

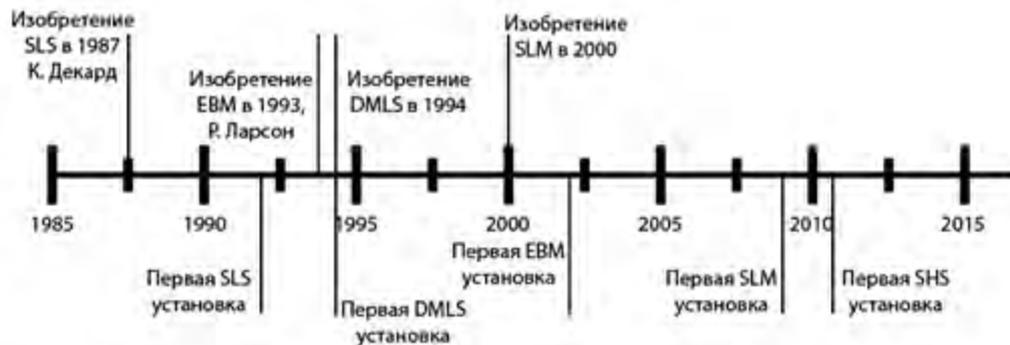


## **ТЕХНОЛОГИЯ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ**

В отличие от технологии селективного лазерного спекания (СЛС) предполагалось полное расплавление порошка



Технология разработана в институте лазерных технологий Фраунгофера ILT в 1995 году Дитером Шварце и Матиасом Фокеле (F&S Stereolithographteknik GmbH)



## ПРЕИМУЩЕСТВА И НЕДОСТАТКИ

Преимущества	Недостатки
Высокие свойства материала	При затвердевании детали дают усадку, что приводит к деформации
Возможность работы со многими материалами	
Создание деталей со сложной геометрией, внутренними полостями и каналами охлаждения	Малая скорость печати
Экономия материала (97-99% неиспользованного порошка повторно используется)	Требуется лазерный луч хорошего качества
Сокращение цикла изготовления из-за отсутствия необходимости изготовления оснастки	Требуется высокомощный лазер (0,3-1 кВт)
	Требуются поддержки

## СХЕМА РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЦЕССА

В процессе селективного лазерного сплавления (СЛП) происходит обработка порошкового материала посредством лазерного луча.

Построение деталей происходит в инертной среде.

Лазерный луч нагревает и расплавляет частицы порошка, способствуя их переходу в жидкое состояние.

После затвердевания формируется сплошной материал.





SLM Solutions



ACONITY 3D



3D Systems



3D Lam

На рынке доступны различные варианты оборудования для реализации процесса СЛП от отечественных и зарубежных производителей.

Основные отличия установок друг от друга заключаются в размерах рабочей камеры, мощности и количестве лазеров, способах подачи и регенерации порошка, а также количестве настраиваемых технологических параметров печати.

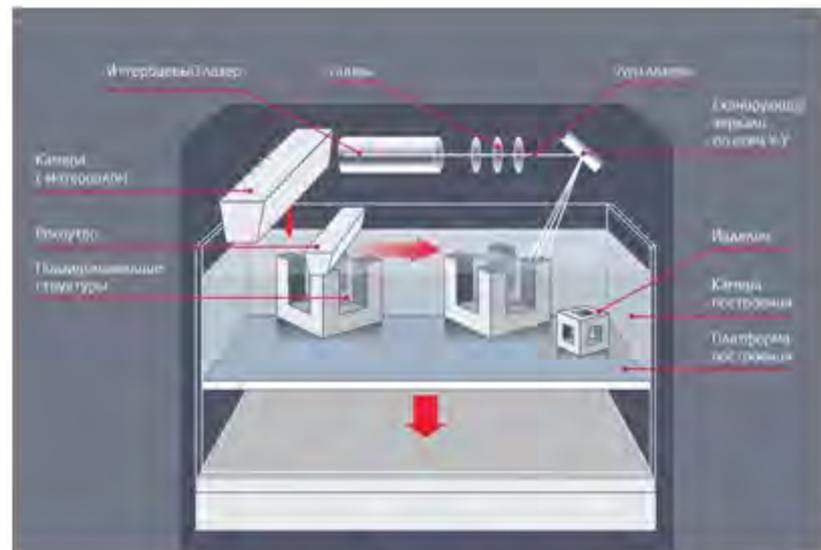
Все установки делятся на лабораторные (для отработки процессов печати) и промышленные (для серийного производства изделий).

## РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА

На поверхность подложки из резервуара наносится слой порошка, который равномерно распределяется при помощи устройства выравнивания. Затем включается лазер. Луч лазера, направляемый подвижными зеркалами и фокусирующей линзой, сканирует поверхность нанесенного порошкового слоя согласно предварительно созданным 3D-моделям. Этот процесс формирует слой детали.

Те области, которые соответствуют текущему срезу изделия, подвергаются сплавлению.

После завершения формирования слоя рабочая платформа опускается на заданную высоту, и процесс повторяется, пока не завершится печать всего изделия.



## ПОСТОБРАБОТКА

После завершения изготовления изделия на 3D-принтере с использованием технологии СЛП часто требуется проведение некоторых дополнительных операций. Например, для придания изделию более гладкой формы поверхности, его шлифуют или полируют. Но с развитием технологий аддитивного производства необходимость в дополнительной обработке для деталей, созданных на СЛП-принтерах, уменьшается.

Для большинства деталей, созданных с использованием метода СЛП, требуется пескоструйная обработка для удаления порошка, оставшегося на поверхности деталей. Обычно поверхность изделий после СЛП оказывается более шероховатой по сравнению с изделиями, изготовленными другими методами.

Для получения требуемой микроструктуры и свойств может потребоваться проведение термической обработки деталей по соответствующему режиму.



# МАТЕРИАЛЫ



Алюминий



Никель



Сталь



Кобальт

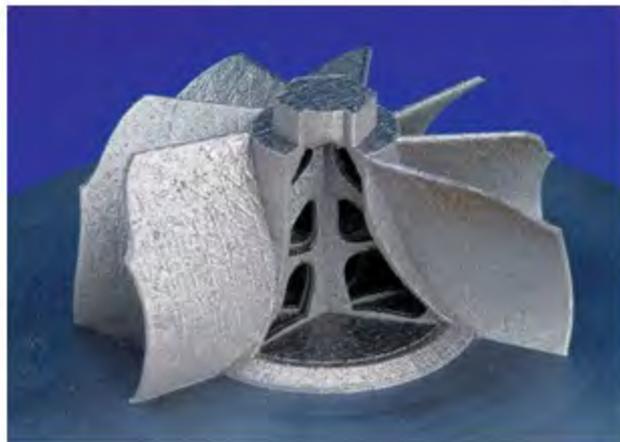


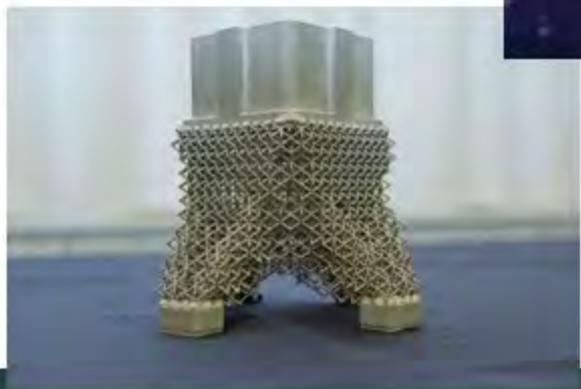
Титан



Медь









## ДРУГИЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ



Пресс-формы



Теплообменники



Индукторы



Энергетика



Химическая промышленность



# МАСШТАБНОЕ ПРОИЗВОДСТВО ДЕТАЛЕЙ



Изготовление большого количества деталей за одну печать



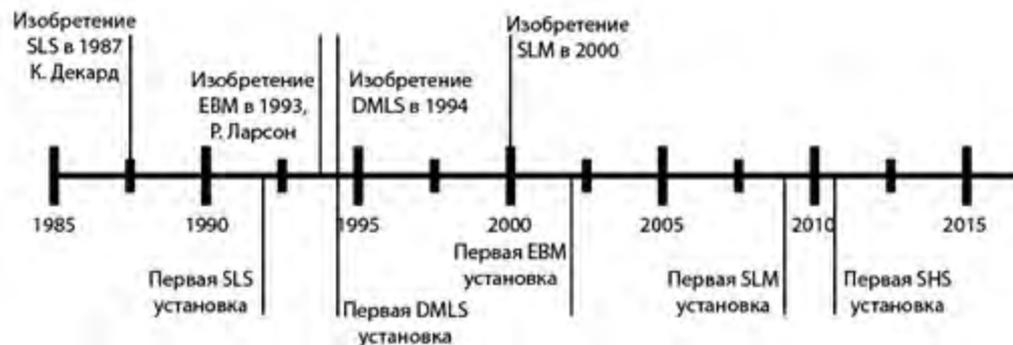
Автоматизация постобработки





## **ТЕХНОЛОГИЯ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЕКАНИЯ**

Технология разработана совместно профессором Джо Биманом и студентом Карлом Декардом под руководством профессора Дейва Борелла в университете штата Техас в Остине в 1980-х годах на факультете машиностроения.



Главное преимущество технологии СЛС – возможность изготовления изделий практически любой геометрии без необходимости добавления поддержек

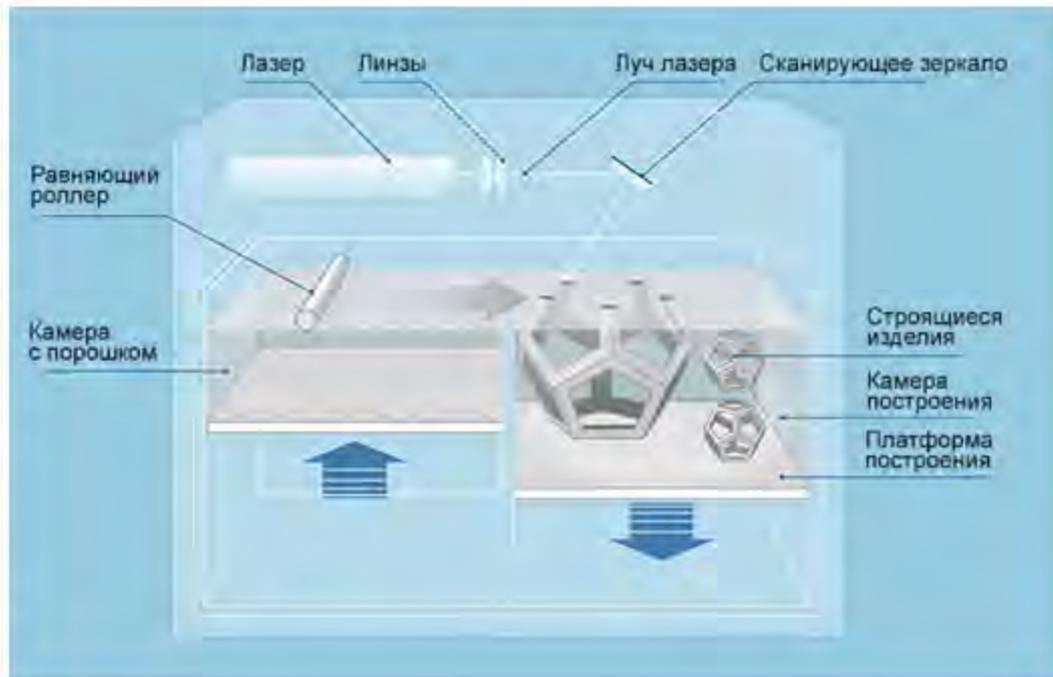


## ПОРЯДОК РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЦЕССА

На поверхность подложки наносится слой порошка, поступающего из емкости подачи. Порошок равномерно распределяется с помощью устройства выравнивания.

Включается лазер, луч лазера, направляемый подвижными зеркалами и фокусирующей линзой, по сгенерированным 3D-моделям сканирует поверхность нанесенного слоя порошка и формирует первичный слой печатаемого объекта методом спекания. В результате оказываются спеченными те области, которые соответствуют текущему срезу изделия.

После завершения слоя рабочая платформа перемещается вниз на заданную высоту, и процесс повторяется, пока изделие не будет напечатано.





На рынке доступны различные варианты оборудования для реализации процесса СЛС.

Основные отличия установок друг от друга заключаются в размерах рабочей камеры, мощности лазеров, способах подачи и регенерации порошка, а также количестве настраиваемых технологических параметров печати.

Установки подразделяют на лабораторные и промышленные.

Для успешной реализации процесса СЛС необходимо наличие периферийного оборудования для очистки деталей после процесса СЛС, регенерации порошка и др.

## ПРЕИМУЩЕСТВА И НЕДОСТАТКИ

Преимущества	Недостатки
Изделия со сложной геометрией	Пористая и шероховатая поверхность
Широкий выбор материалов	
Экономия времени	Необходима постобработка
Не требуются поддержки	Особые требования к помещению и системе кондиционирования
Хорошие механические характеристики	
Высокая точность и качество	Низкая скорость печати
	Высокая стоимость оборудования



1. Изготовление прототипов деталей (проверка геометрии деталей, собираемость, аэро- и гидродинамика, эргономичность и т. д.).
2. Изготовление моделей для технологии литья.
3. Изготовление конечных деталей.



## Автомобилестроение



## Медицина



## Авиация



При использовании металлического порошка сочетаются преимущества технологии СЛС – отсутствие необходимости в подложках и механические свойства металлов

После изготовления заготовки производится постобработка для формирования плотного материала (спекание, пропитка и т. д.).



Полиэфирэфиркетон (PEEK) – полимерный материал с высокими механическими свойствами применяют для изготовления медицинских инструментов или имплантатов. Детали из PEEK обычно изготавливаются традиционными методами, например литьем под давлением.

СЛС может предложить большую гибкость и позволяет напрямую изготавливать изделия со сложной геометрией. Механические свойства таких деталей близки к чистому алюминию, но имеют более низкий вес.

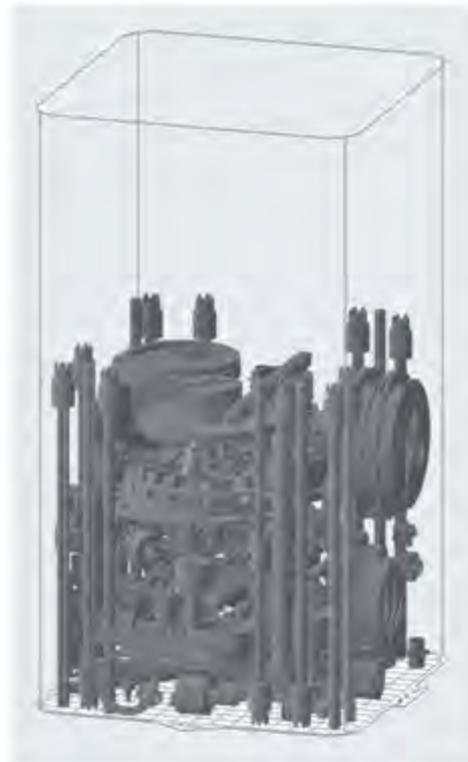


После изготовления детали ее необходимо очистить от не спеченного порошка. Оставшийся порошок смешивается с чистым порошком и повторно используется в технологии СЛС.

При работе с порошками обязательно использование средств защиты (маска, перчатки).



Благодаря отсутствию необходимости установки поддержек возможно изготовление большого количества деталей за одну печать, это позволяет уменьшить срок и стоимость изготовления изделий.



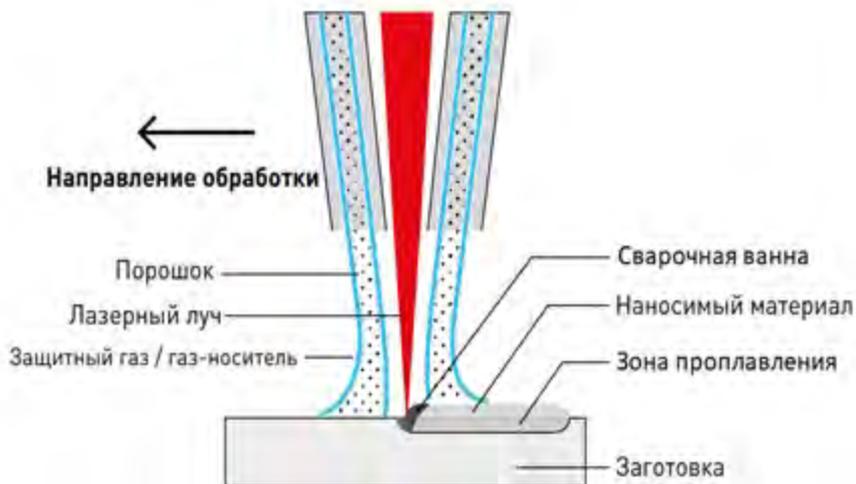


## **ТЕХНОЛОГИЯ ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ**

## СУТЬ ТЕХНОЛОГИИ

Технология прямого лазерного выращивания в зарубежных источниках именуется как *direct metal deposition (DMD)*, *directed light fabrication (DLF)* и *laser metal deposition (LMD)*.

Данная технология согласно классификации стандарта ASTM F2792.1549323-1 (США) относится к категории *directed energy deposition*, что подразумевает прямой подвод энергии непосредственно в место построения.



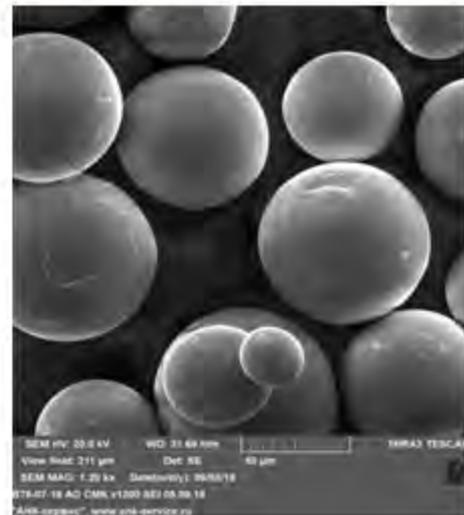
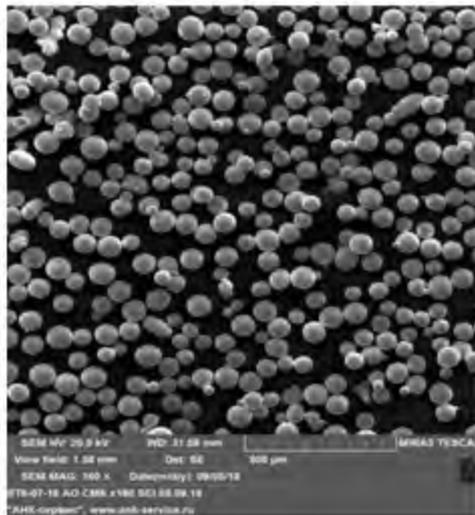
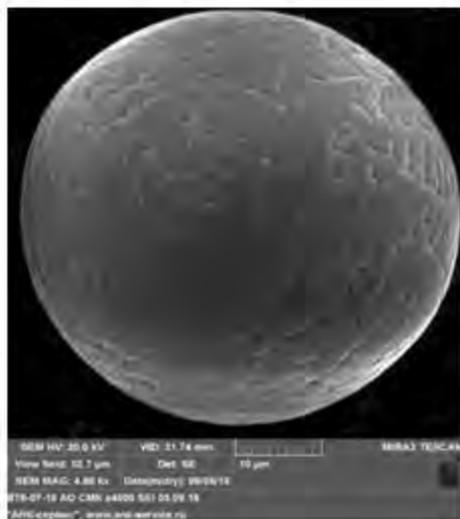
- Наплавляемый материал: металлический порошок (на основе Fe, Ni, Ti, Cr, Co, Cu, Al), ВЭС, МКМ, ФГМ
- Производительность процесса - до 1 кг/час.
- Толщина наплавленного слоя 0,3-0,8 мм.
- Ширина одиночного валика - от 0,8 до 2,5 мм.
- КИМ - до 80-90 %.



