



# МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

**Лекция 8. Основы проектирования и их трансформация.  
Аддитивные технологии. Современные тренды создания  
новых материалов**

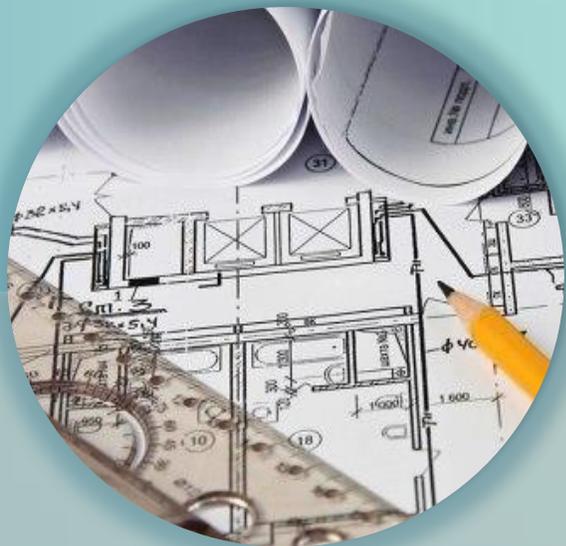
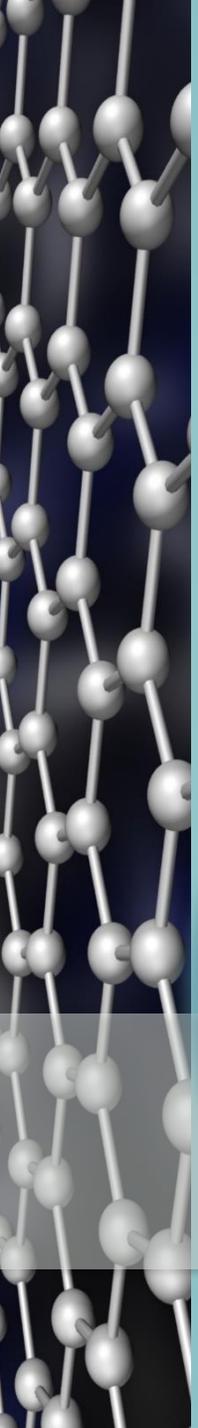
КЛИМЕНОВ Василий Александрович,  
профессор ИШНПТ ТПУ

## Содержание лекции

- › Методология проектирования. Учёт упрочняющих технологий и сварных соединений.
- › Тренды развития современных производств и трансформация методов проектирования.
- › Аддитивные технологии и материалы для них.
- › Особенности структуры металлических материалов, сформированных в условиях аддитивных технологий.
- › Тренды создания современных материалов.

## Дополнительная литература

- › Конструктивная прочность композиции основной металл-покрытие/ Л.И. Тушинский, А.В. Плохов, А.А. Столбов, В.И. Синдеев – Новосибирск: Наука, 1996.-296с.



# Методология проектирования и его трансформация

# Методология проектирования

- › Книги по дизайну часто кажутся расплывчатыми и качественными; подразумевается, что способность к дизайну похожа на способность писать музыку: дар, данный немногим. И правда, в хорошем дизайне есть элемент творческого мышления (в отличие от логических рассуждений или анализа). Но методология проектирования может быть сформулирована, и при ее соблюдении приведет к практическому решению проблемы проектирования.
- › Вначале есть два параллельных процесса: выбор материалов и дизайн компонентов. Предварительный материал выбирается, и данные для него собираются из таблиц данных или из справочных данных. В то же время составляется предварительный проект компонента, способный выполнять функцию (которая должна быть тщательно определена вначале) и выполняется приблизительный анализ для оценки напряжений, моментов и концентраций напряжений, которым он будет подвергаться. Два процесса объединяются в оценке характеристик материала в предварительном проекте. Если материал может выдерживать нагрузки, моменты, напряжения, не отклоняясь слишком сильно и не разрушаясь, тогда проектирование может продолжаться. Если материал не может работать надлежащим образом, выполняется первая итерация: либо выбирается новый материал, либо изменяется дизайн компонента (или оба) для преодоления сбоя.
- › Следующим шагом является детальная спецификация дизайна и материала. Для этого может потребоваться подробный анализ напряжений, анализ динамики системы, ее реакции на температуру и окружающую среду, а также подробное рассмотрение внешнего вида продукта.

# Методология проектирования



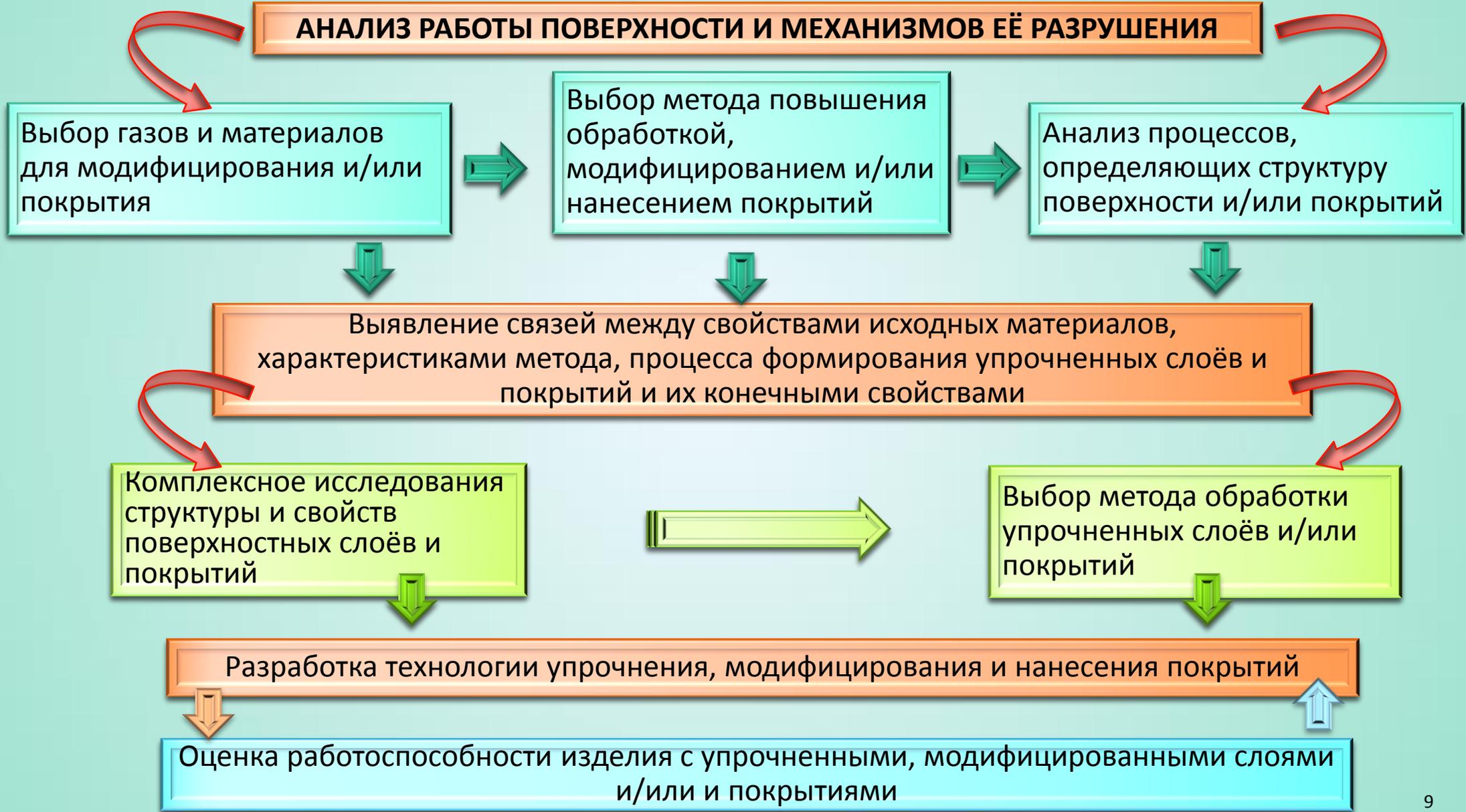
# Методология проектирования



# Методология проектирования

- › Требуются более качественные данные о свойствах материала у возможных поставщиков или самостоятельные испытания
- › Конструкция является жизнеспособной только если она может быть изготовлена экономно. Выбор способа изготовления во многом определяется выбором материала
- › Производственный маршрут зависит от размера производственного цикла и от того, как компонент будет завершен и присоединен к другим компонентам
- › Выбор материала и пути производства определяют цену продукта, поэтому может потребоваться вторая итерация, если калькуляция показывает, что цена слишком высока
- › Возможно, придется рассмотреть новый выбор материала или конструкции компонента, позволяющий создать альтернативный путь производства
- › На этом этапе производится прототип продукта и оценивается его эффективность на рынке. Если удовлетворительно, устанавливается полномасштабное производство
- › Непрерывный анализ производительности компонента выявляет слабые стороны или способы его улучшения или удешевления
- › Всегда есть возможности для дальнейших инноваций: радикально нового дизайна или изменения материала, из которого сделан компонент
- › **Успешные разработки постоянно развиваются, и только так продукт сохраняет конкурентные позиции на рынке**

# Методологические основы



# Характеристики сварного шва, дающие неблагоприятные усталостные свойства

Описание	Комментарии
Изменение в сечении сварного шва	Дает концентрацию напряжения. В случае стыковых сварных швов она может быть устранена шлифованием сварного шва до появления основного металла. Шлифовальные метки должны быть параллельны направлению нагрузки, в противном случае они могут инициировать усталостные трещины
Плохая обработка поверхности сварного шва	Иницирует усталостные трещины. Улучшить отделку шлифовкой
Наличие растягивающих остаточных напряжений такой же величины, что и предел текучести	Шов склонен к усталости даже при применении полностью сжимающего цикла напряжений. Уменьшить остаточные напряжения снятием напряжения, ковка или дробеструйное упрочнение
Часто содержат дефекты (водородные трещины, шлаковые включения, старт-стоп отметки)	Иницирует усталостные трещины. Критические сварные швы проверить неразрушающим методом и дефекты зачистить
Большие различия в микроструктуре между основным металлом, термической зоной и сварным швом	Резкие изменения механических свойств ведут к локальным концентрациям напряжения

