, полиуретановые, силиконовые смолы, резистивные чернила на основе углерода. После нанесения проводящего рисунка проводится спекание при температурах 120°С – 300°С на время от 30 до 60 минут, что предъявляет требования температурной устойчивости ко всем используемым материалам [10]. Возможно отверждение чернил ультрафиолетом, а также спекание лазером.

Диэлектрическое основание. В качестве ядра и препрегов печатной платы может использоваться как готовая подложка (стекло, стеклотекстолит, керамика), так и напечатанные диэлектрическими чернилами слои.

Метод АНМ позволяет изготавливать многослойные печатные платы с переходными отверстиями, достичь ширины печатного проводника в 10 мкм [13]. В работе [1] была продемонстрирована работоспособность двухслойной ПП, изготовленной исключительно методом АНМ, проведены успешные испытания на температурную устойчивость в диапазоне 10°– 80°.

Струйная печать. Капельное и непрерывное нанесение материала (drop on demand и continuous inkjet).

Два основных режима струйной печати — это режим непрерывной струйной печати (ННМ) и режим струйной печати по требованию, или же капельного нанесения материала (КНМ). В обоих методах жидкость проходит через отверстие или сопло.

В случае КНМ используется массив сопел, к каждому из которых поступает команда (с помощью пульсирующего давления) о выдавливании капли чернил. Затем капли падают по прямой линии [11].

Системы ННМ могут использовать как одно сопло, так и несколько. В режиме ННМ, как следует из его названия, жидкость непрерывно проталкивается через сопло. Затем струя распадается на поток капель в результате капиллярной неустойчивости Рэлея-Плато. Капельки заряжаются и отклоняются с помощью полевых пластин на подложку во время печати, в то время как остальные собираются улавливателем для переработки. ННМ обычно обеспечивает высокую скорость капли (> 10 м/с) [14] и, таким образом, обеспечивает быструю обработку для таких приложений, как маркировка и штрихкодирование. Благодаря непрерывному струйному действию сопло с меньшей вероятностью засоряется из-за испарения растворителя, особенно если используется летучий растворитель. Однако разрешение ННМ обычно ниже,

чем у КНМ. Кроме того, осаждение мелких фрагментированных капель на пластины поля может изменить электрическое поле и в худшем случае может привести к отказу принтера. Повторное использование чернил может также привести к загрязнению и потребовать повторной регулировки концентрации чернил для учета испарения растворителя. Струйная печать типа КНМ используется более широко, где капля генерируется только по мере необходимости с помощью термического или пьезоэлектрического привода. Типичная скорость капли составляет около 5–8 м/с [15]. Недостатком струйной печати является высыхание чернил в сопле во время простоя, что может привести к осаждению частиц в сопле и возможному засорению.

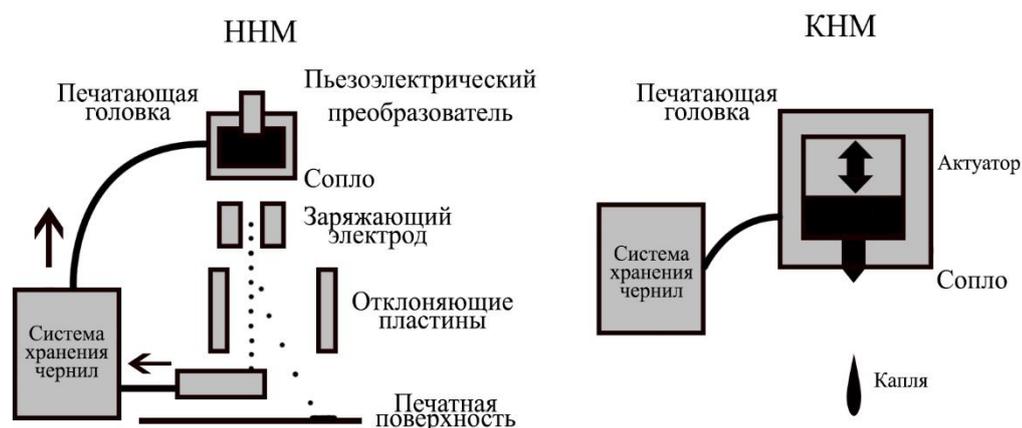


Рисунок 7. - Принцип работы метода струйной печати [16]