- Металлические порошки на основе Fe, Ni, Ti, Cr, Co, Cu, Al
- Фракционный состав: 40-200 мкм
- Форма порошинок - сферическая



Порошок Inconel 625 – общий вид



Изображения частиц порошка, полученные на электронном микроскопе



Авиация



Космос и ОПК



Ядерная энергетика



Медицина



Автомобильная промышленность



Прочее машиностроение

## ПРЕИМУЩЕСТВА

- Возможность изготавливать детали диаметром до двух метров, высотой до одного метра и весом до 4000 кг.
- Прочностные характеристики наплавляемого материала идентичны свойствам материала, полученного традиционным способом (прокатка, ковка).
- Более высокая производительность ПЛВ по сравнению с аддитивными технологиями bed deposition (до 1 кг/ч).
- Отсутствие несплавлений и трещин в наплавляемом металле.
- Возможность создания сложнопрофильных тонкостенных изделий.



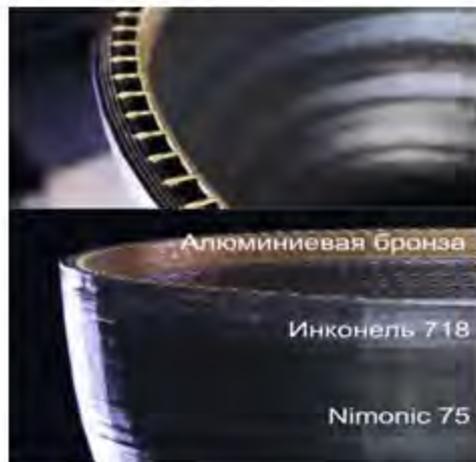
Возможность создания градиентных изделий с переменным химическим составом и физическими свойствами.

Минимальные припуски на последующую обработку.

Создание гибридных конструкций: комбинация аддитивных и традиционных технологий (сварка, литье, штамповка, механическая обработка и др.).

Нанесение функциональных покрытий в процессе выращивания на изделия, полученные традиционными способами производства.

Многофункциональность технологических комплексов: прямое лазерное выращивание, лазерная сварка, наплавка, термоупрочнение и резка в одном технологическом комплексе.



## СХЕМА ИЗГОТОВЛЕНИЯ



## ВХОДНОЙ КОНТРОЛЬ

Входной контроль проводится с целью установления соответствия качества порошка требованиям Государственных Стандартов и включает в себя:

- определение химического состава;
- определение фракционного состава;
- определение насыпной плотности;
- определение формы порошинок.



## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

### Задачи:

- ✓ Получение режима выращивания с минимальным количеством дефектов: пор, трещин, несплавлений.
- ✓ Минимизация шероховатости и волнистости поверхности выращиваемых изделий.

### Варьируемые параметры режима:

- Мощность лазерного излучения.
- Скорость перемещения робота.
- Диаметр пятна.
- Расход металлического порошка.
- Шаг между слоями (по оси  $Z$ ).



# НАПИСАНИЕ УПРАВЛЯЮЩЕЙ ПРОГРАММЫ (УП)

## Варианты написания УП

Создание траектории движения в специализированных программах, так называемых САМ-системах (англ. computer-aided manufacturing)



SprutCAM



Siemens NX



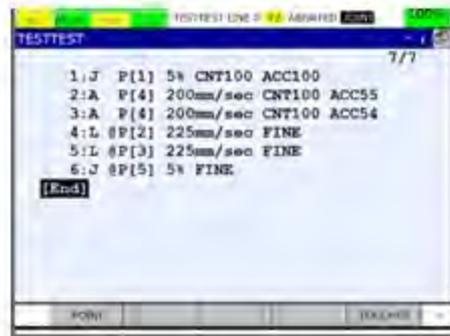
Autodesk  
PowerMill



Подходит для написания программ по выращиванию сложнопрофильных изделий



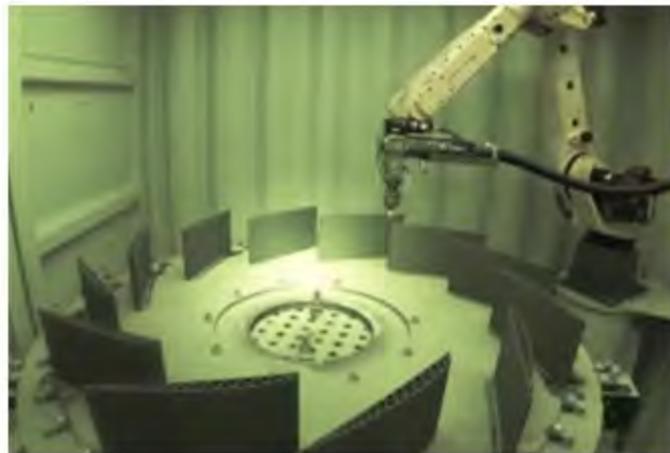
Программирование траектории с использованием пульта управления робота



Подходит для написания программ с простейшей траекторией

## ПРОЦЕСС ВЫРАЩИВАНИЯ

В зависимости от размера детали процесс выращивания может занимать от нескольких часов до нескольких недель



В зависимости от марки материала выбирается соответствующий режим термической обработки. Назначение термообработки: снижение температурных напряжений, химической и структурной неоднородности.



## ПОСТОБРАБОТКА

Технология ПЛВ является в большей степени технологией изготовления высокоточных заготовок. После выращивания и термической обработки деталь необходимо отрезать от подложки – основания, на котором происходит послойный рост детали.

Также необходимо подготовить посадочные места, крепежные отверстия, базовые плоскости деталей.

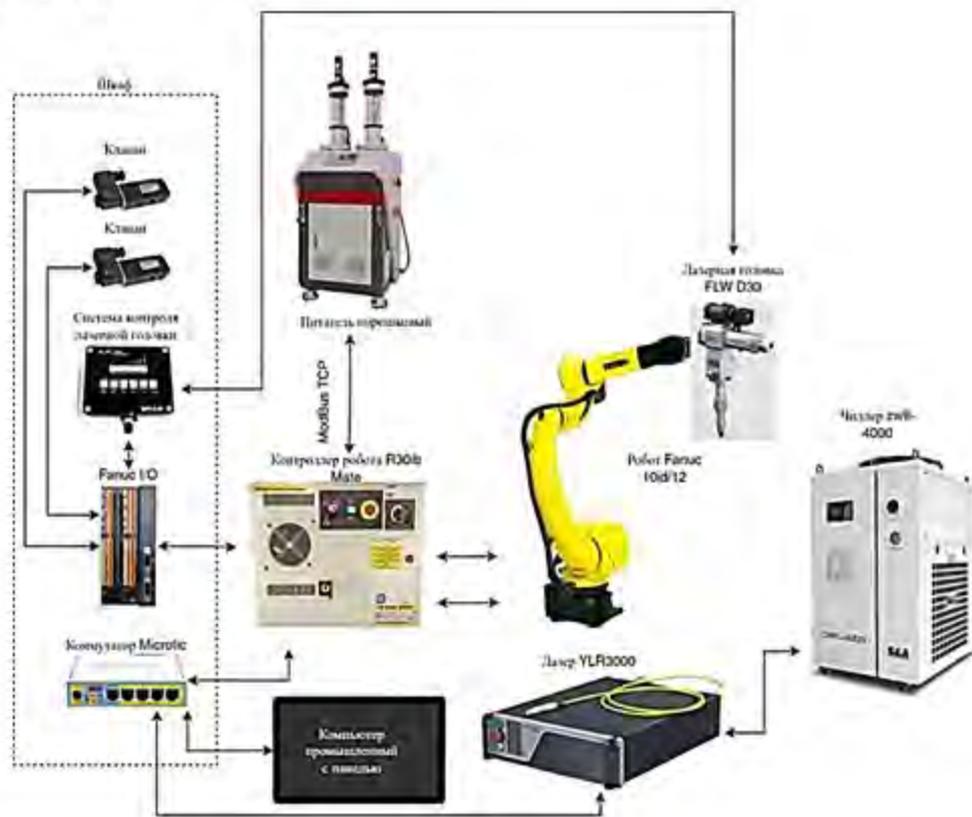
Чаще всего обработка производится методами фрезерования, точения, шлифования, пескоструйной обработки.



## УСТРОЙСТВО УСТАНОВОК ПЛВ

Основные компоненты установки ПЛВ:

- Система перемещения (робот манипулятор или система ЧПУ на линейных направляющих).
- Технологический инструмент (оптическая головка, сопло).
- Лазерный источник.
- Чиллер.
- Шкаф управления.
- Герметичная камера (опционально).



- Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
- Институт лазерных и сварочных технологий
- ГК «Лазеры и Аппаратура»



Установка лазерной порошковой  
наплавки МЛ7



Роботизированный комплекс прямого  
лазерного выращивания (СП6ПУ)



Технологический комплекс прямого лазерного  
выращивания и лазерной наплавки  
«ОКТА Принтер» (СП6ПУ)

**Компании производители:**

- VeAM (Франция)
- Optomec (США)
- FormAlloy (США)
- InssTek (Южная Корея)
- TRUMPF (Германия)
- DMG MORI (Германия)



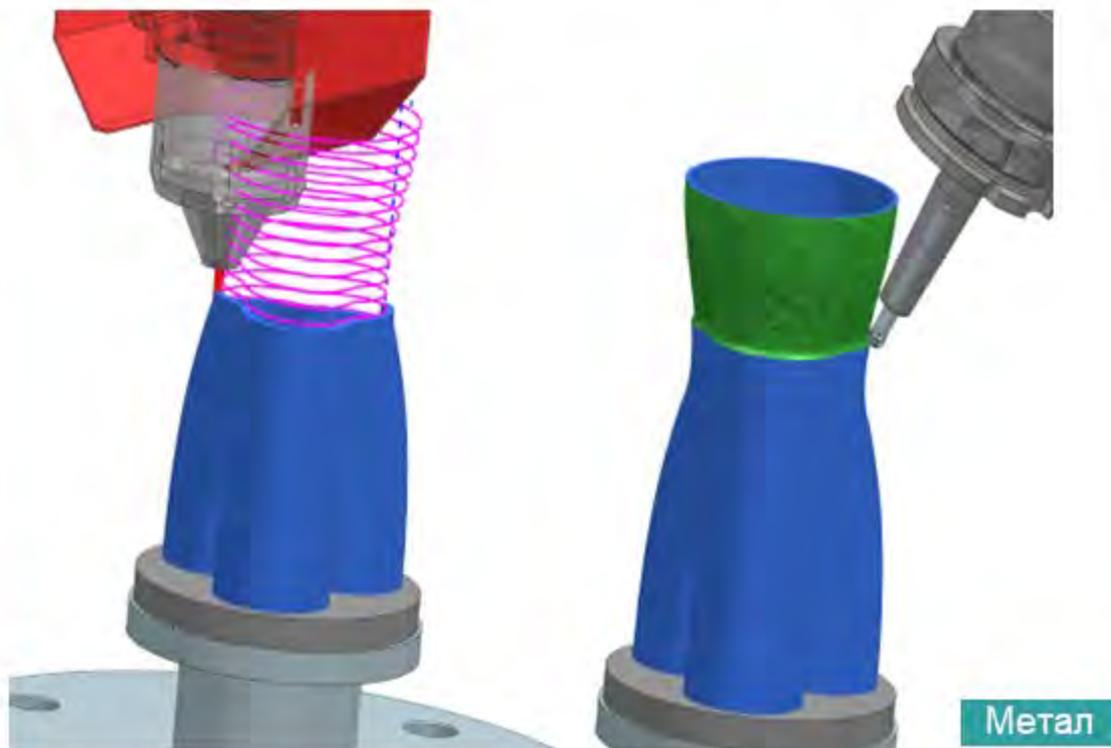
# 3D-ПЕЧАТЬ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИБРИДНОГО АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА

**Гибридное аддитивное производство:**

Сочетание технологии ПЛВ с  
механической обработкой в одном  
станке.

Сложные крупногабаритные детали с  
внутренними полостями.

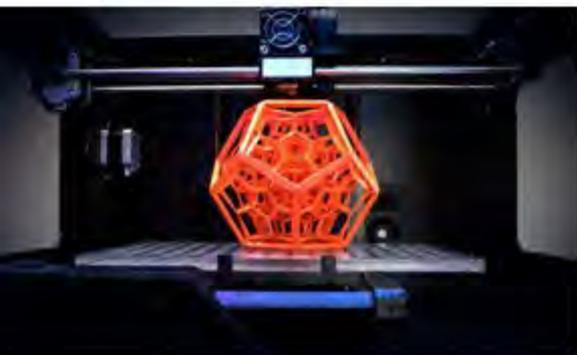
Устранение поддержек.





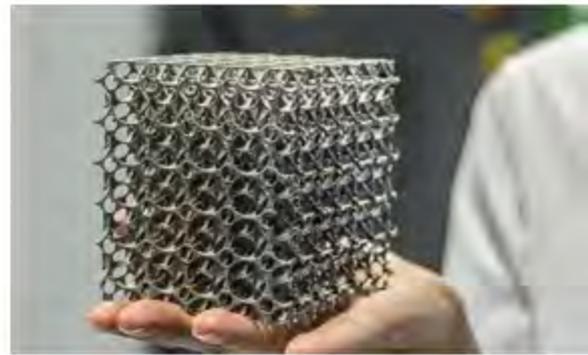
**ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ  
РОБОТИЗИРОВАННОЙ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ  
НАПЛАВКИ ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ ДЕТАЛЕЙ**

**Особенности обычного 3D-принтера, используемого в домашних условиях:** доступная цена; только пластики; объекты малых размеров; доступное программное обеспечение.



**Технология селективного лазерного сплавления:**

- Широкий перечень сплавов.
- Сложные конструкции.
- Объекты малых размеров.
- Чрезвычайно высокая стоимость.
- Доступное программное обеспечение.



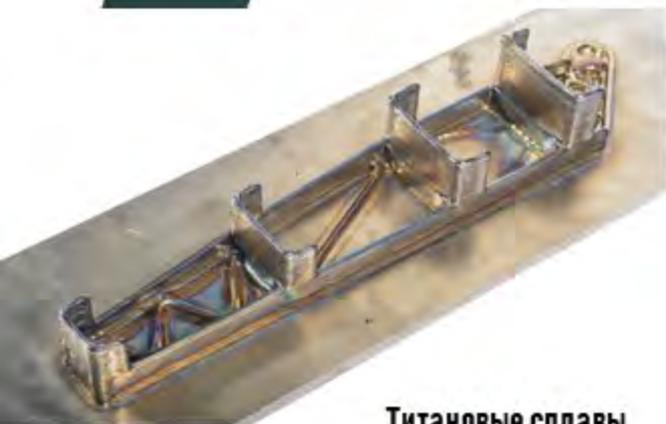
**Электродуговое выращивание**

**(Wire + Arc Additive Manufacturing-WAAM):**

- Пригодно для свариваемых материалов.
- Объекты больших размеров.
- Высокая производительность.
- Низкая стоимость.
- Сложные конструкции.
- Отсутствие программного обеспечения.



# ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ WAAM



Титановые сплавы



Бронзы



Нержавеющие стали

# ОБОРУДОВАНИЕ

Машины для выращивания на базе промышленных роботов



Машины для выращивания на базе порталных устройств



MX3D



Ramlab



Relativity

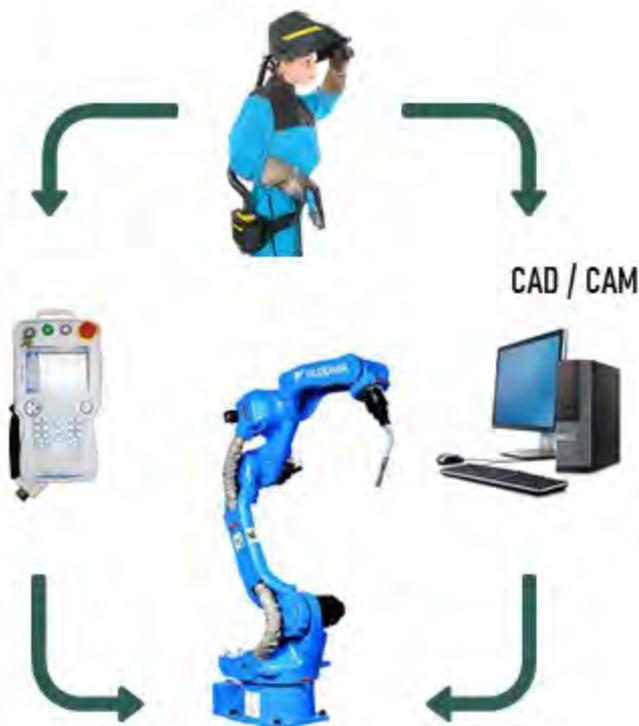
Geferetec

Addilan



Norsk Titanium

# РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ВЫРАЩИВАНИЯ



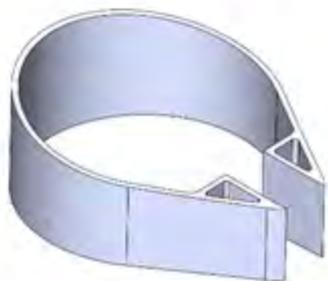
CAD (Computer-aided design) /  
CAM (Computer-aided manufacturing)



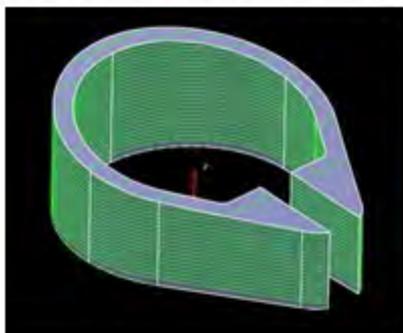
Алгоритм

# АЛГОРИТМ ВЫРАЩИВАНИЯ

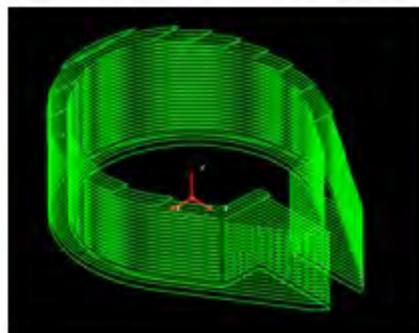
Выбор конкретной стратегии зависит от материала и его физико-химических свойств, которые влияют на форму и размер валика под воздействием технологических параметров (ток, напряжение, скорость и т. д.).