# CAD/CAM/CAE

- › **CAD-системы** (computer-aided design – компьютерная поддержка проектирования) - программное обеспечение, которое автоматизирует труд инженера-конструктора и позволяет решать задачи проектирования изделий и оформления технической документации при помощи персонального компьютера
- › **CAM-системы** (computer-aided manufacturing – компьютерная поддержка изготовления) автоматизируют расчеты траекторий перемещения инструмента для обработки на станках с ЧПУ и обеспечивают выдачу управляющих программ с помощью компьютера
- › **CAE-системы** (computer-aided engineering – компьютерная поддержка инженерных расчетов) - для решения различных инженерных задач (расчет конструктивной прочности, анализ тепловых процессов, расчет гидравлических систем и механизмов)
- › **CAD/CAM/CAE** системы развиваются уже несколько десятилетий. За это время произошло разделение систем уровни
  - **верхний** – системы обладают огромным набором функций и возможностей, но с ними тяжелее работать
  - **нижний** - имеют ограниченные функции, но очень просты в изучении
  - **средний** - обеспечивают пользователя инструментами, достаточными для решения большинства задач, не сложны для изучения и работы

# Эволюция машиностроительного производства

- Внедрение конвейерного производства

1870

Электрификация



- Умное производство

СЕГОДНЯ



- Замена мускульной силы на энергию пара

1794

Механизация



- Внедрение роботизирующих систем с ЧПУ

1969

Автоматизация

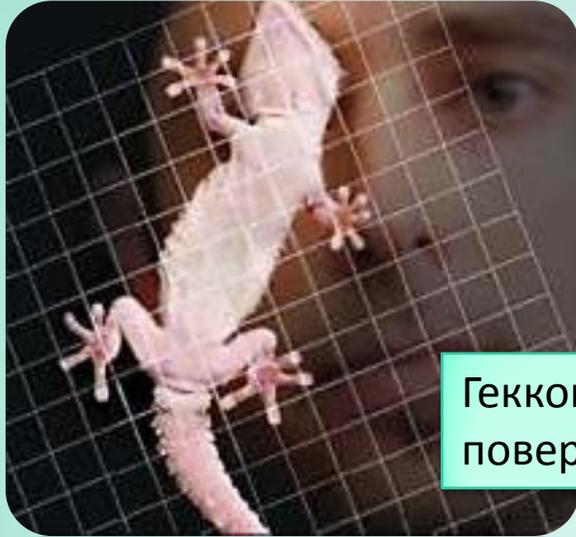


# Тренды современного цифрового производства



- › **Бионический** (топонимический, генеративный) **дизайн** - способ проектирования различных объектов, при котором для снижения веса и увеличения прочности применяются нетрадиционные решения. Внешне такие объекты отличаются от обычных техногенных изделий. Они имеют выраженные черты, присущие растениям, имитируют строение конечностей или костей
- › Метод предполагает использование в конструкциях эффективных решений позаимствованных в природе. В целом, это плавные линии, распределенная структура тонких сплошных или трубчатых конструкций. Биодизайн - частный случай топологической оптимизации
- › **Топологическая оптимизация** – изменение конструкции детали и ее варьирующихся параметров с улучшением ее функционала. Позволяет адаптировать геометрию под определенную технологию (как традиционную, так и 3D-печать), создавать сложные структуры и сокращать число единиц в сборке



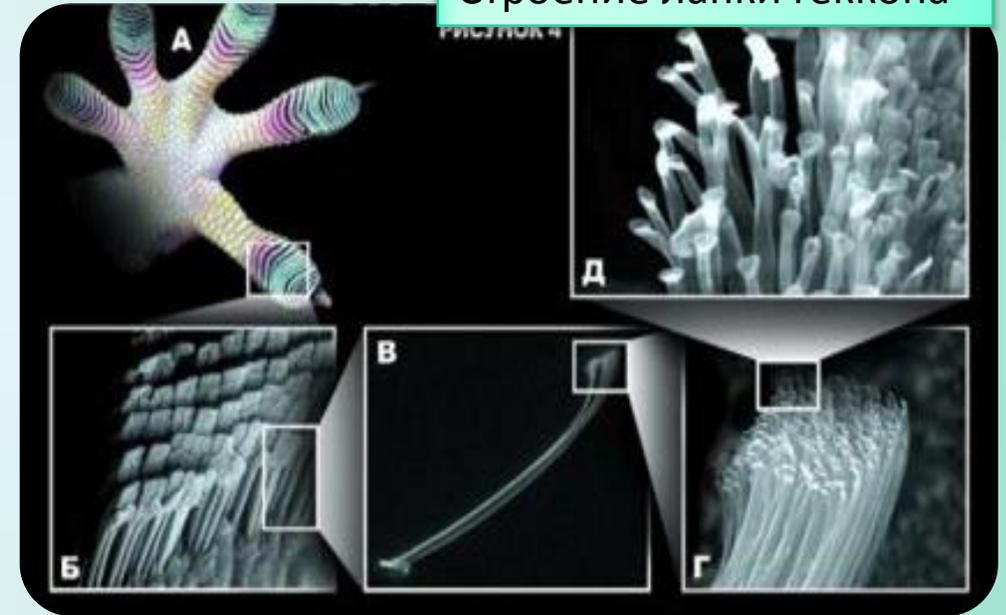


Геккон на гладкой вертикальной поверхности. Фото: Kellar Autumn

› **Гекконы** способны

- карабкаться по гладкой стене со скоростью 1 м/с
- бегать вверх тормашками по потолку из полированного стекла
- поддерживать вес тела одной лапкой

Строение лапки геккона



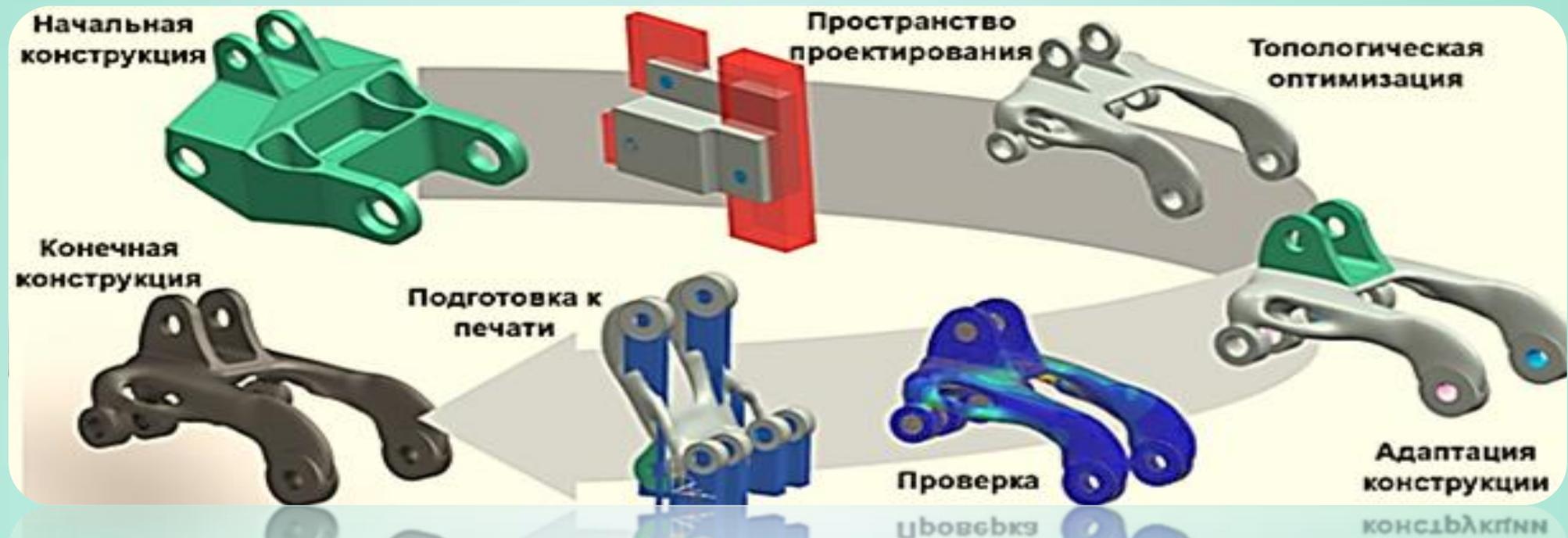
› Поиск разгадки длился почти **100 лет**

- **Клейкое вещество?**
- **Присасывание?** Лапки геккона могут прилипнуть к поверхности в вакууме, где нет давления воздуха
- **Электростатическое притяжение?** Возникает между электрически заряженными объектами. Когда создали условия, при которых любой заряд исчезал, лапки геккона все равно прилипали
- **Трение?** Кератин - белок, который вырабатывается в коже, оказывается слишком "скользким". К тому же, трение не может объяснить передвижение по потолку
- **Сцепление между шероховатыми поверхностями?** Гекконы могут прилипнуть к полированному стеклу

- › Близкий контакт щетинок на лапках с поверхностью. Гекконы используют связи ближнего взаимодействия между молекулами, т.е. прилипают посредством **сил Ван-дер-Ваальса**

