

Горячкин Б. С., кандидат технических наук, доцент,

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Черната Н. С., магистрант,

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

ОБЗОР ВОЗМОЖНЫХ ВАРИАНТОВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ И МАТЕРИАЛОВ 3D ПЕЧАТИ В АВИАЦИОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Аннотация: Данная статья посвящена обзору групп технологий аддитивного производства (АП) и материалов, используемых для решения различных задач в авиационной промышленности. Цель статьи – провести обзор как технологий и материалов АП, так и задач АП в авиационной промышленности и их специфики. Рассмотренная классификация задач позволяет для каждой группы задач определить желаемые физические параметры материалов с целью дальнейшего отбора материалов, удовлетворяющих нужным условиям, и соответствующих технологий аддитивного производства.

Ключевые слова: Аддитивное производство, аддитивные технологии, 3D-печать, 3D-принтер, авиационная промышленность, материалы 3D-печати.

Abstract: This article is devoted to an overview of the groups of additive manufacturing technologies and materials used to solve various problems in the aviation industry. The purpose of the article is to review both AM technologies and materials, as well as AM tasks in the aviation industry and their specifics. The considered classification of tasks allows each group of tasks to determine the desired physical parameters of materials in order to further select materials that meet the necessary conditions and the appropriate technologies for additive manufacturing.

Key words: Additive manufacturing, additive manufacturing technologies, 3D printing, 3D printer, aviation industry, 3D printing materials.

Введение

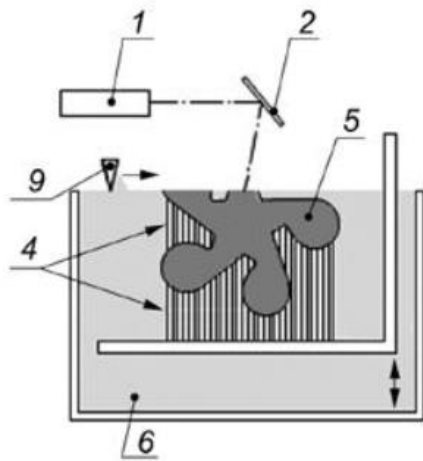
В связи с окончанием нескольких патентов на технологии 3D-печати в 2010-ых годах, данная сфера получила сильный толчок в развитии, которое раньше сдерживалось искусственно. Создаются новые технологии 3D-печати, улучшаются существующие, преобразуются многие процессы создания различных изделий во всех сферах. В связи с таким скачком в развитии технологий 3D-печати, с каждым годом данная сфера растет и все большее количество производств, предприятий и организаций разного рода деятельности интересуются возможностью имплементации 3D-печати в существующие процессы организации, либо внедрении новых, ранее недоступных процессов.

На сегодняшний день, из-за постоянного роста и развития сферы 3D-печати, существует огромное множество технологий, что может сделать трудным определение того, какие именно технологии лучше всего применимы для решения той или иной задачи. В связи с этим, в рамках данной статьи будут рассмотрены группы технологий аддитивного производства (АП), определенные в следующем стандарте - ГОСТ Р 57589-2017 [1]. С базовыми понятиями и терминами, так или иначе связанными с процессом АП, можно ознакомиться изучив следующий документ - ГОСТ Р 57558-2017 [2].

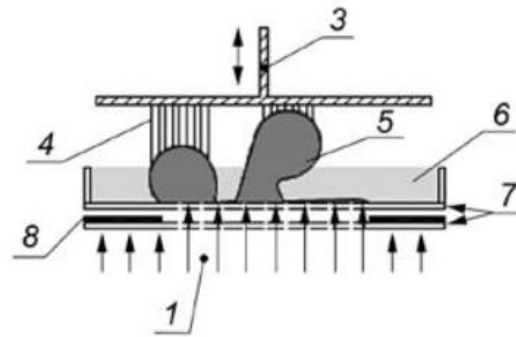
Описание видов технологий аддитивного производства

❖ *Фотополимеризация в ванне*

Фотополимеризация в ванне - это процесс, при котором предварительно осажденный фотополимер выборочно облучается световым излучением. Под воздействием света соседние полимерные цепи скрепляются друг с другом. Процесс фотополимеризации в ванне продемонстрирован на рис. 1.



а) Фотополимеризация в ванне с помощью лазера



б) Фотополимеризация в ванне с помощью управляемого источника ультрафиолетового излучения

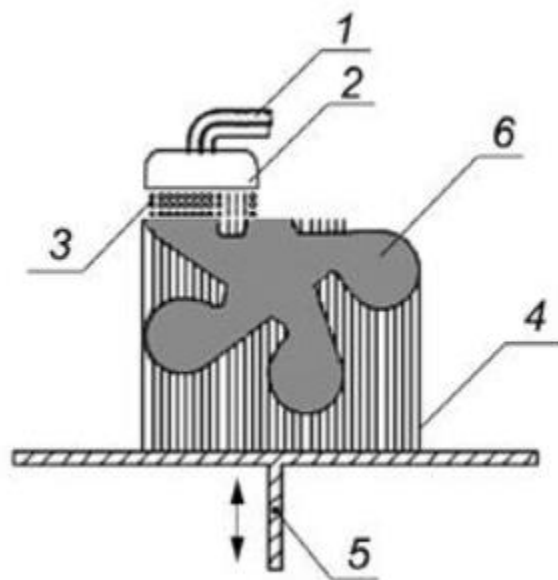
1 - источник света; 2 - зеркало, фокусирующее падающий на него свет; 3 - строительная платформа и подъемник; 4 – структуры поддержки изделия; 5 – получаемое изделие; 6 – ванна с фотополимеризующимся составом; 7 - прозрачные пластины; 8 - фотошаблон; 9 – механизм, выравнивающий поверхность

Рис. 1. Схемы фотополимеризующих процессов, использующих различные источники света

Сырье: жидкое или пастообразное: фотореакционноспособная смола с наполнителем или без него.

❖ *Струйное нанесение материала*

Струйное нанесение материала – это процесс аддитивного производства, в котором изготовление изделия осуществляется путем нанесения капель строительного материала на строительную платформу. Данный процесс представлен на рис. 2.