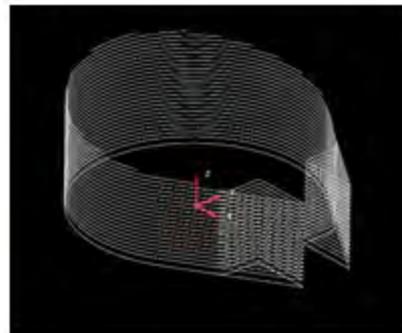
CAD-модель



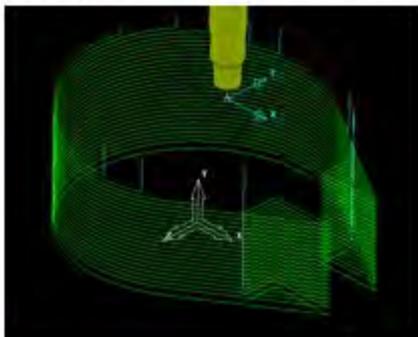
Разбиение CAD-модели  
подготовка 2,5D-мерных участков



Построение 2D-фигур



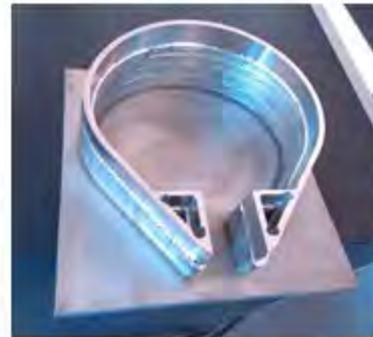
Построение пути движения робота с  
учетом размеров валиков



Компиляция кода для движения робота



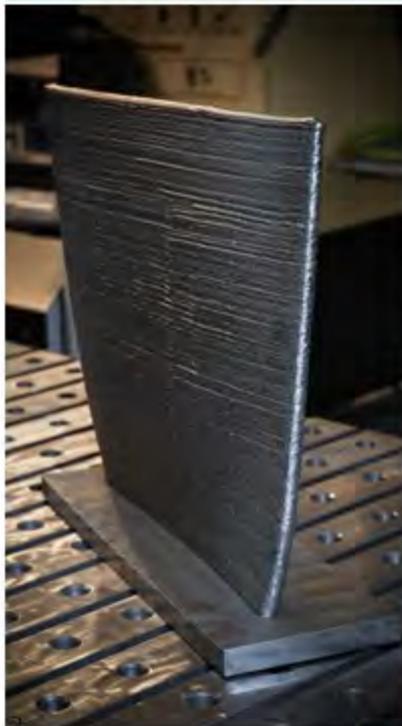
Внешний вид после окончания наплавки



Внешний вид после токарно-фрезерной обработки

## КАК ЭТО ВЫГЛЯДИТ?

Лопасть вентилятора



Топ мачты



Кронштейн



Крыльчатка



Короб под батареи



Горелка





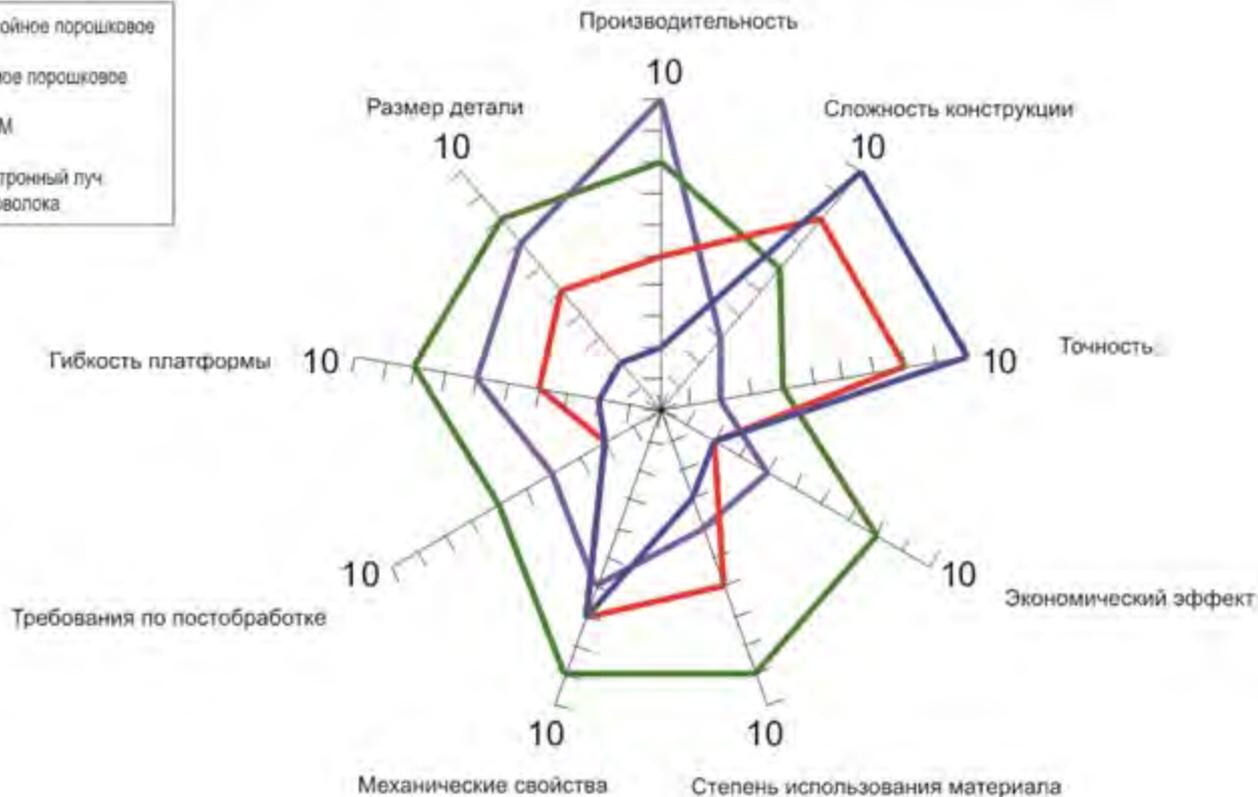
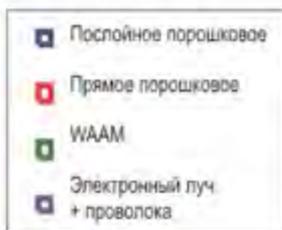
# МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Механические свойства металла опытных образцов, полученных методом WAAM, в сравнении с требованиями соответствующих государственных стандартов

Система легирования	WAAM				ГОСТ			
	Марка проволоки	$\sigma_s$ , МПа	$\sigma_{0.2}$ , МПа	$\delta$ , %	Сплав	$\sigma_s$ , МПа	$\sigma_{0.2}$ , МПа	$\delta$ , %
Al - Mg - Mn	Ok Autrod 18.22	296	158	18.7	AMr61 (1561) ГОСТ Р 56371 - 2015	335	175	12.0
Al - Si	DT - AlSi12	213	109	11.7	AK12 ГОСТ 1583 - 93 (д)	157	-	1.0
Al - Mg	CaAMr5.H	292	143	21.8	AMr5 ГОСТ 21631-76	275	130	15.0
Al - Mg - Si	CaAMr3.H	215	102	14.5	AMr3 ГОСТ 21631-76	185	80	15.0
Ti - Al - V	BT6ca	962	868	13.4	BT6 ГОСТ 22178-76	885	-	8.0
Fe - Mn - Ni - Cr - Mo	OK Aristorod 69	864	736	25.3	Mn3NiCrMo ГОСТ Р ИСО 16834 - 2012	770	690	17.0
Fe - Cr - Ni - Nb - Si	ER-347 Si	642	367	55.4	19 9 Nb Si ГОСТ Р ИСО 14343-2012	550	350	25.0

Испытания на растяжение для выращенного металла по ГОСТ 6996 с использованием цилиндрических образцов диаметром рабочей части 3 мм.

# СРАВНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ



## Сравнительный анализ аддитивных технологий

• S. Williams, Large Scale Metal  
 Wire+Arc Additive  
 Manufacturing of Structural  
 Engineering Parts  
 (WAAMMAT.com)

Введение понятия *BTF* необходимо для описания экономических аспектов технологии

$$BTF = \frac{\text{Масса}_{\text{начальная}}}{\text{Масса}_{\text{конечная}}}$$



Деталь	Масса заготовки (кг)	Масса готового изделия (кг)	Значение BTF
Корпус	182	30	6,1
Фланец воздуховода 1	67	11,1	6
Фланец воздуховода 2	67	7,7	8,7
Комплексный фланец воздуховода 1	149	7,7	19,4
Комплексный фланец воздуховода 2	207	10,3	20,1
Большой блиск	810	97	8,4
Нервюра	657	18	37

- S.Williams, Large Scale Metal Wire+Arc Additive Manufacturing of Structural Engineering Parts (WAAMMAT.com)

*BTF* характеризует соотношение массы необходимого материала к конечной массе изделия

## Распределение стоимости изготовления, тыс. руб.

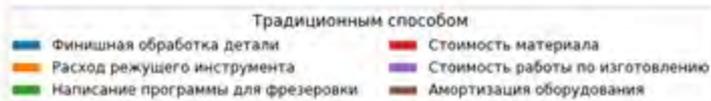


Диаграмма представлена для детали «Топ мачты» из алюминиевого сплава АМг61. ВТФ-8.

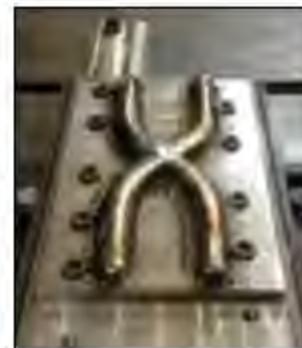
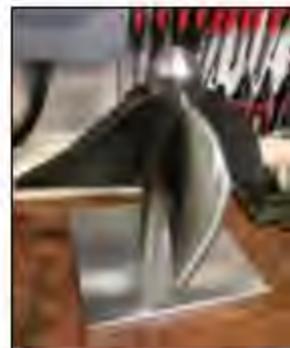


Процесс производства		Винт		Х-ребро	
		Стоимость, в британских фунтах	Снижение стоимости, %	Стоимость, в британских фунтах	Снижение стоимости, %
Аддитивный	WAAM	18,359	-	1,703	-
	Электронный луч	33,362	45	2,123	20
	Лазерный луч	86,267	79	5,489	69
Субтрактивный	BTF 5	18,732	2	1,703	0
	BTF 10	38,166	52	3,687	54
	BTF 15	57,549	68	5,483	69
	BTF 20	76,983	76	7,329	77

**Электродуговое выращивание является конкурентом других аддитивных технологий, а также конкурентом субтрактивных технологий.**

**Согласно литературным данным стоимость при использовании электродугового выращивания снижается на 20-79 % по сравнению с технологиями, использующими лазерный и электронный лучи.**

**Сопоставление стоимости электродугового выращивания с фрезерной обработкой целесообразно при BTF>5 (что подтверждено результатами работ научных работников СПбПУ), соответственно, чем больше BTF, тем больше экономический эффект от применения электродугового выращивания.**



# ЭКОНОМИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ

Лопасть вентилятора из стали 08Г2С. Условные габариты 482×390×190 мм (вес 56 кг).  
Объем партии – 100 единиц.

Команда СПБУ занимается полным циклом производства изделий любой геометрической формы и размеров. От экономических расчетов и САД-моделей до печати детали и интеграции процесса в производственный цикл.



Стандартный метод производства.  
Литье в Германии партия от 100 шт.



3D печать по технологии СПБУ  
Производственный цикл для ед.  
продукции – ~26 часов, партия от 1 шт.





**ЭКСТРУЗИЯ МАТЕРИАЛА.  
ПОСЛОЙНОЕ НАПЛАВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛА  
(FDM-ТЕХНОЛОГИЯ)**

# СУЩЕСТВУЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ 3D-ПЕЧАТИ ПОЛИМЕРНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ

На сегодняшний день существуют 16 технологий 3D-печати полимерными материалами и примерно 300 компаний-производителей оборудования.

Технологии классифицируются по типу используемого в процессе печати исходного материала: реактопласты (жидкие), эластомеры (жидкие) и термопласты (листы, филаменты, ленты, гранулы, порошок).

Технологию FDM-печати (выделено красным) с применением в качестве исходных материалов термопластичных филаментов используют примерно 200 компаний.



## ТЕХНОЛОГИЯ ПОСЛОЙНОГО НАПЛАВЛЕНИЯ МАТЕРИАЛА (FDM-ТЕХНОЛОГИЯ)

В 1984 году Чарльз Халл разработал устройство для стереолитографии полимерных материалов, известное как SLA.

В 1986 году он основал первую компанию по 3D-печати, которая в 1987 году выпустила первый 3D-принтер, печатающий слой за слоем с помощью процесса SLA. Так появилась возможность коммерциализации аддитивного производства и 3D-печати для производителей.



Первый принтер SLA-1



Чарльз Халл

# ТЕХНОЛОГИЯ ПОСЛОЙНОГО НАПЛАВЛЕНИЯ МАТЕРИАЛА (FDM-ТЕХНОЛОГИЯ)

В 1991 году были коммерциализированы еще три новые технологии аддитивного производства, одной из которых является технология послойного наплавления материала (FDM-технология), изобретенная Скоттом Крампом. В дальнейшем Скотт Крамп основал собственную компанию Stratasys.



Скотт Крамп



Первые принтеры Stratasys: слева - первый прототип принтера; справа - первый коммерческий FDM-принтер 3D Modeler

23 марта 2005

Запускается блог RepRap и начинаются исследования.

13 сентября 2006

Прототип RepRap 0.2 успешно напечатал первую деталь.

9 февраля 2008

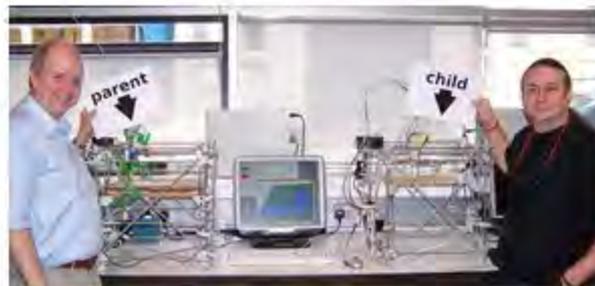
RepRap 1.0 "Darwin" успешно изготовил по крайней мере один экземпляр из более чем половины всех своих деталей созданных методом быстрого прототипирования

14 апреля 2008

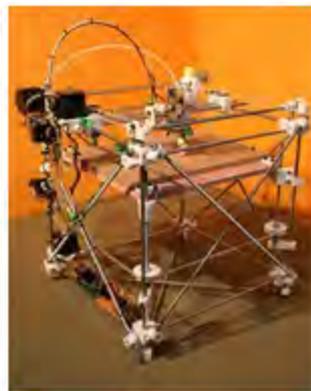
RepRap напечатал, вероятно, первый потребительский предмет: зажим для крепления iPod на панели Ford Fiesta

2 ноября 2010

На сайте RepRap.org выложены подробные инструкции по сборке современных 3D-принтеров: Prusa, Huxley, Mendel...



Адриан Боуер



RepRap 1.0 (Darwin)

# ТЕХНОЛОГИЯ ПОСЛОЙНОГО НАПЛАВЛЕНИЯ МАТЕРИАЛА (FDM-ТЕХНОЛОГИЯ)

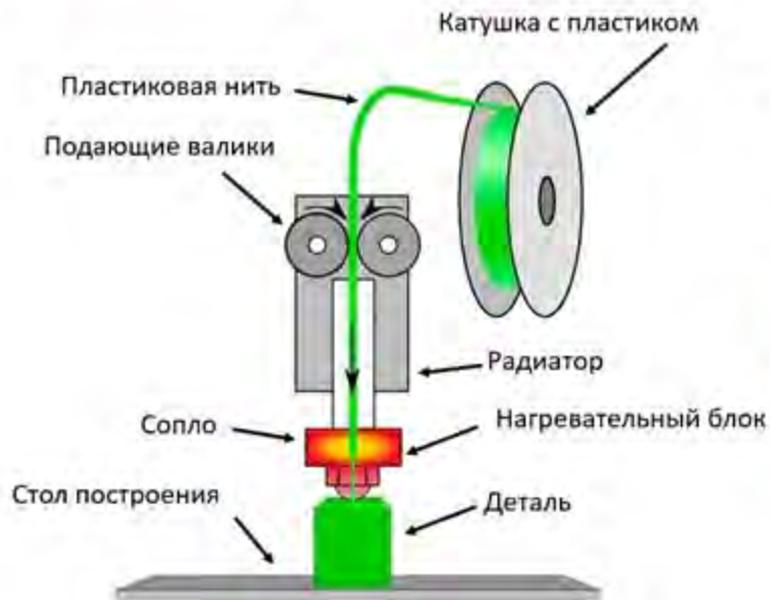


Схема процесса экструзии материала

Технология FDM представляет собой процесс 3D-печати, где термопластичный филамент из катушки с помощью вращения подающих валиков поступает в разогретое сопло, где и происходит его плавление. При печати требуется обеспечить необходимое сцепление первого слоя с платформой построения. Последующие слои укладываются на предыдущие и затвердевают по мере охлаждения.



Настольные FDM-принтеры



Промышленные FDM-принтеры

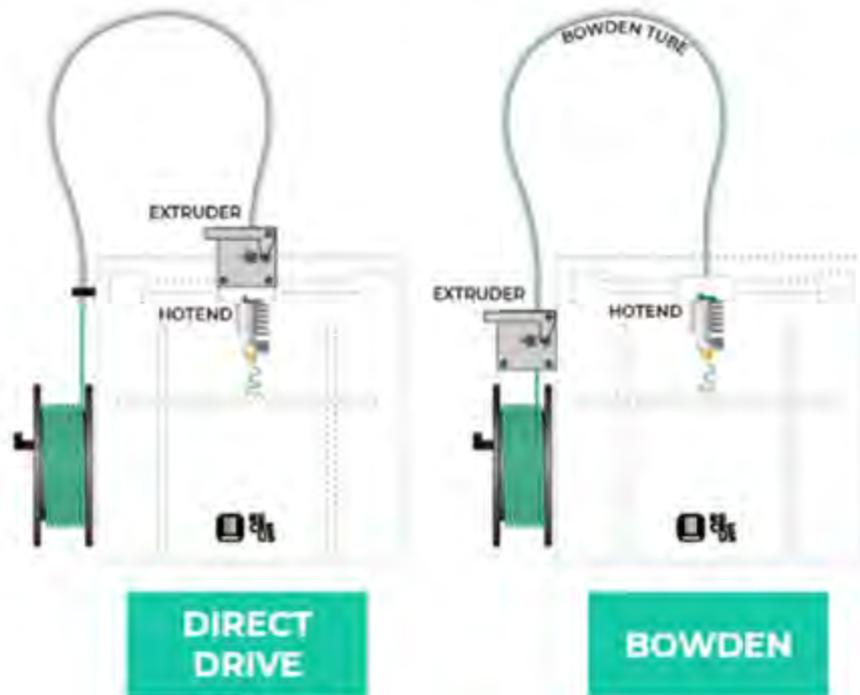
# ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ FDM ПЕЧАТИ

## Преимущества:

- Лучшее экструдирование.
- Более быстрое втягивание.
- Можно использовать меньшие по размерам и мощности двигатели.
- Более широкий выбор филаментов.

## Недостатки:

- Большая нагрузка на печатающую головку.
- Техническое обслуживание усложнено.



## Преимущества:

- Меньший вес печатающей головки / меньше перемещаемая масса.

## Недостатки:

- Необходим более мощный двигатель.
- Больше время отклика.
- Меньше выбор филаментов.

Схемы реализации процесса FDM-печати

## ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ FDM ПЕЧАТИ

### ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ FDM-ТЕХНОЛОГИИ

1. Процесс начинается с создания 3D-модели CAD (автоматизированного проектирования).
2. Программное обеспечение для нарезки делит цифровую модель на фрагменты (слои) и выдает файл G-кода для принтера.
3. FDM-принтер нагревает термопластичный филамент, расплавляет и выдавливает его из сопла - слой за слоем - на платформу построения, формируя 3D-объект.
4. Данный процесс повторяется до тех пор, пока деталь не будет готова.



# ФОРМИРОВАНИЕ G-КОДА ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ПЕЧАТИ

Условно G-код можно разделить на несколько блоков:

## 1. Комментарии с различной информацией

Комментарии можно вставлять отдельным кадром или после основных команд.

Начинаются они со знака (;) «точка с запятой».

## 2. Подготовительные операции

Для 3D принтера перед печатью важно установить точку отсчёта координат и нагреть рабочий стол с хотэндом.

## 3. Рабочая часть — изготовление детали

Процесс послойный, поэтому на данном этапе при печати одного слоя происходит множество движений в плоскости XY.

## 4. Заключительные операции

Когда печать закончена, несколько заключительных строк команд G-кода приводят принтер в исходное состояние. Например, сопло может переместиться в исходное положение, нагрев и двигатели хотэнда и платформы отключаются и т. д.

