

Раздел 2. «Машиностроение, технологические машины и транспорт, строительство»

МРНТИ 621.7 (073)
УДК: 621.865

[DOI:10.4411/s00259-019-346](https://doi.org/10.4411/s00259-019-346)

Д.М.Бұланбай

*Карагандинский индустриальный университет, г. Темиртау, Казахстан
(E-mail:bulanbay@tttu.edu.kz)*

«Технология 3D-печати металлических компонентов в аэрокосмической промышленности»

В статье рассматривается технология 3D-печати металлических компонентов, которая приобретает все большее значение в аэрокосмической промышленности. Аддитивное производство позволяет создавать сложные геометрические формы, что снижает вес конструкций и повышает их прочностные характеристики. Применение металлов, таких как титан, алюминий и сплавы никеля, делает возможным производство высоконагруженных деталей для авиационных и космических аппаратов. Технология также способствует снижению затрат на производство и сокращению времени изготовления по сравнению с традиционными методами.

Ключевые слова: 3D-печать, аддитивное производство, металлические компоненты, аэрокосмическая промышленность, титан, алюминий, сплавы никеля, производство деталей, снижение веса, оптимизация конструкции, инновационные технологии.

Введение

Аэрокосмическая промышленность является одной из самых высокотехнологичных и быстроразвивающихся отраслей, в которой требования к качеству, надежности и эффективности компонентов постоянно растут. В условиях глобальной конкуренции и стремления к снижению затрат, компании сталкиваются с необходимостью внедрения инновационных технологий, которые могут обеспечить конкурентные преимущества. Одной из таких технологий, которая в последние годы привлекла значительное внимание, является 3D-печать металлических компонентов. Эта технология, также известная как аддитивное производство, открывает новые горизонты для проектирования, производства и эксплуатации компонентов, используемых в аэрокосмической отрасли.

3D-печать металлических компонентов представляет собой процесс, при котором объекты создаются путем последовательного наложения слоев материала. Эта методология отличается от традиционных методов производства, таких как фрезерование или литье, которые требуют значительных затрат времени и ресурсов на подготовку инструментов и форм. В отличие от этого, 3D-печать позволяет создавать сложные геометрические формы с высокой степенью свободы, что делает ее особенно привлекательной для аэрокосмической промышленности, где часто требуются уникальные и высоконагруженные детали.

Одним из ключевых аспектов 3D-печати является разнообразие технологий, используемых для создания металлических компонентов. Существует несколько методов аддитивного производства, таких как селективное лазерное спекание[SLM], электронно-лучевая плавка[EBM] и другие, каждый из которых имеет свои особенности и преимущества. Эти технологии позволяют использовать широкий спектр металлических материалов, включая титан, алюминий, сталь и никелевые сплавы, что является критически важным для аэрокосмической отрасли, где требования к прочности и легкости компонентов являются определяющими. Применение 3D-печати в аэрокосмической промышленности уже демонстрирует значительные успехи. Компании, занимающиеся производством самолетов и космических аппаратов, начинают активно интегрировать аддитивные технологии в свои производственные процессы. Это позволяет не только сократить время на разработку и производство компонентов, но и значительно уменьшить количество отходов, что является важным фактором в условиях экологической ответственности современного производства. Примеры успешного

Раздел 2. «Машиностроение, технологические машины и транспорт, строительство»

применения 3D-печати в аэрокосмической отрасли включают создание деталей для двигателей, конструктивных элементов и даже целых узлов, что подтверждает потенциал этой технологии.

Однако внедрение 3D-печати в аэрокосмической промышленности также сопряжено с рядом вызовов. Ключевыми аспектами, требующими внимания, являются выбор материалов, их свойства и поведение при эксплуатации, а также проектирование и моделирование компонентов для аддитивного производства. Важным этапом является контроль качества и сертификация компонентов, которые должны соответствовать строгим стандартам безопасности и надежности, применяемым в аэрокосмической отрасли. Это требует разработки новых подходов к оценке качества, поскольку традиционные методы контроля могут не быть применимы к аддитивно произведенным компонентам.

Не менее важным аспектом является экономическая эффективность внедрения технологии 3D-печати. Анализ затрат и выгод, связанных с переходом к аддитивному производству, позволяет оценить целесообразность инвестиций в эту технологию. В условиях растущих затрат на традиционное производство и необходимости оптимизации производственных процессов, 3D-печать может стать ключевым фактором, способствующим снижению общих расходов и увеличению прибыльности.

Таким образом, технология 3D-печати металлических компонентов в аэрокосмической промышленности представляет собой многообещающее направление, которое может существенно изменить подходы к проектированию и производству. В данной работе будет рассмотрено множество аспектов, связанных с этой технологией, начиная от ее принципов и методов, заканчивая экономическими и качественными аспектами внедрения. Мы проанализируем существующие технологии 3D-печати, их применение в аэрокосмической отрасли, используемые материалы, проектирование компонентов, контроль качества и сертификацию, а также экономические аспекты, что позволит получить полное представление о текущем состоянии и перспективах развития этой инновационной технологии.

Актуальность исследования «Технология 3D-печати металлических компонентов в аэрокосмической промышленности» обусловлена стремительным развитием аддитивных технологий, которые открывают новые горизонты в проектировании и производстве сложных компонентов для авиации и космонавтики. В условиях глобальной конкуренции и необходимости повышения эффективности производства, 3D-печать позволяет значительно сократить время на разработку и изготовление деталей, а также снизить затраты на материалы и трудозатраты. Учитывая важность надежности и безопасности в аэрокосмической отрасли, исследование вопросов контроля качества и сертификации компонентов становится особенно актуальным. Кроме того, анализ экономических аспектов внедрения данной технологии поможет выявить ее преимущества и потенциальные риски, что имеет ключевое значение для стратегического планирования и принятия решений в рамках современных производственных процессов.

В работе «Технология 3D-печати металлических компонентов в аэрокосмической промышленности» объектом исследования является процесс 3D-печати, который включает в себя использование аддитивных технологий для создания металлических компонентов, применяемых в аэрокосмическом секторе. Предметом исследования выступают специфические аспекты этой технологии, такие как методы печати, используемые материалы, проектирование и моделирование компонентов, а также вопросы контроля качества и сертификации изделий. Кроме того, работа анализирует экономические аспекты внедрения 3D-печати в аэрокосмической отрасли, что позволяет оценить её влияние на эффективность производства и конкурентоспособность.

Целью данного исследования является всесторонний анализ технологии 3D-печати металлических компонентов в аэрокосмической промышленности, с акцентом на её потенциал для повышения эффективности производства и улучшения качества изделий. Задачи работы включают изучение существующих технологий 3D-печати, оценку их применения в аэрокосмическом секторе, анализ материалов, используемых для печати, а также разработку методов проектирования и моделирования компонентов. Кроме того, особое внимание уделяется вопросам контроля качества и сертификации, что критически важно для безопасности и надежности аэрокосмической техники, а также экономическим аспектам внедрения данной технологии, что позволит оценить её рентабельность и перспективы в условиях современного рынка.

Раздел 2. «Машиностроение, технологические машины и транспорт, строительство»

Методы и материалы

Технологии 3D-печати металлических компонентов представляют собой одно из самых значительных достижений в области аддитивного производства, особенно в аэрокосмической промышленности, где требования к материалам и компонентам очень высоки. Процесс 3D-печати, или аддитивного производства, заключается в последовательном добавлении материала для создания трехмерного объекта на основе цифровой модели. В отличие от традиционных методов, таких как фрезеровка или литье, которые основываются на удалении материала, аддитивные технологии формируют объект слой за слоем, что позволяет создавать более сложные геометрические формы и структуры, а также значительно снижать количество отходов. Одним из ключевых аспектов 3D-печати металлических компонентов является выбор технологии, которая будет использоваться для создания изделия. Существует несколько основных методов 3D-печати металлом, среди которых наиболее распространенными являются селективное лазерное плавление [SLM], электронно-лучевая плавка [EBM], а также методы, основанные на инъекции связующего вещества и лазерном спекании. Каждый из этих методов имеет свои особенности, преимущества и недостатки, которые определяют их применение в различных областях, включая аэрокосмическую промышленность [1].