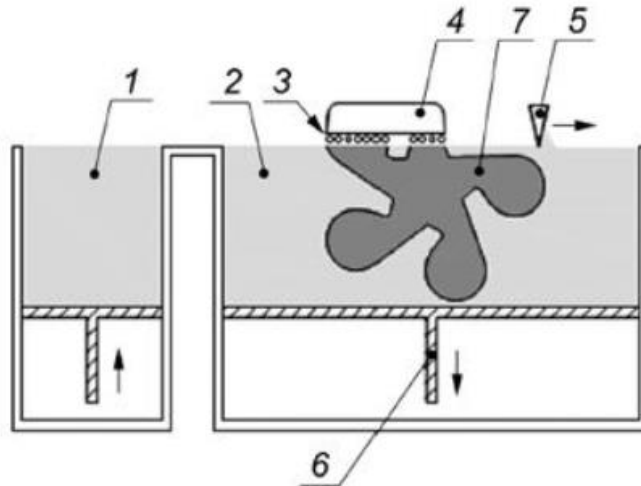
1 - система подачи сырья для сборки и материала подложки; 2 - дозирующее устройство (источник света или тепла); 3 - капли строительного материала; 4 – структуры поддержки изделия; 5 - строительная платформа и подъемник; 6 – получаемое изделие

Рис. 2. Схема процесса струйного нанесения материала

Сырье: жидкий фотополимер или расплавленный воск с наполнителем или без него.

❖ *Струйное нанесение связующего*

Струйное нанесение связующего – это процесс аддитивного производства, в котором жидкий связующий материал выборочно наносится на соединяемые порошковые материалы. Схема работы данного процесса продемонстрирована на рис. 3.



1 - система подачи связуемого материала; 2 - связуемый порошкообразный материал, распределенный в ванне; 3 - жидкий связующий материал; 4 – система подачи связующего материала с дозирующим устройством; 5 - устройство распределения порошка; 6 - строительная платформа и подъемник; 7 – получаемое изделие

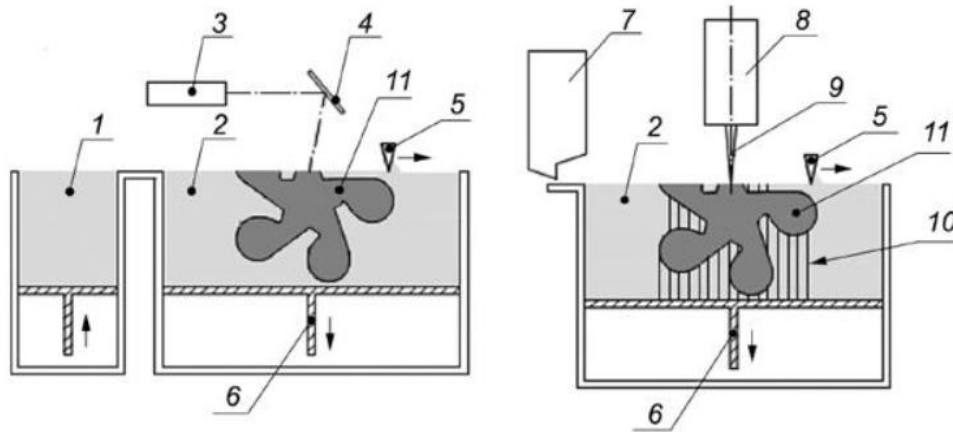
Рис. 3. Схема процесса струйного нанесения связующего

Сырье: порошки, порошковые смеси или частицы материалов, а также жидкое адгезионное/связующее вещество.

❖ *Синтез на подложке*

Синтез на подложке – это процесс аддитивного производства, при котором распределенный по поверхности строительной платформы связуемый порошковый материал полностью или выборочно расплавляется тепловой энергией с помощью лазерного или электронно-лучевого спекания. Схема двух типов процесса в зависимости от источника энергии представлена на рис. 4.

Сырье: различные порошки: термопластичные полимеры, чистые металлы или сплавы металлов, структурная или техническая керамика. Любой из порошковых материалов может быть использован как с наполнителями и связующими веществами, так и без них, в зависимости от конкретного процесса.



а) Лазерное сплавление материала в сформированном слое

б) Электронно-лучевое сплавление материала в сформированном слое

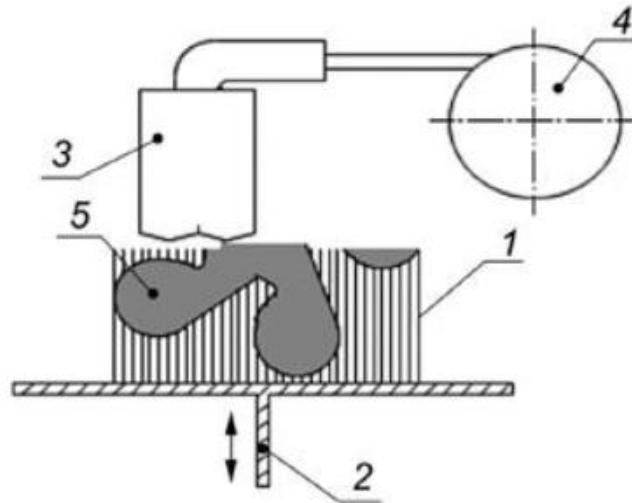
1 - система подачи порошка; 2 - порошкообразный материал, заполняющий ванну; 3 - лазер; 4 - зеркало, фокусирующее падающий на него свет; 5 - дозирующее устройство; 6 - строительная платформа; 7 - контейнер с порошкообразным сырьем; 8 - электронно-лучевая пушка; 9 - сфокусированный электронный пучок; 10 – структура поддержки изделия; 11 – получаемое изделие

Рис. 4. Схема двух типов процесса синтеза на подложке

❖ *Экструзия материала*

Экструзия материала – это процесс аддитивного производства, в котором материал подается через сопло или жиклер. Схема данного процесса представлена на рис. 5.

Сырье: волокно или пасты, как правило, термопласты и структурная керамика.



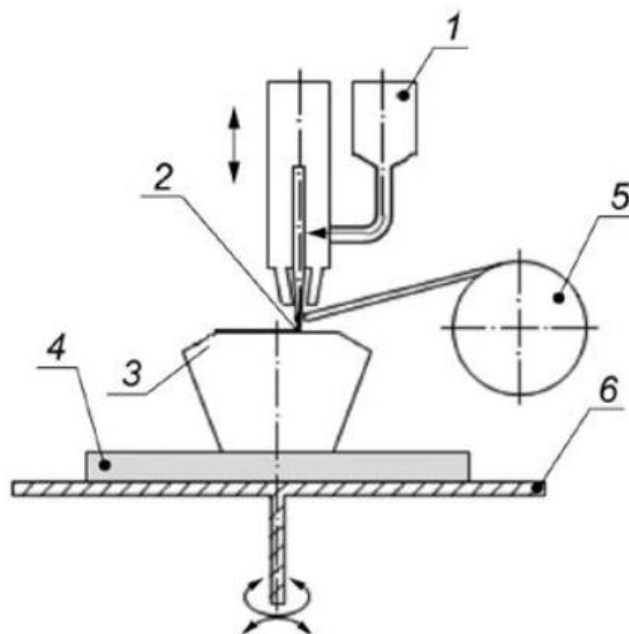
1 – структурные поддержки; 2 - строительная платформа и подъемник; 3 - подогреваемое сопло; 4 – катушка с сырьем; 5 – итоговое изделие

Рис. 5. Схема процесса экструзии материала

❖ *Прямой подвод энергии и материала*

Прямой подвод энергии и материала – это процесс аддитивного производства, при котором одновременно производится подача сырья и тепловой энергии для его сплавления по мере нанесения на строительную платформу. Схема работы процесса прямого подвода энергии и материала продемонстрирована на рис. 6.

