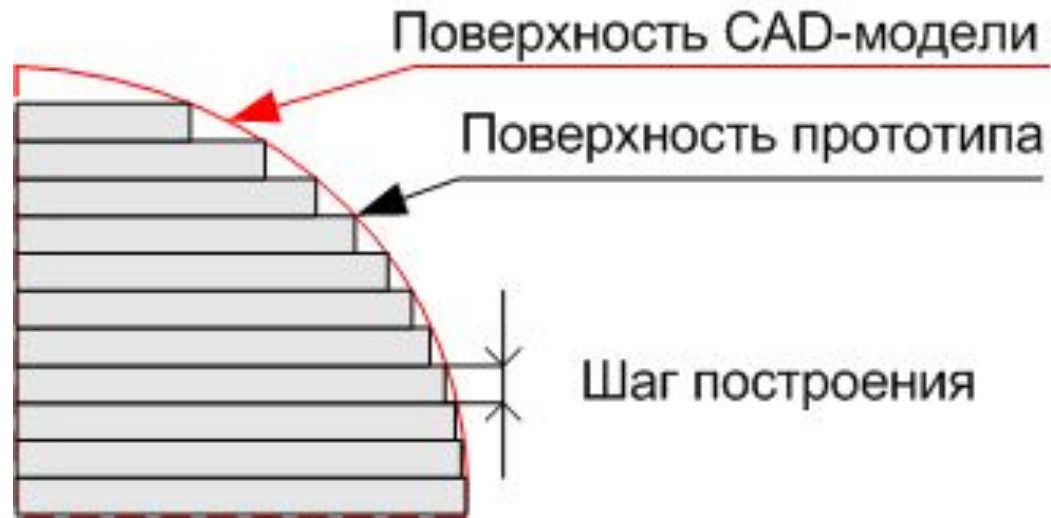


# АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

## 1 Термины и определения

**Аддитивное производство (аддитивный технологический процесс)** – процесс изготовления деталей, который основан на создании физического объекта по электронной геометрической модели путем добавления материала, как правило, слой за слоем, в отличие от вычитающего (субтрактивного) производства (механической обработки) и традиционного формообразующего производства (литья, штамповки) (ГОСТ Р 57558-2017).

# Послойный принцип построения модели



## 2 Достоинства и недостатки технологии

### Достоинства аддитивных технологий:

1. Сокращение рабочего процесса и значительное уменьшение производственных отходов;
2. Сокращение материалов на изготовление и себестоимости изделий;
3. Вариативность и индивидуализация изделий;
4. Изготовление деталей высокой сложности;
5. Улучшенные характеристики готового изделия;
6. Быстрота и легкость обучения персонала;
7. Мобильность производства;
8. Точность размеров;
9. Экологичность;
0. Снижение веса деталей.

## **Недостатки аддитивных технологий:**

1. Высокая стоимость;
2. Качество поверхности;
3. Ограниченный список материалов;
4. Трещины на изделии;
5. Ограниченный размер изделий;
6. Качество и прочность продукции уступают традиционным литью и фрезеровке.

### **3 Технологические процессы, разработанные для аддитивных технологий (ГОСТ Р 57589-2017)**

**3.1 Фотополимеризация в ванне** – это процесс, при котором предварительно осажденный фотополимер селективно облучается световым излучением. Под его воздействием полимерные цепи скрепляются друг с другом.

#### **Основные сведения:**

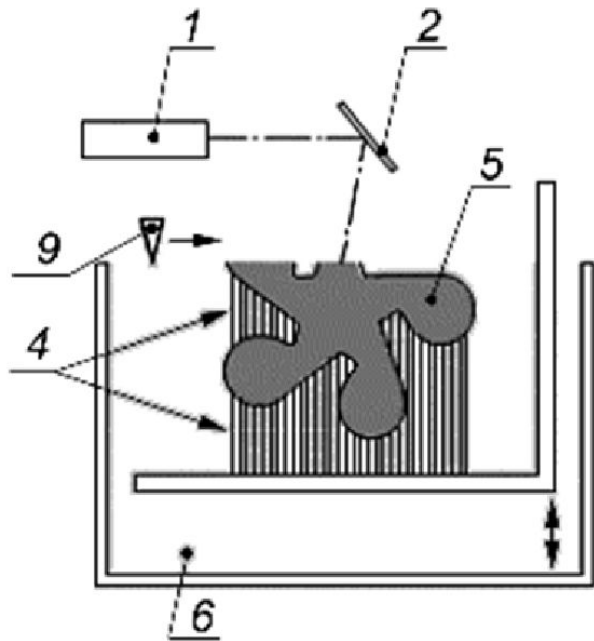
Сырье жидкое или пастообразное: фотореакционноспособная смола с наполнителем или без него;

Механизм связи: химическая реакция;

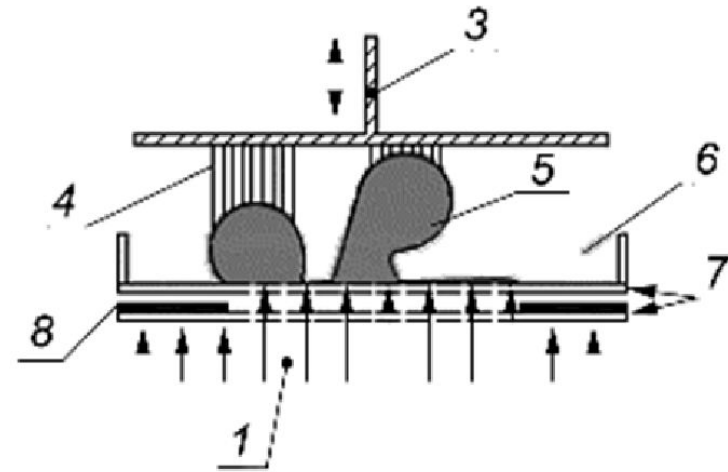
Источник активации: ультрафиолетовое излучение от лазеров и ламп;

Вторичная обработка: чистка, поддержка удаленного материала после отверждения путем дальнейшего воздействия ультрафиолетового излучения.