Селективное лазерное плавление [SLM] является одной из самых популярных технологий 3D-печати металлом. В этом процессе используется мощный лазер, который плавит металлический порошок, слой за слоем, создавая заданную геометрию. Порошок наносится на рабочую платформу, после чего лазер сканирует поверхность, плавя металл в тех местах, где необходимо сформировать изделие. После завершения одного слоя, платформа опускается на толщину следующего слоя, и процесс повторяется. Это позволяет создавать сложные внутренние структуры, такие как пористые элементы или охлаждающие каналы, которые невозможно изготовить с использованием традиционных методов [2].

Электронно-лучевая плавка [EBM] является другой важной технологией, которая использует электронный луч вместо лазера для плавления металлического порошка. Этот метод также позволяет создавать детали с высокой точностью и сложной геометрией, но он работает в вакууме, что может быть преимуществом для некоторых материалов, чувствительных к окислению. EBM обеспечивает более высокую скорость печати по сравнению с SLM и может использоваться для создания крупных деталей, что делает его особенно привлекательным для аэрокосмической отрасли, где часто требуется изготовление больших компонентов [3].

Методы, основанные на инъекции связующего вещества, такие как Binder Jetting, позволяют создавать металлические изделия, используя порошковую металлургическую технологию. В этом процессе связующее вещество распыляется на порошок, объединяя его в единое целое. После этого изделие подвергается термической обработке для удаления связующего и спекания порошка, что приводит к образованию прочного металлического компонента. Этот метод позволяет производить детали с высокой скоростью и низкой стоимостью, хотя конечные свойства материала могут отличаться от свойств, получаемых при использовании SLM или EBM. Лазерное спекание также представляет собой метод 3D-печати, который использует лазер для спекания металлического порошка. В отличие от SLM, в этом процессе порошок не плавится полностью, а лишь частично спекается, что позволяет сохранить некоторые свойства порошка и создать более пористые структуры. Этот метод может быть использован для создания деталей, которые требуют особых механических свойств или специфической пористости.

Технологии 3D-печати металлических компонентов в аэрокосмической промышленности имеют множество преимуществ. Одним из основных является возможность создания легких, но прочных конструкций, что особенно важно для авиации и космонавтики, где каждый грамм на счету. С помощью 3D-печати можно значительно сократить вес деталей, не жертвуя их прочностью и надежностью. Кроме того, аддитивное производство позволяет оптимизировать конструкции, создавая сложные геометрические формы, которые невозможно реализовать с использованием традиционных методов. Это открывает новые горизонты для проектирования и производства компонентов, которые могут улучшить аэродинамические характеристики и общую эффективность летательных аппаратов.

Еще одним важным аспектом является сокращение времени на разработку и производство новых деталей. С помощью 3D-печати можно быстро создавать прототипы, тестировать их и вносить

Раздел 2. «Машиностроение, технологические машины и транспорт, строительство»

изменения в конструкцию без необходимости создания новых форм или инструментов. Это значительно ускоряет процесс разработки и позволяет быстрее выводить новые продукты на рынок. В аэрокосмической промышленности, где время имеет критическое значение, такая гибкость является огромным преимуществом.

Тем не менее, несмотря на все преимущества, технологии 3D-печати металлом также сталкиваются с рядом вызовов. Одним из основных является контроль качества и воспроизводимость продукции. Поскольку процесс 3D-печати включает множество переменных, таких как температура, скорость печати и свойства используемого порошка, важно обеспечить стабильность и предсказуемость результатов. В аэрокосмической отрасли, где безопасность является приоритетом, необходимо проводить тщательные испытания и сертификацию компонентов, произведенных с использованием аддитивных технологий.

Кроме того, важно учитывать стоимость оборудования и материалов. Хотя 3D-печать может снизить затраты на производство в долгосрочной перспективе, начальные инвестиции в оборудование могут быть значительными. Металлические порошки, используемые в аддитивном производстве, также могут быть дорогими, и их качество имеет решающее значение для получения высококачественных деталей. Поэтому для успешного внедрения технологий 3D-печати в аэрокосмической промышленности необходимо проводить экономический анализ и оценивать возможные выгоды [4].

В заключение, технологии 3D-печати металлических компонентов представляют собой мощный инструмент, который может значительно изменить подход к производству в аэрокосмической промышленности. Они предлагают уникальные возможности для создания легких, прочных и сложных деталей, сокращения времени на разработку и улучшения общей эффективности производства. Тем не менее, для успешного использования этих технологий необходимо преодолеть ряд вызовов, связанных с контролем качества, стоимостью и воспроизводимостью продукции. С учетом всех этих факторов, можно с уверенностью утверждать, что 3D-печать металлом будет играть важную роль в будущем аэрокосмической отрасли, открывая новые горизонты для инноваций и развития.

Технология 3D-печати в последние годы усовершенствовала авиационную промышленность. Технология 3D-печати делает строительство небольших и сложных конструкций более удобным. Технология 3D-печати использует последовательное послойное добавление материалов для создания объектов из геометрического Компьютерного проектирования. Технология 3D-печати все чаще используется для разработки и настройки любого типа дизайна. Технология 3D-печати на основе определяемых пользователем параметров позволяет создавать недорогие компоненты. Расходы на оснастку, связанные с разработкой форм, не учитываются, в отличие от другой Технологии формования пластика. Высоко индивидуальные конструкции с минимальными производством количество являются возможным. Поэтому, этот технология имеет обширные приложения в авиационной промышленности. Цель этой обзорной статьи — дать обзор технологий 3D-печати и их использования в авиационной промышленности. Обсуждаются материалы, элементы или компоненты вместе с их свойствами, специально разработанные для применения в авиационной промышленности. Точно представлены типы, преимущества, приложения и ограничения 3D-печати исключительно в авиационной промышленности.

Аддитивное производство. Аддитивное производство[AM] — это класс технологий для создания прототипов, шаблонов, компонентов оснастки и физических моделей с использованием данных, полученных с компьютеров, систем 3D-сканирования или любой передовой цифровой информации [Grzesiak, 2008]. В отличие от традиционных производственных технологий субтрактивной обработки, аддитивное производство[AM] формирует физические объекты путем комбинирования порошковых, листовых материалов или жидкости слой за слоем. Детали, которые имеют решающее значение для производства с использованием других технологий, могут быть изготовлены с использованием технологии аддитивного производства[AM] [Kai, 1994]. Трехмерная печать[3DP], селективное лазерное плавление[SLM], стереолитография и моделирование методом послойного наплавления[FDM] — вот несколько технологий AM, которые в настоящее время используются.

Применение технологий AM инженерами, конструкторами и другие специалисты в последние годы демонстрируют устойчивый рост [Мун и др., 2014]. The различный ЯВЛЯЮСЬ процесс

Раздел 2. «Машиностроение, технологические машины и транспорт, строительство»

классификации, основанный на власти Система доставки и источник энергии [Uriondo et al., 2015] показаны на рисунке 1.