Сырье: порошок или проволока, как правило, из металла; для определенных применений к основному веществу могут быть добавлены керамические частицы.



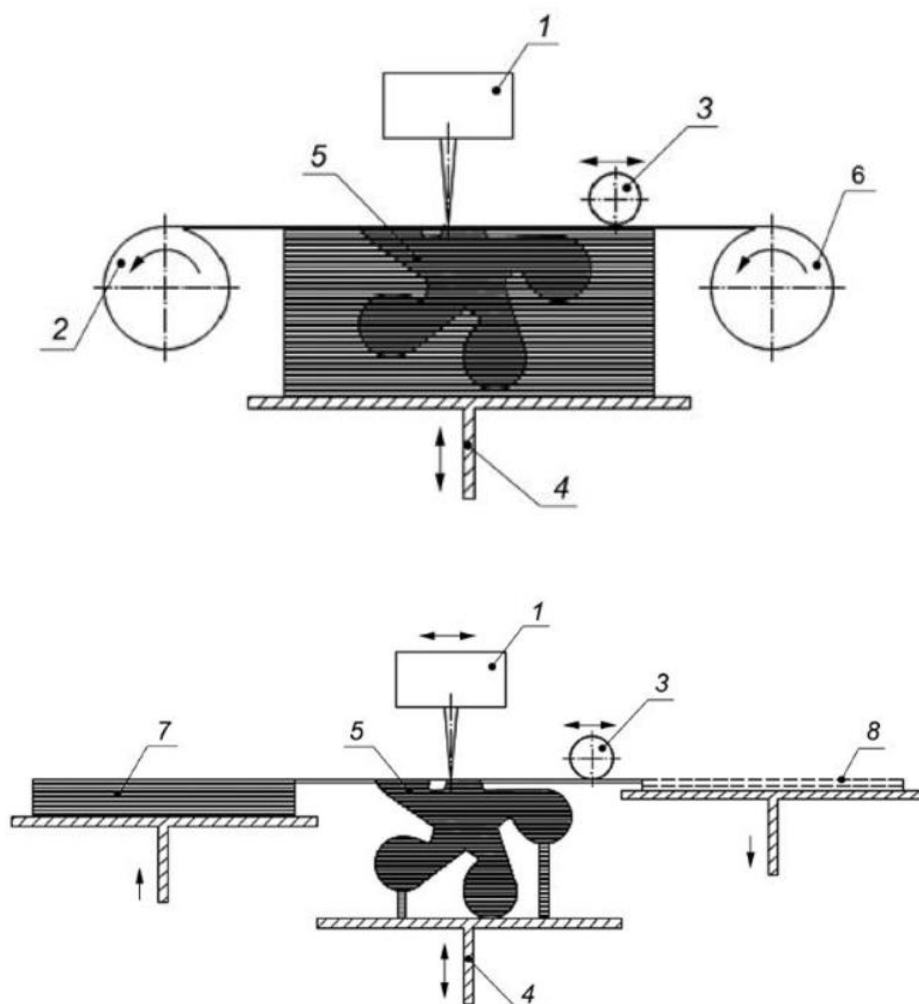
1 - ёмкость с порошком; 2 - направленный луч энергии, например, лазер, электронный или плазменно-дуговой пучок; 3 – получаемое изделие; 4 - подложка; 5 - проволока (нить) катушки; 6 - строительный стол

Рис. 6. Схема процесса прямого подвода энергии и материала

❖ *Листовая ламинация*

Листовая ламинация – это процесс аддитивного производства, который заключается в изготовлении детали путем скрепления листов строительного материала. Схема данного процесса изображена на рисунке 7.

Сырье: листовый материал, как правило, бумага, металлическая фольга, полимеры или композитные листы, изготовленные преимущественно из металла или керамического порошка, скрепленные связующим веществом.



1 - отрезной механизм; 2 – рулон с излишками материала; 3 - барабан ламинатора; 4 - строительная платформа и подъемник; 5 – получаемое изделие; 6 - рулон с сырьем; 7 - излишний материал; 8 - исходный материал

Рис. 7. Схема процесса листовой ламинации

Основные материалы 3D-печати

Со стремительным развитием сферы аддитивного производства рынок материалов 3D-печати также стал расти. Появляется все больше как специфичных для разных сфер материалов, так и новых материалов широкого использования. Распространена следующая классификация конструкционных материалов [3], представленная на рисунке 8.



Рис. 8. Классификация конструкционных материалов

На сегодняшний день наиболее популярными и употребляемыми в процессах АП являются следующие материалы [4; 5]:

➤ **Металлы:**

- Алюминий
- Нержавеющая сталь
- Титан
- Тугоплавкие металлы (тантал, вольфрам)
- Никель
- Медь
- Бронза
- Кобальт

➤ **Неметаллы:**

Термопластичные нити:

- ABS
- PLA
- PETG, PET, PETT

- TPE, TPU, TPC
- PC
- ULTEM 9085, ULTEM 1010

Термопластичные порошки:

- Нейлон 6
- Нейлон 11
- Нейлон 12

Фотополимерные смолы:

- Стандартная
- Литьевая
- Прозрачная
- Высокотемпературная

Пищевые материалы

- Шоколад
- Пастообразные материалы

Другие материалы

- Бетон
- Глина
- Гипс
- Композитные материалы
- Бумага

Отдельно следует отметить такую категорию материалов АП как композиционные материалы (композиты). Они не включены в данный перечень материалов, поскольку полноценная 3D-печать композиционными материалами на сегодняшний день если и доступна, то только на стадии разработки. То, что многие выдают за 3D-печать композитами, на самом деле является печатью все теми же полимерными материалами, но дополнительно усиленные различными

армирующими волокнами [6]. При таком подходе исходный материал будет прочнее обычных термопластичных полимеров, но будет уступать композиционным материалам, слои которых соединяются с помощью специальных смол.