Рабочая часть — изготовление детали

```

8 ;Sliced at: Mon 30-11-2015 17:55:51
9 ;Basic settings: Layer height: 0.25 walls: 1.2 Fill: 100
10 ;Print time: 1 hour 21 minutes
11 ;Filament used: 5.61m 44.0g
12 ;Filament cost: None
13 ;M190 S100 ;Uncomment to add your own bed temperature line
14 ;M109 S200 ;Uncomment to add your own temperature line
15 G21 ;metric values
16 G90 ;absolute positioning
17 M82 ;set extruder to absolute mode
18 M107 ;start with the fan off
19 G28 X0 Y0 ;move X/Y to min endstops

2000 G1 F1800 E84.81274
2070 G0 F4200 X97.710 Y111.425 Z0.650
2071 ;TYPE=HALL-IMMER
2072 G1 F1800 E87.81274
2073 G1 F2100 X97.134 Y111.144 E87.81282
2074 G1 X96.911 Y110.936 E87.83502
2075 G1 X96.906 Y110.912 E87.83500
2076 G1 X96.629 Y110.320 E87.85070
2077 G1 X96.555 Y110.114 E87.85612
2078 G1 X96.452 Y109.491 E87.87097
2079 G1 X96.450 Y109.196 E87.87790
2080 G1 X96.410 Y108.975 E87.88118
2081 G1 X96.151 Y108.160 E87.90320
2082 G1 X96.057 Y107.828 E87.91140
2083 G1 X96.114 Y106.537 E87.94000

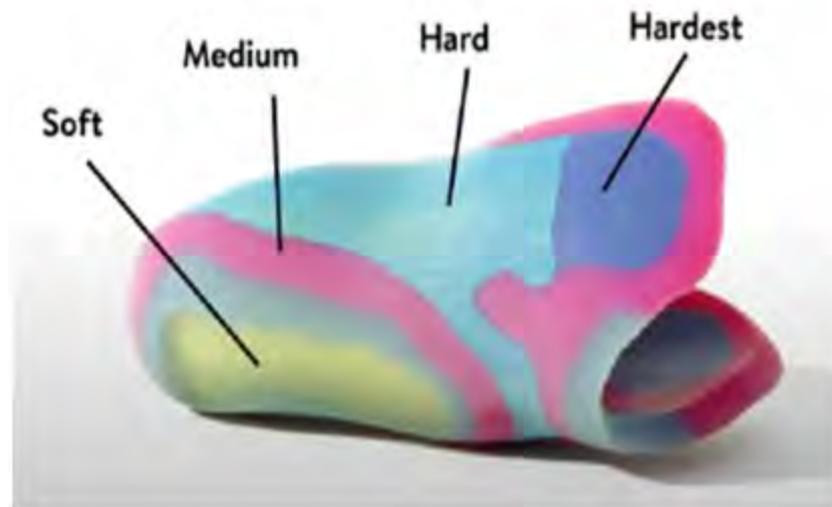
G1 X103.505 Y152.372 E4.5176
G1 X103.505 Y153.291 E4.5648
G1 X103.291 Y153.505 E4.5804
G92 E0.0000
G1 E-0.0000 F1500
; layer end
M107 ; turn fan off
G1 X-8
G1 Y100
G1 Z300
M104 S0 ; turn hotend off
M140 S0 ; turn bed off
M84 ; turn motors off

```

# МУЛЬТИМАТЕРИАЛЬНАЯ FDM ПЕЧАТЬ



3D-принтер Bambu Lab X1 с возможностью мультиматериальной печати



Вкладыш с различными областями жесткости для протезов нижних конечностей

# МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ FDM-ТЕХНОЛОГИИ

Два самых распространенных материала для FDM-печати - это ABS (акрилонитрил-бутадиен-стирол) и PLA (полимолочная кислота). Оба материала недорогие и доступны в различных цветах.

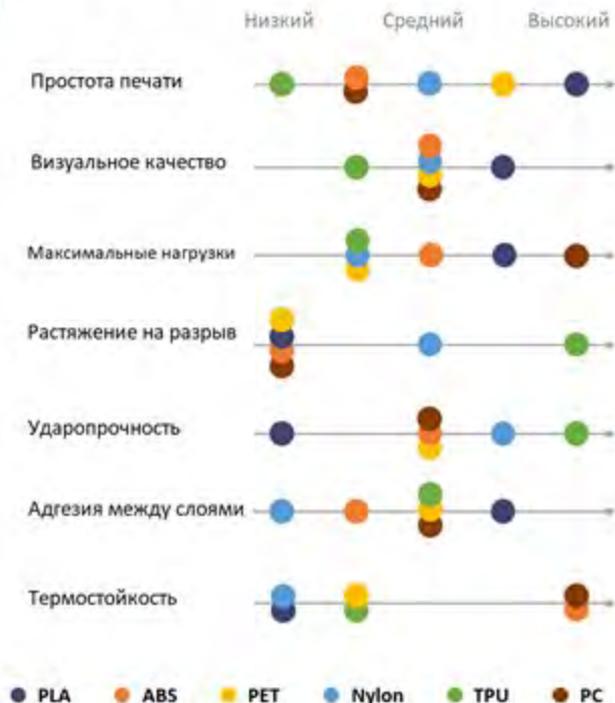
**ABS** - бытовой пластик, обладает высокими прочностными и тепловыми характеристиками, но при его печати требуется хорошая вентиляция, так как он выделяет сильный запах. Чтобы избежать деформации, требуется подогреваемая платформа построения.

**PLA** обеспечивает отличное качество поверхности, является одним из самых простых материалов для печати, кроме того он биоразлагаемый.



Основные сегменты пластика для FDM-печати

# МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ FDM-ТЕХНОЛОГИИ

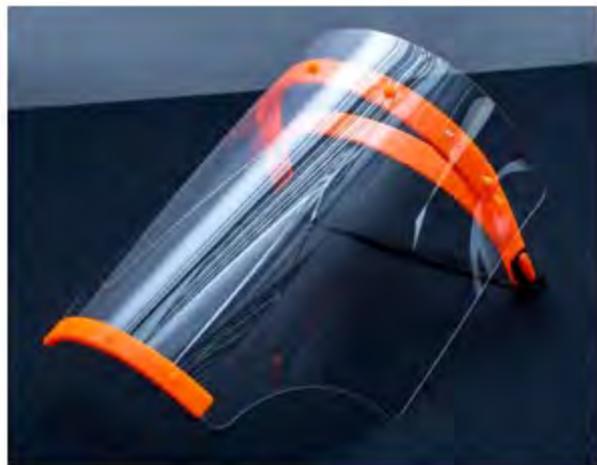


Критерии выбора полимерных материалов для 3D-печати

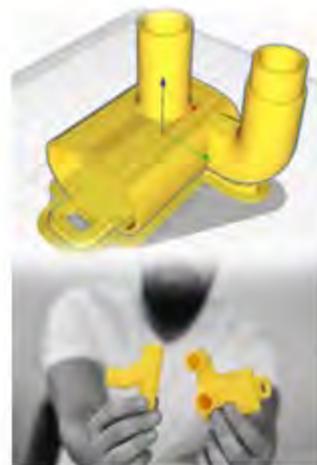


Примеры напечатанных деталей из металлонаполненного и древесосодержащего филамента

## ПРИМЕРЫ НАПЕЧАТАННЫХ ДЕТАЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ FDM-ТЕХНОЛОГИИ



Защитная маска Prusa PRO



Клапан маски для медицинских работников

# ПРИМЕРЫ НАПЕЧАТАННЫХ ДЕТАЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ FDM-ТЕХНОЛОГИИ



Корпус дрона



Напечатанные детали из гибких полимеров



Коллектор из угленаполненного полиамида для автомобиля

# ПРИМЕРЫ НАПЕЧАТАННЫХ ДЕТАЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ FDM-ТЕХНОЛОГИИ В МЕДИЦИНЕ



Вкладыш протеза для нижней конечности



Ортопедический корсет



Печать прототипов органов перед операцией



Протезы рук



**ЭКСТРУЗИЯ МАТЕРИАЛА.  
3D-ПЕЧАТЬ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ**

Карта технологий и существующих компаний, производящих оборудование для процесса 3D-печати различными материалами (полимеры, металлы, керамика и др.), в том числе полимерными композитами.

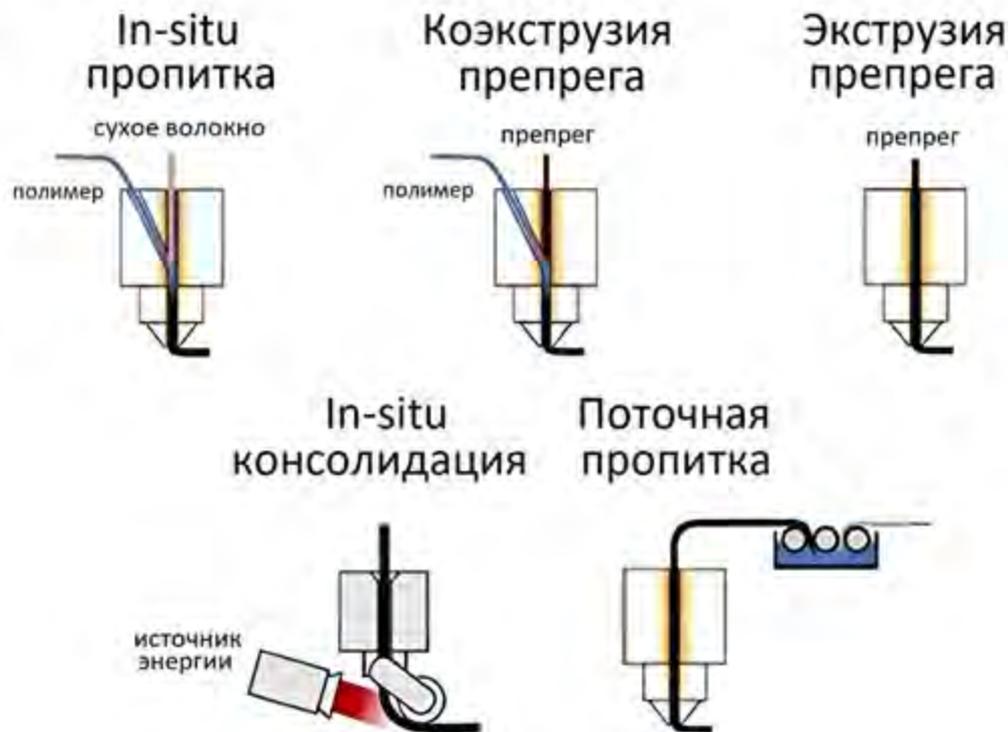
Из всех семейств материалов именно полимерные композиты, армированные волокном, в том числе непрерывными волокнами, обладают уникальными свойствами и преимуществами, а использование 3D-печати позволяет расширить применение данных материалов за счет более эффективного, экономичного и быстрого производства деталей с уникальным сочетанием конечных функциональных свойств.



# СХЕМЫ РЕАЛИЗАЦИИ 3D-ПЕЧАТИ НЕПРЕРЫВНО-АРМИРОВАННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

Сотрудниками Мюнхенского технического университета была проведена работа по созданию концепции для стандартизации процессов 3D-печати ПКМ с непрерывными волокнами.

Источник: Alexander Matschinski, Virtual Symposium on AFP and AM, TU Munich, Chair of Carbon Composites (LCC), Sep. 2020.



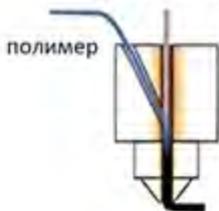
# ТЕХНОЛОГИЯ IN-SITU ПРОПИТКИ



**Continuous  
Composites**

In-situ  
пропитка

сухое волокно



Страна - США

Технология - Continuous Fiber 3D Printing (CF3D) - непрерывное сухое волокно пропитывается «на месте» специальной термореактивной смолой мгновенного отверждения с помощью УФ.

Сайт - <https://www.continuouscomposites.com/>



Катушки с армирующими волокнами



Фотополимерная смола для пропитки волокон



Процесс печати сотовой структуры с использованием УФ света

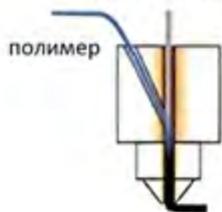


Элемент лонжерона крыла самолета из углеродного волокна



In-situ  
пропитка

сухое волокно



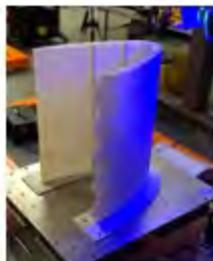
Страна - США

Технология - Непрерывное сухое волокно пропитывается «на месте» термопластичным полимерным материалом с последующим уплотнением роликом.

Сайт - <https://www.orbitalcomposites.com/>



Печатающая головка для 3D-принтера Orbital Composites

Защита передней кромки лопасти  
ветряной турбины

Модель Orbital e-



Модель Orbital S



Модель Orbital F

# ТЕХНОЛОГИЯ IN-SITU ПРОПИТКИ

In-situ  
пропитка

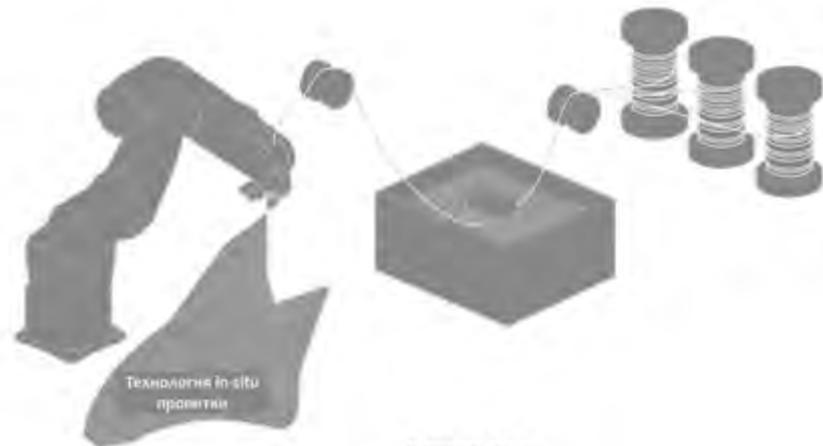
сухое волокно



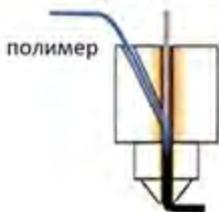
Страна - Италия

Технология - Continuous Fiber Manufacturing (CFM) - 3D-печать непрерывных волокон с использованием эпоксидной смолы, винилэфира и акрила с непрерывными стеклянными, углеродными, базальтовыми и другими волокнами.

Сайт - <https://www.moi.am/>



Процесс печати



3D-печатный катер MAMBO (Motor Additive Manufacturing Boat)



Велосипедная рама



Примеры деталей



Роботизированная печать на базе Кука

# КОЭКСТРУЗИЯ ПРЕПРЕГА



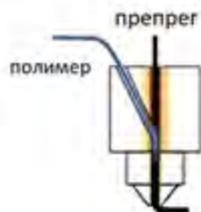
## anisoprint

Коэкструзия  
препрега

Страна - Люксембург, Китай

Технология - Continuous Fiber Coextrusion (CFC) печать  
предварительно пропитанного препрега с добавлением  
термопластичного полимера.

Сайт - <https://anisoprint.com/>



3D-принтер модели PROM IS500



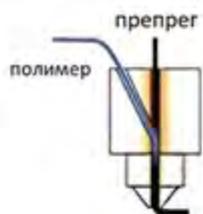
Примеры напечатанных деталей

# КОЭКСТРУЗИЯ ПРЕПРЕГА



Composite Additive Manufacturing

Коэкструзия  
препрега



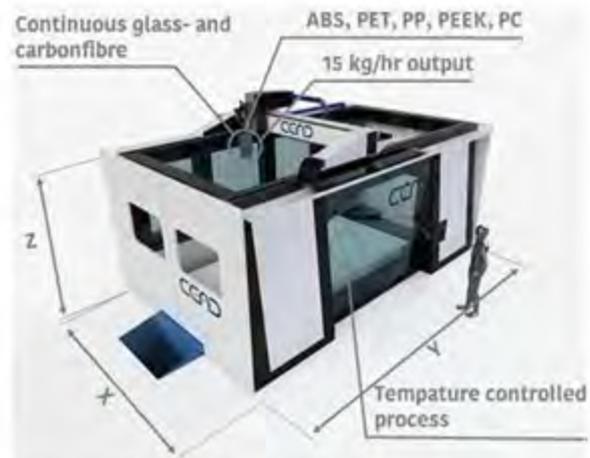
Страна - Нидерланды

Технология - Continuous Fibre Additive Manufacturing (CFAM)  
экструзия термопластичного полимера с использованием гранул.

Сайт - <https://ceadgroup.com/>



Детали, изготовленные технологией CFAM



3D-принтер модель CFAMPrime


**Markforged**

Экструзия  
препрега

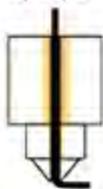
Страна - США

**Технология** - Continuous Fiber Reinforcement (CFR) экструзия композитного термопластичного филамента, содержащего непрерывные волокна.

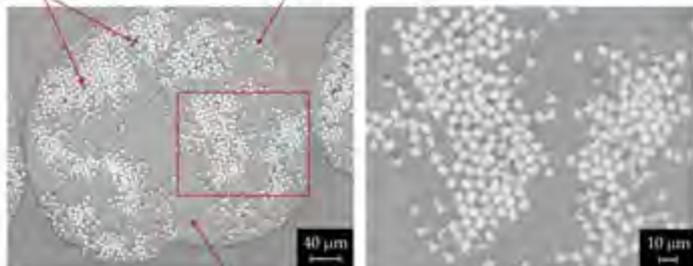
**Сайт** - <https://markforged.com/>

**Виртуальный принтер FX20** <https://markforged.com>

препрег



Voids Single CF



Поперечное сечение препрега с непрерывными волокнами



Настольный принтер  
Mark Two™



Детали, напечатанные Mark Two™



3D-принтер модели FX20

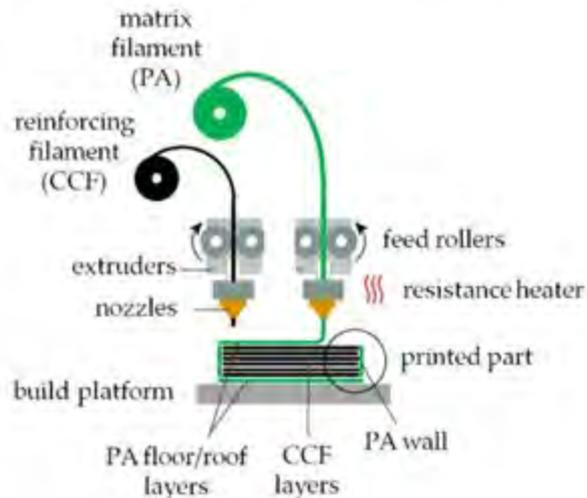
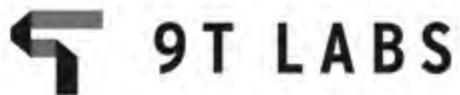


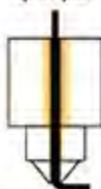
Схема процесса 3D-печати

# ЭКСТРУЗИЯ ПРЕПРЕГА



Экструзия  
препрега

препрег



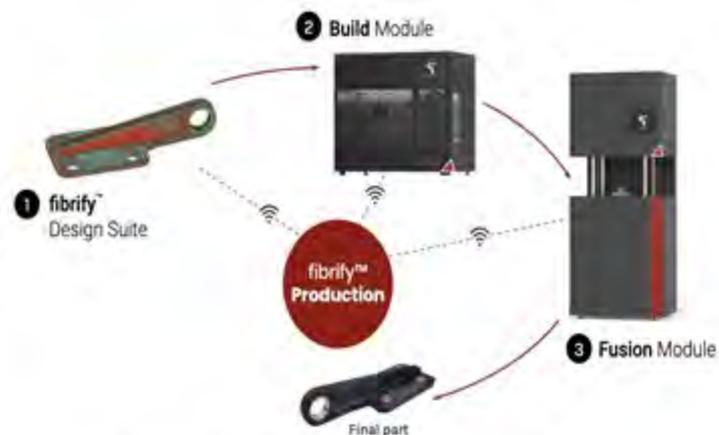
Страна - Швейцария

Технология - Additive Fusion Technology (AFT) технология  
печати непрерывными волокнами на основе FDM + технология  
прессования

Сайт - <https://www.9tlabs.com/>



Детали, изготовленные с использованием AFT-технологии



Цикл изготовления деталей по AFT-технологии

# ЭКСТРУЗИЯ ПРЕПРЕГА

Экструзия  
препрега

препрег



Страна - Россия

Технология - 5Dtech (5D-печать) технология печати  
термопластичными филаментами с непрерывными волокнами

Сайт - <https://stereotech.org/>



3D-принтер Stereotech HYBRID



3D-принтер Stereotech FIBER



Пример непрерывно-армированной детали



Примеры напечатанных деталей



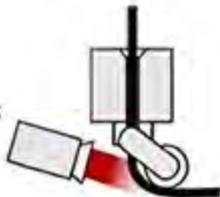
In-situ  
консолидация

Страна - США

Технология - Micro Automated Fiber Placement (μAFP) печать  
ПКМ с использованием препрега в виде ленты.