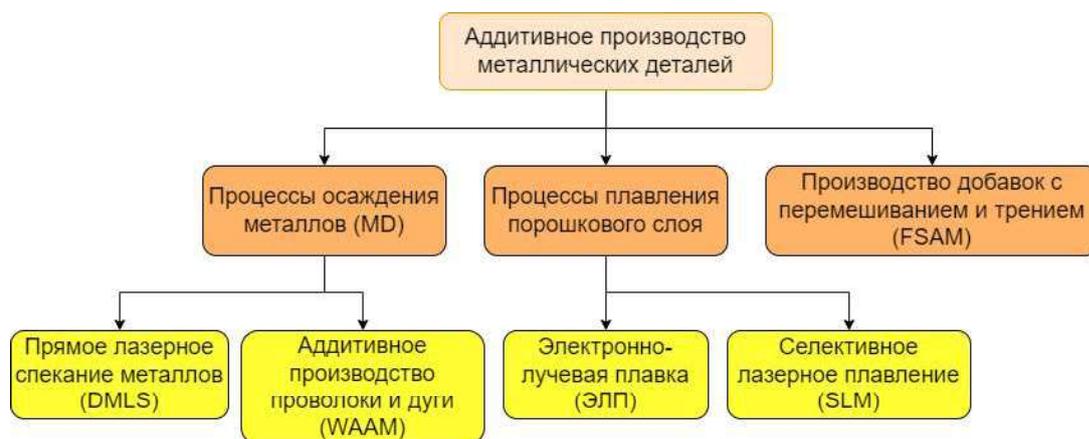


Рисунок 1. Подробная блок-схема процессов аддитивного производства [Uriondo] и др., 2015]

Прямое лазерное спекание металлов [DMLS] — это система на основе проволоки, которая может использоваться только для изготовления деталей из металлических сплавов. Это дальнейшее развитие порошковой металлургии [ПМ], передовая технология формовки металла для производства порошковых металлических деталей с использованием давления и температуры. Продукт, произведенный проволокой вместе с дуговым аддитивным производством [WAAM], имеет высокий стандарт и более предпочтителен, чем обычные сварочные процедуры [Hibbert, 2014]. WAAM может применяться к широкому спектру металлов, если и только если они находятся в проволоке форма. Любой металл, который может быть сварной с использованием традиционных методов также можно использовать WAAM, включая нержавеющую сталь, сплавы на основе никеля, титановые и алюминиевые сплавы и многое другое.

Метод Powder Bed Fusion [PBF] используется для сплавления и плавления порошковых материалов вместе. Этот метод использует лазер или электронный луч для сплавления порошкообразный материалы. Технологии печати Beam Melting [EBM], Selective Heat Sintering [SHS] и Selective Laser Sintering [SLS]. В технологии печати SLS для создания различных деталей используются такие материалы, как керамика, пластик и металлы. Для производства продукта из любого материала используется технология печати SLM. Для технологии лазерной плавки EBM [Electron Beam Melting] становится высококачественной заменой, и она также используется для ремонта и производства лопаток турбин [Marx et al., 2013]. Наряду с Powder Bed Fusion, Directed Energy Deposition и другими технологиями, ее можно использовать для производства структурных деталей для самолетов или более мелких механических деталей [5].

При сварке в твердом состоянии сварка трением с перемешиванием [FSW] может использоваться без расплавления материала заготовки. В этой технике для сварки материала заготовки используется нерасходуемый инструмент.

Аддитивное производство с перемешиванием трением [FSAM] является усовершенствованием техники FSW, при которой стопки сварных пластин свариваются внахлест, а затем свариваются трением с перемешиванием для создания продукта слой за слоем. В самолетной промышленности, для производства лонжероны, стрингеры/ребра жесткости и лонжероны крыла, можно использовать технологию FSAM [Palanivel et al., 2015]. Среди различных процессов AM только несколько отвечают всем требованиям авиационной промышленности. Таким образом, наиболее широко используемыми процессами AM для авиационной промышленности являются EBM, SLS, WAAM и SLM [Joshi & Sheikh, 2015]. Первая коммерциализация процесса 3D-печати [стереолитографии] была разработана и изобретена Чаком Халлом в 1983 году. Эта идея пришла ему в голову, когда он занимался упрочнением покрытий столешниц с помощью УФ-излучения [Шахрубудин и др., 2019]. 3D-печать — это последовательное добавление материала слой за слоем для создания физических деталей из данных

Раздел 2. «Машиностроение, технологические машины и транспорт, строительство»

3D-модели [ASTM International., нд]. Для 3D принтер производство, продукт должен быть разработано в CAD-инструменте, а затем экспортировано в совместимый формат файла на 3D-принтер. Высокая степень кастомизации в дизайне продукта достигается с помощью 3D-принтеров, которые используются для печати компонентов, которые обычно не могут быть созданы другими традиционными методами производства. Производство любого деликатного компонента со значительным сокращением отходов материала, производственных затрат и времени является преимуществом 3DP. Рабочий процесс проектирования, включенный в технологию 3DP, показан на рисунке 2.

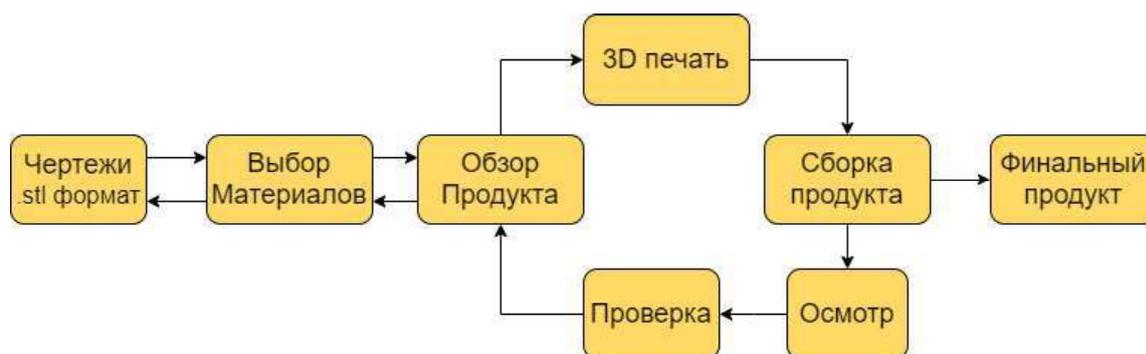


Рисунок 2. Рабочий процесс технологии 3D-печати

Стереолитография — это основная идея технологии 3DP, в которой заполненная жидким фотополимером поверхность ванны фокусируется на концентрированных лучах ультрафиолетового света. Луч ультрафиолетового света рисует каждый слой за слоем объекты на поверхности жидкой формы, перемещая их под управлением компьютера. Поверхность жидкой формы в конечном итоге превращается в твердое тело везде, где луч ультрафиолетового света попадает на фотополимер, сшивается или полимеризуется. Математическая нарезка компьютерной модели компонента на несколько тонких слоев выполняется с помощью передового программного обеспечения CAE/CAD/CAM. Затем 3D-принтер строит компонент слой за слоем и завершает конечный продукт в определенное время.

В настоящее время технология 3DP может производить объекты или детали, используя обычные термопластики, металлы, материалы на основе графена и керамику. 3DP имеет много преимуществ, включая низкую стоимость, меньшие временные затраты и меньшую сложность производства.

Технология 3DP широко используется во всем мире, особенно в производственных и научно-исследовательских отраслях. Она получила широкое развитие в последние годы, поскольку является самой мощной и гибкой технологией в передовой производственной отрасли [6].