Классификация задач для авиационной промышленности

Большинство задач в рамках авиационной промышленности имеет определенную общую специфику. АП может быть рассмотрено как замена классическим методам производства, использующим многоосевые фрезерные и токарные ЧПУ-станки, при более высокой экономической и производственной для эффективности, чем классические методы. Также АП открывает новые возможности в производстве: с помощью технологий АП становится возможным производство изделий с более сложной геометрией, чем это было возможно раньше; использование новых материалов также позволяет улучшить различные физические характеристики изделия (вес, прочность, термостойкость и другие).

Решаемые задачи в отрасли можно свести к нескольким основным категориям [7]:

1. Создание функциональных прототипов
2. Создание инструментов и оснастки
3. Создание легких компонентов
 - Салонные/бортовые элементы
 - Вентиляционные каналы
 - Бортовые панели
 - Конструктивные металлические компоненты

Специфика задач авиационной промышленности [8]:

- Мелкосерийное производство
- Акцент на снижение веса деталей при сохранении остальных параметров
- Увеличение эффективности использования материалов

- Изготовление деталей сложной геометрии
- ***Мелкосерийное производство***

При сравнении АП и классических методов производства, становится очевидным, что классические методы производства нацелены на массовое изготовление изделий с помощью выстраивания производственного процесса по их созданию, в то время как АП больше нацелено на мелкосерийное производство, но для более широкого ряда изделий (деталей).

- ***Снижение веса при сохранении остальных параметров***

С точки зрения снижения веса деталей, АП позволяет использовать всевозможные материалы для достижения требуемых параметров. Специально для авиакосмической отрасли пару десятков лет назад были разработаны многофункциональные инженерные термопластики – ULTEM 9085 и ULTEM 1010, призванные заменить алюминиевые и магниевые сплавы. Также в отрасли используются и другие материалы при АП, такие как инженерный термопласт РАЕК (высокоэффективные поликетоны), армированный нейлон, кобальт, титан, нержавеющая сталь и многие другие. Это позволяет решить потребность авиационной промышленности в легких, механически прочных и жаростойких материалах.

- ***Эффективность использования материалов***

Эффективность использования материалов при производстве также известная как коэффициент использования материалов (КИМ) значительно отличается у классических методов производства и методов АП. В зависимости от сложности геометрии изготавливаемой детали, при использовании фрезерных станков с ЧПУ КИМ может опускаться до 15%, что указывает на максимально неэффективное использование материалов. Данное явление обусловлено ограниченностью возможных процессов обработки материалов на фрезерных и токарных станках, что влечет за собой многоступенчатость процесса и увеличение отходов при производстве. При использовании методов АП, КИМ стремится к 100%, так как

изделие создается путем послойного добавления материала, а не вычитания, как это происходит в классических методах.

▪ ***Изготовление деталей сложной геометрии***

Философия методов АП, заключающаяся в создании изделия путем добавления материала, позволяет создавать детали сложной геометрической формы за один производственный шаг, в то время как при использовании другие методов производства данные детали изготавливались бы за большее количество шагов, либо и вовсе не могли бы быть изготовлены ввиду сложности геометрической формы.

Из определенных выше особенностей отрасли можно выделить то, что задачи определяют критерии используемых материалов, а материалы в свою очередь ограничивают выбор группы технологий.



Рис. 9. Методика определения подходящей группы технологий в зависимости от задачи

Сравнительный анализ материалов и определение подходящих технологий для реализации основных задач сферы

Исходя из вышеописанных задач авиационной промышленности, использующих АП, определим подходящие множества материалов для каждой из

них. Основными параметрами сравнения материалов будут: **предельная прочность, плотность и температура плавления материала.**

Прочность (ед. измерения - [Па]) - это свойство материала противостоять деформации и разрушению под действием приложенных нагрузок - растягивающих, сжимающих, изгибающих, скручивающих и срезающих.

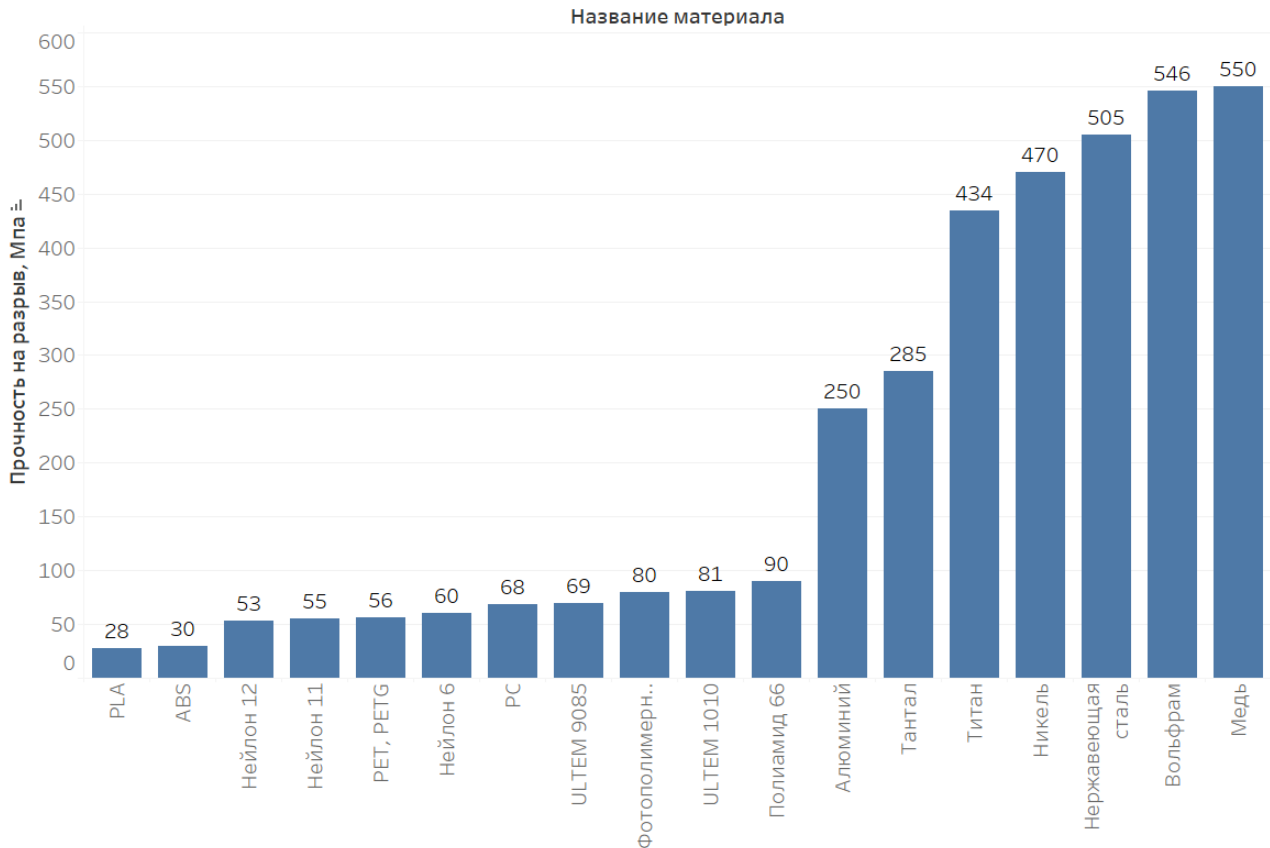


Рис. 10. Значения предельной прочности материалов

На гистограмме, приведенной на рис. 10, можно четко увидеть, что существует сильный разброс по предельной прочности материала между группой металлов (металлы и сплавы) и материалами из группы неметаллов (термопластичные полимеры, фотополимерные смолы, инженерные термопласты). Визуально можно выделить несколько групп материалов по данному параметру.