# Схема двух альтернативных принципов для фотополимеризации в ванне



а) фотополимеризация в ванне с помощью лазера



б) фотополимеризация в ванне с помощью управляемого источника ультрафиолетового излучения

1- источник света; 2 – установленное под углом зеркало;  
3 – строительная платформа и подъемник; 4 – поддерживающая структура; 5 – получаемый продукт; 6 – ванна заполненная фотополимеризующимся составом; 7 – прозрачные пластины; 8 – фотошаблон; 9 – перекрытие и механизм выравнивания поверхности.

**3.2 Струйное нанесение материала** – это процесс аддитивного производства, в котором изготовление объекта осуществляется нанесением капель строительного материала.

**Основные сведения:**

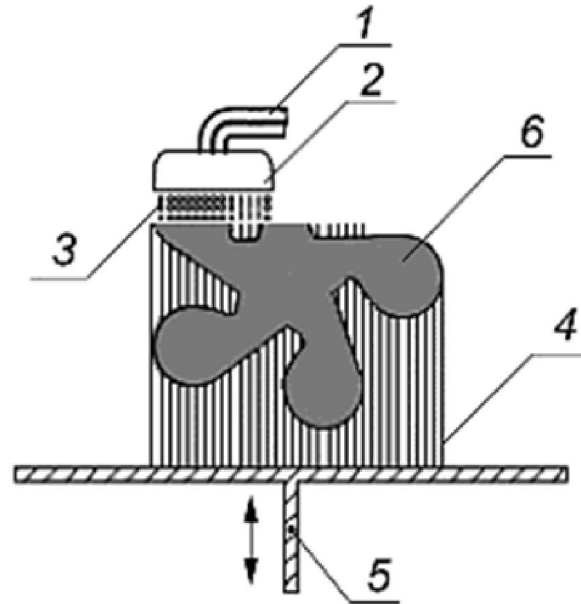
Сырье: жидкий фотополимер или расплавленный воск с наполнителем или без него;

Механизм связи: химическая реакция связывания или адгезия в результате затвердевания расплавленного материала;

Источник активации: источник излучения света для химической реакции связывания;

Вторичная обработка: удаление материала, после отверждения под воздействием светового излучения.

# Схема процесса струйного нанесения материала



- 1 – система подачи сырья для сборки и материала подложки (опционально зависит от конкретного процесса);
- 2 – дозирующее устройство (излучение света или источник тепла);
- 3 – капли строительного материала;
- 4 – поддерживающая структура;
- 5 – строительная платформа или подъемник;
- 6 - получаемый продукт



**3.3 Струйное нанесение связующего** – процесс аддитивного производства, в котором жидкое связующее выборочно наносится на соединяемые порошковые материалы.

**Основные сведения:**

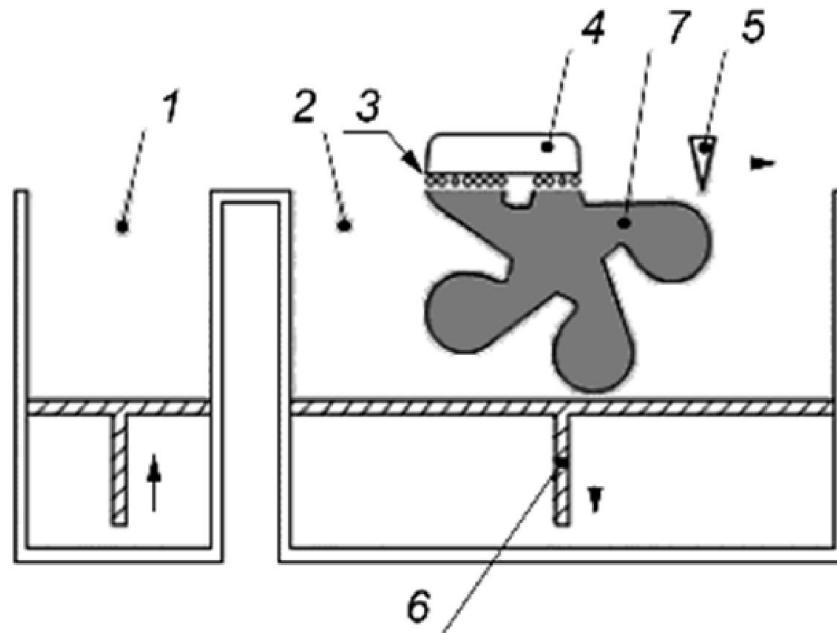
Сырье: порошки, порошковые смеси или частицы материалов, а также жидкое адгезионное/связующее вещество;

Механизм связи: химическая и/или термическая реакция связывания;

Источник активации: в зависимости от адгезионного вещества: химическая реакция;

Вторичная обработка: удаление порошка, пропитки и проникновения любой жидкости материала в зависимости от материала порошка и применения.

# Схема струйного нанесения связующего



- 1 – система подачи порошка; 2 – порошкообразный материал, распределенный по ванне; 3 – жидкая связующая составляющая; 4 – дозирующее устройство, включая подключение к системе подачи связующего вещества; 5 – устройство распространения порошка; 6 - строительная платформа и подъемник; 7 – получаемый продукт.

**3.4 Синтез на подложке** – процесс аддитивного производства, в котором поверхность предварительно нанесенного слоя порошкового материала выборочно, полностью или частично расплавляется тепловой энергией.