Сайт - <https://www.desktopmetal.com/>

источник  
энергии



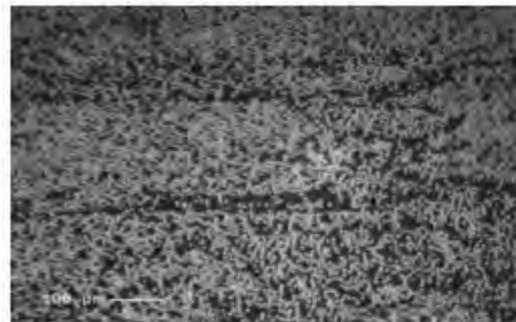
Воздуховод на автомобиль BMW  
PEEK + CF



Крепление педали велосипеда  
PA6 + FG



3D-принтер серии Fiber



Лента из непрерывных волокон (до 12 тысяч)  
с объемной долей до 60 %, пропитанная смолой

# ТЕХНОЛОГИЯ IN-SITU КОНСОЛИДАЦИИ



In-situ  
консолидация

Страна - США

Технология - Automated Fiber Placement (AFP) печать непрерывными волокнами в виде ленты и уплотнение роликом.

Сайт - <https://www.electroimpact.com>.

источник  
энергии



3D-принтер системы SCRAM



Элемент двери отсека



Изогнутый воздуховод

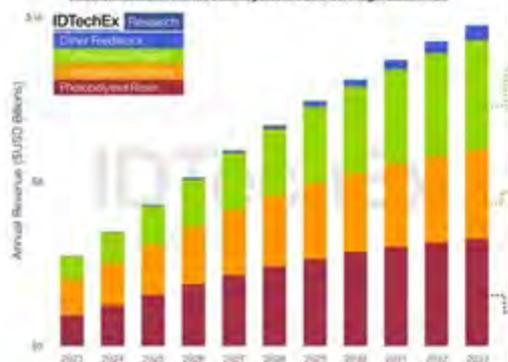
# СОВРЕМЕННЫЙ РЫНОК ПКМ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ

## Polymer Additive Manufacturing 2023-2033: Technology and Market Outlook

Comprehensive benchmarking of 14 polymer-3D printing technologies, annual 10-year market forecasts with 85 forecast lines, and complete output analysis.

IDTechEx Research

## Revenue Forecast for Polymer 3D Printing Materials



В ходе опросов пользователей IDTechEx были определены несколько областей применения:

- Автомобильная промышленность.
- Медицинские устройства.
- Потребительские товары.



Уплотнитель от GM для Chevrolet Tahoe 2022 г. 60 000 шт.  
(принтер HP Multi Jet Fusion)



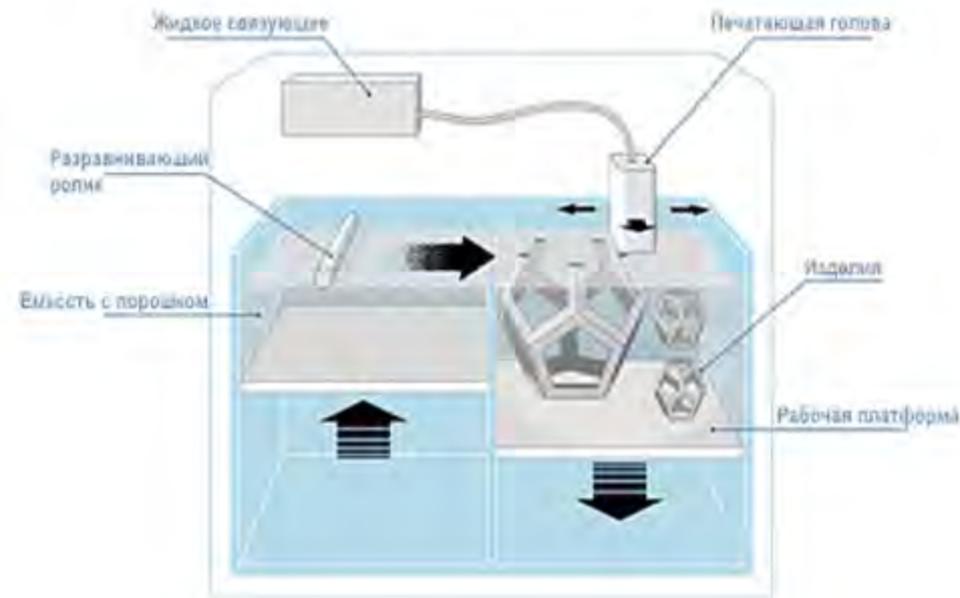
Индивидуальные слуховые аппараты  
(Stereolithography)



Кроссовки Futurecraft 4D от Adidas в 2018 г.  
Arevo печать рам 25 000 шт.



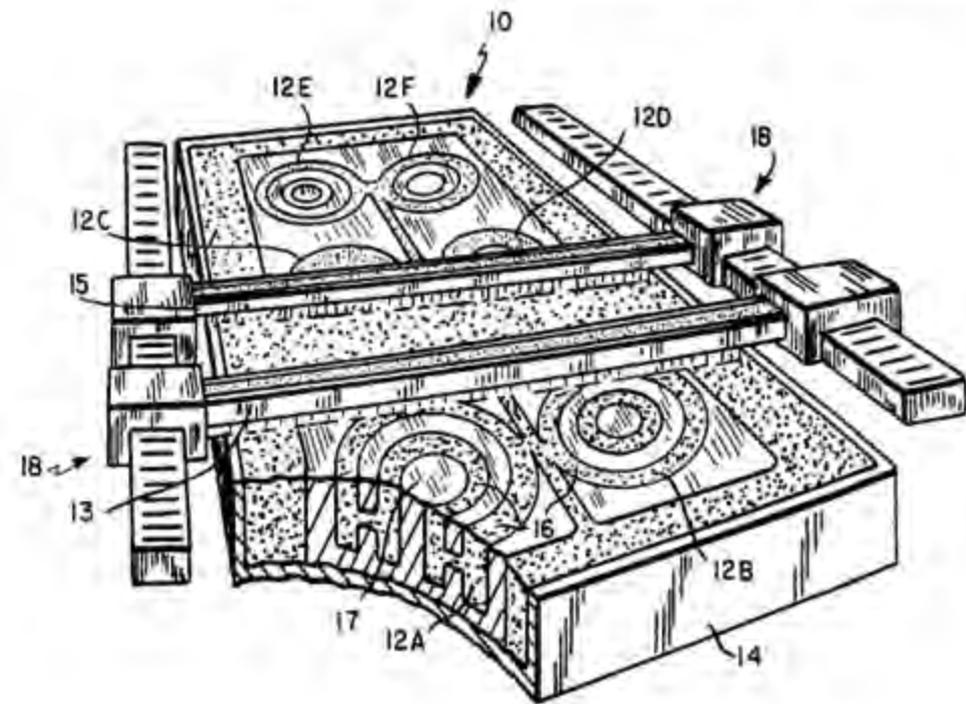
**СТРУЙНОЕ НАНЕСЕНИЕ СВЯЗУЮЩЕГО**



## ЧТО ТАКОЕ СТРУЙНОЕ НАНЕСЕНИЕ СВЯЗУЮЩЕГО?

**Струйное нанесение связующего (Binder Jetting) - процесс аддитивного производства, в котором порошковые материалы соединяются выборочным нанесением жидкого связующего.**

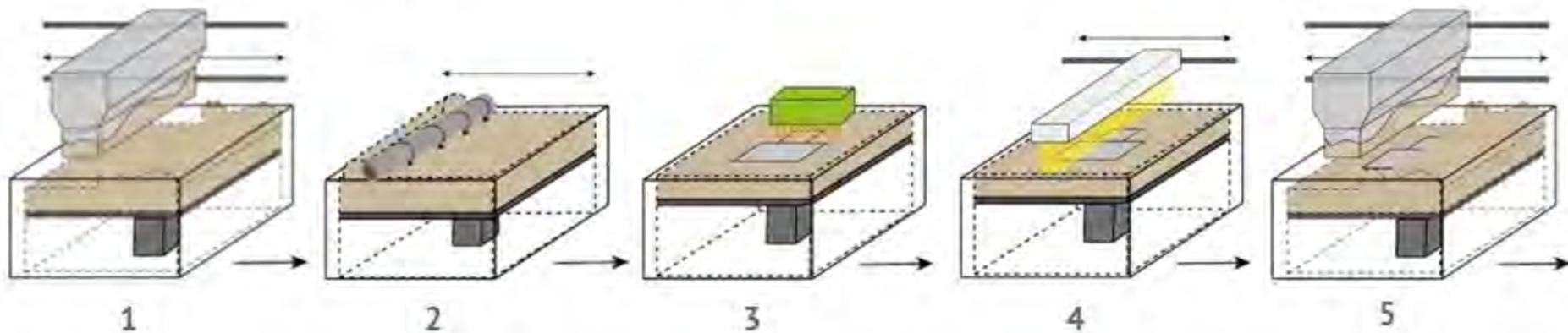
# ИСТОРИЯ СОЗДАНИЯ ПРОЦЕССА СТРУЙНОГО НАНЕСЕНИЯ СВЯЗУЮЩЕГО



Технология нанесения связующего была первоначально разработана в Массачусетском технологическом институте (MIT) и запатентована в 1993 году Эмануэлем Саксом, который разработал процесс с использованием порошка гипсового типа и связующего вещества на основе глицерина и воды, наносимого с помощью термопузырьковых струйных печатающих головок.

## ПРОЦЕСС ПЕЧАТИ

1. С помощью осциллятора порошок подается из бункера в рабочую зону.
2. На платформе с помощью ролика формируется тонкий слой порошкового материала.
3. Жидкое связующее подается печатающей головкой на слой порошка в соответствии с текущим сечением компьютерной модели.
4. Порошковый слой с нанесенным на него связующим подвергается тепловому воздействию с помощью инфракрасной лампы.
5. Платформа опускается на заданную величину толщины слоя.
6. Процессы повторяются до обработки всех слоев компьютерной модели.



## ПОСТОБРАБОТКА

1. После завершения печати рабочая платформа помещается в сушильный шкаф на 2-4 час при температуре 180-200 °С для отверждения связующего вещества.
2. После отверждения связующего green модели обладают достаточной прочностью для удаления излишков порошка с помощью кисти или сжатого воздуха в зависимости от сложности модели.
3. Полученные модели спекают или пропитывают расплавленным металлом.



# ПРОИЗВОДИТЕЛИ ОБОРУДОВАНИЯ И ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ

3D systems

Voxeljet

ExOne

Digital Metal

Desktop Metal

Металлы	—	—	+	+	+
Керамика	—	+	+	—	—
Песок	—	+	+	—	—
Полимеры	+	+	—	—	—



3D Systems'  
Projet CJP 860pro



Voxeljet's  
VX1000



ExOne's  
M-Flex



Digital Metal's  
DM P2500



Desktop Metal's  
X160Pro

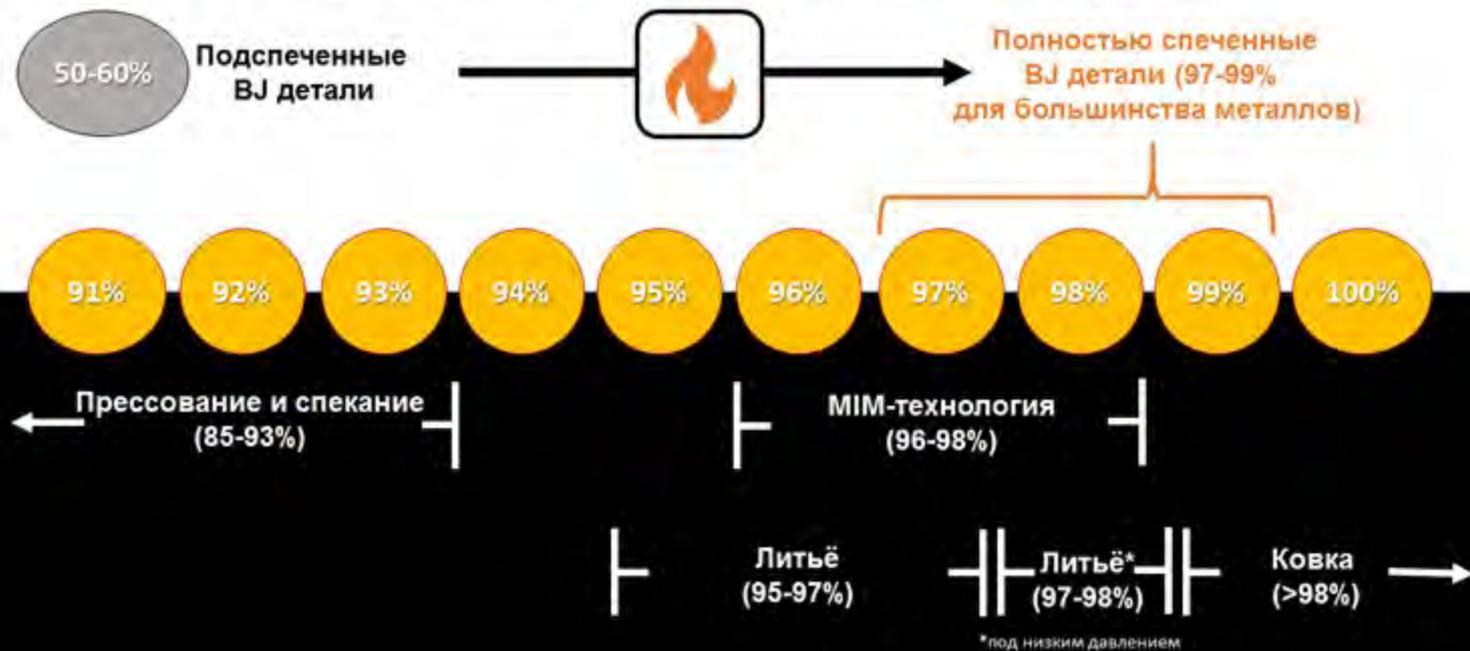
## СТРУЙНОЕ НАНЕСЕНИЕ СВЯЗУЮЩЕГО С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ

- Позволяет изготавливать изделия из нержавеющей сталей, никелевых и титановых сплавов, металломатричных композитов.
- Не требует использования поддерживающих структур.
- Позволяет получать очень точные детали, конкурирующие по свойствам с традиционными методами производства.
- Стоимость оборудования гораздо ниже в сравнении с лазерными процессами аддитивного производства.
- Более высокая скорость производства относительно других процессов металлической 3D-печати.



# ПЛОТНОСТЬ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

Плотность изделий, изготовленных методом Binder Jetting



Плотность изделий, изготовленных традиционными методами производства

## СТРУЙНОЕ НАНЕСЕНИЕ СВЯЗУЮЩЕГО С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КЕРАМИКИ

- В качестве исходных материалов используют оксиды алюминия и циркония, карбиды кремния, титана и вольфрама, а также пьезокерамику (титанат бария) и даже гипс.
- Позволяет получать изделия сложной формы, изготовление которых традиционными методами затруднено или невозможно.
- После печати в зависимости от материала и дальнейшего применения заготовки подвергают спеканию или пропитке металлическим расплавом.



## СТРУЙНОЕ НАНЕСЕНИЕ СВЯЗУЮЩЕГО ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛИТЕЙНЫХ ФОРМ

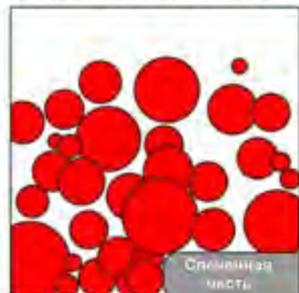
- В качестве исходного материала используют кварцевый песок.
- В качестве связующего используют фурановые и фенольные смолы.
- Позволяет получать крупные литейные формы высокой сложности для отливки металлических деталей различного назначения.



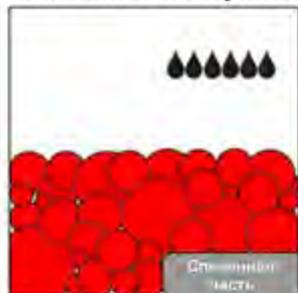
# СТРУЙНОЕ НАНЕСЕНИЕ СВЯЗУЮЩЕГО С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОЛИМЕРОВ

Особенностью большинства технологий струйного нанесения связующего с использованием полимеров является тепловое воздействие, способствующее спеканию или сплавлению частиц порошка в зонах, обработанных связующим веществом

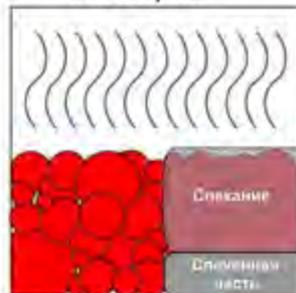
1. Нанесение материала



2. Нанесение связующего



3. Нагрев



4. Конечный результат



## СТРУЙНОЕ НАНЕСЕНИЕ СВЯЗУЮЩЕГО С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОЛИМЕРОВ



- Позволяет изготавливать как мастер-модели для последующего их применения в литье по выплавляемым моделям, так и конечные полимерные изделия.
- Благодаря использованию цветных связующих возможна полноцветная печать для изготовления различных моделей и прототипов.



## СТРУЙНОЕ НАНЕСЕНИЕ СВЯЗУЮЩЕГО С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕПРОМЫШЛЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ

*Древесная пыль*

- Дочернее предприятие Компания Desktop Metal под названием Forust использует технологию струйного нанесения связующего для изготовления мебели и предметов быта из древесной пыли
- Готовые детали обладают соответствующими обычной древесине функциональностью и жесткостью и могут быть окрашены под натуральный дуб, ясень и орех.