Таблица 1. Вербально-числовая оценка предельной прочности материала

Числовое значение, МПа	Вербально-числовая оценка
Менее 50	Низкая
От 50 до 100	Средняя
От 100 до 300	Высокая
Более 300	Очень высокая

Плотность (ед. измерения - [г/см³]) — скалярная физическая величина, определяемая как отношение массы тела к занимаемому этим телом объёму.

Плотность материала напрямую влияет на конечный вес изделия.

Существует оценка плотности металлов, согласно которой металлы с плотностью менее 3 г/см³ считаются *легкими*, а металлы с плотностью выше 3 г/см³ – *тяжелыми* [9]. Данную градацию предлагается применять ко всем рассматриваемым материалам, при плотности менее 3 г/см³ считать материал легким, а при плотности более 3 г/см³ – тяжелым для рассматриваемых задач.

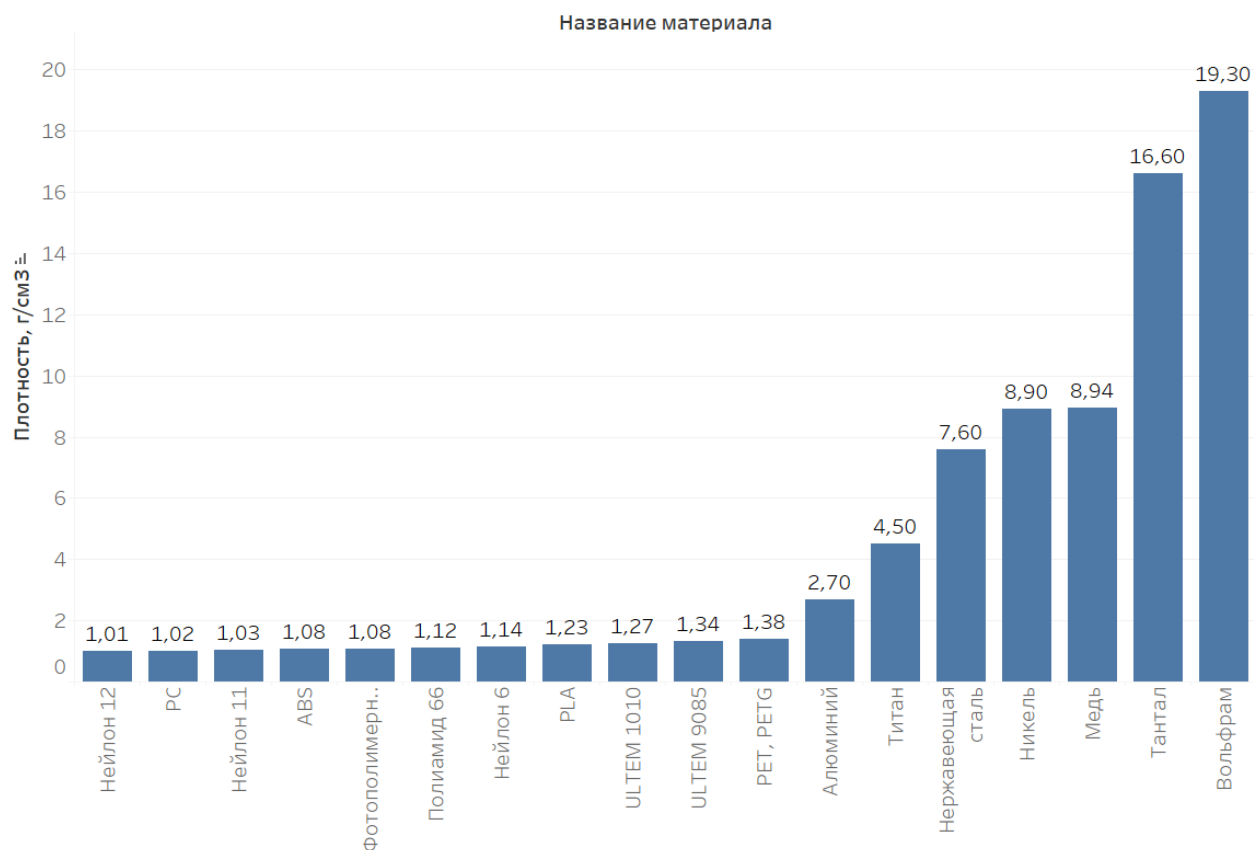


Рис. 11. Значения плотности материалов

Температура плавления (ед. измерения - [°C]) — температура твёрдого кристаллического тела (вещества), при которой оно совершает переход в жидкое состояние.

Температура плавления прямопропорциональна таким показателям как жаростойкость и жаропрочность материала, которые важны для решения некоторых рассматриваемых задач. Чем выше температура плавления, тем выше показатели жаростойкости и жаропрочности материала. Предлагается следующая

Таблица 2. Вербально-числовая оценка температуры плавления материала

Вербально-числовая оценка	Числовое значение, °C
Низкая	До 300
Средняя	От 300 до 700
Высокая	От 700 до 2000
Очень высокая	Более 2000