**Основные сведения:**

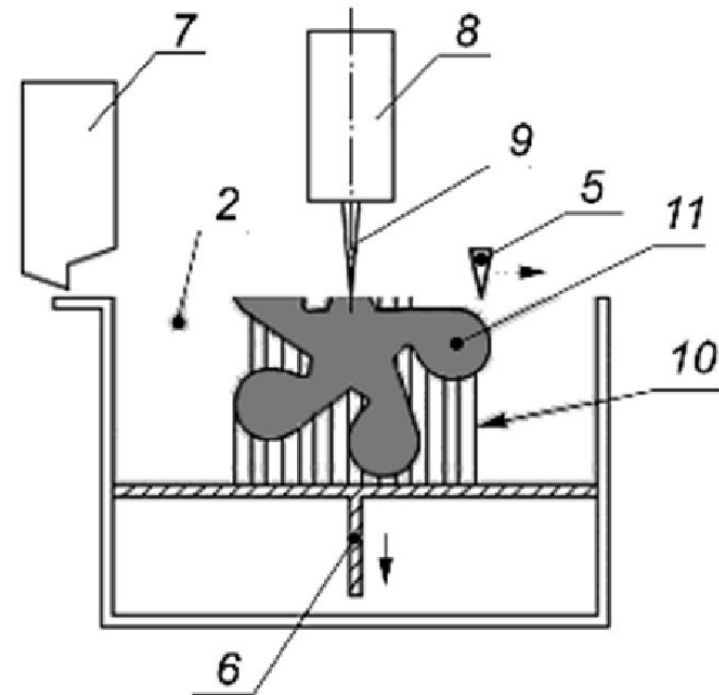
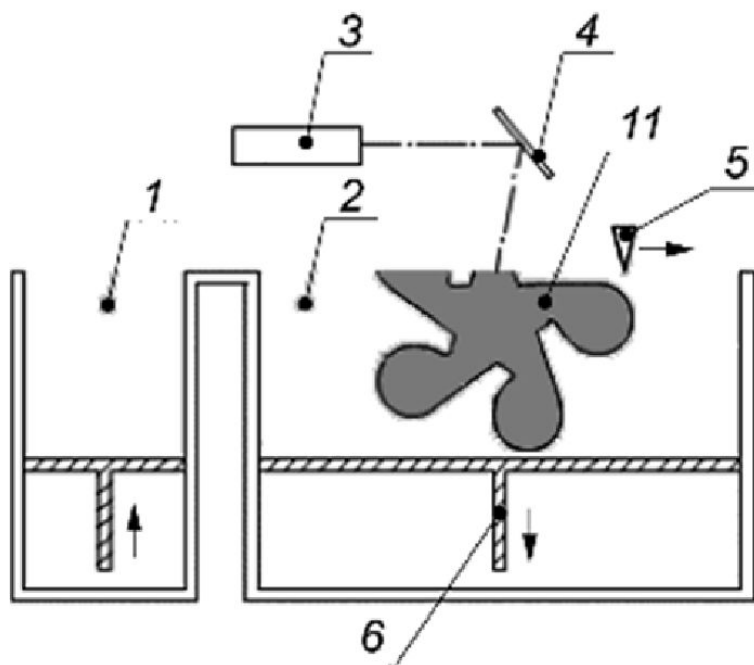
Сырье: различные порошки: термопластичные полимеры, чистые металлы или сплавы металлов, структурная или техническая керамика. Любой из порошковых материалов может быть использован как с наполнителями и связующими веществами, так и без них, в зависимости от конкретного процесса.

Механизм связи: термическая реакция связывания;

Источник активации: тепловая энергия, как правило, передающаяся от лазера электронным пучком и/или инфракрасными лампами.

Вторичная обработка: удаление порошка, если применимо, вспомогательного материала, а также различные операции для улучшения качества поверхности, точности размеров и свойств материала: например, микровзрывные работы, фрезерование, полирование и термообработка.

# Схема двух типов процесса синтеза на подложке



а) Лазерное сплавление материала в сформированном слое

б) Электронно-лучевое сплавление материала в сформированном слое

1 – система подачи порошка (в некоторых случаях порошка в контейнере, как в позиции 7); 2 – порошкообразный материал, распределенный в ванне; 3 – лазер; 4 – установленное под углом зеркало, фокусирующее падающий на него свет; 5 – дозирующее устройство; 6 – строительная платформа; 7 – контейнер с сырьем; 8 – электронно-лучевая пушка; сфокусированный электронный пучок; 10 – поддерживающая структура; 11 – получаемый продукт.

**3.5 Экструзия материала** – это процесс аддитивного производства, в котором материал выборочно подается через сопло или жиклер.

**Основные сведения:**

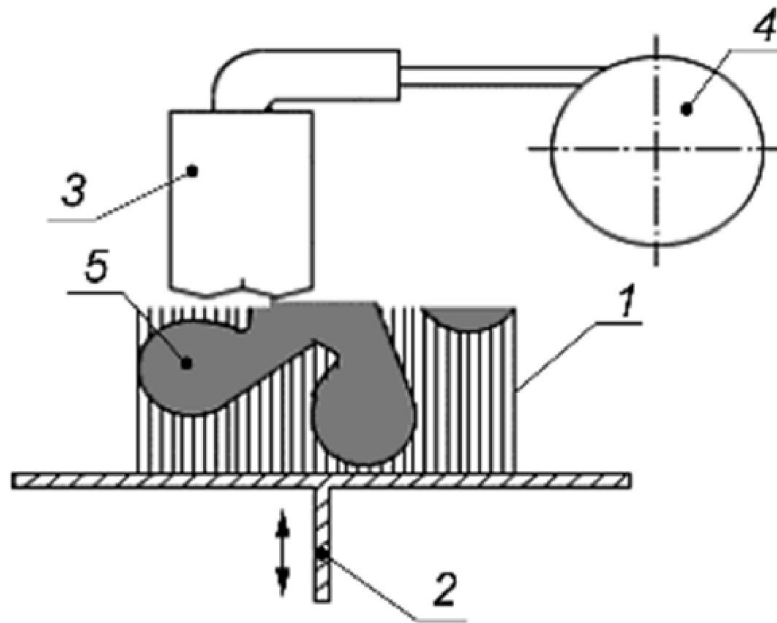
Сырье: волокно или пасты, как правило термопласты и структурная керамика;

Механизм связи: химическая или термическая реакция связывания;

Источник активации: тепло, ультразвук или химическая реакция между компонентами;

Вторичная обработка: удаление поддерживающей структуры.