Параметры производительности печати. Ключевые показатели производительности включают:

Разрешение измеряется в точках на дюйм (DPI), зависит от объема капли, который определяется рабочим напряжением, продолжительностью импульса, диаметром сопла и типом подложки, и угла контакта. Для КНМ составляет порядка десятков микрон [15]. Консистенция зависит от свойств жидкости, таких как реология и поверхностное натяжение. Точность размещения капли: разница между целевым и фактическим местом падения капли (обычно угол отклонения равен $\pm 0,95^\circ$) [17].

Характеристика чернил. Вязкость и поверхностное натяжение. Измерение поверхностного натяжения: методы включают пластину Вильгельми, кольцо Дю Нуи и метод висячей капли [18].

Реологическая характеристика: ньютоновские жидкости имеют постоянную вязкость, в то время как неньютоновские жидкости демонстрируют поведение разжижения или загустевания при сдвиге, который составляет порядка 10^4 c^{-1} [19].

Распад струи и образование капли. Формирование капли регулируется инерционными, вязкими, упругими и поверхностными силами. Наиболее часто влияние вышеперечисленных свойств и других параметров, например диаметра сопла, на печатаемость чернил оценивается с использованием трех безразмерных чисел: числа Рейнольдса (для стабильного образования капель лежит в пределах от 1 до 10), описывающего соотношение между инерционными и вязкими силами, числа Вебера (для стабильного образования капель лежит в пределах от 4 до 1000), описывающего соотношение между инерционными и поверхностными силами, числа

Онезорге (для стабильного образования капель лежит в пределах от 0,1 до 1), описывающего отношение вязких и поверхностных сил [20–22].

Чернила. Практически любой материал может использоваться в качестве чернил: керамика, полимеры, коллоидные и гидрогели, металлические сплавы.

В современных процессах печати электроники чаще всего используются серебряные наночернила, хотя также доступны и золотые, медные и никелевые варианты. Серебро (Ag) и золото (Au) являются предпочтительными благодаря своей высокой стабильности, низкой химической активности и отличной электропроводности. В отличие от них, медь (Cu) и никель (Ni) применяются реже, так как подвержены окислению, что негативно сказывается на долговечности чернил и требует применения дополнительных защитных покрытий или печати в инертной атмосфере.

Металлоорганические чернила представляют собой металлическую соль, растворенную в специальном растворителе, которая восстанавливается в металлические частицы с помощью оптических или термических методов. Эти чернила существуют в растворенной форме, что предотвращает агломерацию и засорение сопла. Исследования показали, что металлоорганические частицы обеспечивают лучшую проводимость линий по сравнению с аналогами из наночернил и позволяют спекать при более низких температурах (ниже +150 °С).

Чернила на основе нанопроволок используются гораздо реже, чем наночернила, из-за высокого аспектного отношения нанопроволок и их низкой концентрации в чернилах, что может приводить к засорению сопел и необходимости многократной печати для достижения нужной проводимости. Тем не менее, они демонстрируют более высокую механическую пластичность, что делает их подходящими для создания антенн и мобильной электроники [23,24].

Для изготовления гибких проводников применяются чернила из композиции оксида графена, технического углерода и карбоксиметилцеллюлозы с сопротивлением 0,6 Ом на см.

Для изоляции обычно применяют как подложки, так и специальные чернила, такие как SU-8, SunTronic Solsys Jettable Insulator EMD 6415, поли(4-винилфенол) (ПВП, PVP) и другие. В гибкой электронике часто используют подложки [25] из полиимидов (PI, полиимидная пленка, например, Dupont Kapton), полиэтилентерефталата (ПЭТ, PET), полиэтиленнафталата (ПЭН, PEN) и полидиметилсилоксана (ПДМС, PDMS).

Многофункциональное нанесение материала (МФНМ).