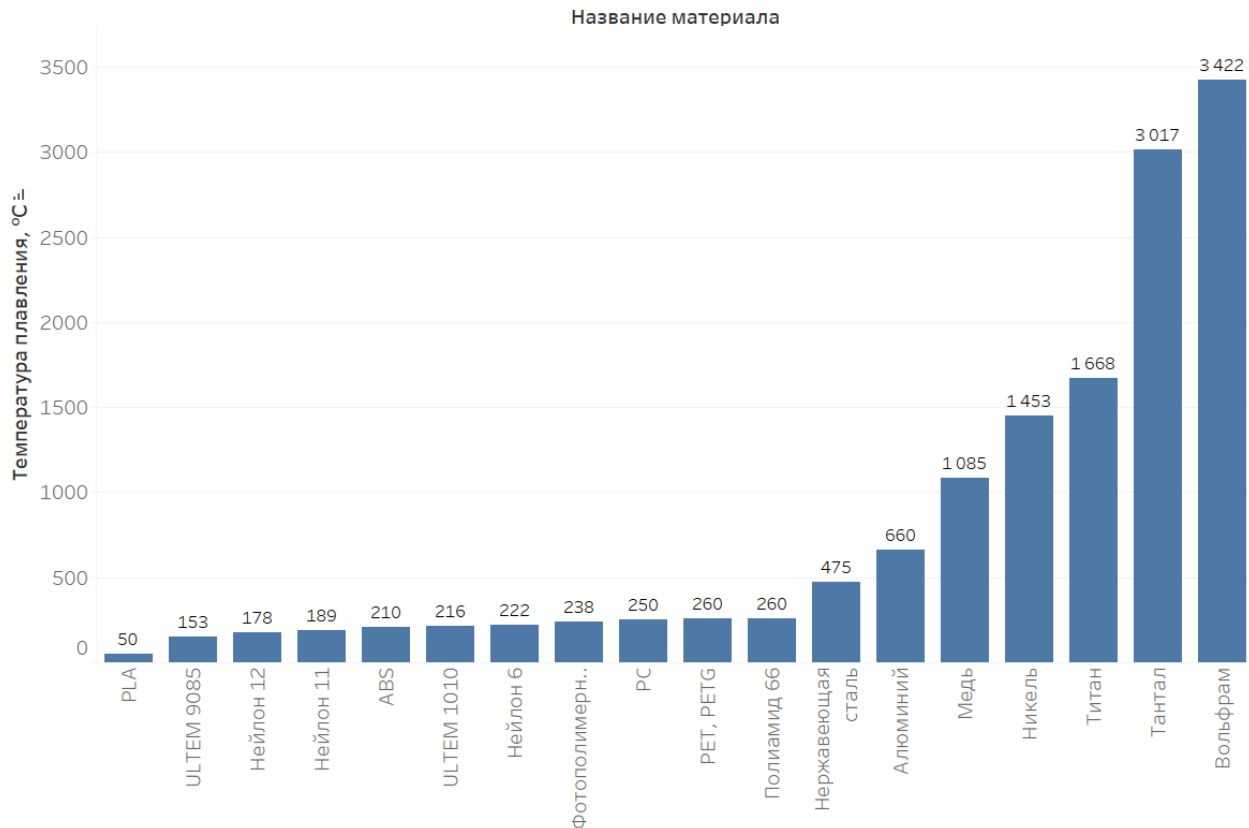


Рис. 12. Значения температуры плавления материалов

Рассмотрим более детально задачи, описанные в разделе классификации задач для авиационной промышленности и для каждой группы задач определим оптимальные материалы, группы материалов, а на основании выбора материалов, определим наилучшие виды технологий АП для этих задач.

❖ Создание функциональных прототипов

Для создания различных функциональных прототипов в авиационной промышленности в первую очередь важны прочность материала и его плотность, что повлияет на конечный вес изделия [7]. Функциональные прототипы являются прототипами будущей детали. На этапе функционального прототипирования необходимо получить рабочий прототип детали, который будет обладать определенными механическими показателями для проведения тестирования, а также должен быть легким для устранения проблем при необходимости создания нескольких прототипов одной детали и их дальнейшего сравнения.

Исходя из особенностей, описанных выше, определим наиболее подходящие материалы (классы материалов). Ограничения можно сформулировать следующим образом: *предельная прочность* – не ниже средней (см. табл. 1), *плотность* – легкие материалы.

Название материала
PC
PET, PETG
ULTEM 1010
ULTEM 9085
Алюминий
Нейлон 6
Нейлон 11
Нейлон 12
Полиамид 66
Фотополимерные смолы..

Рис. 13. Материалы, подходящие для задач функционального прототипирования

Исходя из рис. 13 можно сделать вывод, что наиболее подходящими материалами для создания функциональных прототипов являются различные

термопласты, фотополимерные смолы и некоторые легкие металлы. Титан включен в список Данный результат обусловлен тем, что функциональное прототипирование является очень широкой областью, решающей множество различных задач.

Подходящими классами технологий для данных задач будут являться все технологии поддерживающие данные материалы:

- Экструзия материала – термопластичные полимеры, инженерные термопластичные полимеры

- Фотополимеризация в ванне – фотополимерные смолы

- Синтез на подложке, прямой подвод энергии и материала – металлы

❖ **Создание инструментов и оснастки (прочность, температура плавления)**

Для создания инструментов и инструментальной оснастки материалы должны обладать достаточно высокой механической прочностью, поскольку любые инструменты рассчитаны на длительное использование при больших механических нагрузках. Также такие материалы должны иметь возможность быть использованными при определенных средне-высоких температурах на производстве. Необходимость в использовании тугоплавких металлов отсутствует для такого рода задач. Плотность материала для решения данной задачи имеет не такое существенное значение как для других задач и её можно не учитывать при выборе материала.

Таким образом, можно сформулировать следующие ограничения по рассматриваемым параметрам: *предельная прочность* – не ниже высокой (см. табл. 1), *температура плавления* – средняя/высокая (см. табл. 2). Список материалов, соответствующих данным критериям, изображен на рис. 14.

Название материала

Алюминий

Медь

Нержавеющая сталь

Никель

Титан

Рис. 14. Материалы, подходящие для создания инструментов и оснастки

Таким образом, наилучшими вариантами для создания инструментов и оснастки будут являться технологии, способные печатать различными металлами и металлическими сплавами, как алюминий и титан. Данными группами технологий являются *Синтез на подложке* и *Прямой подвод энергии и тепла*. Хорошими примерами технологий данных технологических групп являются *SLS (Selective Laser Sintering)* и *DED (Direct Energy Deposition)*, соответственно.

❖ **Создание легких компонентов**

- Вентиляционные каналы, бортовые панели, салонные элементы

Специфика задачи создания вентиляционных каналов воздушного судна (ВС) состоит в том, что они должны быть произведены из легкого, прочного материала. Предельная прочность – не ниже средней (см. табл. 1), так как взаимодействие персонала и пассажиров ВС с данными элементами максимизировано. Плотность – легкие материалы, так как данные элементы не являются критическими для конструкции ВС и уменьшение веса всех таких компонентов при сохранении прочностных характеристик неизменными сильно влияет на экономическую эффективность полета [10].

Название материала
PC
PET, PETG
ULTEM 1010
ULTEM 9085
Нейлон 6
Нейлон 11
Нейлон 12
Полиамид 66
Фотополимерные смолы ..