Результаты и обсуждение

Слияние материи на молекулярном или атомном уровне [электронный луч, ультрафиолетовый свет, лазер или тепло], а также свойства и физическое состояние первичных материалов [твердые, порошковые или жидкие процессы] используются для классификации процессов 3D-печати. Существует семь видов 3D-принтеров, которые являются полезными в производстве части или продукты связанных самолетом, промышленностью, а именно, цифровая/EBM, SLS, FDM, SLM, производство ламинированных объектов [LOM], стереолитография[SLA] и цифровая обработка света [DLP].

Типы 3D Печать. Технология 3DP была разработана в разнообразие способами с различными модулями. Трудно обосновать, какая технология и функции лучше. Поскольку каждая из них имеет свои собственные приложения и основана на требованиях заказчика, технология 3DP не ограничивается приложениями для прототипирования, но также расширяется в сторону создания разнообразных продуктов.

Раздел 2. «Машиностроение, технологические машины и транспорт, строительство»

Прежде чем выбрать любой тип 3D-принтера, мы должны знать, какие материалы нити используются в этих 3D-принтерах для производства деталей и компонентов. Кроме того, необходимо иметь предварительные знания о размерах, типах и точности из части и компоненты что являются идущий к быть произведено к что 3D- принтер.

Авиационная промышленность имеет одни из самых высоких стандартов в производительности компонентов. Экстремальные температуры и химикаты нагружают детали самолета, подвергая их многократному использованию и при этом оставаясь легкими как можно больше по весу. Любой отказ отдельного компонента может привести к отказу всей системы самолета, перевозящего пассажиров и груз, поэтому в авиационной промышленности отказ просто невозможен. Поскольку точность компонентов является критическим фактором в проектировании самолетов, 3D-принтеры используются в авиационной промышленности для обеспечения чрезвычайно высокой точности деталей и компонентов [7].

Типы 3D-печати, используемые для производства металлических компонентов и деталей самолета, — это DMLS, EBM, SLM и SLA. SLS, SLA, DLP, FDM и струйная печать материалов — это типы 3DP, используемые для производства полимерных или композитных компонентов и деталей самолета [Ahart, 2019]. Согласно стандарту, ASTM F2792[ASTM International., nd], технологии 3DP каталогизированы по семи категориям, которые показаны на рисунке 3.

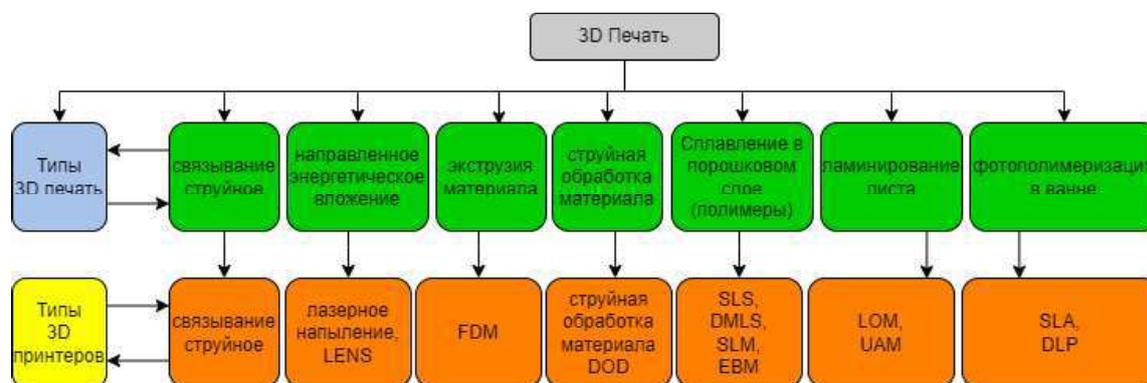


Рисунок 3. 3D типы процессов и принтеров

Связующее Струйная. В связующее струйная обработка, а обязательный жидкость агент является использовал к предохранителю пудра частиц путем выборочного осаждения на них. Это процесс 3D-печати с быстрым прототипированием. Для создания слоя на распыленном порошке используется струйное химическое связующее в технологии струйного нанесения связующего. Этот метод быстрее, дешевле и проще и позволяет печатать крупногабаритные изделия.

Направленное энергетическое вложение. Процесс печати с направленным энергетическим осаждением является несколько критическим методом и обычно используется для добавления или восстановления дополнительных материалов сохранившиеся части. Этот процесс способен производить хорошее качество продукт, и он также имеет более высокий уровень контроля структуры зерна.

Кроме того, эта процедура обычно используется с гибридами на основе металлов и другими металлами, и она также может быть используется с различной керамикой и полимеры, в форма либо порошка, либо проволоки. Лазерное осаждение и лазерное формирование сетки [LENS] являются двумя примерами этой технологии.

Экструзия материала. Технология 3DP на основе экструзии материалов полезна для производства из многоцветный и многоматериальный печать на еду, пластик, или живые клетки. FDM создает детали от основания до вершины детали путем добавления слоев путем выдавливания термопластик нить накала. Как правило, 3D-принтер по доступной цене использует технологию FDM, и это самая популярная технология 3D-печати. Скотт Крамп изначально разработал и реализовал эту технологию.

Раздел 2. «Машиностроение, технологические машины и транспорт, строительство»

Струйная обработка материала. Процесс струйной печати использует метод струйной печати, при котором жидкий фотореактивный материал наносится на платформу, а печатающие головки используются слой за слоем. Методы нанесения материала различаются в зависимости от используемого принтера и могут потребовать либо принципа Drop-on-Demand[DOD], либо принципа непрерывной струйной печати.

Сплавление в порошковом слое. Как обсуждалось ранее, в процессе спекания порошкового слоя[PBF] используются методы печати SHS, SLS и EBM.

Ламинирование листа. Ламинирование листов — один из 3DP-процессов, при котором тонкие листы материала являются комбинированный слой за слоем к урожаю, а одинокий кусок. The листы являются подается через, а система ролики для склеивания. Этот процесс сравнительно недорог, прост в обращении с материалами, а также возможна переработка излишков материала. С помощью этой техники возможна дальнейшая полноцветная печать. Ультразвуковое аддитивное производство [UAM] и LOM являются примерами технологии 3DP, которая использует метод ламинирования листа.

Фотополимеризация в ванне. Фотополимеризация — одна из наиболее часто используемых 3DP-техник, которая в общем описывает отверждение фотореактивных полимеров с использованием ультрафиолетовых лучей или лазеров. Время экспозиции, источник питания и длина волны являются ключевыми факторами для фотополимеризации в ванне. Жидкие материалы затвердевают под воздействием ультрафиолетового света. Это упрощает изготовление продукта с большим количеством деталей и высокой отделкой поверхности. Для создания высококачественных продуктов в технологии 3D-печати требуются высококачественные материалы, имеющие совместимые характеристики. Поставщики и конечные пользователи продуктов принимают контроль для подтверждения этих спецификаций, требований, процедур и соглашений материалов.

Материалы, включая сплавы алюминия, титана, керамики, полимеров, стали и металла, и их смешивание в виде композитов, FGM [функционально-градиентных материалов] или гибридов, используются в технологии 3D-печати искусно для создания полностью функциональных деталей. В зависимости от используемых технологий аддитивного производства и физического состояния материалов, объекты с минимальной толщиной слоя от 20 до 100 мкм могут быть созданы с использованием 3DP.

3DP материалы по морфологии бывают четырех видов: пластиковая пленка, порошковый материал, жидкая фоточувствительная смола и проволоочный материал с низкой температурой плавления [Vaezi et al., 2013]. Эти виды материалов рассматриваются на основе веса и структурный надежность нравиться поверхность точность, носить сопротивление, Плотность, термическая стабильность и структурная прочность. Ti-6Al-4V и Inconel 718 — два сплава на основе Ti и Ni, которые имеют большее значение в авиационной промышленности. Поскольку эти два сплава обладают хорошей стойкостью к окислению/коррозии, устойчивостью к повреждениям и прочностными свойствами [8].