# Схема процесса экструзии материала



1 – поддерживающая структура; 2 – строительная платформа и подъемник; 3 – подогреваемое сопло; 4 – поставка сырья; 5 – получаемый продукт

**3.6 Прямой подвод энергии и материала** – процесс аддитивного производства, в котором тепловая энергия используется для соединения материалов путем сплавления по мере их нанесения.

**Основные сведения:**

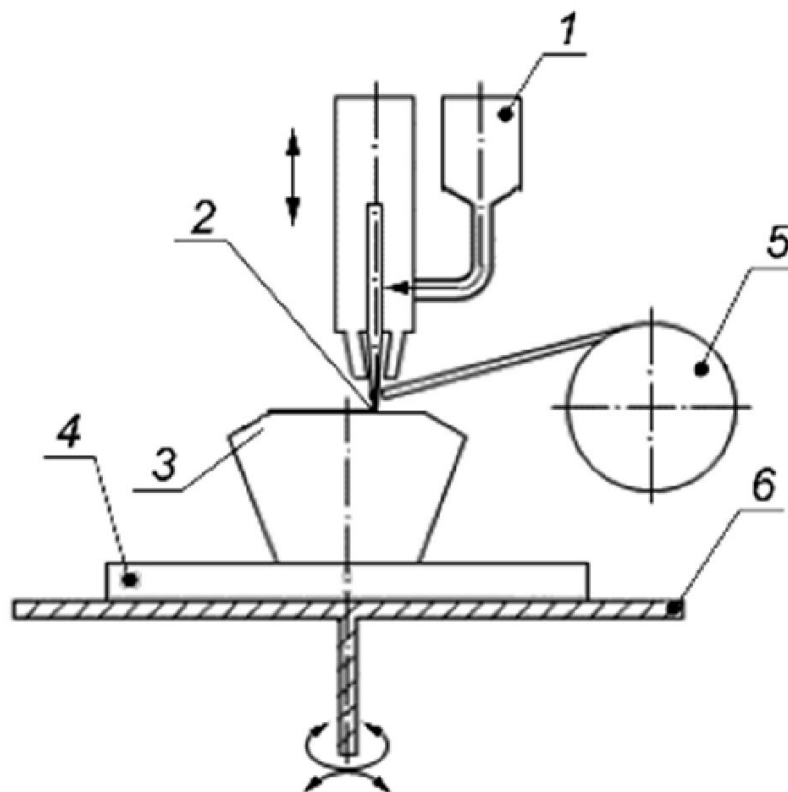
Сырье: порошок или проволока, как правило из металла; для определенных применений к основному веществу могут быть добавлены керамические частицы;

Механизм связи: термическая реакция связывания – плавление и застывание;

Источник активации: лазер, электронный луч или плазма;

Вторичная обработка: улучшение состояния поверхности, например: механическая обработка, микровзрывные работы, лазерное оплавление, шлифовка или полировка и улучшение свойства материала (например, термообработка).

# Схема процесса прямого подвода энергии и материала



- 1 – бункер с порошком; 2 – направленный луч энергии, например: лазер, электронный или плазменно-дуговой пучок; 3 – получаемый продукт; 4 – подложка; 5 – проволока (нить) катушки; 6 – строительный стол.



**3.7 Листовая ламинация** – процесс аддитивного производства, в котором изготовление детали осуществляется скреплением листов материала.