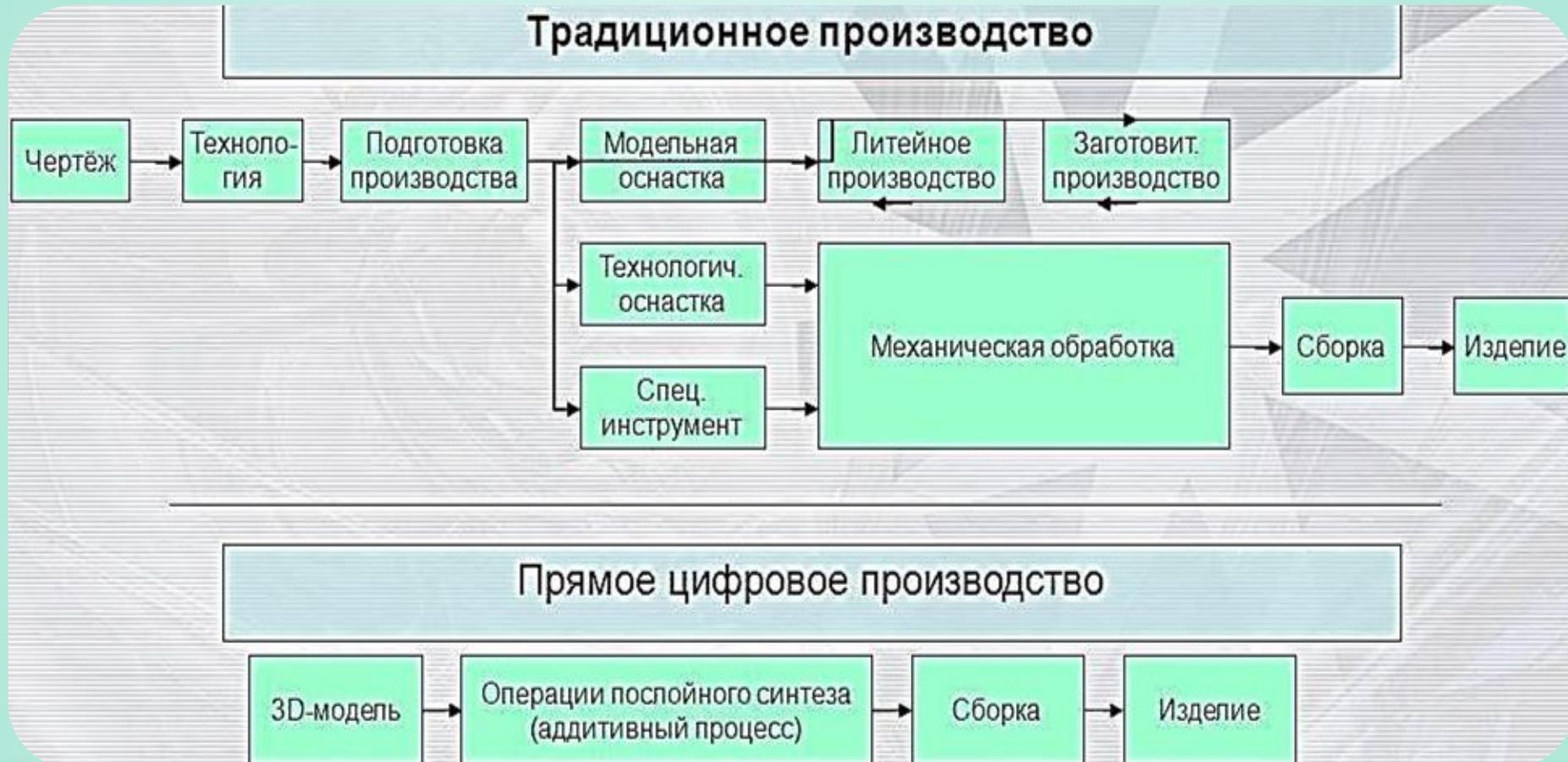
**Сила действует на очень маленьких расстояниях (между молекулами) и резко уменьшается при увеличении расстояния между поверхностями**  
**Чтобы такая слабая сила удерживала геккона на вертикальной стене, необходима огромная площадь близкого контакта между лапкой геккона и поверхностью**

- › На пальцах - очень тонкие, плотно размещенные ( **$1,5 \times 10^6$  на  $1 \text{ см}^2$** ) волоски (щетинки), длиной 100 мкм
- › Каждая щетинка на конце расходится в 400-1000 ответвлений
- › Каждое ответвление заканчивается на конце треугольной лопаточкой шириной 0,2 мкм
- › Лапка геккона площадью контакта чуть больше  $1 \text{ см}^2$  прикасается к поверхности **двумя миллиардами окончаний!**

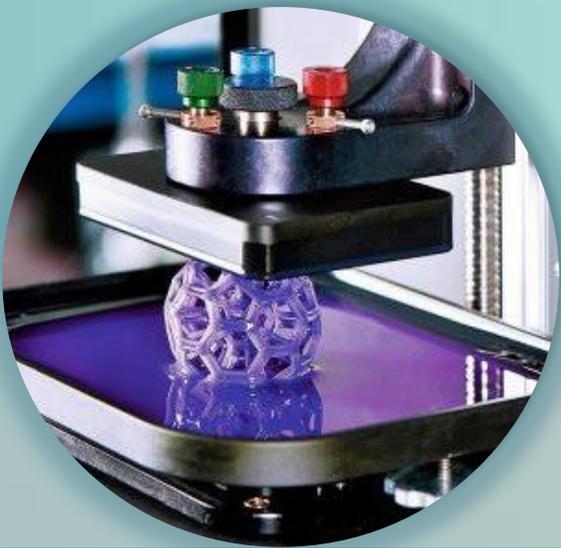
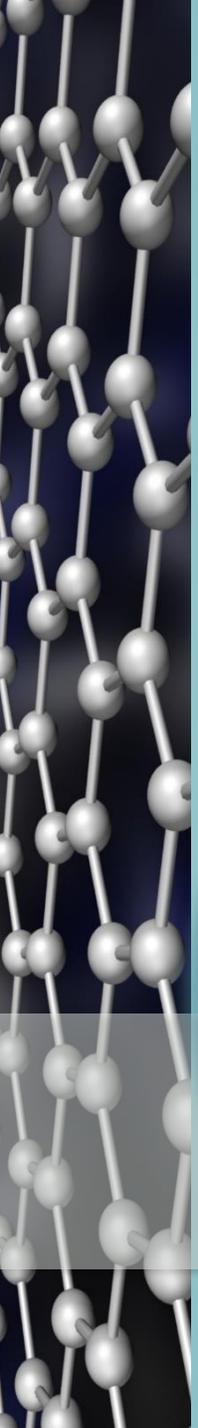


- » **Алексей Боровков:** «С одной стороны, идет математическое моделирование и проектирование на основе математич. моделирования технологии, технологии оптимизации. Наблюдается совершенствование математических, вычислительных и инженерных наук, их стремительное развитие. С другой стороны, - стремительное развитие аддитивных технологий, аддитивного производства. На объединении, конвергенции двух этих трендов возникает синергетический эффект, когда создаются принципиально новые конструкции, и это не просто новые конструкции, а это глобально конкурентоспособная продукция - конструкции, машины, различные элементы, детали нового поколения. Это будут конструкции столь же совершенные, что мы видим в живой природе, доходившей до этих конструкций сотнями тысяч лет эволюции»

# Прямое цифровое производство



Значительно сокращается длительность производственного процесса и уменьшается его стоимость



# Аддитивные технологии

# Аддитивные технологии



*Аддитивное производство:  
добавляем нужное. Чак Халлом,  
лазерная стереолитография,  
1986*

**Принцип:** послойное воспроизводство трехмерной геометрии в виде последовательности плоских слоев одинаковой толщины

**Преимущество:** не бесконечная сложность воспроизводимой геометрии, а бесконечная простота, с которой эта сложность преодолевается

**Основа:** цифровое описание воспроизводимого объекта в виде трехмерной компьютерной модели

При работе с установкой аддитивного производства отпадают следующие этапы разработки технологии:

- **не надо** проектировать и изготавливать оснастку
- **не надо** выбирать инструмент, назначать стратегии обработки и оптимизировать её режимы