Полимеры, которые обычно используются для печати различных деталей самолетов с помощью технологии SLS, - это полиамид 12, армированный углеродным волокном[Carbonamide], порошок полиамида 12, наполненный стеклянными шариками [PA 3200 GF], порошок полиамида 12, наполненный алюминием[Alumide], и белый порошок полиамида 12 с огнестойкой добавкой [PA 2210 FR] [Techno-Grafica GmbH, nd]. Полимеры, которые используются для печати различных деталей самолетов. с FDM технология являются Полифенилсульфон[ППСФ/ППСУ] [Stratasys Ltd., nda], PEAK-Polyarylether-ketone[Quantevo-CF] [AREVO Ltd., nd], ULTEM™ 9085[Европейское космическое агентство [ESA], 2013; Stratasys Ltd., ndb], ABSi [Stratasys Ltd., 2022] и Nylon 12[Stratasys Ltd., nda]. Технология 3D-печати для изготовления различных деталей самолетов с их процессами - мартенситно-закаливается сталь [EOS Maraging Steel MS1] с DMLS [EOS GmbH - Electro Optical Systems, 2017], AlSi10Mg [алюминиевый сплав] с DMLS.

Заполнение — это повторяющийся узор, используемый для того, чтобы занять пространство внутри 3DP-объекта. Как правило, заполнение скрыто от глаз, но иногда особое заполнение выделяется. На самом деле, заполнение имеет и другие цели, например, изменение веса продукта в зависимости от использования материала.

Раздел 2. «Машиностроение, технологические машины и транспорт, строительство»

Кроме того, заполнение позволяет соплу эффективно печатать плоские горизонтальные края по пространству. Более того, заполнение является основным фактором в 3D-печати, и продукт станет хрупким из-за структурных и устойчивых проблем, если заполнение не настроено должным образом.

Оптимизация заполнения может быть утомительной задачей с различными узорами, плотностями, стилями, и ориентации. Там являются различные типы из заполнения доступный для технологии 3DP [Pecho et al., 2019], и только некоторые из них показаны на рисунке 4.

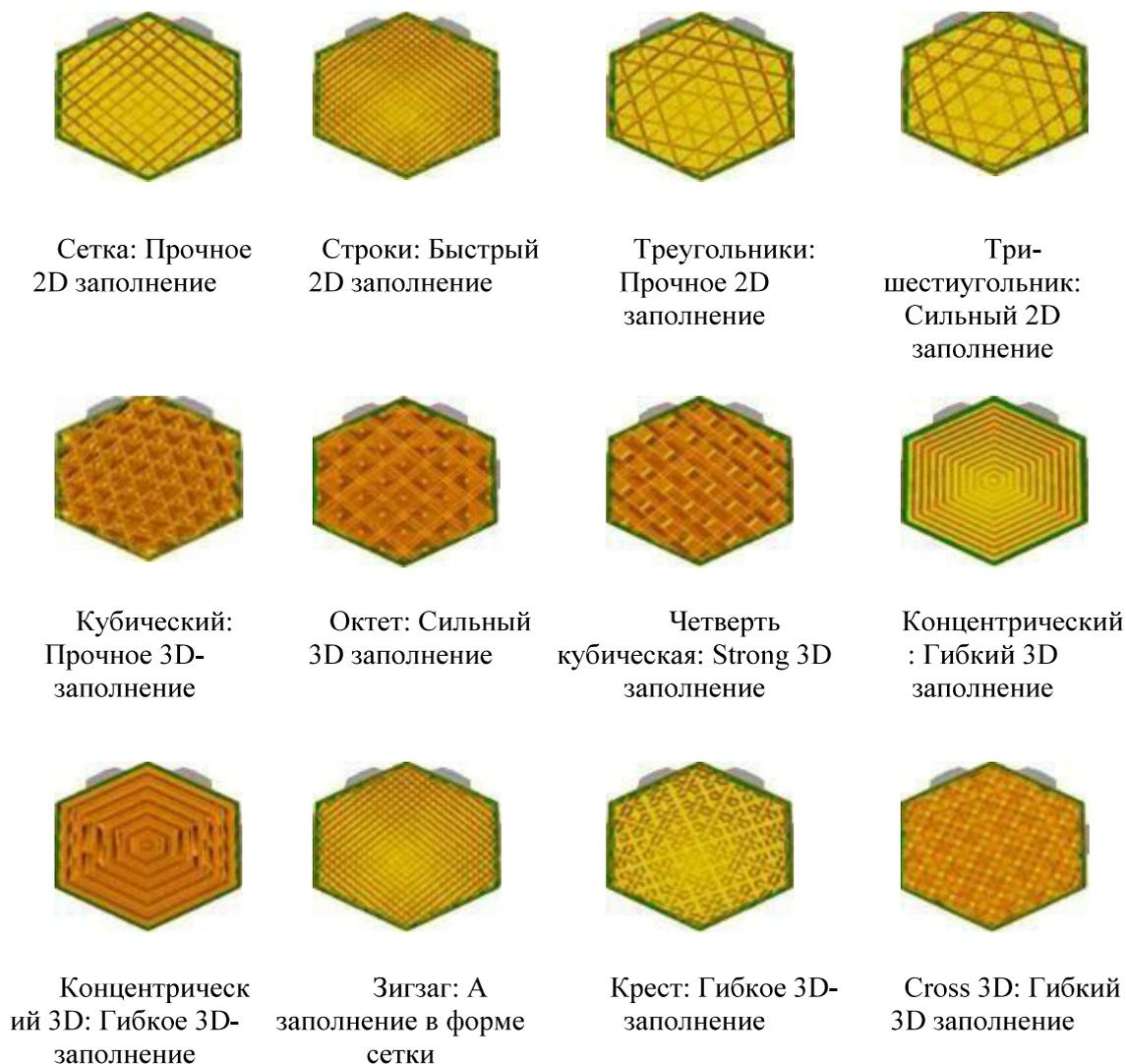


Рисунок 4. Типы заполнения в 3DP

Выбор заполнения основан на использовании и применении авиационной продукции. Выбор заполнения, используемого в 3D-печати для производства авиационной продукции, зависит от различных факторов, таких как нить, процесс 3D-печати, прочность и вес, точность, использование авиационной продукции и т. д [9].

Как правило, на рынке представлено множество вариантов нитей. рынок. Каждый филамент имеет свои преимущества и недостатки, а его использование зависит от применения в самолетах.

PLA [полилактидная кислота] и ABS[акрилонитрилбутадиенстирол] являются наиболее часто используемыми филаментами.

Раздел 2. «Машиностроение, технологические машины и транспорт, строительство»

Таблица 1

Механические свойства сплавов на основе Ti и Ni, полученных с помощью AM и других технологий [Джоши и Шейх, 2015]

Сплавы	Техника		Предел текучести [МПа]	Предел прочности на растяжение [МПа]
Ti6Al4 V	Процесс AM	ЭБМ	830	915
		ОДС	990	1095
		ВААМ	803	918
	Другой производственный процесс	Типичный кованный	828	897
		Отожженный[кованный]	790	870
		ИСО 5832-3[ИСО Стандарт]	>780	>860
Инконель 718	Процесс AM	ЭБМ	580	910
		ОДС	552	904
		Форма Металлического Нанесения[СМД]	473	828
	Другой производственный процесс	Кастинг	488	786
		Бросать Инконель 718	915	1090
		Кованный Инконель 718	1185	1432
		Инъекция Формованный[как спеченный]	506	667
		Инъекция Формованный[в зависимости от возраста]	780	1022
		Нажатый - Горячий изостатически	993	1334
		АМС 5662G[для Кованный материал]	1035- 1167	1275- 1400

Соединяя слой за слоем порошковые, жидкие или листовые материалы, 3D-принтеры создают различные детали и продукты. Технология 3D-печати дает уникальную свободу в производстве и выпуске различных компонентов. Технология 3DP может обеспечить улучшенное качество для сложных геометрий и изготавливать легкие детали, что может снизить потребность в ресурсах и энергии.