Технология многофункционального нанесения обладает своей уникальностью, которая выделяет его среди многих других технологий, вместо использования традиционного ИК-нагрева, как это происходит в 3D-принтерах от компаний NanoDimension и BotFactory, в этом методе раскрывается потенциал УФ-излучения [2]. УФ-излучение может не только преобразовывать полимерные материалы, но и спекать наночастицы серебра, что является ключевым моментом в создании проводящих дорожек.

В качестве фундамента этой технологии лежит метод интенсивного импульсного света (IPL), основанный на фототермическом механизме, ксеноновые лампы генерируют короткие импульсы света, которые нагревают чернила, в следствии фотонного поглощения и дальнейшей генерации тепла [2]. Во время всего процесса следует внимательно контролировать термический аспект, чтобы избежать разрушение проводников в следствии резких температурных перепадов. Для серебряных наночернил с размером частиц менее 50 нм

УФ-излучение в диапазоне 390 нм является самым эффективным методом спекания без необходимости в термообработке [2]. Одной из важных особенностей данной технологии является то, что процесс фототермического спекания затрагивает только проводящие чернила, не нарушая ранее напечатанные полимерные компоненты [2].

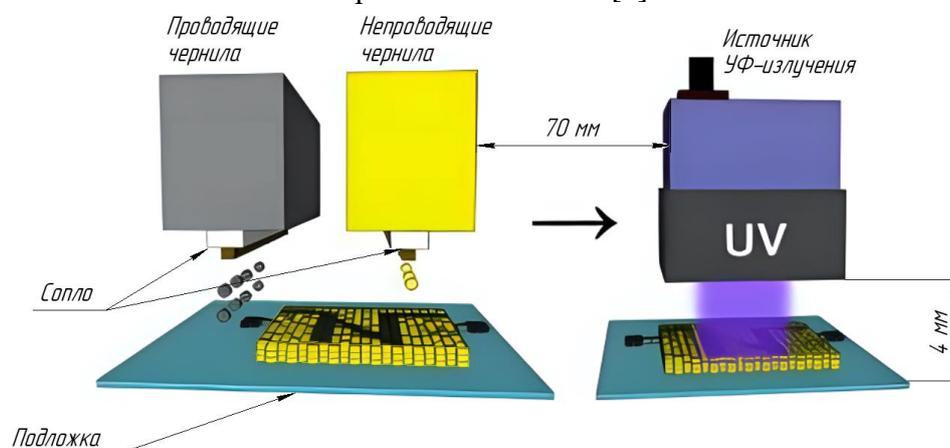


Рисунок 8. – Принцип работы метода МФНМ [26]

Чернила. Современные установки используют следующие УФ-отверждаемые чернила: серебряные наночернила SilverJet DGP-40LT-15C фирмы Advanced Nano Products (ANP), состоящие из 38,85 мас.% частиц серебра, диспергированных в монометилевого эфира триэтиленгликоля (triethylene glycol monomethyl ether, TGME), графитовые чернила на водной основе серии 3800 фирмы Methode Development Co., диакрилатные мономерные диэлектрические чернила [2].

Получаемые структуры. Технологией многофункционального нанесения можно получать точные, с точки зрения геометрии, структуры, размером до 50-30 мкм, по сравнению с некоторыми другими методами.