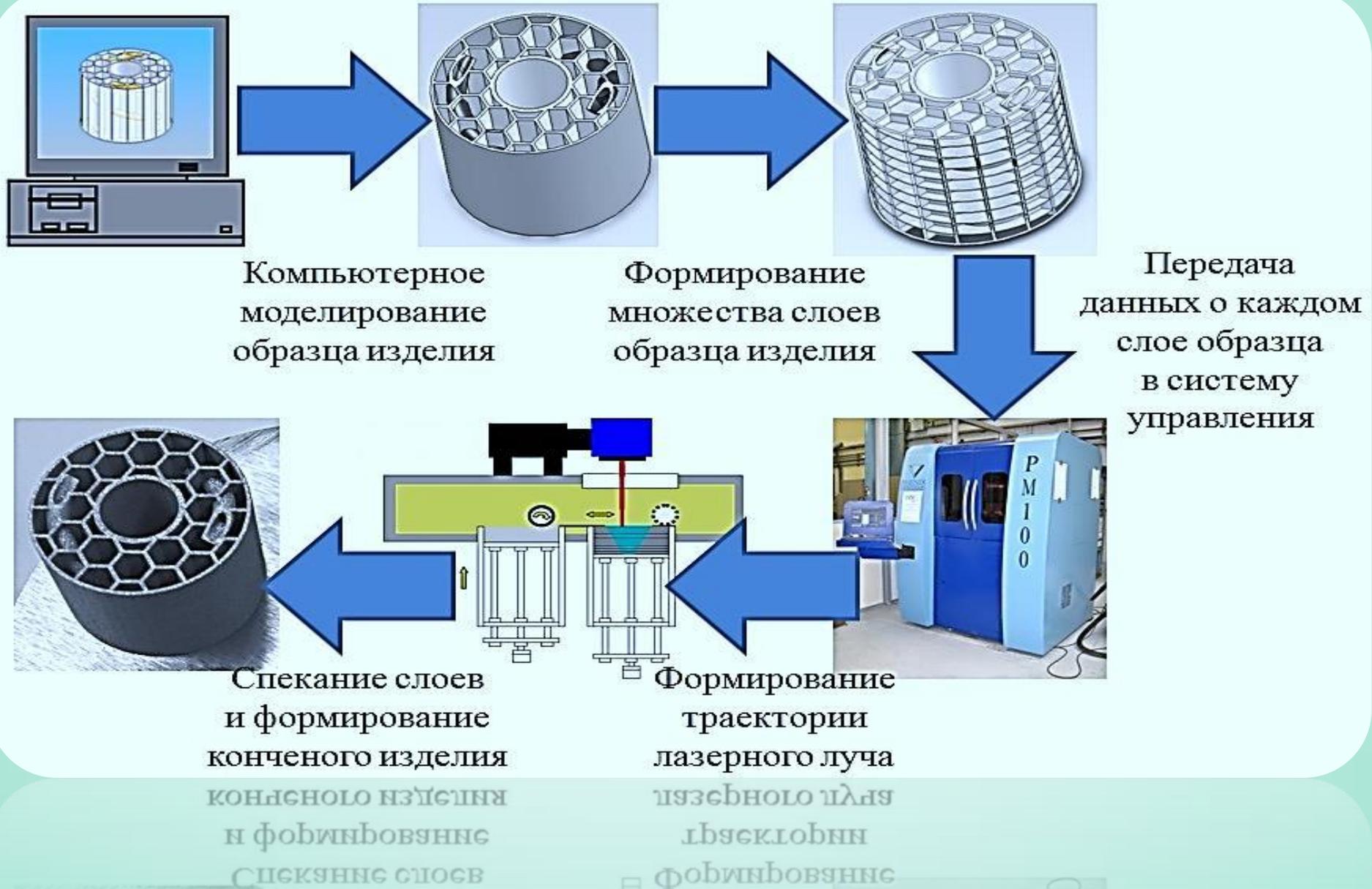
# Аддитивные технологии

- › Аддитивные технологии позволяют изготовить любое изделие послойно на основе компьютерной 3D модели
- › Процесс создания объекта называют **выращиванием**
- › При **традиционном** производстве вначале имеется заготовка, от которой отсекают все лишнее либо деформируют ее
- › При **аддитивном** производстве из аморфного расходного материала выстраивается новое изделие
- › В зависимости от технологии, объект может строиться снизу вверх или наоборот, получать различные свойства

Схема АД производства

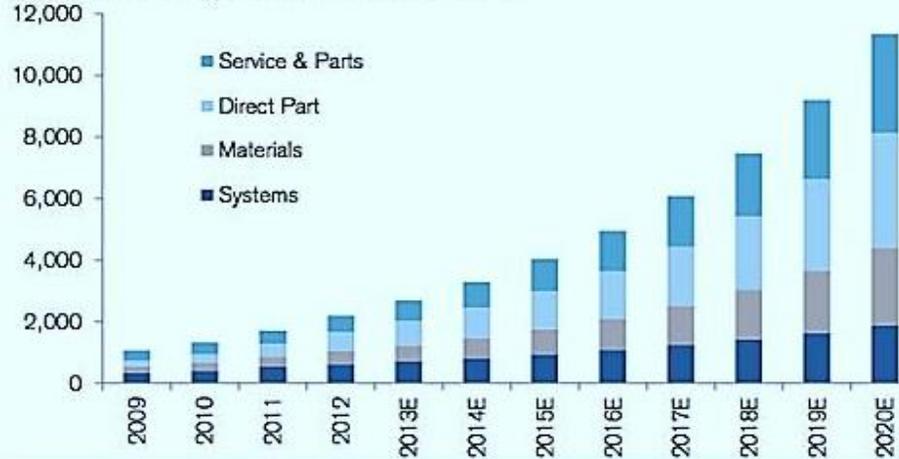


# Последовательность в АТ



## Перспективы роста рынка 3D печати

US\$ in millions, unless otherwise stated

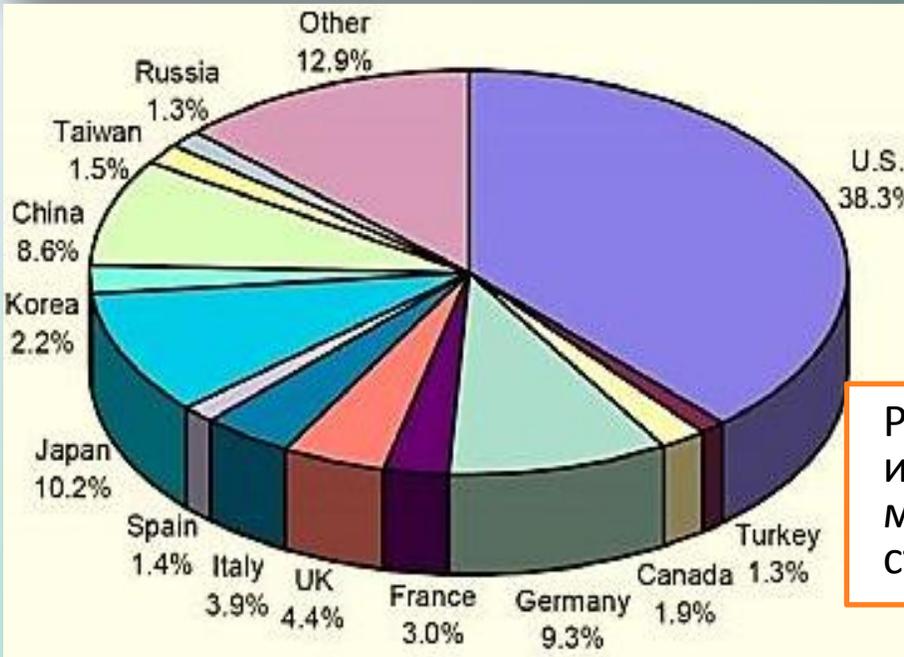


Source: Credit Suisse estimates.

## Статистика патентования в области 3D-печати по данным «UK Intellectual Property Office», 2013

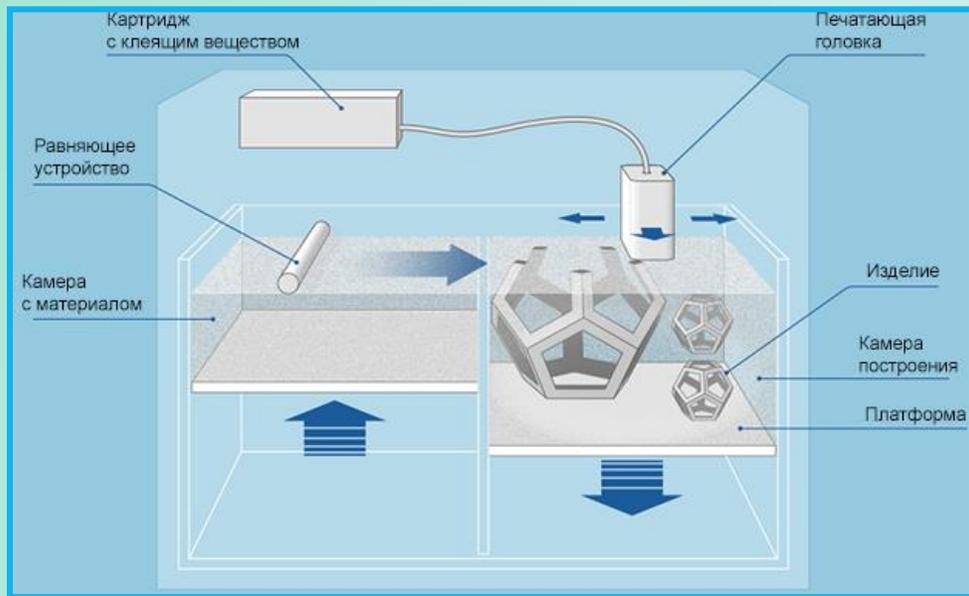


## Количество проданных промышленных установок АП для производства изделий из металла (2000-2017)



## Распределение инсталляций АМ-машин по странам мира

# 3D печать гипсовым порошком



## Материал

ZCast 501 - маршаллит (кварцевый песок)

ZP 14 - порошок с волокном целлюлозы

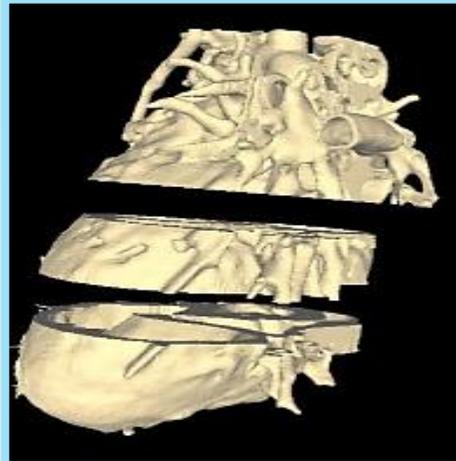
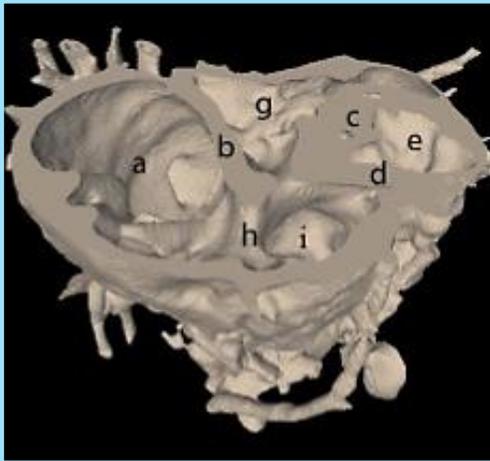
ZP 15 - гибкие модели



ZPrinter 310 Plus

Показатель	Значение
Технология	3DP
Разрешение, точек/дюйм	300 x 450
Количество печатающих головок	1
Вертикальная скорость построения объекта, слой/мин	2-3
Максимальный объем печати, мм	203x254x203
Толщина слоя, мм	0.089 -0.203
Количество сопел	304