## СТРУЙНОЕ НАНЕСЕНИЕ СВЯЗУЮЩЕГО С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕПРОМЫШЛЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ

### *Сахарная пудра*

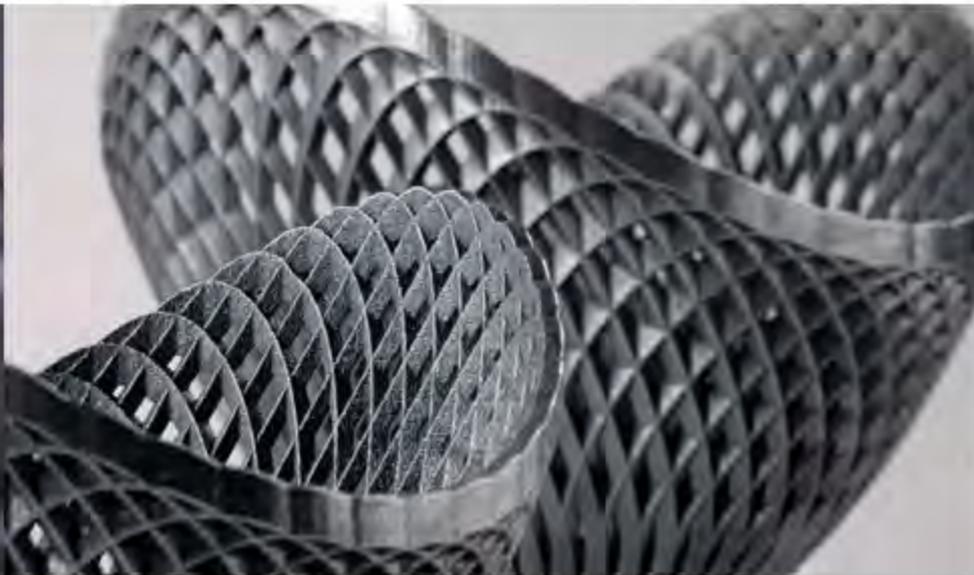
- Около десяти лет назад компания Sugar Lab изобрела кулинарный принтер, который использовал сахарную пудру и воду в технологии, подобной струйному нанесению связующего.
- Компания Sugar Lab создает сахарные творения причудливой формы и цвета и продает их по всей территории США.



Струйное нанесение связующего — это универсальная и быстро развивающаяся технология аддитивного производства, обладающая многочисленными преимуществами, такими как свобода проектирования, скорость печати и универсальность материалов.

Проводимые исследования и разработки позволяют снижать ограничения, связанные с плотностью и механическими свойствами изделий и расширять области применения данного процесса АП.

Ожидается, что по мере развития эта технология будет играть все большую роль в будущем производстве, позволяя изготавливать инновационные и сложные детали, которые ранее были недостижимы при использовании традиционных методов.

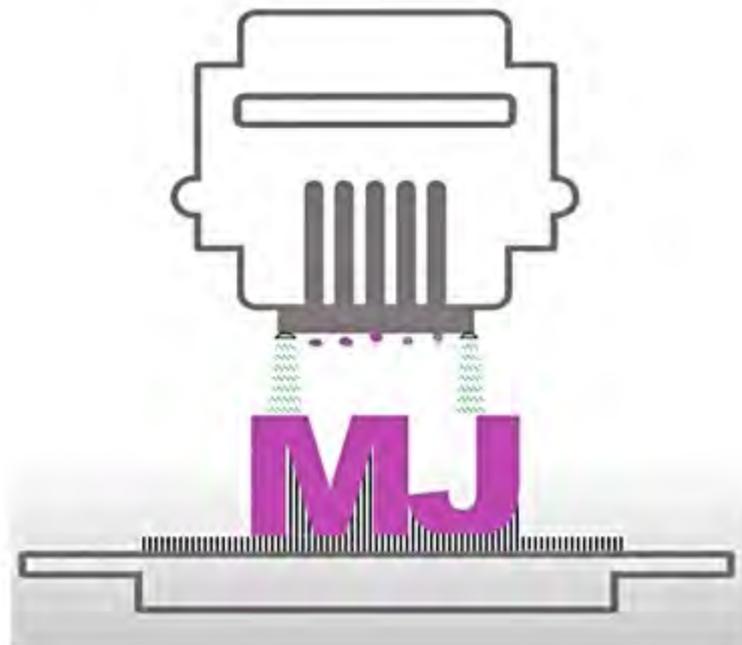




**СТРУЙНОЕ НАНЕСЕНИЕ МАТЕРИАЛА**

## СТРУЙНОЕ НАНЕСЕНИЕ МАТЕРИАЛА

Струйное нанесение материала (material jetting) - это процесс аддитивного производства, представляющий собой изготовление трехмерного объекта путем нанесения капель строительного материала (определение согласно ГОСТ Р 57558-2017).



# ИСТОРИЯ ТЕХНОЛОГИЙ СТРУЙНОГО НАНЕСЕНИЯ МАТЕРИАЛА

## Знаковые даты и события

- 1994 год - Solidscapе разработала технологию и оборудование специально для создания прототипов и точных мастер-форм из воска.
- 1996 год - 3D Systems представила свою первую платформу для струйной обработки материалов, которая использовала струйный механизм для прямой печати восковыми материалами.
- 1998 год - Objet Geometries разработала свою запатентованную технологию струйной печати фотополимерными материалами. Коммерческое название технологии poly jet.
- 2011 год - Stratasys Objet Connex представила возможность объединения двух или более фотополимеров poly jet в определенных концентрациях для создания композиционных материалов с гибридными свойствами.
- 2016 год - компания Xjet представила технологию nanoparticle jetting, реализующую потенциал процесса струйного нанесения связующего для изготовления изделий из металлических и керамических материалов.




3D SYSTEMS





## НАИБОЛЕЕ ПОПУЛЯРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

К наиболее популярным и распространенным технологиям, базирующимся на процессе струйного нанесения материала, относятся: poly jet; multi jet printing; drop on demand и nanoparticle jetting

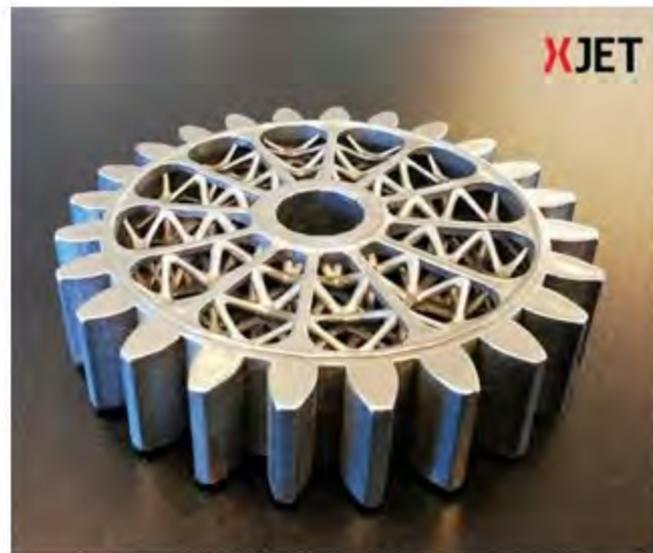
Примеры изделий изготовленных по технологиям:



Poly jet (из полимера)



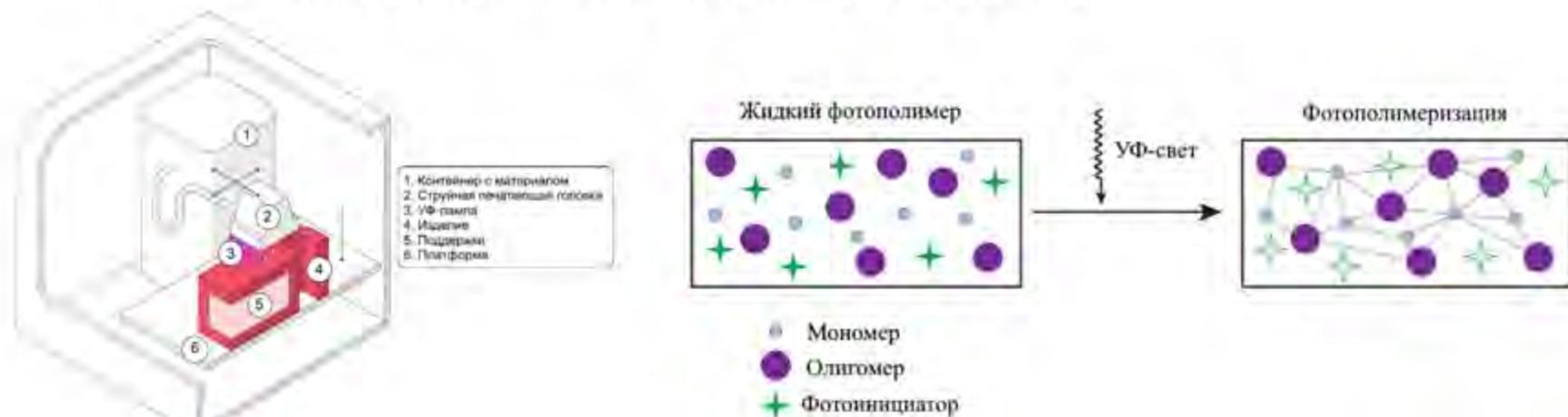
Multi jet printing, drop on demand (из воска)



NanoParticle jetting (из металла)

# СТРУЙНОЕ НАНЕСЕНИЕ ФОТОПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Струйное нанесение фотополимерных материалов получило широкую популярность благодаря компании **Objet** и ее технологии **poly jet**, базирующейся на использовании фотополимерных смол в качестве исходного материала. Фотополимерная смола обладает способностью затвердевать под воздействием света, в большинстве случаев – ультрафиолетового (УФ), этот процесс и называют фотополимеризацией. Источник ультрафиолетового излучения встроен в печатающую головку, поэтому нанесенный материал затвердевает сразу после формирования каждого слоя. Аналогичный процесс реализован компанией **3D Systems** в технологии **multi jet printing**, а также рядом других компаний в случае использования фотополимерных материалов.



# СТРУЙНОЕ НАНЕСЕНИЕ ФОТОПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

## Основные стадии изготовления изделий :

- Подготовка компьютерных данных для 3D-печати.
- Подготовка оборудования для 3D-печати.
- 3D-печать.
- Постобработка, которая может включать в себя :
  - отделение от платформы;
  - промывание фотополимерных деталей;
  - удаление поддерживающих структур;
  - дополнительная засветка фотополимерной смолы;
  - механическая обработка;
  - окрашивание, нанесение покрытий.
- Упаковка.



# СТРУЙНОЕ НАНЕСЕНИЕ ФОТОПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

## Применение

Образование и медицина



Функциональные модели, дизайнерская продукция



Архитектура



Конечные изделия

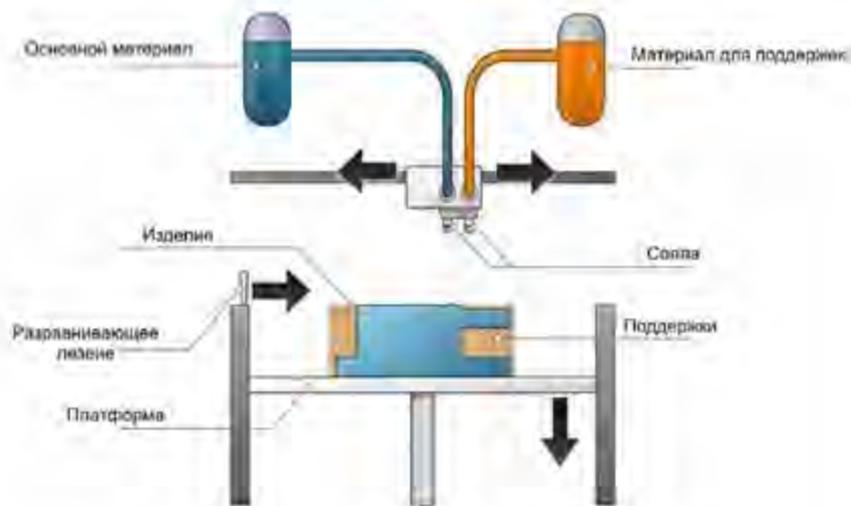


Прототипы



## СТРУЙНОЕ НАНЕСЕНИЕ ВОСКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Струйное нанесение восковых материалов получило широкую популярность благодаря компании **Solidscapе** и ее технологии **drop on demand (DoD)**. Данная технология подразумевает нанесение микроскопических капель материала вместо непрерывных струй, которые обычно используются для вязких жидких материалов. Принтеры с технологией **DoD** используют две печатающие головки: для основного и вспомогательного материалов. В качестве основного материала используется воск, который загружается в принтер в виде порошка и расплавляется внутри нагретого резервуара. Аналогичный процесс реализован компанией **3D Systems** в технологии **multi jet printing** в случае использования воскового материала.



## СТРУЙНОЕ НАНЕСЕНИЕ ВОСКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

### Основные стадии изготовления изделий:

- Подготовка компьютерных данных для 3D-печати.
- Подготовка оборудования для 3D-печати.
- 3D-печать.
- Постобработка, которая может в себя включать:
  - отделение от платформы;
  - промывание деталей с удалением поддерживающих структур;
  - окрашивание, нанесение покрытий.
- Упаковка.



# СТРУЙНОЕ НАНЕСЕНИЕ ВОСКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

## Применение

Изготовление восковых моделей для ювелирной промышленности и медицины

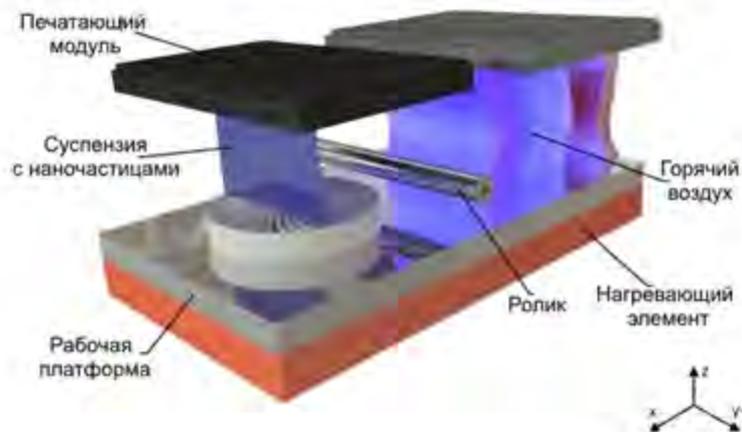


Изготовление восковых моделей для литейной промышленности



## СТРУЙНОЕ НАНЕСЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ С НАНОЧАСТИЦАМИ

Струйное нанесение материалов с наночастицами является решением от компании Xjet. В технологии nanoparticle jetting используется уникальная методика распыления для нанесения наночастиц на платформу. Твердые наночастицы основного материала (металла или керамики) и вспомогательная жидкость образуют суспензию, которая наносится на рабочую платформу. Суспензия загружается в принтер в герметичных картриджах, что обеспечивает безопасность работы с наночастицами. Две печатающие головки с тысячами сопел одновременно выпускают сверхмелкие капли строительного и поддерживающего материала на подложку. Высокие температуры внутри печатной камеры (до 300 °С) приводят к испарению жидкой основы материала, таким способом удается получить твердые слои из керамики или металла для последующего высокотемпературного спекания.



# СТРУЙНОЕ НАНЕСЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ С НАНОЧАСТИЦАМИ

## Основные стадии изготовления изделий:

- Подготовка компьютерных данных для 3D-печати.
- Подготовка оборудования для 3D-печати.
- 3D-печать.
- Постобработка, которая может в себя включать:
  - удаление поддерживающих структур;
  - высокотемпературное спекание.
- Упаковка.



# СТРУЙНОЕ НАНЕСЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ С НАНОЧАСТИЦАМИ

## Применение

Изделия из металлических сплавов



Изделия из керамики



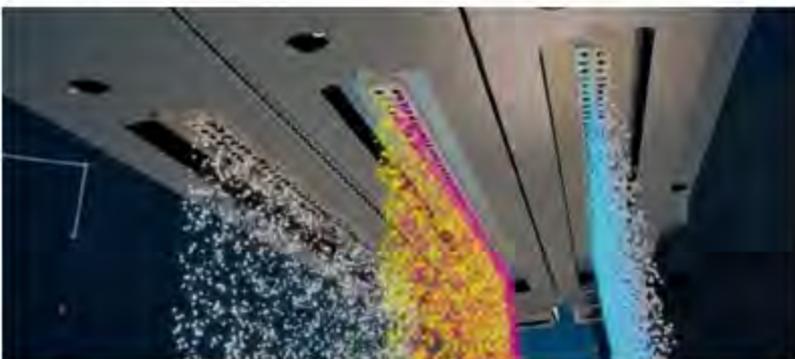
# СТРУЙНОЕ НАНЕСЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ

## Преимущества

- **Возможность печати многокомпонентных и многоцветных изделий.** Печатающая головка, используемая в процессе печати из фотополимерных смол, обычно включает в себя несколько сопел, поэтому в одном процессе печати возможно использование различных по цвету и свойствам материалов.
- **Высокая точность печати.** Струйное нанесение материала имеет очень высокий уровень точности благодаря распылению капель материала очень малого размера. Каждый слой может быть напечатан толщиной до 4-16 мкм, что позволяет создавать детали с очень гладкой поверхностью.
- **Высокая скорость печати.** Несмотря на высокое разрешение по оси Z то есть получение очень тонких слоев, используемые печатающие головки обеспечивают скорость печати не уступающую, например, скорости печати с использованием технологии аддитивного процесса экструзии материала.

## Недостатки

- **Ограниченный размер деталей.** Большинство принтеров данного процесса имеют довольно ограниченный размер рабочей зоны, поэтому могут печатать лишь небольшие детали и модели.
- **Высокая стоимость.** Принтеры струйного нанесения материала настолько же дороги насколько быстры и точны. Стоимость исходных материалов тоже высокая.
- **Необходимость постобработки.** Как и большинство процессов АП, струйное нанесение материала требует нескольких этапов последующей обработки в зависимости от применяемой технологии и используемого материала. Для большинства печатаемых изделий требуется использование поддержек, обычно они легко удаляются механически или растворяются в специальном растворе, но некоторые из этапов постобработки требуют ручного труда.
- **Ограниченные свойства.** По сравнению с другими технологиями изделия, изготовленные струйным нанесением материала, могут обладать более низкими эксплуатационными характеристиками.