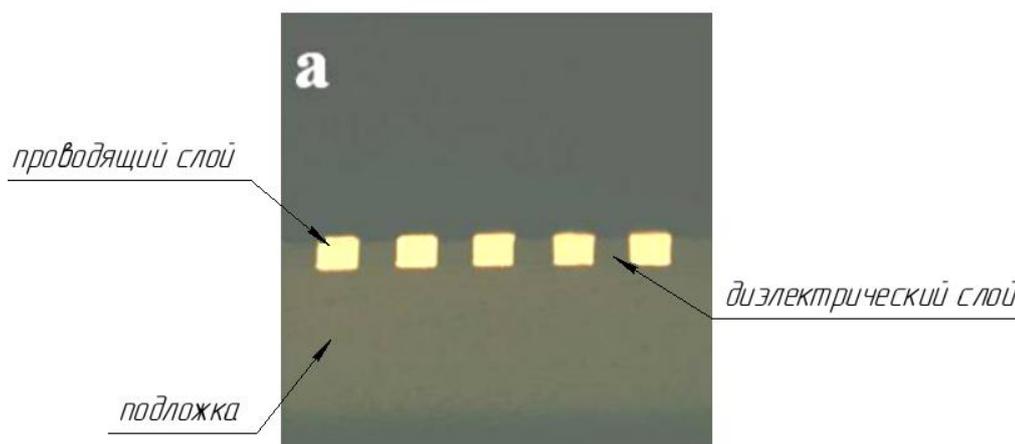


Рисунок 9. - Структура, получаемая технологией МФНМ [27]

На Рисунке 9 представлено поперечное сечение тонких линий полученных с помощью МФНМ, представляющие собой правильные прямоугольники, при этом средняя ширина нижней и верхней части очень близка к расчетным значениям (50 мкм), поскольку при изготовлении тонких линий из МФНМ исключается процесс травления, медные линии без взаимодействия с раствором для травления получают более ровными, и фактическая ширина

проводника соответствует расчетной [27]. Таким образом высокая точность и гибкость и выделяет этот метод среди других.

Заключение.

Было проведено сравнение параметров печатных плат, получаемых методами 3D-печати (Таблица 1).

Таблица 1. - Сравнение методов 3D-печати для изготовления печатных плат

Общие сведения	Характеристика				
Наименование метода	Капельное нанесение материала	Непрерывное нанесение материала	Послойное наложение филамента	Многофункциональное нанесение материала	Аэрозольное нанесение материала
Класс точности ПП (ГОСТ Р 53429)	>7 - в теории, 5-6 - на практике [28]	3 [28]	5 [28]	6 [28]	>7 [28]
Тип изготавливаемых ПП	ЖПП/ГПП [28]	ЖПП/ГПП [28]	ЖПП/ГПП [28]	ЖПП [28]	ЖПП/ГПП [28]
Количество слоев ПП, шт.	>2 [28]	>2 [28]	>3 [28]	>2 [28]	>2 [28]
Минимальная ширина проводника, мкм	30 - в теории, 75 - на практике [5,29,30]	200 [15]	100 [30]	40 [27]	10 [9]
Минимальная толщина проводника, мкм	0,01-2 [5,31]	200 [32]	200 [31]	25 [27]	1,4 [5]
Минимальное расстояние между проводниками, мкм	100 [33]	400 [16]	100 [33]	80 [27]	20 [2]
Материал	Токопроводящий: Ag, Au, графен, реже Cu и Ni Изоляционный: полиимид, SU-8, SunTronic Solsys Jetttable Insulator EMD 6415, поли(4-винифенол) (ПВП, PVP) и другие [25]	Токопроводящий: Ag, Au, графен, Cu и Ni, металлоорганика Изоляционный: полиимид, стекло, оксиды алюминия, керамика [25]	Токопроводящий: композитное углеродное волокно Изоляционный: полиамиды, керамика, высокотемпературные полимеры, термопластичный полиуретан [34]	Токопроводящий: Ag Изоляционный: диакрилатные мономерные диэлектрические чернила, содержащие три (пропиленгликоль) диакрилат, 2,4-диэтилтиоксанон и этил 4-(диметиламино) бензоат [2]	Токопроводящий: наночастицы серебра, меди. Изоляционный - акрилаты, фенольные, эпоксидные, полиуретановые, силиконовые смолы, резистивные чернила на основе углерода [10]
Форма	Чернила	Чернила	Филамент	Чернила	Чернила
Размер твердых частиц, мкм	в 50 раз меньше диаметра сопла [5,35]	0,02-10 [24]	10-50 [36]	Не менее 50 [2]	0,05–5 [13]
Вязкость мПа*с	1-40 [32,35]	1-40 [32,35]	100000-800000 [37]	13 [26]	0,7-2500 [12,13]
Поверхностное натяжение мН/м	25-50 [32]	25-50 [17]	30-50 [38]	30 - 37 [26]	-
Подложка	Не требуется	Не требуется	Не требуется	Требуется (алюминиевая) [27]	Не требуется

В результате сравнительного анализа было выявлено, что наиболее передовой из рассмотренных методов – аэрозольное напыление, однако, на данный момент, он является и самым дорогим, дороже и традиционных методов производства.