# 3D-модели детских сердец для томского НИИ кардиологии

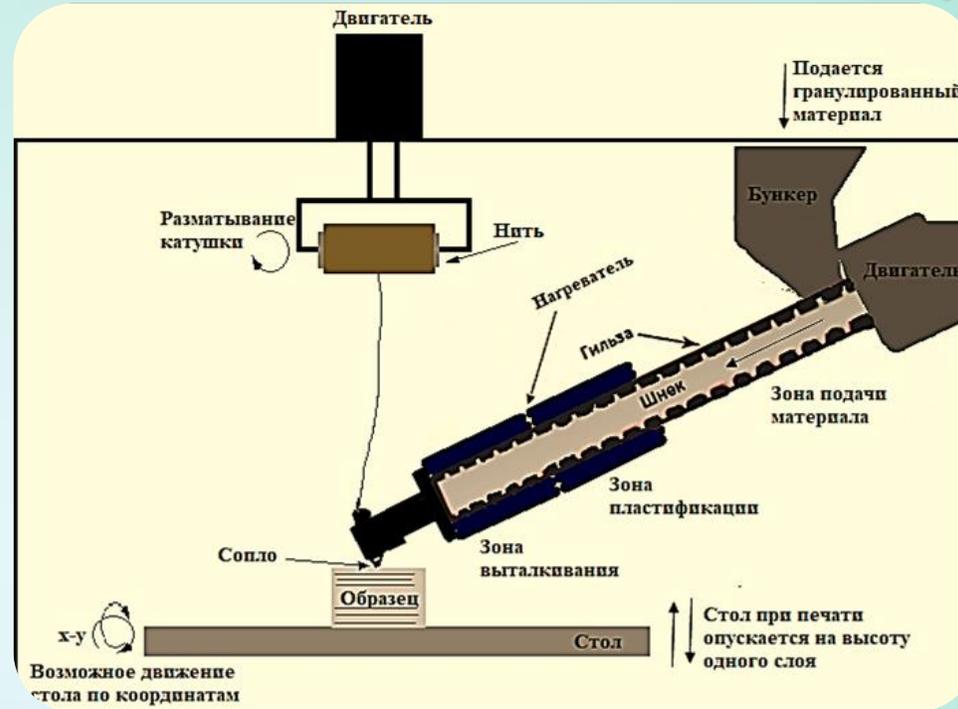
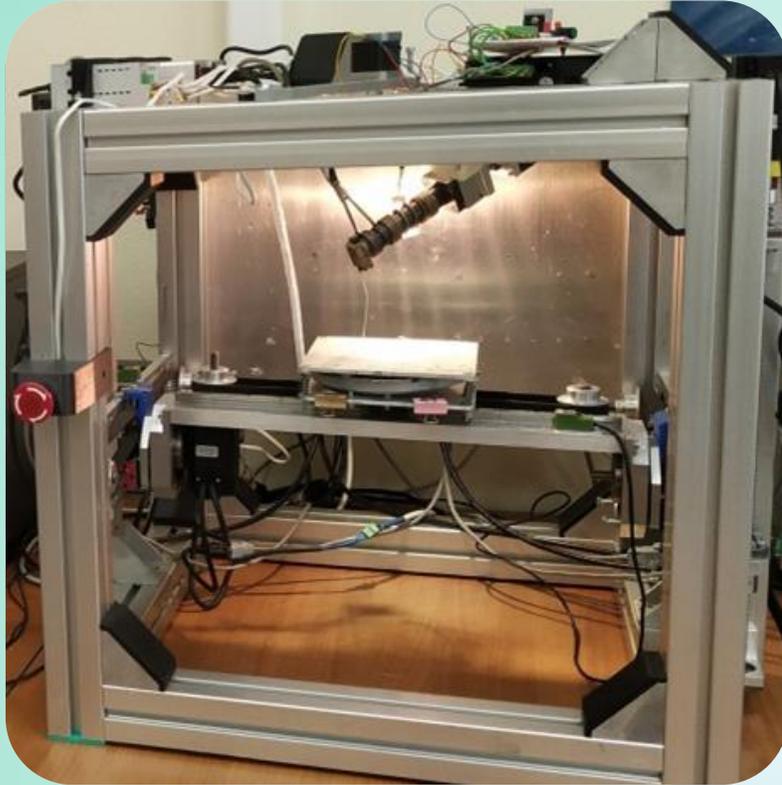


3D-реконструкция сердца. Поперечный срез на уровне дефекта межжелудочковой перегородки



Печать пластиковых копий настоящих **сердец** на основе томографических изображений. Имея в руках осязаемую модель, кардиохирурги могут подробнее изучить дефекты органа и выбирать подходящие способы оперативного лечения

# 3D принтер полимерных КОМПОЗИТОВ



Показатель	Значение
Минимальная высота печати одного слоя, мкм	150
Количество осей манипулятора	4+1 (XYZA + наклон) с возм. доведения до 5+1
Количество регулируемых зон нагрева, шт	минимум 3
Максимальная температура печати, °C	450
Программное обеспечение	Linux CNC

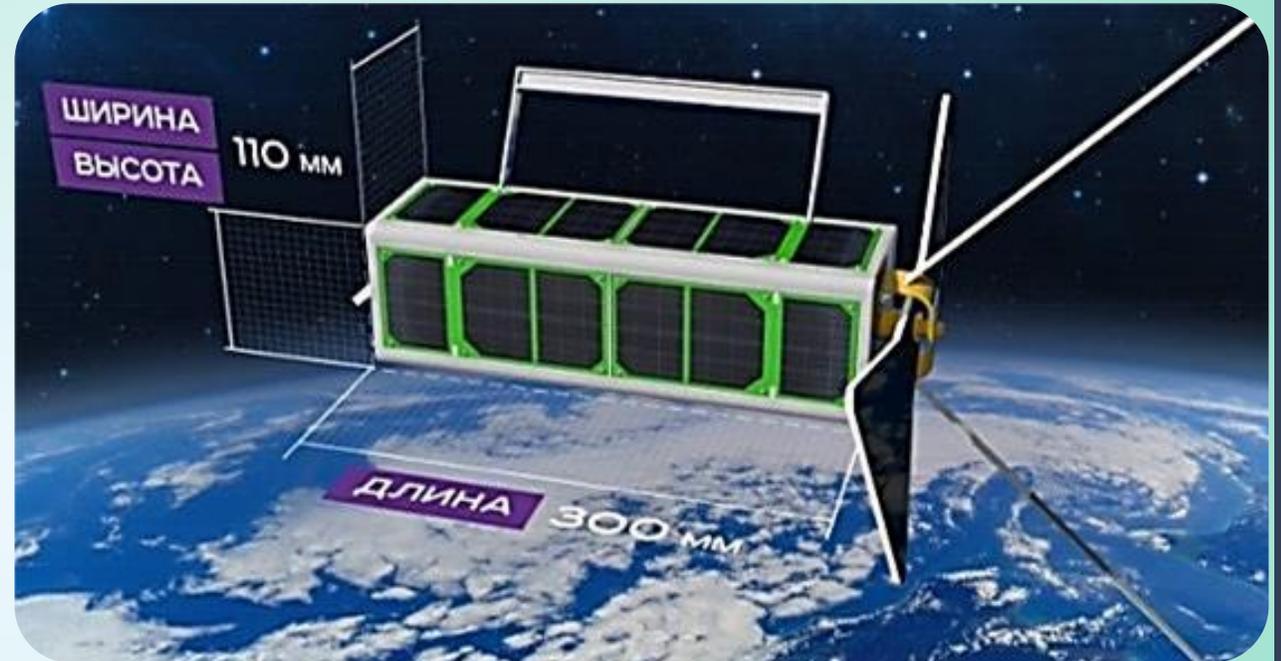


# Спутник Томск-ТПУ 120



Постоянное усложнение конструкций делает невозможным изготовление деталей традиционными методами. Им на смену приходят **аддитивные технологии**

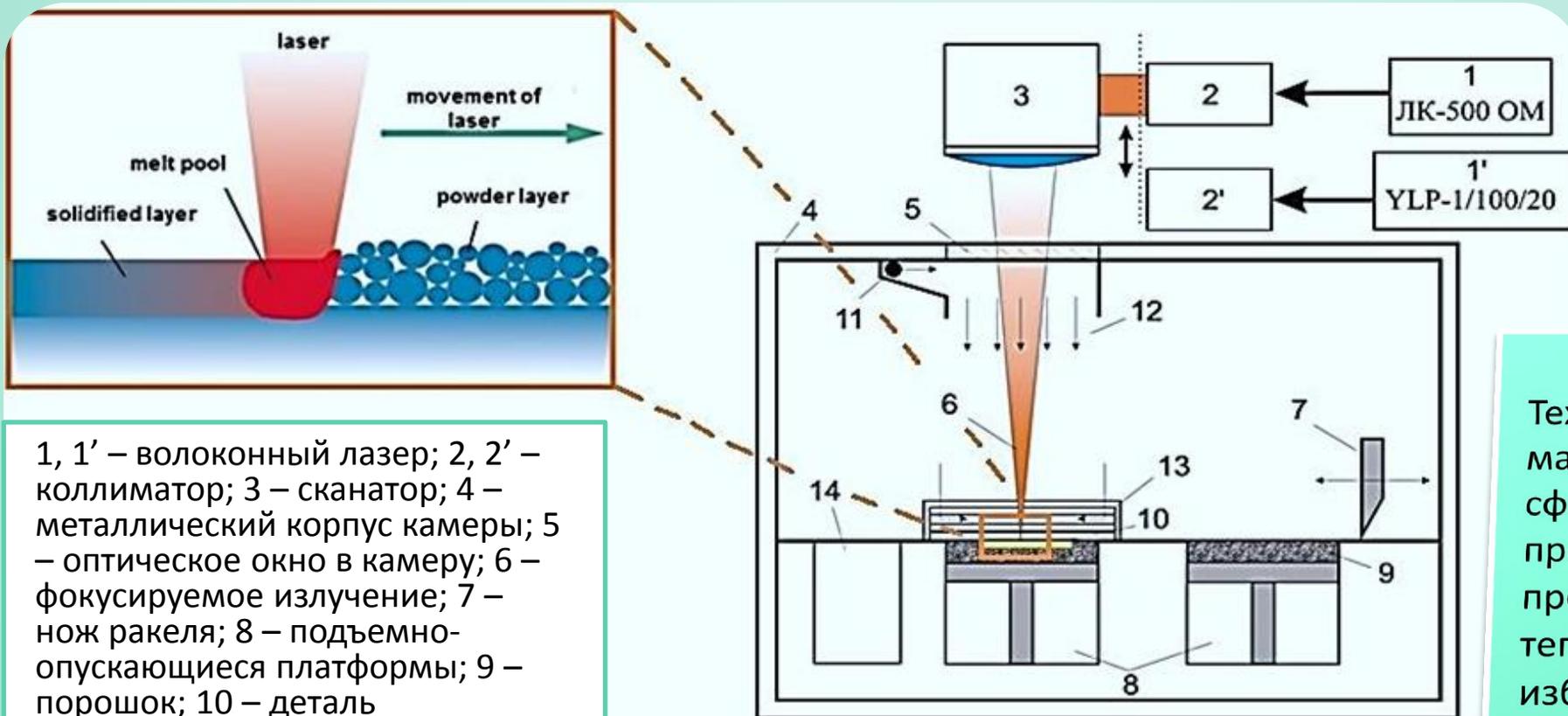
Это позволяет получать изделия с необходимой внутренней структурой. Находится тонкий баланс между требуемой прочностью и одновременно легкостью конечной конструкции