**Аддитивный процесс струйного нанесения материала имеет большое значение для различных промышленных отраслей, где требуется высокое качество поверхности, разрешение и широкая цветовая гамма продукции.**

**Данный процесс является ключевым и конкурентоспособным производственным методом для широкого спектра промышленных и научных применений благодаря своей экономичности, высокой производительности и масштабируемости производства, а также способности расширять функциональность за счет печати из нескольких материалов.**

**Однако изделия, произведенные с помощью струйного нанесения материала, не используются в областях с высокими нагрузками из-за особенностей фотополимерных смол.**



## **ЛИСТОВАЯ ЛАМИНАЦИЯ (SHEET LAMINATION)**

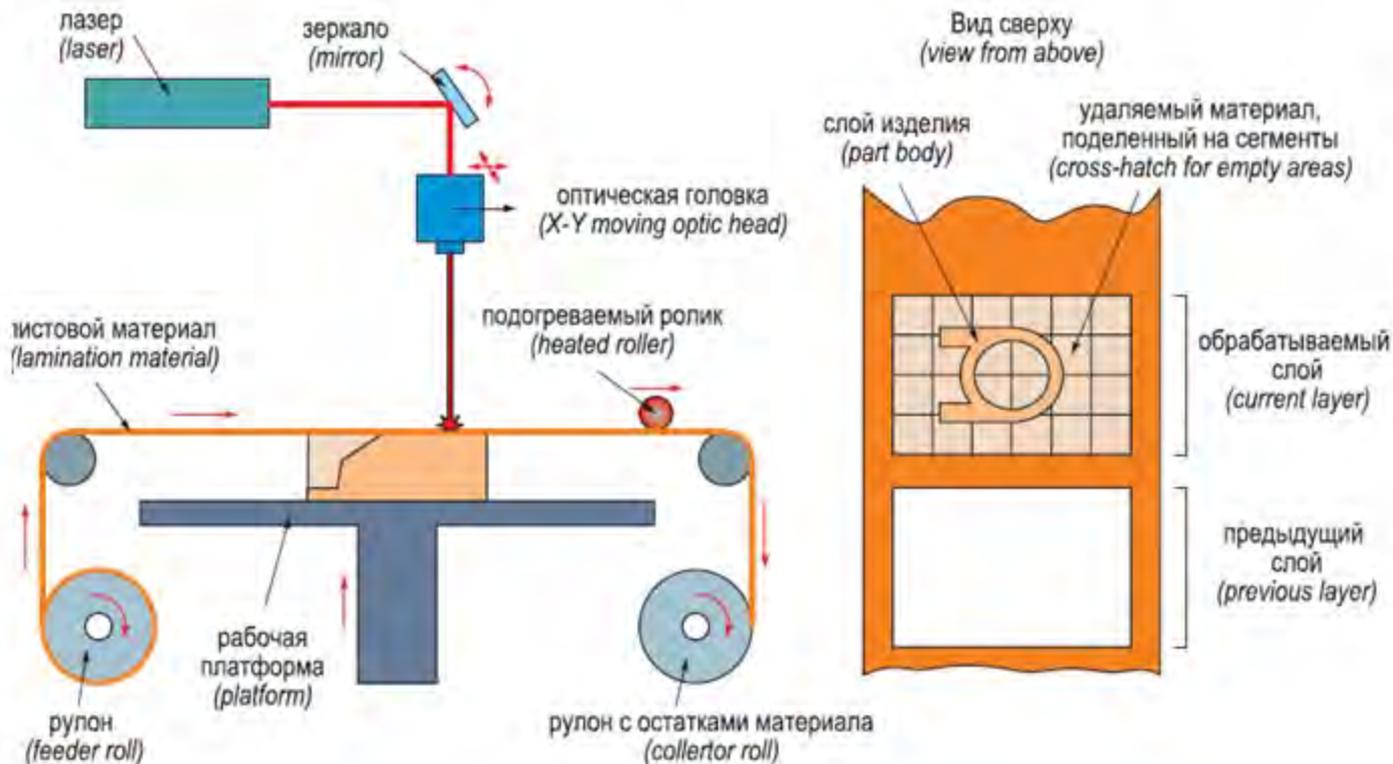
## ЛИСТОВАЯ ЛАМИНАЦИЯ

**Листовая ламинация (sheet lamination)** – одна из первых коммерциализированных технологий аддитивного производства.

В этом процессе используются листы строительного материала, которые **разрезаются лазером или ножом**, затем **соединяются** один за другим **с помощью клея** или путем скрепления вместе для формирования 3D-объекта.

Процесс также называется **ультразвуковым аддитивным производством (УАП)**, если в качестве строительного материала используются **металлические листы** и для их скрепления друг с другом используется **ультразвук**.

# ЛИСТОВАЯ ЛАМИНАЦИЯ (LOM) – СХЕМА ПРОЦЕССА

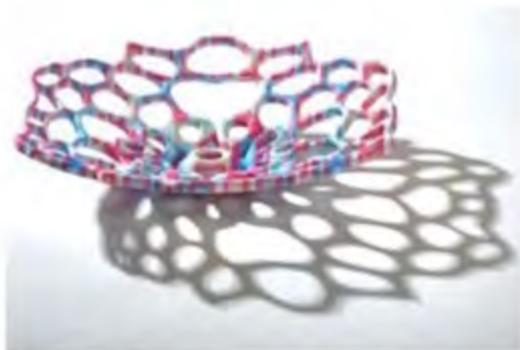


## ЛИСТОВАЯ ЛАМИНАЦИЯ – ПРИМЕНЕНИЕ

**Листовая ламинация** – **низкотемпературный** процесс, используемый для изготовления **демонстрационных моделей**, подходит для быстрого изготовления **визуальных моделей** при **низких затратах**, но не для изготовления **структурных или функциональных моделей**. Поэтому даже для создания прототипов процесс листовой ламинации имеет ограниченное применение.

Обычно этот процесс используется только для изготовления макетных моделей с демонстрационной целью.

# ЛИСТОВАЯ ЛАМИНАЦИЯ (ЛОМ) – ПРИМЕРЫ ИЗДЕЛИЙ



Материал - бумага

**3D-принтер SD3000 LOM****3D-принтер Mcor**

Материал – металлические листы.

Скрепление слоев осуществляется с помощью ультразвука.

Придание формы осуществляется с помощью механической обработки контуров листов.



## Примеры изделий



## УЛЬТРАЗВУКОВОЕ АДДИТИВНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

Примеры изделий с комбинированием двух материалов



## Преимущества

- более быстрое время печати;
- простота обработки материала;
- возможность изготовления деталей из керамики и композитных волокон;
- датчики, провода и т.п. могут быть встроены в деталь на этапе ламинирования;
- относительно низкая стоимость;
- отсутствует необходимость в опорных конструкциях;
- полноцветная печать – LOM может печатать во всем цветовом спектре;
- в некоторых технологиях листовой ламинации состояние материала не изменяется во время процесса и после его окончания;
- возможны слои из нескольких материалов (УАП).

## Недостатки

- высота слоя не может быть изменена без изменения толщины листа, поэтому точность печати детали связана с толщиной листа;
- качество поверхности может варьироваться в зависимости от материала (бумаги или пластика), но может потребоваться постобработка;
- ограничение вариантов материалов;
- удаление излишков материала после фазы ламинирования может занять много времени и трудозатратно;
- полые детали (внутренние пустоты и полости) трудно получить в некоторых процессах листовой ламинации;
- прочность склеивания зависит от используемой техники ламинирования, и, в некоторых случаях, клеевые соединения недолговечны при длительном использовании изделия;
- отходы материала могут быть высокими, если изготавливаемая деталь меньше площади сборки или размера листа.



## **ФОТОПОЛИМЕРИЗАЦИЯ В ВАННЕ (VAT PHOTOPOLYMERIZATION)**

## ФОТОПОЛИМЕРИЗАЦИЯ В ВАННЕ

**Фотополимеризация в ванне (vat photopolymerization)** – это тип аддитивной технологии, которая позволяет получать 3D-объекты путем выборочного отверждения **фотополимерной жидкой смолы** с помощью полимеризации, активируемой светом.

**Фотополимер**, или **светоактивируемая смола**, представляет собой полимер, изменяющий свои свойства при **воздействии света**, часто в **ультрафиолетовой** или **видимой области** электромагнитного спектра, заставляя его молекулы соединяться в цепочки.



## ФОТОПОЛИМЕРИЗАЦИЯ В ВАННЕ

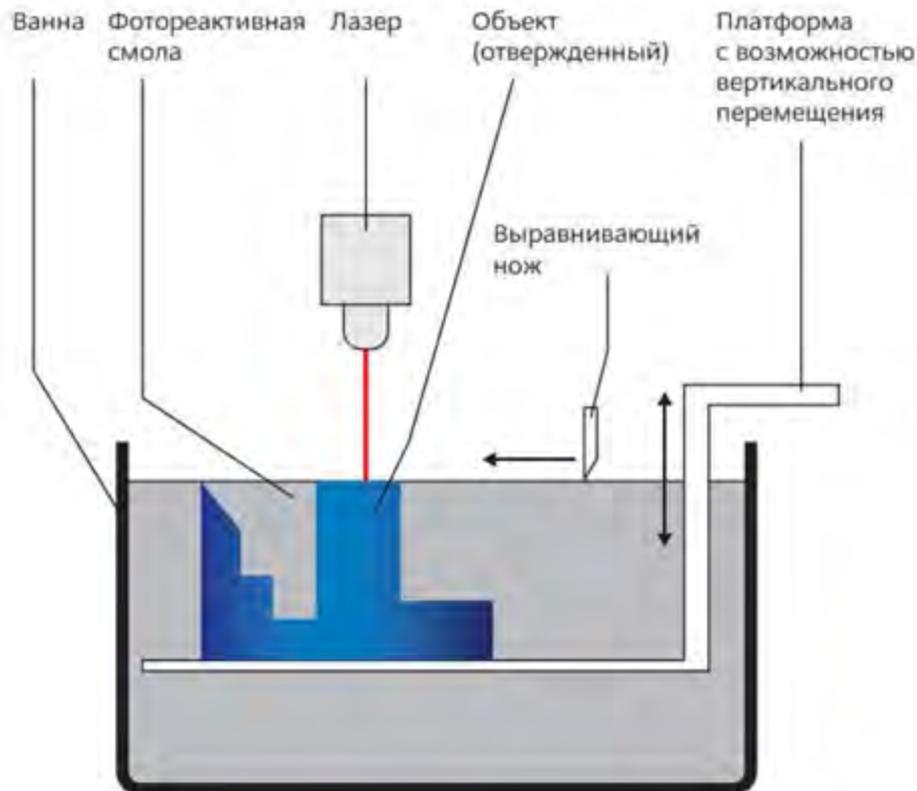
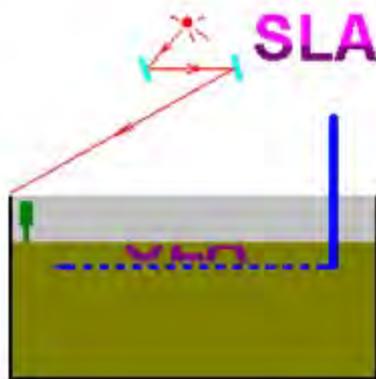
*Первый слой жидкого полимера.* Первым шагом в процессе фотополимеризации в ванне является погружение платформы для построения в контейнер с жидким фотополимером, который представляет собой отверждаемую смолу. Платформа погружается чуть ниже поверхности смолы, в соответствии с заданной толщиной печатаемого слоя.

*Световое воздействие.* Жидкость на поверхности погруженной платформы подвергается воздействию света, благодаря которому получается в узор, необходимый для печатаемого слоя. Источником света может быть, в частности, УФ-лазер, ультрафиолетовый свет или цифровая обработка света (DLP).

*Перемещение платформы сборки.* После отверждения слоя смолы платформа сборки перемещается дальше в жидкую смолу или из нее, прежде чем процесс облучения и отверждения будет повторен.

*Постобработка.* После печати деталь извлекается из резервуара со смолой для последующего отверждения. Оставшаяся жидкая смола может быть повторно использована для другого проекта печати. Напечатанная деталь может быть обработана вручную, что включает в себя удаление любой опорной конструкции, полировку поверхностей и/или окраску детали при необходимости.

**Стереолитография (SLA)** - первый запатентованный и появившийся на рынке процесс аддитивного производства, представляет собой технологию фотополимеризации в ванне.





Материалы для SLA 3D-печати можно разделить на четыре категории:

- стандартные смолы для SLA;
- инженерные смолы SLA;
- литейные смолы;
- стоматологические и медицинские SLA-смолы



Nylon 11 CF



Высокотемпературная смола



Прозрачная смола



Гибкая смола

**Стандартные смолы для SLA** - это экономичные материалы, из которых получаются жесткие, высококачественные детали с гладкой поверхностью, что делает их популярным выбором для быстрого прототипирования. Стандартные смолы также имеют уникальную взаимосвязь между цветом и свойствами. Например, белая смола хорошо подходит для деталей, требующих гладкой поверхности, а серая - для деталей с замысловатыми элементами.

**Инженерные SLA-смолы** специально разработаны для изготовления деталей и прототипов, которые очень похожи на литые под давлением пластиковые детали. Однако следует учитывать, что для достижения оптимальных механических свойств инженерные SLA-смолы требуют последующего отверждения под ультрафиолетовым светом.

**Литейные смолы** - это универсальные материалы, разработанные специально для 3D-печати в ювелирной промышленности и позволяющие создавать сложные детали и гладкие поверхности, что соответствует высоким стандартам, предъявляемым в ювелирном производстве. Одним из заметных преимуществ литейных смол является их способность выгорать в процессе литья, не оставляя после себя никаких следов, что гарантирует отсутствие дефектов на готовых литых ювелирных изделиях.

- Создание конструкторских и дизайнерских прототипов, макетов различных изделий и сборок.
- Изготовление формообразующей оснастки при различных видах точного литья. Создание моделей для изготовления формообразующей оснастки из других материалов.
- Создание мастер-модели при изготовлении электродов для электроэрозионной обработки.
- Восстановление объектов по данным рентгеновской, акустической или ЯМР-томографии в медицине, криминалистике, археологии и др.
- Изготовление микрооптики из прозрачных пластических материалов, в том числе для видеокамер нано-БПЛА.



## ПОСТОБРАБОТКА

Доотверждение смолы



Очистка деталей от остатков смолы



Удаление поддержек



## МЕТОД ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СВЕТОМ (DIRECT LIGHT PROCESSING, DLP)

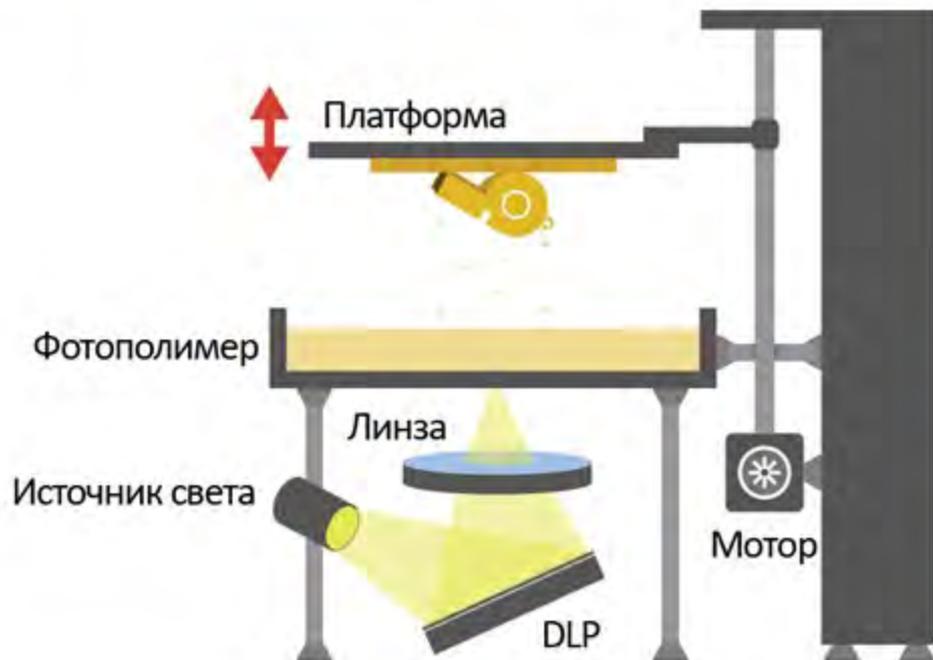
Метод **цифровой обработки светом** (direct light processing, **DLP**) берет свое начало в технологии проецирования изображений и использует в качестве **источника света проектор**.

Таким образом, один проецируемый свет воздействует **сразу на весь лоток со смолой**.

В основе этого процесса лежит цифровое микрозеркальное устройство (DMD), расположенное между проектором и смолой.

В настоящее время в некоторых 3D-принтерах DMD заменен на ЖК-экран, что значительно снижает стоимость аппарата.

# МЕТОД ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СВЕТОМ (DIRECT LIGHT PROCESSING, DLP)



## МЕТОД ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СВЕТОМ. ОБОРУДОВАНИЕ (DIRECT LIGHT PROCESSING, DLP)



Настольный DLP 3D-принтер

## Преимущества

- высокая степень детализации, точности и общего качества;
- скорость процесса;
- доступность систем.

## Недостатки

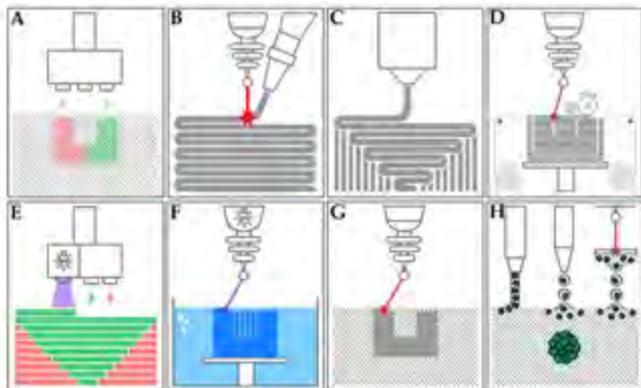
- стоимость;
- как правило, для получения значительной прочности детали должны подвергаться длительному постотверждению;
- ограниченный выбор материалов;
- недостаточная прочность и долговечность;
- после печати смолы все еще могут подвергаться воздействию УФ-излучения;
- смолы могут деформироваться и изгибаться с течением времени.



# МУЛЬТИМАТЕРИАЛЬНАЯ 3D-ПЕЧАТЬ

# МУЛЬТИМАТЕРИАЛЬНАЯ 3D-ПЕЧАТЬ

## Аддитивные технологии



Мультиматериальная 3D-  
печать



Мультиматериальная 3D-печать – это технология аддитивного производства с одновременным использованием нескольких материалов для изготовления изделий, обладающих повышенными эксплуатационными характеристиками. Принцип мультиматериальной печати может быть реализован для большинства методов АП.

Расширение возможностей проектирования за счет использования различных материалов позволяет создавать 3D-печатные изделия разного цвета или с различными свойствами материала.



# МУЛЬТИМАТЕРИАЛЬНАЯ 3D-ПЕЧАТЬ

Аддитивные технологии



Мультиматериальная 3D-  
печать

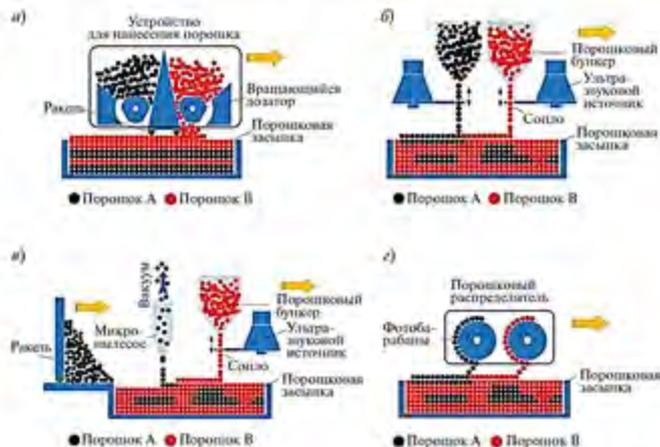
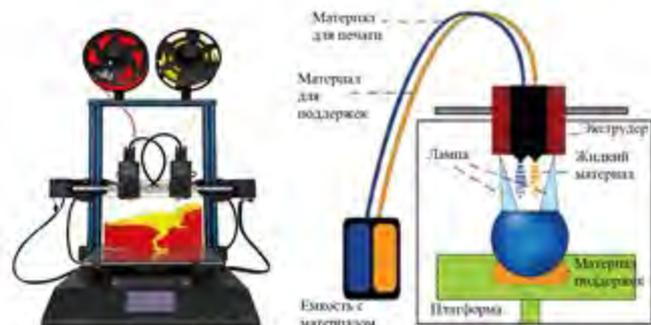
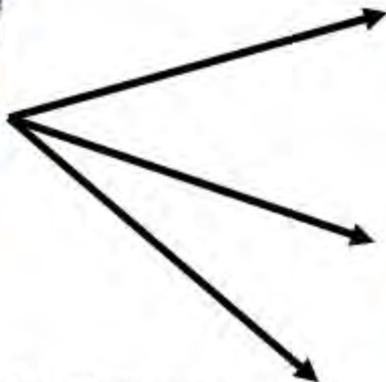


По сравнению с традиционными технологиями производства мультиматериальное аддитивное производство может обеспечить более надежный метод изготовления геометрически сложных мультиматериальных компонентов и снизить стоимость производства.

Данный процесс обеспечивает более высокий уровень свободы проектирования, который позволяет контролировать направленность и разнообразие распределения материала в сложном трехмерном пространстве.

Мультиматериальный АП может обеспечить «печать нужных материалов в нужных местах» и «печать уникальных структур для уникальных функций».