Текущие исследования направлены на улучшение шероховатости поверхности и механической прочности путем оптимизации параметров температурных профилей и методов напыления. В настоящее время не существует серийного производства печатных плат методом 3D-печати. Одна из причин – недостаточность исследовательской базы, а значит и отсутствие нормативной документации. Существуют и ограничения по оборудованию: нет 3D-принтеров, способных обеспечить полный цикл производства ПП. Для увеличения производительности и размеров получаемых ПП необходимы промышленные принтеры с большой рабочей областью и несколькими печатающими головками – таким образом можно формировать проводящий рисунок сразу нескольких ПП на одной подложке, как это происходит при изготовлении конвенциональными методами. Эти недостатки обуславливают и увеличенное время производства. При устранении вышеперечисленных недостатков технологии можно говорить о масштабировании производства ПП с помощью 3D-печати.

Список литературы

1. Bolger J. et al. Multi-layer PC boards Fabricated using Aerosol-jet Printing // International Symposium on Microelectronics. 2013. Vol. 2013, № 1. p. 000921–000926.
2. Смирнова О., Боброва Ю., Моисеев К. МЕТОДЫ 3D-ПЕЧАТИ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ // ELECTRONICS: SCIENCE, TECHNOLOGY, BUSINESS. 2022. Vol. 219, № 8. pp. 128–136.
3. Kang B.J., Lee C.K., Oh J.H. All-inkjet-printed electrical components and circuit fabrication on a plastic substrate // Microelectron Eng. 2012. Vol. 97. pp. 251–254.
4. Adams J.J. et al. Conformal Printing of Electrically Small Antennas on Three-Dimensional Surfaces // Advanced Materials. 2011. Vol. 23, № 11. pp. 1335–1340.
5. Wilkinson N.J. et al. A review of aerosol jet printing—a non-traditional hybrid process for micro-manufacturing // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2019. Vol. 105, № 11. pp. 4599–4619.
6. Haghsefat K., K.; Eng M., Tingting L. FDM 3D Printing Technology and Its Fundamental Properties // In Proceedings of the International Conference on Innovation and Research in Engineering Sciences / ed. Haghsefat K., K.; Eng M., Tingting L. Tbilisi, 2020.
7. Sood A.K. et al. An investigation on sliding wear of FDM built parts // CIRP J Manuf Sci Technol. 2012. Vol. 5, № 1. pp. 48–54.
8. P.M. Pandey., N. Venkata Reddy., S.G. Dhande. Part Deposition Orientation Studies in Layer Manufacturing // Journal of Material Processing Technology. 2007. Vol. 185. pp. 125–131.
9. Werum K. et al. Aerosol Jet Printing and Interconnection Technologies on Additive Manufactured Substrates // Journal of Manufacturing and Materials Processing. 2022. Vol. 6, № 5. p. 119.
10. Lewis P., White R., Smith-Draper B. Lessons learned in the implementation of aerosol jet printing for fabricating multilayer circuit boards // Advancing Microelectronics. 2017. Vol. 44, № 3. pp. 12–15.
11. Martin G.D., Hoath S.D., Hutchings I.M. Inkjet printing - the physics of manipulating liquid jets and drops // J Phys Conf Ser. 2008. Vol. 105. p. 012001.