Таким образом, эта технология может быть весьма полезной в авиационной промышленности [Джоши и Шейх, 2015]. Технология 3DP приводит к экономии топлива за счет сокращения материала, используемого для производства деталей самолета.

Кроме того, оборудование 3DP активно используется для производства или ремонта дополнительных компонентов для двигателей, крыльев, фюзеляжей и хвостового оперения.

Обычно несколько частей двигателя могут легко повредиться во время работы, требуя частой замены. Таким образом, для закупки и замены таких запасных частей части, использование технологии 3DP может быть очень полезно [Ван и др.] др., 2019].

Стремительный производство, Быстрое прототипирование и/или быстрая оснастка — все это можно осуществить с помощью 3DP технология [Ван и др.] др., 2019]. The разные классификации среди этих 3DP-приложения показаны в таблице 2 [10].

Раздел 2. «Машиностроение, технологические машины и транспорт, строительство»

Таблица 2

Классификация из 3DP

Категория	Приложения
Быстрое прототипирование	Для тестирования запасной части из платформы, транспортные средства или двигателя [Кочан, 2000] К создавать прототипы из различного самолета части [Торрес и др., 2011] Для проверка плесень машина способность [Будзик, 2007]
Стремительный оснастка	Для формовки турбокомпрессор крыльчатки и лезвия [Будзик, 2007] Для производства деталей самолетов или космических кораблей методом копирования существующий структуры [Гозль] эт др., 2014] Ассоциирование эластичный производительность с ферма решетка для крыльев БПЛА [Moon et al., 2014]
Быстрое изготовление	Для изготовления самолет запасной части для обслуживания [Чен и Линь, 2017; Г. Будзик, 2007; Кочан, 2000] К построить, а весь БПЛА или дрон [Луна эт др., 2014] К учреждать а глобальный поставлять и распределение цепь для запасных частей [Чэнь и Линь, 2017]

Применение технологии 3DP в космической и авиационной промышленности изучалось с использованием отзывов основных отраслей авиастроения, рынка ее использования, используемых материалов, приложений для технического обслуживания самолетов и использования в космической промышленности.

В настоящее время, благодаря усовершенствованию технологий, только 60 дизайнеров с помощью 40 видов данные по промышленному дизайну требуются для производства одного авиадвигателя. Но вскоре, с помощью технологии 3DP, производство такой двигатель будет полегче и потребуются только 3D принтер, а набор проектные данные и несколько инженеров [Ван и др., 2019].

Технология 3D-печати часто используется при техническом обслуживании самолетов для изготовления различных запасных частей для компонентов двигателя, которые часто выходят из строя. и должны быть заменены во время обслуживания. Рынок технологий 3DP не еще полностью развитый. Рынок 3DP и его преимущества в авиационной и космической промышленности прогнозируются в рисунке 5 [Чэнь и Линь, 2017].

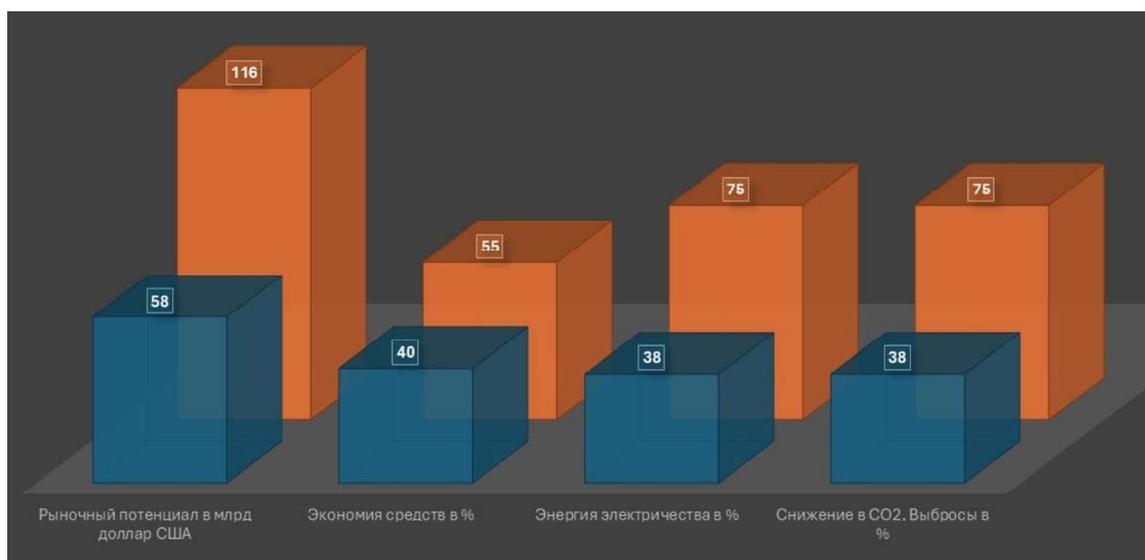


Рисунок 5. 3D Печать Технологии, Прогнозируемый Эффекты в Самолетной промышленности к 2025 [Чэнь и Линь, 2017]

Раздел 2. «Машиностроение, технологические машины и транспорт, строительство»

Преимущества и ограничения 3D печать технологии в аэрокосмической промышленности.

Технология 3DP в целом имеет ряд преимуществ. Однако по сравнению с традиционными технологиями производства она имеет и некоторые недостатки [Gebler эт др., 2014]. The преимущества из 3ДП в самолетной промышленности являются большая оптимизация по отношению прочности/веса, большее снижение общего веса компонента, сокращение количества компонентов или деталей, короткий промежуток времени или время обработки для производства, низкая стоимость настройки и меньшие требования к рабочей силе.

Основная проблема заключается в ограничении размера продукта [Машина EBM имеет ограничение по размеру 350 мм в диаметре x 380 мм в высоту, что является типичным примером ограничения по размеру. Действительно, размеры производимой продукции в настоящее время увеличиваются медленно. Процесс изготовления продукции медленный, но это является частично возмещено к с использованием околосетевой форма, который является напрямую приобретено. Из-за некоторых причин усталости или для оптических результатов 3DP-продукты могут потребовать некоторой отделки из-за высокой шероховатости поверхности. Это обычные ограничения, с которыми сталкивается технология 3DP, и она медленно улучшается.

Таблица 3

Базовый преимущества 3D печать технологий [TWI]

Простая конструкция	Быстрый дизайн	Печать по требованию	Хорошая прочность
Меньше масса	Быстрый производство	Меньше отходов	Экономия средств
Простота из доступ	Экологически чистый	Продвинутое здравоохранение	Авиационная промышленность

Таблица 4

Базовый Недостатки 3D Печать Технология[TWI]

Меньше доступности материалов	Ограниченный объем сборки	Требуется постобработка	Производство большего объема остается дорогостоящим
Снижение в работа для сотрудников- людей	Более низкие допуски	Часть структура	Проблемы с авторскими правами

В 3DP методы, продукты являются сформированный слой к слою, и они может расслаиваются при определенном напряжении или ориентации. Эта проблема более существенна в FDM. Иногда это хорошо к использовать инъекция формовка как это создает однородный части что воля нет отдельный и перерыв. Используя технологию 3D-печати, любой может создать полностью поддельный или дубликат частей, и может быть важно найти разницу между оригинальным продуктом и его дубликатом, что может привести к проблемам с авторскими правами.