**Основные сведения:**

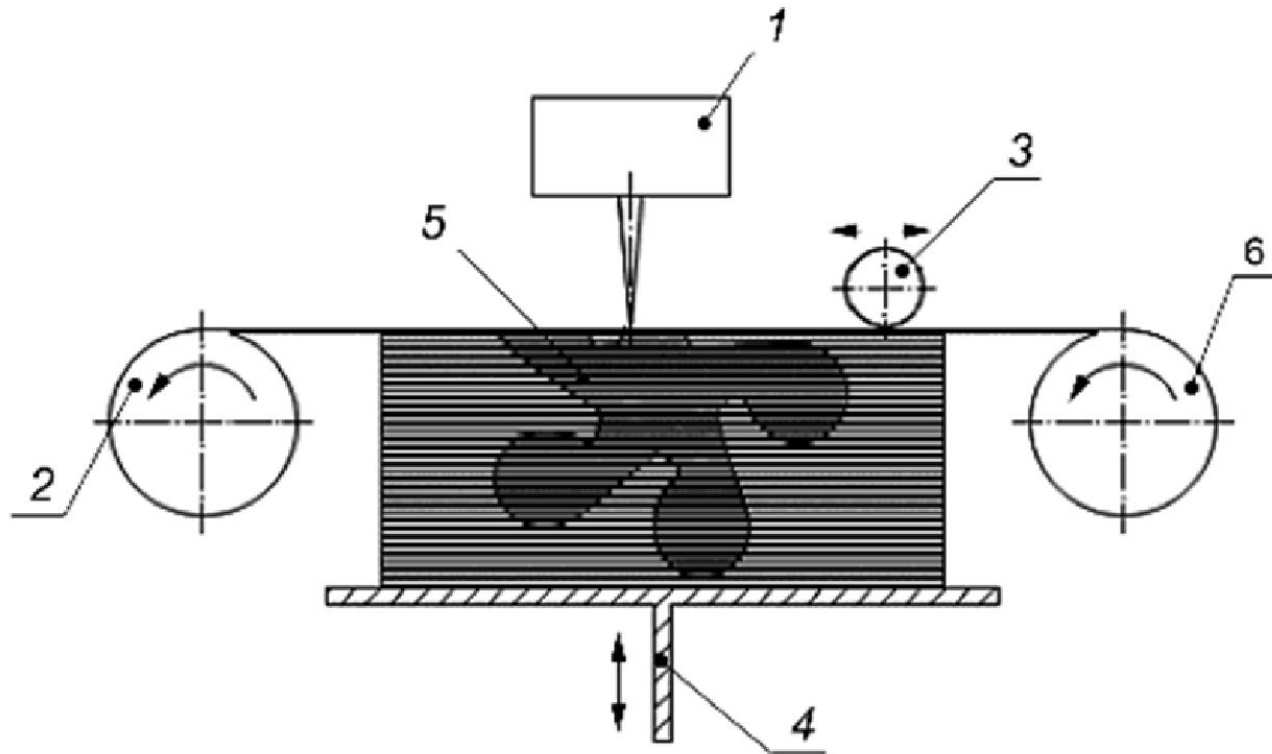
Сырье: листовый материал, как правило, бумага, металлическая фольга, полимеры или композитные листы, изготовленные преимущественно из металла или керамического порошка, скрепленные связующим веществом.

Механизм связи: термическая реакция склеивания, ультразвук;

Источник активации: локальный или общий нагрев, химическая реакция и ультразвуковые датчики;

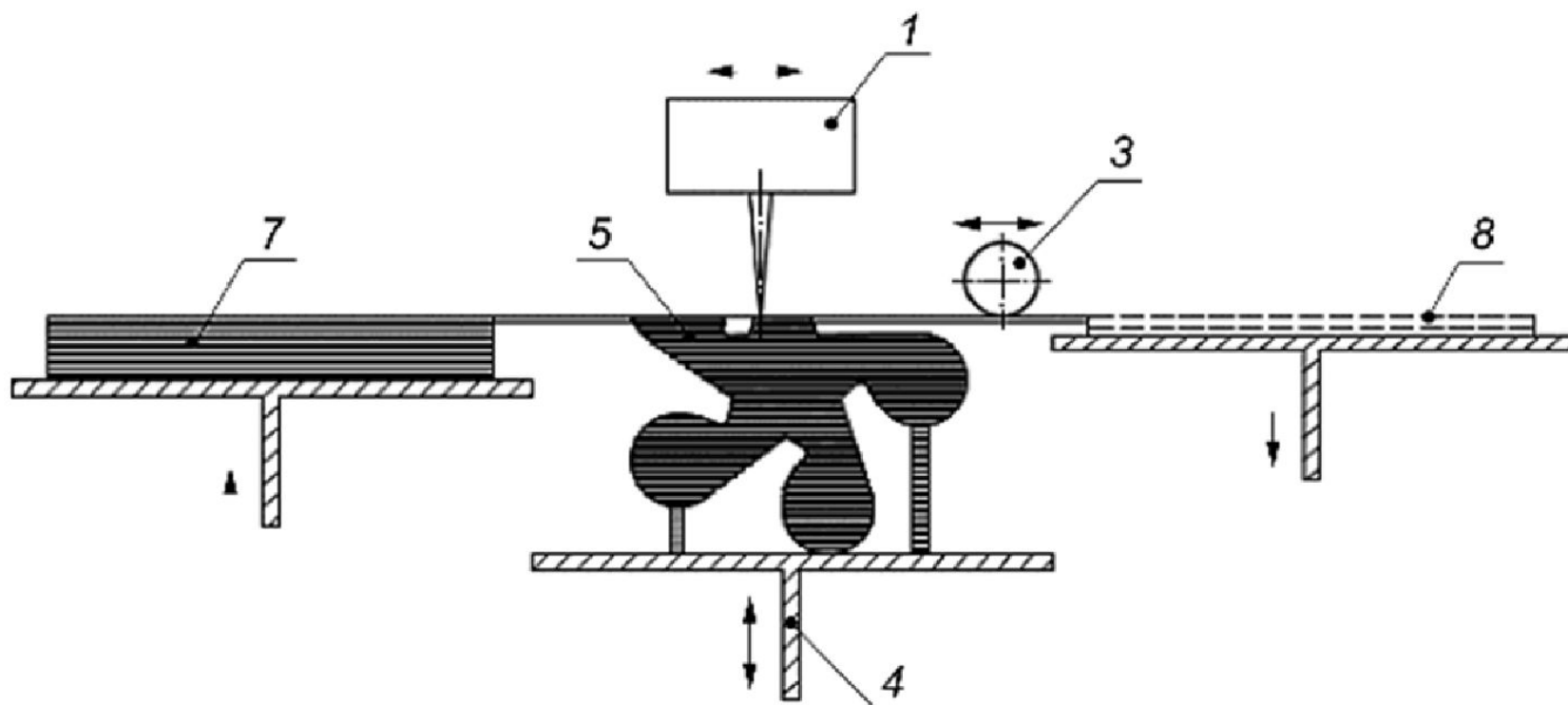
Вторичная обработка: удаление отходов и необязательно спекание, инфильтрация, термическая обработка, шлифовка или механическая обработка для улучшения качества поверхности.