Рис. 15. Материалы, подходящие для создания вентиляционных каналов ВС, бортовых панелей и салонных элементов

Подавляющее большинство материалов, представленных в списке на рис. 15, являются термопластичными полимерами. Исходя из этого, наилучшим выбором для создания вентиляционных каналов, бортовых панелей и иных салонных элементов станет вид технологий *Экструзия материала*.

Хорошим примером данной группы технологий является технология *FDM (Fused Deposition Modeling)*, принтеры на основании которой способны печатать всеми вышеперечисленными термопластами.

- Конструктивные металлические компоненты

Задачи данной группы сводятся к тому, что прочность и температура плавления материалов выходят на первое место, а дальше, как правило, выбираются самые легкие из них. Примером изделий, принадлежащих к данной категории задач, являются лопасти двигателя ВС и форсунки двигателя. Таким образом, сформулируем следующие ограничения по значениям параметров материалов: *предельная прочность* – высокая/очень высокая (см. табл. 1), *температура плавления* - высокая/очень высокая (см. табл. 2)

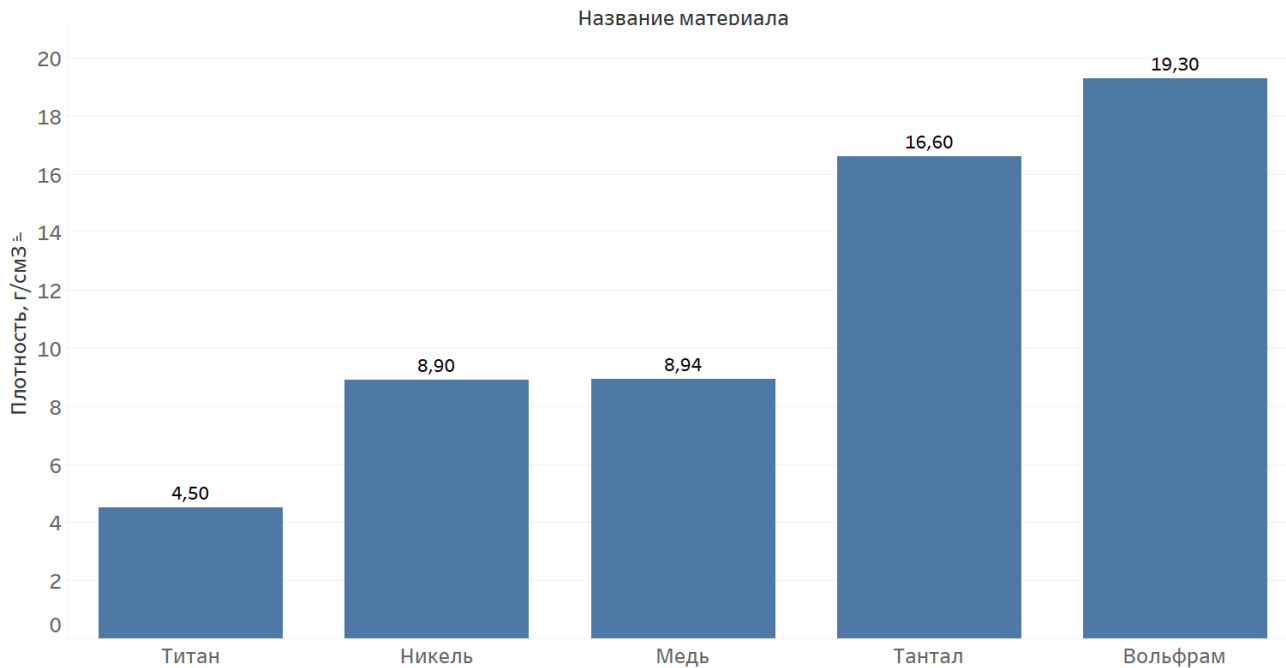


Рис. 16. Плотность материалов, подходящих для создания конструктивных металлических компонентов

На рис. 16 отображены материалы, прочность и температура плавления которых достаточна для решения данных задач. Все эти материалы, очевидно, являются металлами. Как видно на гистограмме, при прочих равных, плотность титана значительно выше при достаточно высоких остальных показателях, поэтому данный металл является предпочтительным выбором при создании конструктивных компонентов ВС.

Прямой подвод энергии и тепла, а также *Синтез на подложке* являются двумя видами технологий АП, позволяющими использовать титан в качестве исходного сырья. Конкретными примерами данных технологий могут являться *DED (Direct Energy Deposition)* и *EMB (Electron Beam Melting)*, соответственно.

Заключение

В данной статье был проведен обзор групп технологий аддитивного производства, был приведен список самых популярных материалов 3D-печати. Описана специфика задач аддитивного производства в авиационной промышленности. Исходя из специфики каждой задачи, выведены качественные

показатели основных параметров материалов для конкретной задачи. На основании данных параметров, определены оптимальные наборы материалов для решения упомянутых задач. Более того, в соответствие каждой задаче была предложена одна или более группа технологий АП, использующая оптимальные материалы для данной задачи.

Библиографический список:

1. ГОСТ Р 57589-2017. Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Часть 2. Материалы для аддитивных технологических процессов. Общие требования. М. – Стандартинформ, 2019.
2. ГОСТ Р 57558-2017. Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Часть 1. Термины и определения. М. – Стандартинформ, 2018.
3. Ковалевская Ж.Г., Безбородов В.П. Основы материаловедения. Конструкционные материалы: учебное пособие / Ж.Г. Ковалевская, В.П., Безбородов. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 110 с.
4. От воска до металла: обзор основных материалов для 3D-печати. – URL: <http://blog.iqb.ru/3d-printing-materials/> (дата обращения: 15.04.2021).
5. 25 самых популярных материалов для 3D печати. URL: <http://3dprintstory.org/25-samih-populyarnih-materialov-dlya-3d-pechati/> (дата обращения: 17.04.2021).
6. Anisoprint Composer: 3D-печать высокой прочности. URL: <http://3dtoday.ru/blogs/top3dshop/anisoprint-composter-3d-printing-high-strength/> (дата обращения: 09.05.2021).
7. Применение 3D-печати в авиакосмической и оборонной промышленности. URL: http://i3d.ru/blog/dlya_mozayki/3d_printery/aviatsionno-kosmicheskaya-otrasl/ (дата обращения: 11.05.2021).

8. Как 3D-технологии могут изменить бизнес-модель и повысить эффективность предприятий аэрокосмической отрасли. URL: <http://blog.iqb.ru/3d-printers-efficiency-in-aerospace/> (дата обращения: 11.05.2021).