Будущее области применения 3D печать технологии в аэрокосмической промышленности.

3D печать для компонентов аэрокосмических технологий имеют большие размерамы, что необходимо для установки и использования в соответствии с будущими требованиями, имеет решающее значение. В будущем технология 3D-печати может использовать различные сплавы материалов для большей прочности, снижения веса и других лучших решений для компонентов самолетов. 3D-печать также может быть возможна в наноразмерах с использованием различных видов наноматериалов для создания некоторых сложных объектов, которые могут использоваться в космических программах и авиационной промышленности. Такие компании, как SpaceX и NASA, работают над развитием обществ на других планетах, таких как Марс, используя технологию 3D-печати в больших масштабах.

Раздел 2. «Машиностроение, технологические машины и транспорт, строительство»

Многие другие будущие разработки возможны в технологии 3DP и ее использовании в авиационной промышленности.

В последние десятилетия технологии 3D-печати стали важным инструментом в различных отраслях промышленности, и аэрокосмическая сфера не является исключением. В ходе исследования были рассмотрены ключевые аспекты, связанные с применением 3D-печати металлических компонентов в аэрокосмической промышленности, что позволяет сделать вывод о значительном потенциале этой технологии для оптимизации производственных процессов, улучшения качества продукции и снижения затрат.

Авиационная и оборонная промышленность были исключительными пионерами в 3DP и продолжают вносить огромный вклад в ее экономический рост. Еще в 1989 году несколько аэрокосмических компаний немедленно начали внедрять эту передовую технологию, и успешное внедрение 3D-печати значительно возросло в последующие годы. В 2015 году аэрокосмическая и оборонная промышленность внесли около 16% 3D-печати в 4,9+ млрд долларов в мировом масштабе. В этот обзор, добавка производство технология и 3ДП были подробно описаны технологии и их применение в авиационной промышленности. Типы из принтеров использовал в 3D печать технология и типы из печати были рассмотрены и представлены материалы, выполненные с использованием 3D-принтеров.

Материалы, используемые в технологии 3D-печати в качестве нитей для производства различных компонентов самолетов, со свойствами материалов, их применением и технологиями производства, используемыми специально для этой нити, были изучены из различной литературы и представлены. Были отмечены применения технологии 3D-печати с преимуществами и небольшими недостатками в авиационной промышленности, и считается, что в ближайшем будущем будут производиться более крупные детали в большем масштабе с использованием улучшенных материалов.

Технологии 3D-печати, такие как селективное лазерное спекание[SLM], электронно-лучевая плавка[EBM] и другие, предоставляют возможность создавать сложные геометрические формы, которые невозможно или крайне сложно производить традиционными методами. Это особенно актуально в аэрокосмической отрасли, где требования к весу и прочности компонентов являются критическими. С помощью 3D-печати можно не только уменьшить массу деталей, но и повысить их эксплуатационные характеристики. Например, применение топологической оптимизации в процессе проектирования позволяет создать компоненты с максимальной прочностью при минимальном весе, что является важным фактором в аэрокосмической инженерии.

Важным аспектом является выбор материалов для 3D-печати металлических компонентов. В аэрокосмической промышленности используются различные сплавы, такие как титановые, алюминиевые и никелевые, каждый из которых имеет свои уникальные свойства, подходящие для конкретных применений. Титановые сплавы, например, обладают высокой прочностью и коррозионной стойкостью, что делает их идеальными для использования в условиях, характерных для космических полетов. Алюминиевые сплавы, в свою очередь, обеспечивают легкость и хорошую обрабатываемость, что также является важным для создания компонентов, которые должны быть не только прочными, но и легкими. Выбор материала в значительной степени определяет не только физические характеристики конечного продукта, но и его стоимость, поэтому понимание свойств различных материалов и их поведения в процессе 3D-печати становится критически важным для успешной реализации проектов.

Проектирование и моделирование компонентов для 3D-печати представляют собой отдельный этап, требующий глубоких знаний как в области аэрокосмической инженерии, так и в области технологий аддитивного производства. Использование современных САД-систем и программ для симуляции процессов печати позволяет инженерам создавать оптимизированные модели, которые учитывают не только функциональные требования, но и особенности технологии печати. Это позволяет минимизировать риски, связанные с возможными дефектами в процессе производства, и обеспечивает высокое качество конечного продукта.

Однако, несмотря на все преимущества, внедрение технологии 3D-печати в аэрокосмическую промышленность сопряжено с рядом вызовов. Контроль качества и сертификация компонентов, произведенных с помощью аддитивных технологий, являются критически важными для обеспечения безопасности и надежности аэрокосмической продукции. Стандарты и нормативы, регулирующие

Раздел 2. «Машиностроение, технологические машины и транспорт, строительство»

производство таких компонентов, должны быть адаптированы к новым технологиям, что требует активного участия как государственных органов, так и промышленных ассоциаций. Важно отметить, что на сегодняшний день существуют уже разработанные стандарты, такие как ASTM F3055, которые направлены на установление требований к качеству и процессам аддитивного производства. Тем не менее, дальнейшая работа в этом направлении необходима для повышения доверия к технологии 3D-печати со стороны регуляторов и конечных пользователей.

Экономические аспекты внедрения технологии 3D-печати в аэрокосмическую промышленность также заслуживают особого внимания. Несмотря на первоначальные высокие затраты на оборудование и материалы, потенциал для снижения производственных затрат в долгосрочной перспективе является значительным. 3D-печать позволяет сократить время разработки и производства, минимизировать отходы материалов и оптимизировать логистику, что в совокупности может привести к значительной экономии. Кроме того, возможность быстрого прототипирования и малосерийного производства дает компаниям гибкость в реагировании на изменения рынка и потребностей клиентов. Это особенно важно в условиях быстро меняющегося технологического ландшафта, где способность адаптироваться и внедрять инновации становится конкурентным преимуществом [10].

Таким образом, 3D-печать металлических компонентов открывает новые горизонты для аэрокосмической промышленности, предлагая возможности для улучшения проектирования, производства и контроля качества. Применение этой технологии может привести к созданию более легких, прочных и эффективных компонентов, что в свою очередь повлияет на общую эффективность аэрокосмических систем. Однако для успешного внедрения необходимо преодолеть существующие вызовы, связанные с сертификацией, контролем качества и экономической целесообразностью. Важно продолжать исследования и разработки в этой области, чтобы обеспечить дальнейший прогресс и интеграцию аддитивных технологий в аэрокосмическую промышленность.

В заключение, можно сказать, что технологии 3D-печати металлических компонентов в аэрокосмической промышленности имеют огромный потенциал и могут значительно изменить подход к проектированию и производству в этой высокотехнологичной области. С учетом постоянного развития технологий и увеличения интереса со стороны исследовательских институтов и промышленных компаний, можно ожидать, что в ближайшие годы мы станем свидетелями значительных изменений и инноваций, которые повлияют на всю аэрокосмическую отрасль.