# Схема процесса листовой ламинации для случая непрерывного слоистого рулона



- 1 – отрезной механизм; 2 – излишки материала в рулоне;  
3 – барабан ламинатора; 4 – строительная платформа;  
5 – получаемый продукт; 6 – рулон с сырьем.

# Схема процесса листовой ламинации для случая прерывистого слоистого рулона



- 1 – отрезной механизм; 3 – барабан ламинатора;  
4 – строительная платформа; 5 – получаемый продукт;  
7 – излишний материал; 8 – исходный материал.

## **4 Материалы аддитивных технологий**

### **4.1 Пластики**

#### **АБС-пластик (акрилонитрилбутадиенстирол)**

АБС – ударопрочный материал, относящийся к инженерным пластикам. Обладает высокой прочностью и износостойкостью. Экологически безопасен, но при нагревании в процессе производства возможны выбросы паров акрилонитрила.

#### **PLA-пластик (полилактид)**

PLA – биоразлагаемый, биосовместимый, термопластичный материал. Сырьем для производства служат ежегодно возобновляемые ресурсы, такие как кукуруза и сахарный тростник. Используется для производства изделий с коротким сроком службы: пищевая упаковка, одноразовая посуда, пакеты, различная тара.

Плавится при температуре выше 170 °С. Для размягчения достаточно 50 °С.

## **ПЭТ-пластик (полиэтилентерефталат)**

Бесцветная нить с очень высоким уровнем прочности. ПЭТ легкий и ударопрочный материал, из него возможно создание прозрачных как стекло изделий.

Средняя температура печати составляет от 212 до 224 °С.

## **Нейлон**

Нейлон обладает повышенной прочностью на разрыв и гибкостью.

Отличительные особенности: хорошее соединение с поверхностью, высокая водонепроницаемость, хорошее сопротивление разрыву и возможность впитывать краску.

Температура плавления от 178 до 218 °С.

## **Laywood**

Композитный материал, на 40 % состоящий из натурального дерева и безопасного связующего полимера. Его можно резать, шлифовать и разрисовывать, так как это делается с любыми деревянными объектами.

## **Laybrick**

Полимер с эффектом песчаника для 3D-печати.

## **4.2 Бетон**

Используется особый состав цементной смеси. С помощью строительного 3D-принтера можно создавать полноценные дома и конструкции.

## 4.3 Металл

В качестве материала для создания деталей из металла используется специальный порошок. Под порошками понимают сыпучие материалы с размером частиц до 1.0 мм.

Виды порошков по размерам частиц ( по условному диаметру  $d$ ):

- Нанодисперсные с  $d < 0,001$  мкм;
- Ультрадисперсные с  $d = 0,01-0,1$  мкм;
- Высокодисперсные с  $d = 0,1-10$  мкм;
- Мелкие с  $d = 10-40$  мкм;
- Средние с  $d = 40-250$  мкм;
- Крупные с  $d = 250-1000$  мкм.

# Структура востребованности металлов



**Достоинства:** высокая прочность, высокий уровень детализации до 0,025 мм; устойчивость к высоким температурам; возможность повторного применения материала.