Первый космический аппарат, корпус которого изготовлен на 3D-принтере

# Методы послойного выращивания металлических изделий

Схема рабочей камеры установки лазерного селективного сплавления НИ ТПУ

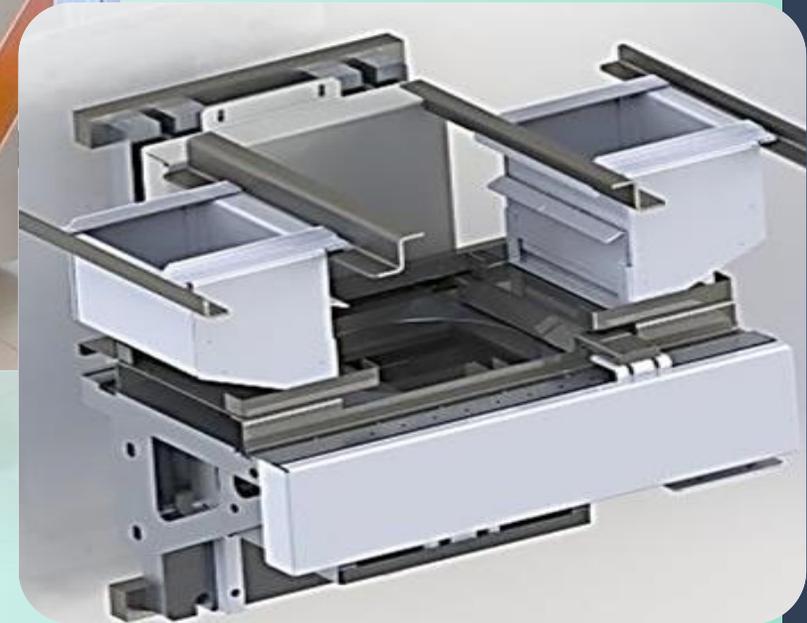
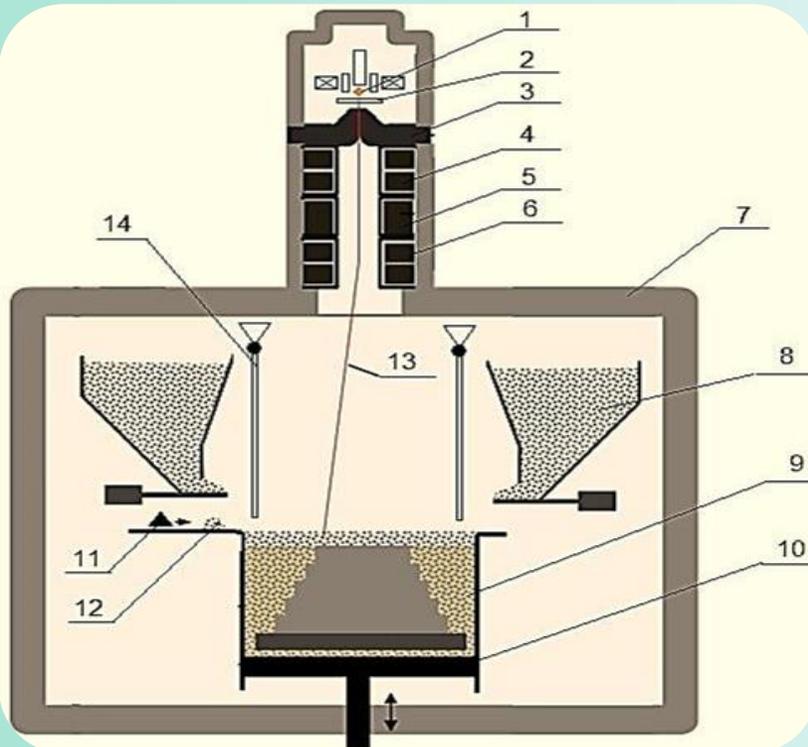


1, 1' – волоконный лазер; 2, 2' – коллиматор; 3 – сканатор; 4 – металлический корпус камеры; 5 – оптическое окно в камеру; 6 – фокусируемое излучение; 7 – нож ракеля; 8 – подъемно-опускающиеся платформы; 9 – порошок; 10 – деталь построения; 11 – подача инертного газа; 12 – газовый поток; 13 – отвод продуктов и газа из камеры; 14 – бункер для излишков порошка

**Метод 3D печати**  
Технология расплавления материала в заранее сформированном слое - процесс аддитивного производства, в котором тепловая энергия избирательно сплавляет области порошкового слоя

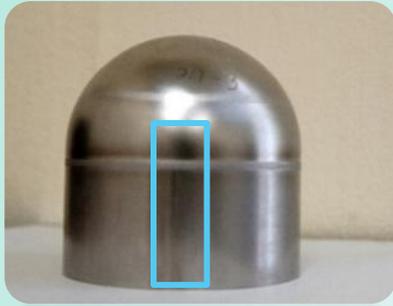
# Методы послойного выращивания металлических изделий

Схема работы установки селективного электронно-лучевого сплавления НИ ТПУ

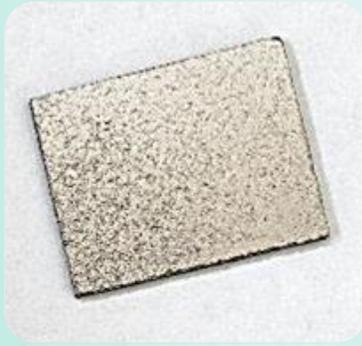


1 – плазма; 2 – цилиндр Венельта; 3 – анод; 4 – коррекция астигматизма; 5 – фокусирующая электромагнитная линза; 6 – отклоняющая электромагнитная линза; 7 – вакуумная камера; 8 – бункер с порошком; 9 – область построения; 10 – стартовая платформа; 11 – нож ракеля; 12 – порошок; 13 – электронный луч; 14 – шторка

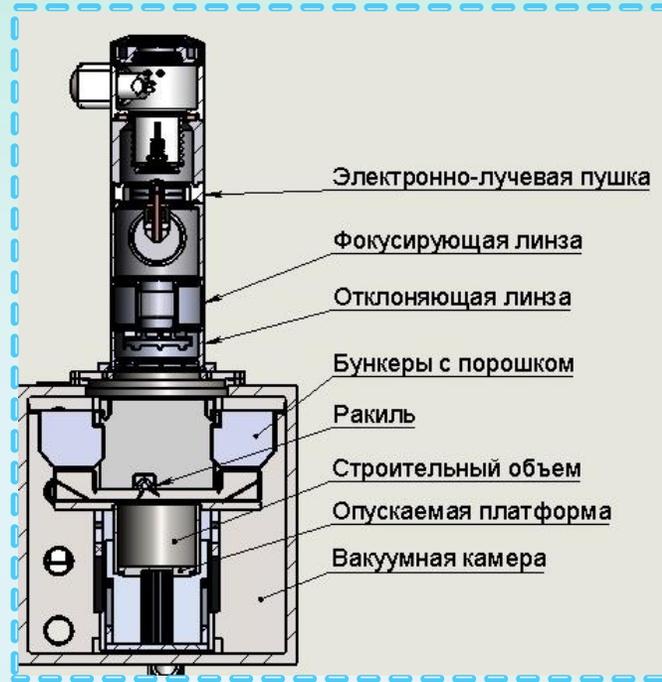
# Установка электронно-лучевого сплавления (разработана и реализована в ТПУ)



Наплавка проволоки, сварной шов

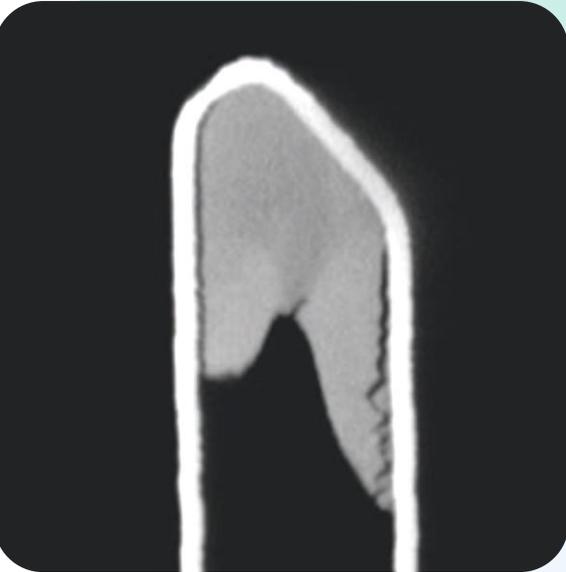
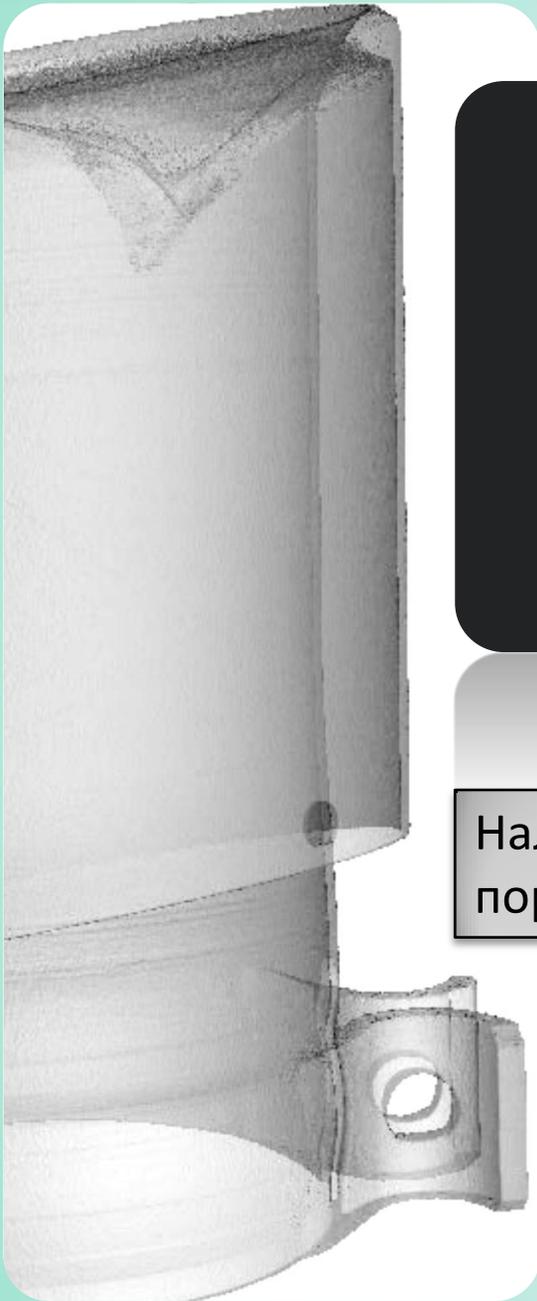