Список литературы

- 1 Абрамов И. В., Абрамов В. И. Центры аддитивных технологий–драйверы цифровой трансформации экономики // Вопросы инновационной экономики. – 2022. – Т. 12. – №. 3. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49551580> [дата обращения: 14.07.2024].
- 2 Абрамов И. В., Лукина Ю. Д., Абрамов В. И. Обеспечение развития аддитивных технологий в России в условиях санкций // Russian Economic Bulletin. – 2022. – Т. 5. – №. 4. – С. 198-204. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49189847> [дата обращения: 14.07.2024].
- 3 Акбулатов Э. Ш., Назаров В. П., Герасимов Е. В. Исследование характеристик ракетного двигателя малой тяги, изготовленного методом аддитивной SLM-технологии // Сибирский аэрокосмический журнал. – 2023. – Т. 24. – №. 4. – С. 682-696. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-harakteristik-raketnogo-dvigatelya-maloy-tyagi-izgotovlennogo-metodom-additivnoy-slm-tehnologii> [дата обращения: 14.07.2024].
- 4 Александрова А. В., Носов В. К. Цифровые технологии и инструментарий моделирования в создании авиационно-космической техники // Тенденции развития экономики и промышленности в условиях цифровизации. – 2017. – С. 567-585. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32460020> [дата обращения: 14.07.2024].
- 5 Артамонов В. Е. Аддитивные технологии 3d-печати металлами и сплавами // Материалы 66-й студенческой научно-практической конференции инженерного факультета ФГБОУ ВО "Самарский государственный аграрный университет". – 2021. – С. 134-139. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46697193> [дата обращения: 14.07.2024].

Раздел 2. «Машиностроение, технологические машины и транспорт, строительство»

6 Аствацатрян Л. Э., Гажва С. И. Современные аспекты использования 3D-технологий в изготовлении съёмных зубных протезов // Современные проблемы науки и образования. – 2017. – №. 5. – С. 194-194. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30457997> [дата обращения: 14.07.2024].

7 Ахмеджанов С. и др. Создание концепции применения аддитивной технологий и компьютерных расчетов при изготовлении композитных компонентов для ракетносителей // Вестник КазАТК. – 2024. – Т. 130. – №. 1. – С. 319-331. URL: <https://vestnik.alt.edu.kz/index.php/journal/article/view/1539> [дата обращения: 14.07.2024].

8 Ашимов И.Н., Папазов В. М. Анализ применения проволочных технологий 3d-печати в условиях космического пространства // Космическая техника и технологии. 2023. №1[40]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-primeneniya-provolochnyh-tehnologiy-3d-pechati-v-usloviyah-kosmicheskogo-prostranstva> [дата обращения: 14.07.2024].

9 Баранова Е. Г., Орешенко Т. Г. Применение прямого лазерного выращивания в ракетостроении. – 2023. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54102446> [дата обращения: 14.07.2024].

10 Барбудхе А. Р., Гаврилов Д. О., Гаврилов Д. С. Технология 3D-печати в ракетостроении // Решетневские чтения. – 2021. – С. 225-226. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47711274> [дата обращения: 14.07.2024].

Д.М.Бұланбай

«Аэроғарыш өнеркәсібіндегі металл компоненттерін 3D-басып шығару технологиясы»

Мақалада металдан жасалған компоненттерді 3D-басып шығару технологиясы қарастырылады, бұл аэроғарыш өнеркәсібінде барған сайын маңызды бола түсуде. Аддитивті өндіріс күрделі геометриялық пішіндерді жасауға мүмкіндік береді, бұл құрылымдардың салмағын азайтады және олардың беріктік сипаттамаларын арттырады. Титан, алюминий және никель қорытпалары сияқты металдарды қолдану авиациялық және ғарыштық аппараттарға арналған жоғары жүктемелі бөлшектерді өндіруге мүмкіндік береді. Технология дәстүрлі әдістермен салыстырғанда өндіріс шығындарын азайтуға және өндіріс уақытын қысқартуға да ықпал етеді.

Түйін сөздер: 3D-басып шығару, аддитивті өндіріс, металл компоненттері, аэроғарыш өнеркәсібі, титан, алюминий, никель қорытпалары, бөлшектер өндірісі, салмақты азайту, құрылымды оңтайландыру, инновациялық технологиялар.

D.M. Bulanbay

«3D Printing Technology for Metal Components in Aerospace Industry»

This article discusses the technology of 3D printing of metal components, which is becoming increasingly important in the aerospace industry. Additive manufacturing allows the creation of complex geometric shapes, which reduces the weight of structures and increases their strength characteristics. The use of metals such as titanium, aluminum, and nickel alloys makes it possible to produce highly loaded parts for aircraft and spacecraft. The technology also helps to reduce production costs and shorten manufacturing times compared to traditional methods.

Keywords: 3D printing, additive manufacturing, metal components, aerospace industry, titanium, aluminum, nickel alloys, parts production, weight reduction, design optimization, innovative technologies.

Раздел 2. «Машиностроение, технологические машины и транспорт, строительство»

References

- 1 Abramov I. V., Abramov V. I. Centers of Additive Technologies - Drivers of Digital Transformation of the Economy // Issues of Innovative Economy. – 2022. – Vol. 12. – No. 3. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49551580> [access date: 14.07.2024].
- 2 Abramov I. V., Lukina Yu. D., Abramov V. I. Ensuring the Development of Additive Technologies in Russia under Sanctions // Russian Economic Bulletin. – 2022. – Vol. 5. – No. 4. – Pp. 198-204. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49189847> [access date: 14.07.2024].
- 3 Akbulatov E. Sh., Nazarov V. P., Gerasimov E. V. Research on the Characteristics of a Low-thrust Rocket Engine Made Using Additive SLM Technology // Siberian Aerospace Journal. – 2023. – Vol. 24. – No. 4. – Pp. 682-696. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-harakteristik-raketnogo-dvigatelya-maloy-tyagi-izgotovlennogo-metodom-additivnoy-slm-tehnologii> [access date: 14.07.2024].
- 4 Aleksandrova A. V., Nosov V. K. Digital Technologies and Simulation Tools in the Creation of Aviation and Space Equipment // Trends in the Development of Economy and Industry under Digitalization Conditions. – 2017. – Pp. 567-585. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32460020> [access date: 14.07.2024].
- 5 Artamonov V. E. Additive Technologies for 3D Printing with Metals and Alloys // Materials of the 66th Student Scientific and Practical Conference of the Faculty of Engineering of the Samara State Agrarian University. – 2021. – Pp. 134-139. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46697193> [access date: 14.07.2024].
- 6 Astvatsatryan L. E., Gazhva S. I. Modern Aspects of Using 3D Technologies in the Manufacture of Removable Dentures // Modern Problems of Science and Education. – 2017. – No. 5. – Pp. 194-194. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30457997> [access date: 14.07.2024].
- 7 Akhmedzhanov S. Et al. Development of the Concept of Using Additive Technologies and Computer Calculations in the Manufacture of Composite Components for Launch Vehicles // Bulletin of KazATK. – 2024. – Vol. 130. – No. 1. – Pp. 319-331. URL: <https://vestnik.alt.edu.kz/index.php/journal/article/view/1539> [access date: 14.07.2024].
- 8 Ashimov Ilyas Nurgaliyevich, Papazov Vladimir Mikhailovich Analysis of the Use of Wire 3D Printing Technologies in Space Conditions // Space Technology and Engineering. 2023. No. 1[40]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-primeneniya-provolochnyh-tehnologiy-3d-pechati-v-usloviyah-kosmicheskogo-prostranstva> [access date: 14.07.2024].
- 9 Baranova E. G., Oreshenko T. G. Application of Direct Laser Deposition in Rocket Engineering. – 2023. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54102446> [access date: 14.07.2024].
- 10 Barbuddhe A. R., Gavrilov D. O., Gavrilov D. S. 3D Printing Technology in Rocket Engineering // Reshetnev Readings. – 2021. – Pp. 225-226. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47711274> [access date: 14.07.2024].