**Недостатки:** технология 3D-печати очень сложна; дорогое оборудование.



## 5 Обмен данными

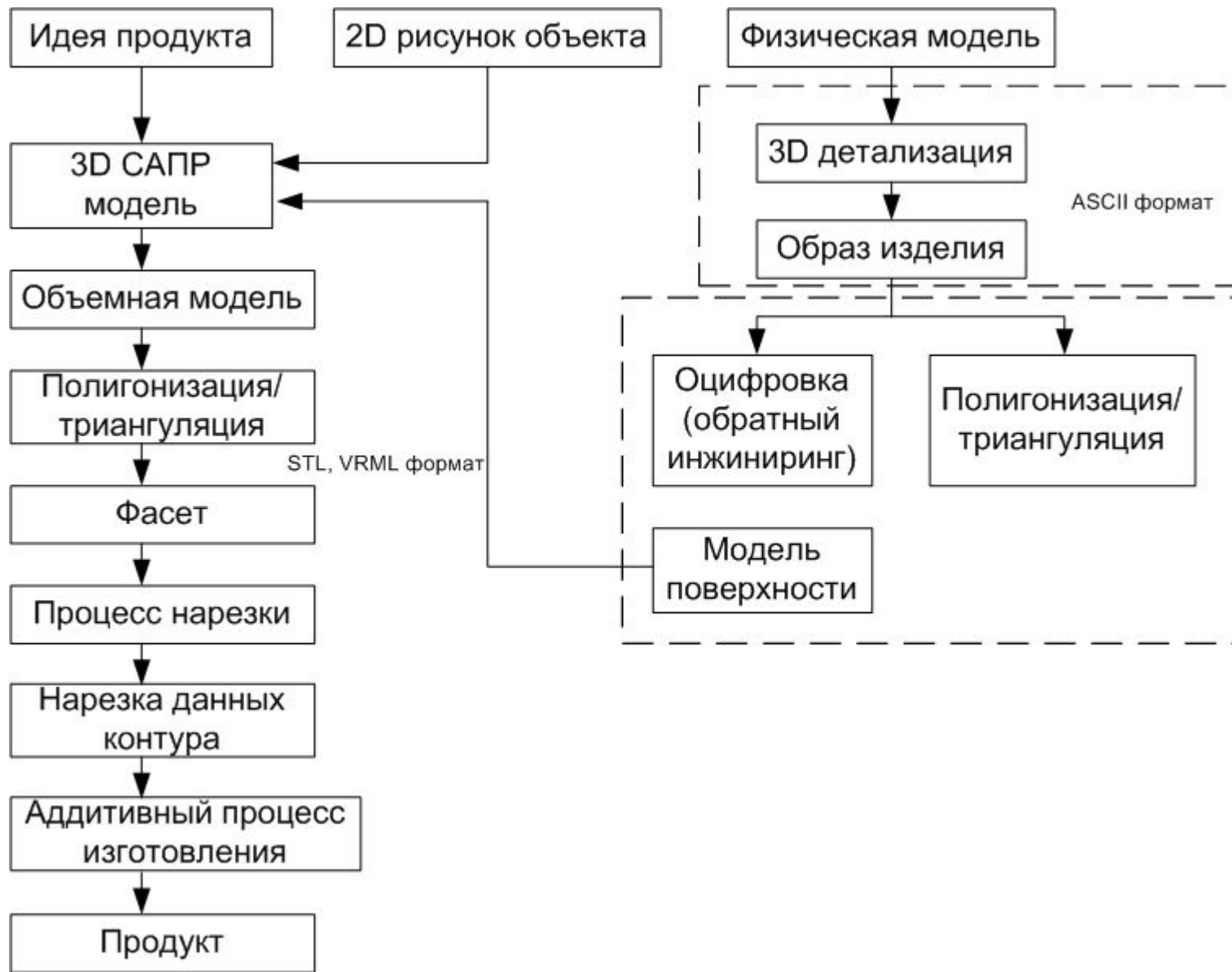
### 5.1 Поток данных

Полный набор 3D-данных части изделия составляет основу аддитивного производства. Чаще всего это создается путем прямого 3D моделирования в САД системах.

Наборы данных также могут быть получены с помощью измерений, если части деталей существуют в физической форме.

Представление данных основано на гранях изделия, затем генерируется из объема или площади модели через полигонизацию или триангуляцию и передается в процессе производства в STL или VRML формате.

Программное обеспечение содействует автоматическому выполнению процесса, насколько это возможно.



**Общий обзор традиционного потока данных от идеи продукта до фактической части**

## **3D САПР моделирование (объемное моделирование) –**

процесс, наиболее часто используемый при проектировании для составления цифровой 3D-модели.

Отправной точкой может быть образ изделия, который принимает форму и становится все более определенным непосредственно на экране компьютера, или ранее созданный образ объекта в виде эскизов, рисунков и т.д., которые потом просто конвертируются в 3D-данные.

Объем изделия может быть описан с помощью двух различных методов или комбинации обоих.

Объект состоит либо из элементарных объемов (форм) (например, прямоугольного параллелепипеда, призмы, цилиндра, конуса, сферы и тороида), которые генерируют реальный объект с помощью последовательности логических операций, или объем, описывающий его окрестности граничных поверхностей и расположение материалов относительно граничных поверхностей.

**3D-оцифровка (обратный инжиниринг)** – это процесс, при котором геометрия поверхности физического объекта определяется с использованием соответствующего оборудования и программного обеспечения и записанных в цифровую модель точек.

Объекты могут быть записаны вручную или использованы готовые модели, которые должны быть скопированы в цифровой форме.

Использование 3D-оцифровки особенно эффективно, если модель имеет эмпирически разработанную, свободную поверхность, так как она является трудно воспроизводимой с помощью прямого моделирования в 3D САПР.

## Реконструкция поверхности

Является средством обработки данных, полученных с помощью 3D-оцифровки.

Начиная с массива точек, создаются математически описанные кривые и поверхности.

Генерируется поверхность объекта с достаточной топологической информацией.

Эти данные затем могут храниться отдельно или быть интегрированы в существующую объемную модель САПР.

Реинжиниринг создает мост между 3D-оцифровкой и моделированием САПР.

## Полигонизация/триангуляция

Это программное обеспечение аддитивного процесса используется для создания объемной модели на основе фасеточных данных либо из массива точек после 3D-оцифровки или использования объемной модели после 3D-моделирования САПР.

Поверхность объекта представляет собой множество крошечных, плоских граней или полигонов, которые протянуты между точками.

Число и размер граней определяют, насколько точно воспроизводится геометрия поверхности.

Этот процесс создает набор данных в формате STL.

## Процесс нарезки

Является важным этапом предварительной подготовки во всех аддитивных производственных процессах.

Он включает в себя нарезку фасетов (объем) модели в несколько последовательных слоев и записи информации, содержащейся в каждом слое.

Если нарезанные данные контура больше не соединяются друг с другом в оси  $Z$ , то последующее масштабирование больше не возможно.

При использовании некоторых технологий этот процесс выполняется автоматически с помощью программного обеспечения, как только необходимые параметры (например, толщина слоя) будут установлены.

Другие системы требуют отдельного программного обеспечения для подготовки и хранения данных слоя.

## 5.2 Форматы данных

Формат **STL** является стандартным форматом для передачи данных. Некоторые системы могут читать и обрабатывать данные в формате **vrml**.

Если в **STL** формат не могут быть экспортированы форматы данных из-за отсутствия модуля интерфейса (не входит в стандартную поставку программы САПР), то данные могут передаваться в другие САПР программы через интерфейс форматы (например, в формате IGES или vda), который затем включает **STL** выход.



# STL

Файл формата STL (тесселяции поверхности языка или стереолитография) зарекомендовал себя как отраслевой стандартный формат для передачи данных в аддитивных технологиях.

Это системно-нейтральный формат обмена данными по геометрическим координатам. Граничные поверхности объемной модели описываются треугольниками (плоские грани) и нормальными векторами.

Наборы STL-файлов могут быть сохранены с помощью ASCII или двоичных представлений, являющихся более удобно читаемым форматом, значительно сокращающим размер файла.

Формат STL является непригодным для обмена данными между системами САПР.

**Язык VRML** (язык моделирования виртуальной реальности), независимый от платформы построения, поддерживает трехмерный формат изображения и различные сетевые возможности.