Сварка тонкостенной мембраны (350 мкм) и корпуса, напыление алюминия на керамику

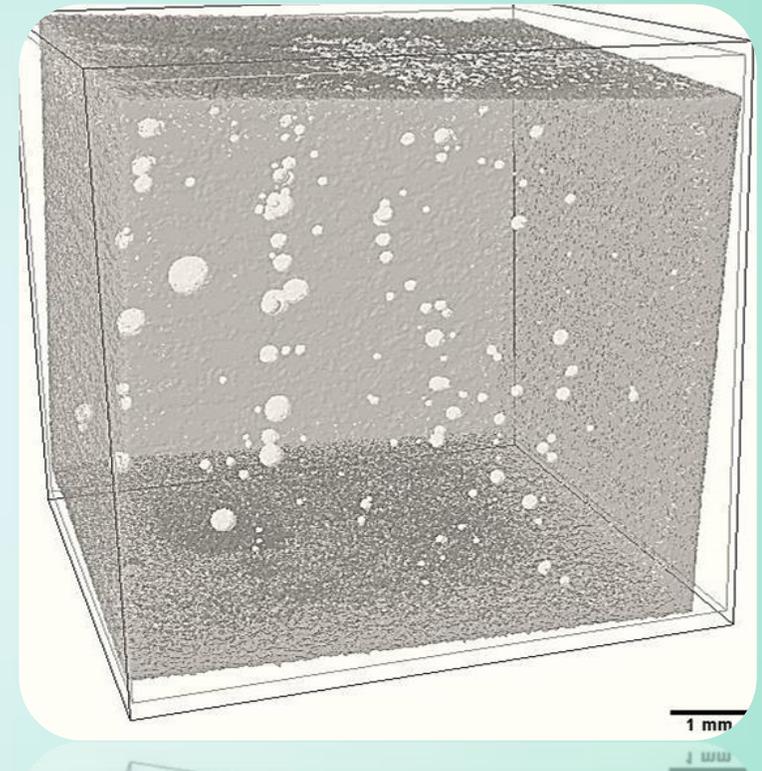


Показатель	Значение
Минимальная толщина слоя, мкм	50
Максимальная толщина слоя, мкм	300
Погрешность построения детали, мкм	100-200
Максимальная скорость сканирования, м/с	800
Область построения, мм	Ø150x150
Минимальный диаметр пучка, мкм	150
Программное обеспечение	Linux CNC

# Контроль качества материала и изделия при АТ



Наличие не проплавленного порошка в детали



Наличие пор в образце, полученном послойным сплавлением проволокой

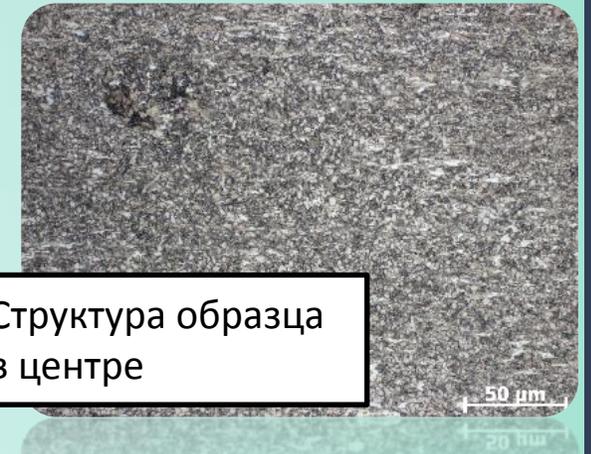
# Получение монолитных 3D образцов электроннолучевым сплавлением



Внешний вид полученного образца в поперечном сечении



Структура образца вблизи подложки



Структура образца в центре

**Режимы сплавления:** ускоряющее напряжение  $U_{\text{уск}} = 40$  кВ; ток луча  $I_{\text{луч}} = 2$  мА; скорость сканирования  $v = 25$  мм/с; диаметр электронного луча  $d_{\text{луч}} = 180$  мкм; штриховка - зигзагообразная; расстояние между треками в штриховке  $h = 100$  мкм. Выращивался образец с квадратным сечением со стороной 4 мм в плоскости подложки

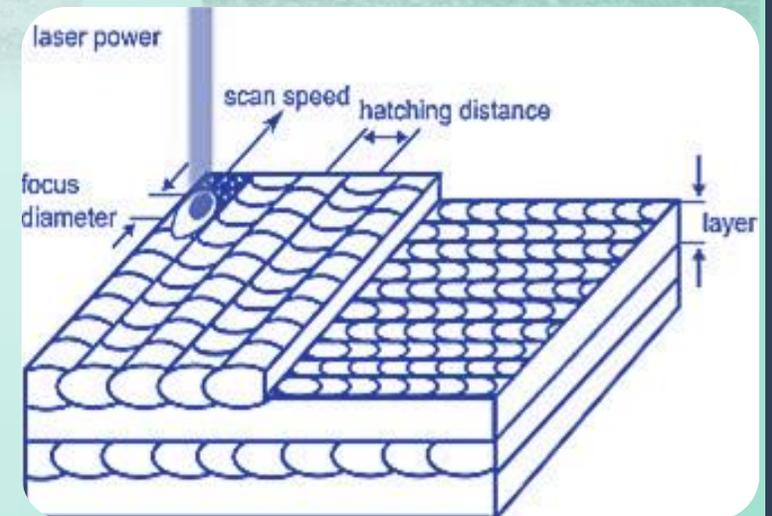
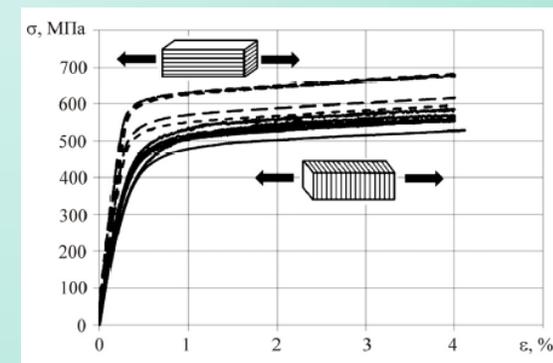
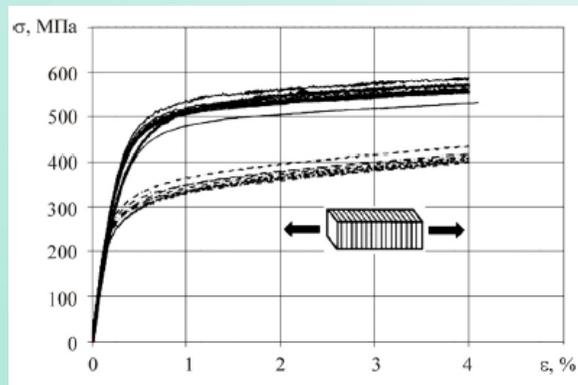
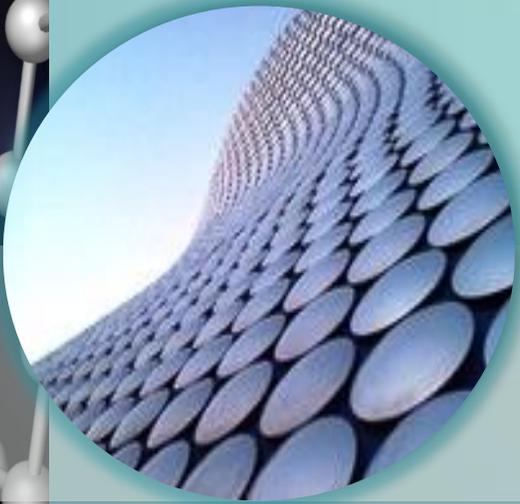
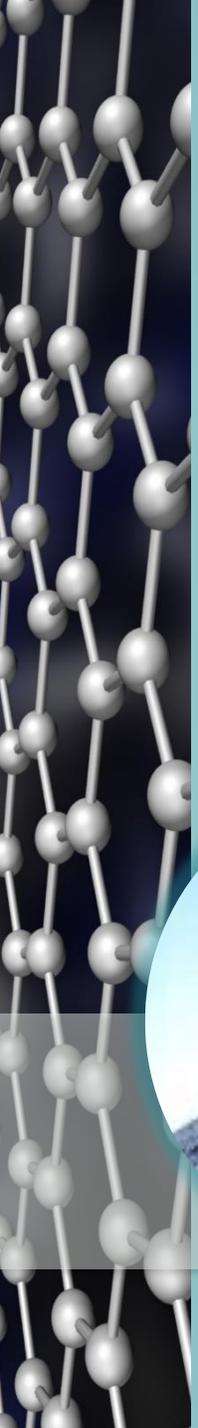