12. Christenson K.K. et al. Direct Printing of Circuit Boards Using Aerosol Jet // NIP & Digital Fabrication Conference. 2011. Vol. 27, № 1. pp. 433–436.
13. Gupta A.A. et al. Aerosol-Jet Printed Transmission Lines for Microwave Packaging Applications // IEEE Trans Compon Packaging Manuf Technol. 2019. Vol. 9, № 12. pp. 2482–2489.
14. Derby B. Inkjet Printing of Functional and Structural Materials: Fluid Property Requirements, Feature Stability, and Resolution // Annu Rev Mater Res. 2010. Vol. 40, № 1. pp. 395–414.
15. Hutchings I. M., Martin G. D. Inkjet Technology for Digital Fabrication / ed. Hutchings I. M., Martin G. D. Manchester: Wiley, 2012.
16. Martin G.D., Hoath S.D., Hutchings I.M. Inkjet printing - the physics of manipulating liquid jets and drops // J Phys Conf Ser. 2008. Vol. 105. P. 012001.
17. Lean M. H. Method and apparatus for reducing drop placement error in printers: pat. US6367909B1 USA. United States, 2002.
18. Arthur W. Adamson., Alice P. Gast. Physical Chemistry of Surfaces. 6th ed. / ed. Arthur W. Adamson., Alice P. Gast. New York: Wiley, 1997.
19. Reis N., Ainsley C., Derby B. Ink-jet delivery of particle suspensions by piezoelectric droplet ejectors // J Appl Phys. 2005. Vol. 97, № 9.
20. DUINEVELD P.C. The stability of ink-jet printed lines of liquid with zero receding contact angle on a homogeneous substrate // J Fluid Mech. 2003. Vol. 477.
21. Reis N., Derby B. Ink Jet Deposition of Ceramic Suspensions: Modeling and Experiments of Droplet Formation // MRS Proceedings. 2000. Vol. 625. p. 117.
22. Son Y. et al. Spreading of an Inkjet Droplet on a Solid Surface with a Controlled Contact Angle at Low Weber and Reynolds Numbers // Langmuir. 2008. Vol. 24, № 6. pp. 2900–2907.
23. Huang G.-W., Xiao H.-M., Fu S.-Y. Wearable Electronics of Silver-Nanowire/Poly(dimethylsiloxane) Nanocomposite for Smart Clothing // Sci Rep. 2015. Vol. 5, № 1. p. 13971.
24. Seifert T. et al. Additive Manufacturing Technologies Compared: Morphology of Deposits of Silver Ink Using Inkjet and Aerosol Jet Printing // Ind Eng Chem Res. 2015. Vol. 54, № 2. pp. 769–779.
25. Beedasy V., Smith P.J. Printed Electronics as Prepared by Inkjet Printing // Materials. 2020. Vol. 13, № 3. p. 704.
26. Saleh E. 3D inkjet printing of digital composites for tailored dielectric properties // International Conference on Composites/Nano Engineering / ed. Saleh E. 2017.
27. He H. et al. Fabrication and surface treatment of fine copper lines for HDI printed circuit board with modified full-additive method // Circuit World. 2017. Vol. 43, № 3. pp. 131–138.
28. Е.В. Пирогова. Проектирование и технология печатных плат // Москва: ИНФРА-М, 2005.
29. Zhang H., Moon S.K., Ngo T.H. 3D Printed Electronics of Non-contact Ink Writing Techniques: Status and Promise // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology. 2020. Vol. 7, № 2. pp. 511–524.
30. Nelson M.D., Ramkumar N., Gale B.K. Flexible, transparent, sub-100 μ m microfluidic channels with fused deposition modeling 3D-printed thermoplastic polyurethane // Journal of Micromechanics and Microengineering. 2019. Vol. 29, № 9. p. 095010.

31. Benedict. Voxel8 Developer's Kit 3D printer now shipping // Journal 3D printings and 3D printers news. 2016.
32. Antohe B. V., Wallace D.B. Acoustic Phenomena in a Demand-Mode Piezoelectric Ink-Jet Printer // NIP & Digital Fabrication Conference. 2001. Vol. 17, № 1. pp. 885–889.
33. Paul Hanaphy. Nano Dimension unveils new DragonFly IV and FLIGHT software: technical specifications and pricing // Journal of 3D printing industry. 2021.
34. Flowers P.F. et al. 3D printing electronic components and circuits with conductive thermoplastic filament // Addit Manuf. 2017. Vol. 18. pp. 156–163.
35. Cummins G., Desmulliez M.P.Y. Inkjet printing of conductive materials: a review // Circuit World. 2012. Vol. 38, № 4. pp. 193–213.
36. Singh R. et al. Effect of single particle size, double particle size and triple particle size Al₂O₃ in Nylon-6 matrix on mechanical properties of feed stock filament for FDM // Compos B Eng. 2016. Vol. 106. pp. 20–27.
37. Khaliq M.H. et al. On the use of high viscosity polymers in the fused filament fabrication process // Rapid Prototyp J. 2017. Vol. 23, № 4. pp. 727–735.
38. Sun Q. et al. Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments // Rapid Prototyp J. 2008. Vol. 14, № 2. pp. 72–80