# МУЛЬТИМАТЕРИАЛЬНАЯ 3D-ПЕЧАТЬ



Со временем количество 3D-принтеров, использующих мультиматериальную печать полимеров, увеличилось, затем появились и 3D-принтеры, использующие металлы и керамику.

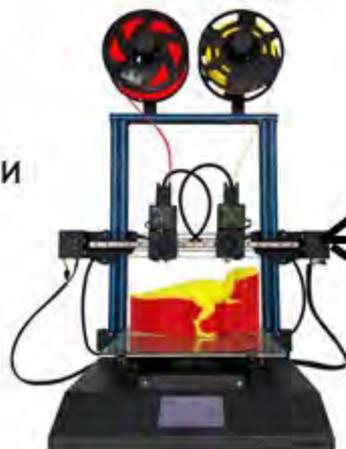
# МУЛЬТИМАТЕРИАЛЬНАЯ 3D-ПЕЧАТЬ В ЭКСТРУЗИИ МАТЕРИАЛА

Нескольких сопел



Одно сопло и дополнительная система  
замены филамента

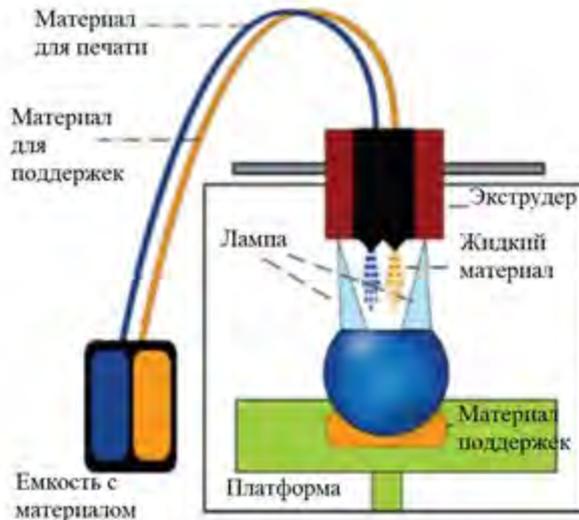
или



Реализовать принцип мультиматериальной печати в FDM-технологии можно за счет использования нескольких сопел (обычно двух) или за счет использования одного сопла и дополнительной системы замены филамента (до пяти катушек с различными материалами). При этом процесс печати не отличается от классической FDM-технологии, различие заключается в очередности подачи того или иного материала.



# МУЛЬТИМАТЕРИАЛЬНАЯ 3D-ПЕЧАТЬ В СТРУЙНОЙ ПЕЧАТИ

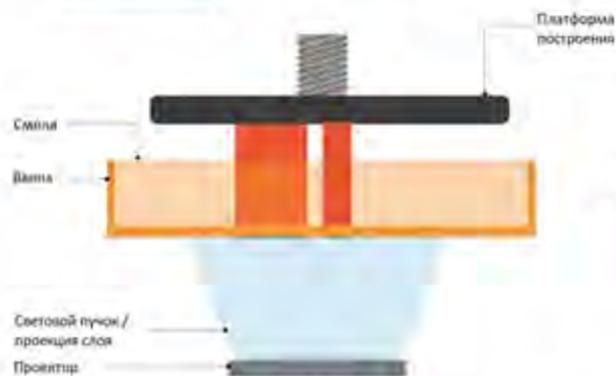


3D-принтер Stratasys Objet 500, работающий по технологии poly jet (струйная печать)



Процесс струйной печати мультиматериалов аналогичен процессу струйной печати офисных принтеров. Печатающая головка состоит из множества небольших сопел, которые по требованию выдавливают капли фотополимеров. Каждое сопло может выдавливать отдельный материал, что позволяет создавать детали из нескольких материалов. Капли материала отверждаются с помощью источника ультрафиолетового излучения, установленного на печатающей головке.

# МУЛЬТИМАТЕРИАЛЬНАЯ 3D-ПЕЧАТЬ В ПЕЧАТИ МЕТОДОМ DLP



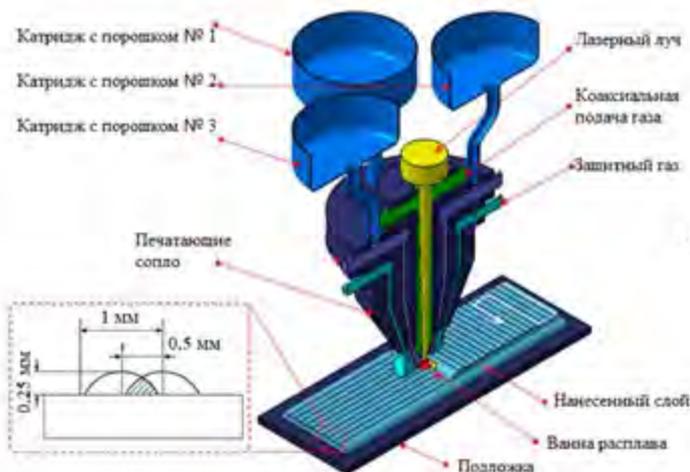
CeraFab Multi 2M30



Компания Lithoz (Австрия) предлагает возможность изготовления мультиматериальных изделий из керамики при использовании метода цифровой обработки светом (digital light processing – DLP). DLP-принтеры, оснащенные УФ-проекторами, работают с использованием микрозеркал для управления проецируемым светом, засвечивающим весь слой за один раз. В принтере Lithoz присутствуют две ванны со смолой и система поворота рабочей платформы, что позволяет изготавливать мультиматериальные изделия.

В процессе изготовления платформа построения опускается в ванну с первым материалом, затем происходит засвечивание слоя и его отверждение. Далее платформа поворачивается на  $90^\circ$  и оказывается над ванной со вторым материалом, погружается в нее, происходит засвечивание слоя и его отверждение. На первом слое затвердевает первый материал, на втором – второй. Процесс повторяется до формирования полноценного мультиматериального изделия.

# МУЛЬТИМАТЕРИАЛЬНАЯ 3D-ПЕЧАТЬ В ПРЯМОМ ПОДВОДЕ ЭНЕРГИИ И МАТЕРИАЛА



InssTek Multi-material



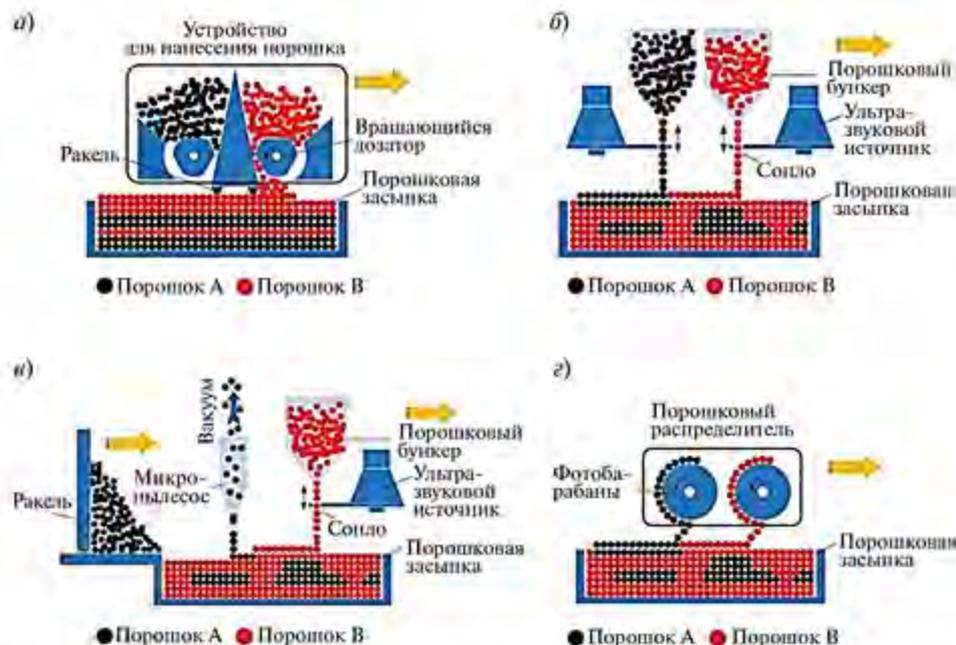
Реализация процесса получения изделий методом прямого лазерного выращивания осуществляется за счет использования нескольких порошковых питателей. В целом процесс изготовления деталей не отличается от классического. Практически каждая установка, работающая по принципу прямого подвода энергии и материала, может быть модернизирована под изготовление мультиматериальных изделий. Например, InssTek Multi-material - специализированная установка печати мультиматериальных изделий корейской компании InssTek.

# МУЛЬТИМАТЕРИАЛЬНАЯ 3D-ПЕЧАТЬ В СЕЛЕКТИВНОМ ЛАЗЕРНОМ ПЛАВЛЕНИИ

В соответствии с распределением разнородных материалов мультиматериальные структуры, напечатанные методом селективного лазерного плавления, разделяют на структуры с межслойной и внутрислойной печатью.

Для этих типов мультиматериалов наиболее важным показателем является получение прочных соединений с беспористой структурой и отсутствием трещин на границе раздела.

В процессе СЛП с использованием нескольких материалов разнородные порошки необходимо доставлять в заранее определенные места.



Реализацию мультиматериальной печати в селективном лазерном плавлении условно разделяют на четыре вида: *а* - дозирование разнородных порошков за счет разделения устройства подачи порошка на две секции; *б* - дозирование разнородных порошков за счет точечного нанесения порошка в необходимую область; *в* - создание разнородного слоя порошка за счет комбинирования методов; *г* - электрофотографический способ печати порошков.

# МУЛЬТИМАТЕРИАЛЬНАЯ 3D-ПЕЧАТЬ В СЛП

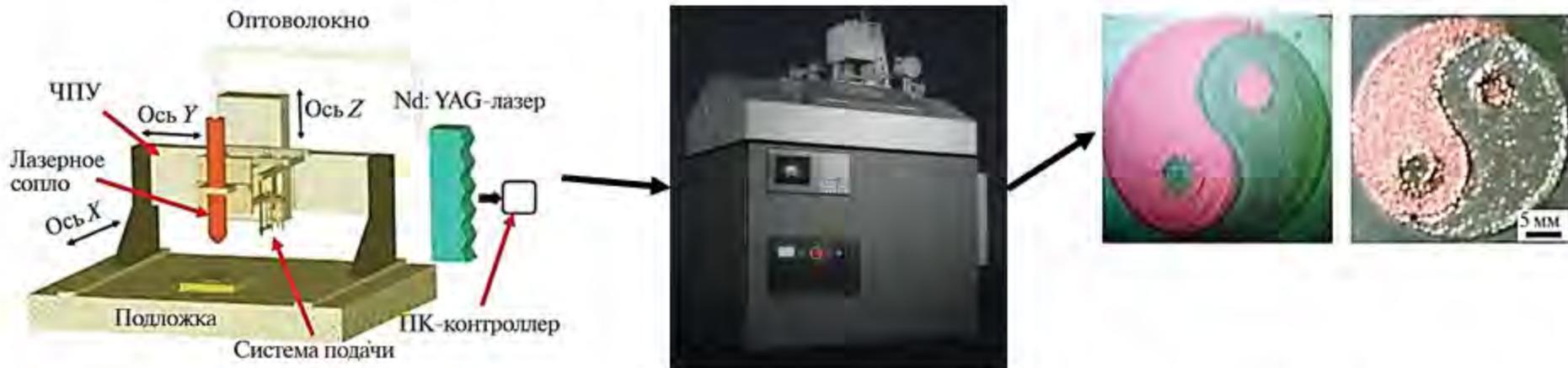
Дозирование разнородных порошков за счет разделения устройства подачи порошка на две секции



При этом дозировании устройство подачи порошка (рекоутер) разделяется на две секции (в классическом исполнении рекоутер имеет одну секцию). При создании мультиматериалов процесс печати осуществляется следующим образом: активна одна секция подачи порошка (порошка А). Порошок насыпается перед ракелем (разравнивающим ножом) и слой порошка А разравнивается, происходит сплавление необходимых участков в соответствии с 3D-моделью. При необходимости печати вторым порошком деактивируется секция подачи порошка А и активируется секция подачи порошка В. Порошок В насыпается перед ракелем и разравнивается. Далее происходит сплавление необходимых участков в соответствии с 3D-моделью. При использовании данного метода изменение материала печати происходит только между слоями.

# МУЛЬТИМАТЕРИАЛЬНАЯ 3D-ПЕЧАТЬ В СЛП

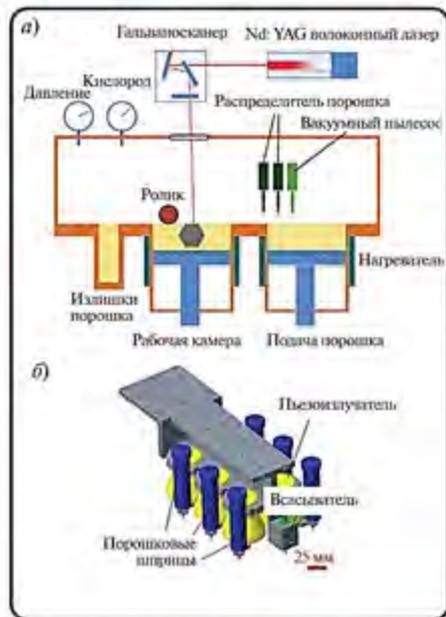
**Дозирование разнородных порошков за счет точечного нанесения порошка в необходимую область**



**Дозирование разнородных порошков за счет точечного нанесения порошка в необходимую область (ультразвуковой метод). В этом виде мультиматериальной печати отсутствует рекоутер, дозирование порошка осуществляется за счет высыпания в определенную область порошка из воронки, на которую воздействует ультразвуковая вибрация. Воронки с устройством вибрации устанавливаются на печатающую головку. После точечного нанесения порошков происходит сплавление необходимых участков в соответствии с 3D-моделью.**

# МУЛЬТИМАТЕРИАЛЬНАЯ 3D-ПЕЧАТЬ В СЛП

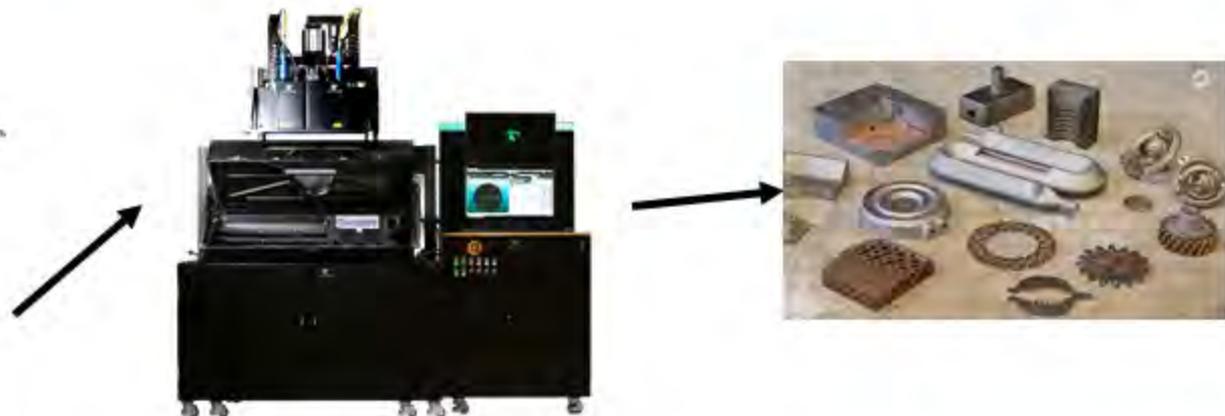
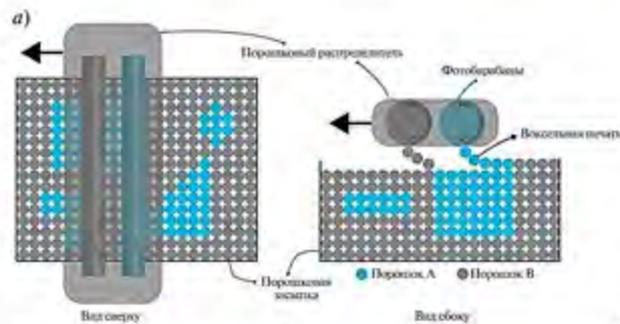
Создание разнородного слоя порошка за счет комбинирования методов (гибридный метод)



Создание разнородного слоя порошка (гибридный метод) происходит за счет комбинирования методов классического нанесения порошка и ультразвукового метода. Устройство подает порошок сплава А перед ракелем, который разравнивает слой порошка сплава А. Далее пылесос засасывает области, в которых не нужен порошок сплава А и засыпает в них порошок сплава В за счет использования воронки, на которую воздействует ультразвуковая вибрация.

# МУЛЬТИМАТЕРИАЛЬНАЯ 3D-ПЕЧАТЬ В СЛП

Электрофотографический способ печати порошков



Электрофотографический способ печати порошков аналогичен способу печати на бумаге лазерным принтерам. В этом способе порошок в соответствии с 3D-моделью переносится на платформу построения за счет электрического заряда.

На принципе электрографии работают лазерные принтеры и копировальные аппараты.

# МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ МУЛЬТИМАТЕРИАЛЬНОЙ 3D-ПЕЧАТИ В СЛП

## Способы разделения порошка

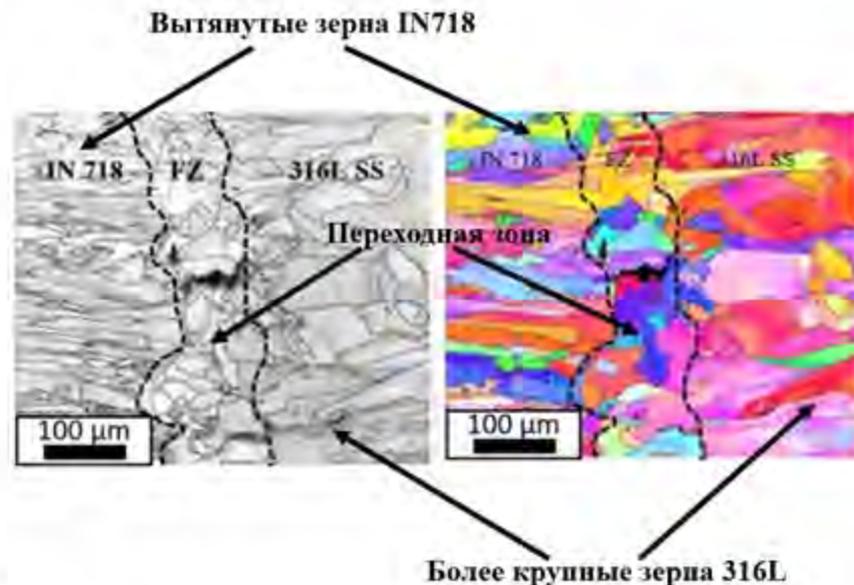


При работе с мультиматериальными системами происходит смешивание разнородных порошков, поэтому возникает необходимость дополнительного технологического шага при производстве изделий – разделение порошков.

Существуют следующие способы разделения порошков: гранулометрический, магнитный и способы, основанные на различии плотности, массы, электропроводности и смачиваемости.

Основной проблемой постобработки (термической или механической обработки) мультиматериалов является различие в свойствах получаемых изделий, состоящих из разнородных сплавов и имеющих различные структурные характеристики. В связи с этим необходимо учитывать различия в температурах плавления и основных фазовых и структурных превращениях.

Совместная термическая обработка разнородных сплавов в одном мультиматериальном образце может привести к микроструктурным различиям в разных зонах. Например, подобного рода явление может возникнуть в мультиматериале из никелевого сплава и стали. В материале возникает переходная зона, свойства которой будут определяться как структурой никелевого сплава, так и структурой стали. Полученная таким образом структура может привести к непредсказуемым результатам.



Микроструктура мультиматериального образца после проведения термической обработки: IN 718 – никелевый сплав; 316L SS – нержавеющая сталь; FZ – переходная зона