9. Акулич Н.В. Процессы производства черных и цветных металлов и их сплавов, Гомель 2008

10. 3D-печать в аэрокосмической отрасли. URL: <http://innovax.info/additivnoe-proizvodstvo-v-aerokosmicheskoy-otrasli/> (дата обращения: 15.05.2021).

11. ГОСТ Р 57590-2017. Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Часть 3. Общие требования. М. – Стандартинформ, 2019.

12. 3D-печать в авиации — конструкционные пластики и металлы. URL: <http://avia.pro/blog/3d-pechat-v-aviacii-konstrukcionnye-plastiki-i-metally/> (дата обращения: 14.05.2021).

13. Как 3D-технологии могут изменить бизнес-модель и повысить эффективность предприятий аэрокосмической отрасли. URL: <https://blog.iqb.ru/3d-systems-emirates-case/> (дата обращения: 11.05.2021).

14. Попадюк С. 3D-технологии на взлете: тренды и задачи российского авиапрома. Аддитивные технологии, №2-2021. URL: <https://additiv-tech.ru/publications/3d-tehnologii-na-vzlete-trendy-i-zadachi-rossiyskogo-aviaproma.html> (дата обращения: 16.05.2021).

15. 3д печать в авиакосмической промышленности. URL: <https://adma.ru/3d-pechat-v-aviakosmicheskoy-promyshlennosti/> (дата обращения: 13.04.2021).

16. 3D Printing Decarbonisation meets digitalisation. URL: <https://www.airbus.com/public-affairs/brussels/our-topics/innovation/3d-printing.html> (дата обращения: 14.04.2021).

17. Application Spotlight: 3D Printing for Aircraft Cabins. URL: <https://amfg.ai/2020/07/27/application-spotlight-3d-printing-for-aircraft-cabins/> (дата обращения: 14.04.2021).

18. How the Aerospace Industry is Finding New 3D-Printing Use Cases for Old Aircraft Parts. URL: <https://www.aviationtoday.com/2020/11/30/aerospace-industry-finding-new-3d-printing-use-cases-old-aircraft-parts/> (дата обращения: 15.04.2021).
19. Aerospace 3D printing applications. URL: <https://www.hubs.com/knowledge-base/aerospace-3d-printing-applications/> (дата обращения: 15.04.2021).
20. Wimpenny, D.I., P.M. Pandey and L.J. Kumar, 2017. *Advances in 3D Printing & Additive Manufacturing Technologies*. Springer Singapore.
21. Росс А., 2017. *Индустрии будущего*. [перевод с англ. П. Миронова] М.: Издательство АСТ.
22. Dilberoglu, U.M., B. Gharehparagh, U. Yaman and M. Dolen, 2017. *The Role of Additive Manufacturing in the Era of Industry 4.0*. ScienceDirect, Volume 11. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978917303529> (дата обращения: 17.04.21).
23. Thompson, M. K., Moroni, G., Vaneker, T., Fadel, G., Campbell, R. I., Gibson, I., Bernard, A., Schulz, J., Graf, P., Ahuja, B., & Martina, F. (2016). Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints. *C I R P Annals*, 24. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.05.004> (дата обращения: 18.04.21)
24. Попович А.А., Суфияров В.Ш., Полозов И.А., Григорьев А.В. СЕЛЕКТИВНОЕ ЛАЗЕРНОЕ ПЛАВЛЕНИЕ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВА. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2018;(1):26-35. URL: <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2018-1-26-35> (дата обращения 18.04.21).
25. H. Ota, S. Emaminejad, Y. Gao, A. Zhao, E. Wu, S. Challa, K. Chen, H.M. Fahad, A.K. Jha, D. Kiriya, W. Gao, H. Shiraki, K. Morioka, A.R. Ferguson, K.E. Healy, R.W. Davis, A. Javey, *Adv. Mater. Technol.* 1 (2016) 1-8. URL: http://nano.eecs.berkeley.edu/publications/Advanced_Materials_Technologies_2016_3D%20printed%20sensors.pdf (дата обращения: 19.04.21).

26. Industry 4.0: 7 Real-World Examples of Digital Manufacturing in Action. URL: <https://amfg.ai/2019/03/28/industry-4-0-7-real-world-examples-of-digital-manufacturing-in-action/> (дата обращения 19.04.21).

27. F. Baldassarre, F. Ricciardi. The Additive Manufacturing in the Industry 4.0 Era: The Case of an Italian FabLab, Journal of Emerging Trends in Marketing and Management, The Bucharest University of Economic Studies, vol. 1(1), pages 105-115, October. URL: <https://ideas.repec.org/a/aes/jetimm/v1y2017i1p105-115.html> (дата посещения: 15.05.21).

28. Rosa Arnaldo Valdés, Víctor Fernando Gómez Comendador, Alvaro Rodriguez Sanz and Javier Perez Castán (March 9th 2018). Aviation 4.0: More Safety through Automation and Digitization, Aircraft Technology, Melih Cemal Kuşhan, IntechOpen, DOI: 10.5772/intechopen.73688. URL: <https://www.intechopen.com/books/aircraft-technology/aviation-4-0-more-safety-through-automation-and-digitization> (дата обращения: 15.05.21).

29. Aerospace & Defense 4.0. Capturing the value of Industry 4.0 technologies. URL: <https://www2.deloitte.com/us/en/insights/focus/industry-4-0/aerospace-defense-companies-digital-transformation.html> (дата обращения: 15.05.21).

30. Five challenges of additive manufacturing in the aviation industry. URL: <https://blog.satair.com/five-challenges-additive-manufacturing> (дата обращения: 15.05.21).

31. Adoption Of Additive Manufacturing In Airline Interiors. URL: <https://www.wevolver.com/article/adoption-of-additive-manufacturing-in-airline-interiors> (дата обращения: 18.05.21).

32. Shishkovsky, I., 2019. Aerospace applications of the SLM process of functional and functional graded metal matrix composites based on NiCr superalloys. Additive Manufacturing for the Aerospace Industry, ScienceDirect. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128140628000145> (дата обращения: 19.05.21).

33. Vityaz, P.A., M.L. Kheifetz and S.A. Chizhik, 2019. Synergetic technologies of direct layer deposition in aerospace additive manufacturing. Additive Manufacturing for the Aerospace Industry, ScienceDirect URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128140628000224> (дата обращения: 19.05.21).

34. How 3D printing is shaping the future of aircraft maintenance, repair & overhaul. URL: <https://www.tctmagazine.com/additive-manufacturing-3d-printing-news/additive-manufacturing-aerospace-maintenance-repair/> (дата обращения: 19.05.21).

35. Additive Manufacturing for Aerospace and Defense. URL: <https://www.3d-systems.com/aerospace-defense> (дата обращения: 20.05.21).