References

1. Bolger J. et al. Multi-layer PC boards Fabricated using Aerosol-jet Printing // International Symposium on Microelectronics. 2013. Vol. 2013, № 1. p. 000921–000926.
2. Smirnova O., Bobrova Y., Moiseev K. 3D PRINTING METHODS FOR THE MANUFACTURE OF PRINTED CIRCUIT BOARDS. 2022. Vol. 219, № 8. pp. 128–136.
3. Kang B.J., Lee C.K., Oh J.H. All-inkjet-printed electrical components and circuit fabrication on a plastic substrate // Microelectron Eng. 2012. Vol. 97. pp. 251–254.
4. Adams J.J. et al. Conformal Printing of Electrically Small Antennas on Three-Dimensional Surfaces // Advanced Materials. 2011. Vol. 23, № 11. pp. 1335–1340.
5. Wilkinson N.J. et al. A review of aerosol jet printing—a non-traditional hybrid process for micro-manufacturing // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2019. Vol. 105, № 11. pp. 4599–4619.
6. Haghsefat K., K.; Eng M., Tingting L. FDM 3D Printing Technology and Its Fundamental Properties // In Proceedings of the International Conference on Innovation and Research in Engineering Sciences / ed. Haghsefat K., K.; Eng M., Tingting L. Tbilisi, 2020.
7. Sood A.K. et al. An investigation on sliding wear of FDM built parts // CIRP J Manuf Sci Technol. 2012. Vol. 5, № 1. pp. 48–54.
8. P.M. Pandey., N. Venkata Reddy., S.G. Dhande. Part Deposition Orientation Studies in Layer Manufacturing // Journal of Material Processing Technology. 2007. Vol. 185. pp. 125–131.
9. Werum K. et al. Aerosol Jet Printing and Interconnection Technologies on Additive Manufactured Substrates // Journal of Manufacturing and Materials Processing. 2022. Vol. 6, № 5. p. 119.
10. Lewis P., White R., Smith-Draper B. Lessons learned in the implementation of aerosol jet printing for fabricating multilayer circuit boards // Advancing Microelectronics. 2017. Vol. 44, № 3. pp. 12–15.