**VRML** - это формат данных, который не ограничивается входной точкой или крайними сведениями в виде списков. Формат данных описывает 3D-объекты или сценарии в объектно-ориентированном способе на одном компьютерном языке (обычный текст ASCII или utf-8).

Основными компонентами формата языка **VRML** являются типы узлов и каналы связи. Типы узлов строятся на основных геометрических формах, таких как прямоугольные параллелепипеды, цилиндры, конусы, сферы. Используются так же камеры узлов (параллельная перспектива) и группы узлов для реализации иерархических структур, а также прототипы, чтобы расширить существующий ассортимент видов узлов. Совсем недавно формат VRML стал форматом XML, расширяемый 3D, Web3D.

# IGES

IGES представляет собой нейтральный формат данных и международный стандарт для обмена CAD-данными между различными САПР.

IGES разрабатывался главным образом, для передачи геометрических данных, относящихся к 2D-модели чертежа и 3D-модели поверхности.

IGES использует объемные элементы (прямоугольных параллелепипедов, цилиндров, сфер и др.), около 40 дополнительных геометрических элементов (поверхности, кривые, дуги, точки, системы взаимодействия и др.) и более 35 негеометрических элементов (текст, размеры, допуски и т.д.).

# VDA-FS

**VDA-FS** является стандартным интерфейсом САПР организации "VDA" (Ассоциация немецких автопроизводителей).

В первую очередь предназначен для обмена данными по кузовным работам.

**VDA-FS** хорошо подходит для обмена данными произвольных поверхностей, которые были сформированы поверхностно-ориентированного 3D программного обеспечения. Точки, объемы точек и векторы также могут быть переданы в данном формате.

# STEP

**STEP** (стандарт обмена данными модели продукта) система нейтрального формата, интерфейс для описания и обмена данными модели продукта между различными CAD-системами.

**STEP** может быть использован для передачи данных о продукте (например, цвета, текст или слой поддержки) помимо геометрических данных (как с DXF или IGES).

Модель данных САПР может быть интегрирована в геометрическое представление (каркасные модели, поверхностные модели объема и другие модели).

# AMF

Производственный формат-добавка **AMF** - это основанный на XML формат данных.

Специально разработан для удовлетворения потребностей производства присадок.

Как и с STL, существует мозаичное описание поверхности части (или частей), однако дополнительно данные, такие как материал, фактура, цвет, уже включены.

## 5.3 Подготовка данных

### Качество

Особое внимание должно быть уделено следующему:

- все поверхности модели должны быть идеально состыкованы (идеально герметичная, водонепроницаемая модель);
- все поверхности модели должны быть ориентированы таким образом, что объемы могут быть четко определены;
- при выполнении триангуляции, поверхности конструкций (слоев, цилиндров, осей, элементов неявики и т.д.) должны быть выбраны;
- модели поверхности в идеале должны быть преобразованы в твердые формы перед выполнением полигонизации/триангуляции.

## Параметры экспорта STL

Настройка параметров экспорта при вводе данных STL и, следовательно, точность, полигонизации/триангуляции определяет, насколько точно задано приближение по геометрии изделия.

Слишком низкое разрешение влияет на точность и внешний вид готового прототипа. Однако очень высокое разрешение требует большой объем памяти (чрезмерного большого размера файла) и увеличивает время подготовки.



Ошибка форматирования	Эффект процесса	Возможная проблема передачи данных	Возможная мера
Слишком грубая триангуляция	нет	Плохая аппроксимация реальной модели	Коррекция STL файла
Слишком хорошая триангуляция	Длительная обработка данных. Ошибки в процессе из-за больших объемов данных	Дефекты, вызванные ошибками в процессе	Коррекция STL файла
Неравномерные и/или необрезные поверхности в CAD-модель	Ошибки процесса, обусловленные неопределенными частями	Геометрические дефекты, искажение	Восстановление данных как чистый срез «закрытых объемов»
Неправильная ориентации поверхности в CAD-модели	Ошибки процесса, обусловленные пустыми слоями или ограниченное определение частей	Геометрические дефекты, искажение. Расслаивание и утрата прочности в Z-направлении (ось)	Проверить нормальные векторы «закрытых объемов»

Различные параметры экспорта могут быть установлены в зависимости от программы САПР:

- высота хорды, соотношение сторон и разрешение;
- значение геометрии поверхности, абсолютное выравнивание поверхности, абсолютное отклонение в фасетах, максимальное расстояние отклонения и т.д.;
- допуск значения геометрии треугольника, угловой допуск, контроль угла, поверхность, угол и т.д.

## **Особенности обработки данных**

### **Припуски на механическую обработку**

В зависимости от компонента и выбранного метода изготовления может потребоваться дополнительная обработка. В этом случае необходимо обеспечить надлежащее превышение размеров увеличением номинального размера в соответствующих областях, при создании CAD-модели. Исполнитель/производитель должен дополнительно проанализировать зоны обработки.

### **Уменьшение объема (массовые сокращения)**

Некоторые технологии аддитивного производства могут быть очень длительными и дорогими при изготовлении больших объемов. Очень часто можно уменьшить объем CAD-модели в тех областях, где, например, требуется обработка полостей с помощью инструментов. Это должно быть учтено на этапе проектирования.

## Время позиционирования

В зависимости от процесса позиционирование происходит в трех координатах и варьируется для получения разных характеристик. Это необходимо учитывать при выравнивании геометрии построения пространства. Кроме того, время производства часто зависит от позиционирования.

Некоторые производственные процессы требуют дополнительных опор для поддержки геометрии нависающей «снизу». Они устанавливаются до производства и, как правило, удаляются вручную после завершения процесса производства.

Не всегда возможно избежать повреждения полностью законченной поверхности, когда имеется поддержка. Для таких случаев следует отметить места, где необходимо, чтобы поддержка не была прикреплена.