11. Martin G.D., Hoath S.D., Hutchings I.M. Inkjet printing - the physics of manipulating liquid jets and drops // J Phys Conf Ser. 2008. Vol. 105. p. 012001.
12. Christenson K.K. et al. Direct Printing of Circuit Boards Using Aerosol Jet // NIP & Digital Fabrication Conference. 2011. Vol. 27, № 1. pp. 433–436.
13. Gupta A.A. et al. Aerosol-Jet Printed Transmission Lines for Microwave Packaging Applications // IEEE Trans Compon Packaging Manuf Technol. 2019. Vol. 9, № 12. pp. 2482–2489.
14. Derby B. Inkjet Printing of Functional and Structural Materials: Fluid Property Requirements, Feature Stability, and Resolution // Annu Rev Mater Res. 2010. Vol. 40, № 1. pp. 395–414.
15. Hutchings I. M., Martin G. D. Inkjet Technology for Digital Fabrication / ed. Hutchings I. M., Martin G. D. Manchester: Wiley, 2012.
16. Martin G.D., Hoath S.D., Hutchings I.M. Inkjet printing - the physics of manipulating liquid jets and drops // J Phys Conf Ser. 2008. Vol. 105. P. 012001.
17. Lean M. H. Method and apparatus for reducing drop placement error in printers: pat. US6367909B1 USA. United States, 2002.
18. Arthur W. Adamson., Alice P. Gast. Physical Chemistry of Surfaces. 6th ed. / ed. Arthur W. Adamson., Alice P. Gast. New York: Wiley, 1997.
19. Reis N., Ainsley C., Derby B. Ink-jet delivery of particle suspensions by piezoelectric droplet ejectors // J Appl Phys. 2005. Vol. 97, № 9.
20. DUINEVELD P.C. The stability of ink-jet printed lines of liquid with zero receding contact angle on a homogeneous substrate // J Fluid Mech. 2003. Vol. 477.
21. Reis N., Derby B. Ink Jet Deposition of Ceramic Suspensions: Modeling and Experiments of Droplet Formation // MRS Proceedings. 2000. Vol. 625. p. 117.
22. Son Y. et al. Spreading of an Inkjet Droplet on a Solid Surface with a Controlled Contact Angle at Low Weber and Reynolds Numbers // Langmuir. 2008. Vol. 24, № 6. pp. 2900–2907.
23. Huang G.-W., Xiao H.-M., Fu S.-Y. Wearable Electronics of Silver-Nanowire/Poly(dimethylsiloxane) Nanocomposite for Smart Clothing // Sci Rep. 2015. Vol. 5, № 1. p. 13971.
24. Seifert T. et al. Additive Manufacturing Technologies Compared: Morphology of Deposits of Silver Ink Using Inkjet and Aerosol Jet Printing // Ind Eng Chem Res. 2015. Vol. 54, № 2. pp. 769–779.
25. Beedasy V., Smith P.J. Printed Electronics as Prepared by Inkjet Printing // Materials. 2020. Vol. 13, № 3. p. 704.
26. Saleh E. 3D inkjet printing of digital composites for tailored dielectric properties // International Conference on Composites/Nano Engineering / ed. Saleh E. 2017.
27. He H. et al. Fabrication and surface treatment of fine copper lines for HDI printed circuit board with modified full-additive method // Circuit World. 2017. Vol. 43, № 3. pp. 131–138.
28. E.V. Pirogova. Design and Technology of Printed Circuit Boards // Moscow: INFRA-M, 2005
29. Zhang H., Moon S.K., Ngo T.H. 3D Printed Electronics of Non-contact Ink Writing Techniques: Status and Promise // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology. 2020. Vol. 7, № 2. pp. 511–524.

30. Nelson M.D., Ramkumar N., Gale B.K. Flexible, transparent, sub-100 μ m microfluidic channels with fused deposition modeling 3D-printed thermoplastic polyurethane // *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 2019. Vol. 29, № 9. p. 095010.
 31. Benedict. Voxel8 Developer's Kit 3D printer now shipping // *Journal 3D printings and 3D printers news*. 2016.
 32. Antohe B. V., Wallace D.B. Acoustic Phenomena in a Demand-Mode Piezoelectric Ink-Jet Printer // *NIP & Digital Fabrication Conference*. 2001. Vol. 17, № 1. pp. 885–889.
 33. Paul Hanaphy. Nano Dimension unveils new DragonFly IV and FLIGHT software: technical specifications and pricing // *Journal of 3D printing industry*. 2021.
 34. Flowers P.F. et al. 3D printing electronic components and circuits with conductive thermoplastic filament // *Addit Manuf*. 2017. Vol. 18. pp. 156–163.
 35. Cummins G., Desmulliez M.P.Y. Inkjet printing of conductive materials: a review // *Circuit World*. 2012. Vol. 38, № 4. pp. 193–213.
 36. Singh R. et al. Effect of single particle size, double particle size and triple particle size Al₂O₃ in Nylon-6 matrix on mechanical properties of feed stock filament for FDM // *Compos B Eng*. 2016. Vol. 106. pp. 20–27.
 37. Khaliq M.H. et al. On the use of high viscosity polymers in the fused filament fabrication process // *Rapid Prototyp J*. 2017. Vol. 23, № 4. pp. 727–735.
 38. Sun Q. et al. Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments // *Rapid Prototyp J*. 2008. Vol. 14, № 2. pp. 72–80
-