Схема сканирования

# Результаты испытаний СЛС-12Х18Н10Т на растяжение при разных технологических режимах изготовления

Технология изготовления	E, ГПа	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\Psi$ , %
Литой материал*	198	550-050	225-315	46-74	66-80
Вертикальные без ТО	156±12	660±14	445±10	56±1	35±6
Горизонтальные без ТО	200±19	826±37	580±38	57±3	42±6
Вертикальные с ТО	167±6	619±11	293±9	75±6	41±8

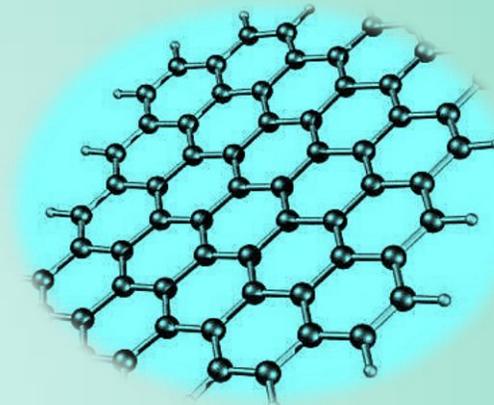




# Тренды создания современных материалов

# Двумерные материалы

- › **Графен** - это двумерная аллотропная форма углерода, в которой объединённые в гексагональную кристаллическую решётку атомы образуют слой толщиной в один атом
  - Самый прочный материал на Земле
  - В **300** раз прочнее стали
  - Лист графена площадью в **1 кв. м** и толщиной в **1 атом**, способен удерживать предмет массой **4 кг**



**Новоселов  
Константин Сергеевич**

Нобелевские лауреаты **2010** по физике

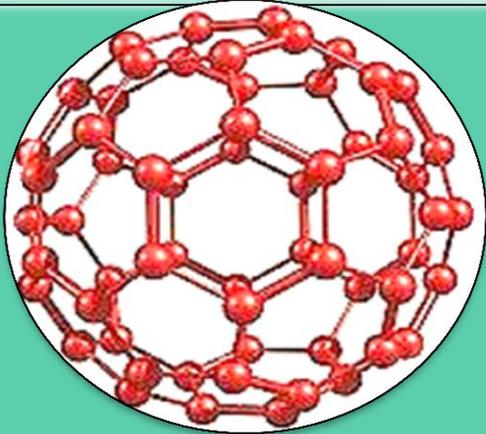


**Гейм  
Андрей Константинович**

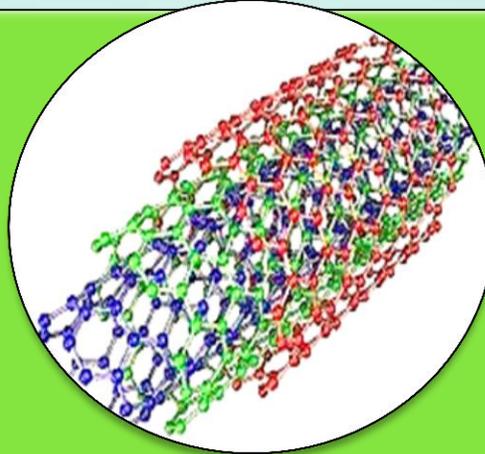
## Двумерные материалы

- › Российские ученые первыми в мире создали **двухмерное золото**
- › Ученые-исследователи Центра фотоники и двумерных материалов Московского физико-технического института выяснили, что известный мягкий металл золото несложно превратить в практически «плоскую» двумерную структуру
- › Для этого следует прикрепить атомы золота к специальной подложке, состоящей из соединений молибдена с серой
- › Новую технологию можно использовать при создании прозрачной электроники (из журнала *Advanced Material Interfaces*)

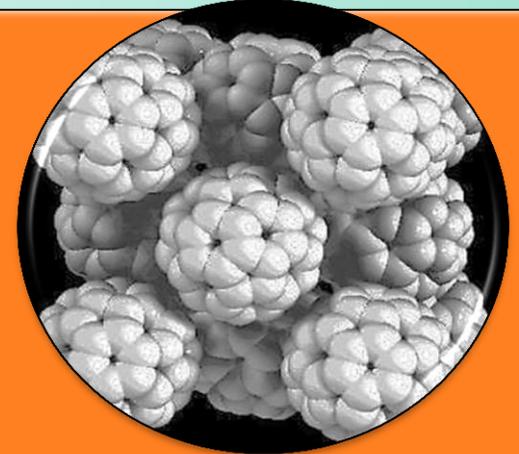
# Фуллерены и нанотрубки



**Фуллерен** - молекулярная форма углерода или аллотропная его модификация. Длинный ряд атомных кластеров  $C_n$  ( $n > 20$ ), которые представляют собой выпуклые замкнутые многогранники, построенные из атомов углерода и имеющие пяти- или шестиугольные грани (здесь есть очень редкие исключения)



**Углеродные нанотрубки** – материал, которым грезят многие ученые. Высокий коэффициент прочности, превосходная тепло- и электропроводность. Огнестойкость и весовой коэффициент на порядок выше, чем у большинства известных материалов. Представляют собой свернутый в трубку лист графена



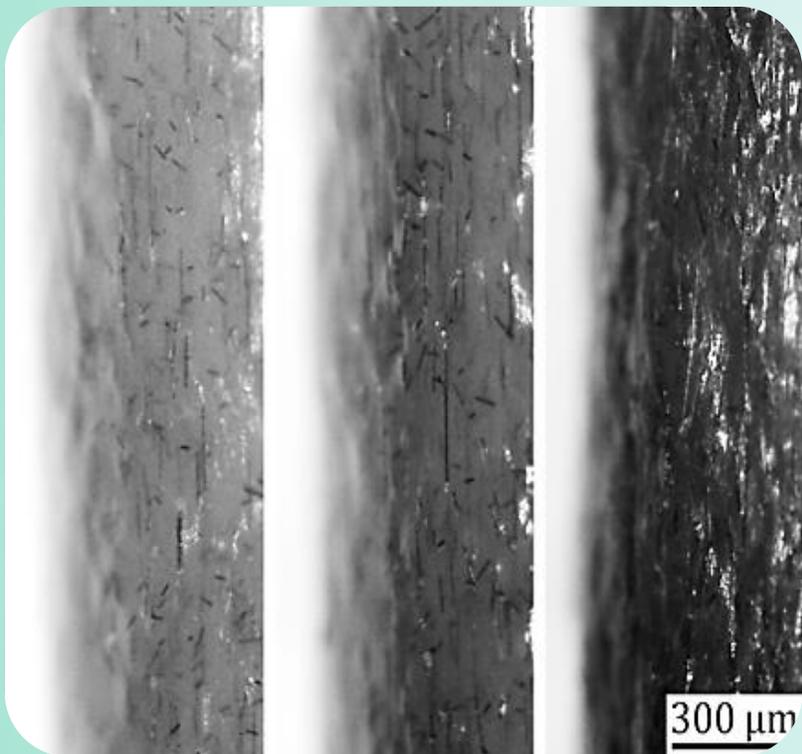
Новый материал **нафен** состоит из нановолокон оксида алюминия, сопоставимых по размеру с углеродными нанотрубками. Диаметр **10 нм**, что в **5 тыс. раз** тоньше человеческого волоса. Превосходит нанотрубки по однородности распределения в др. веществах после их смешивания

# Полимерные композиты для АД

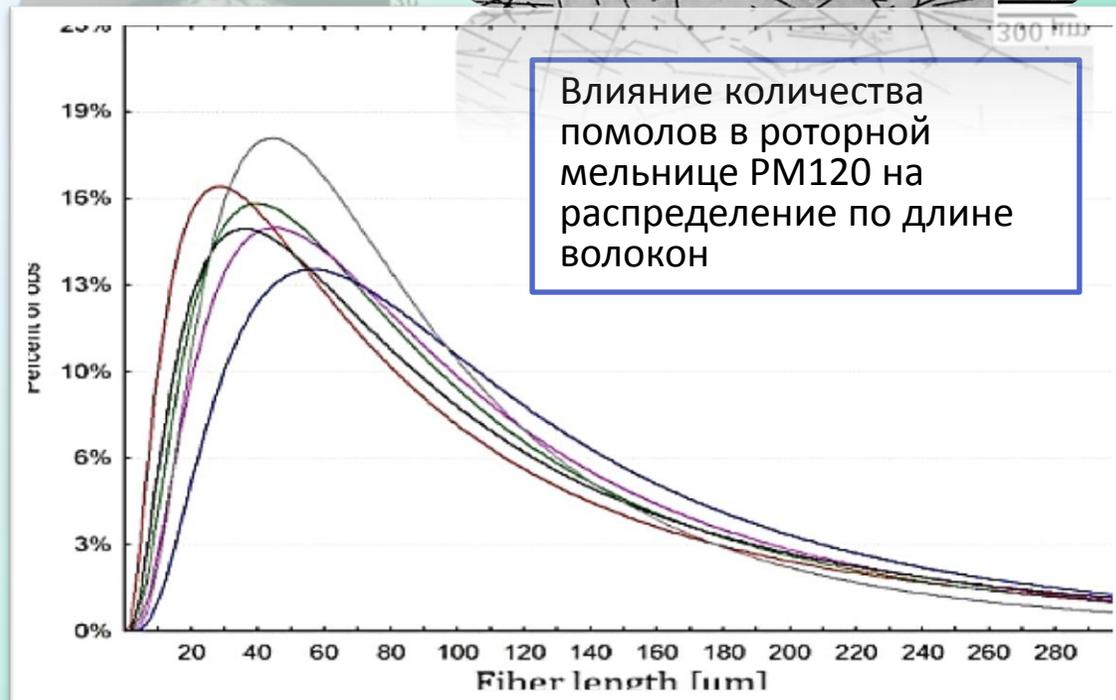
Поперечное сечение композиционн. филамента с добавлением углеродного волокна



Внешний вид волокон

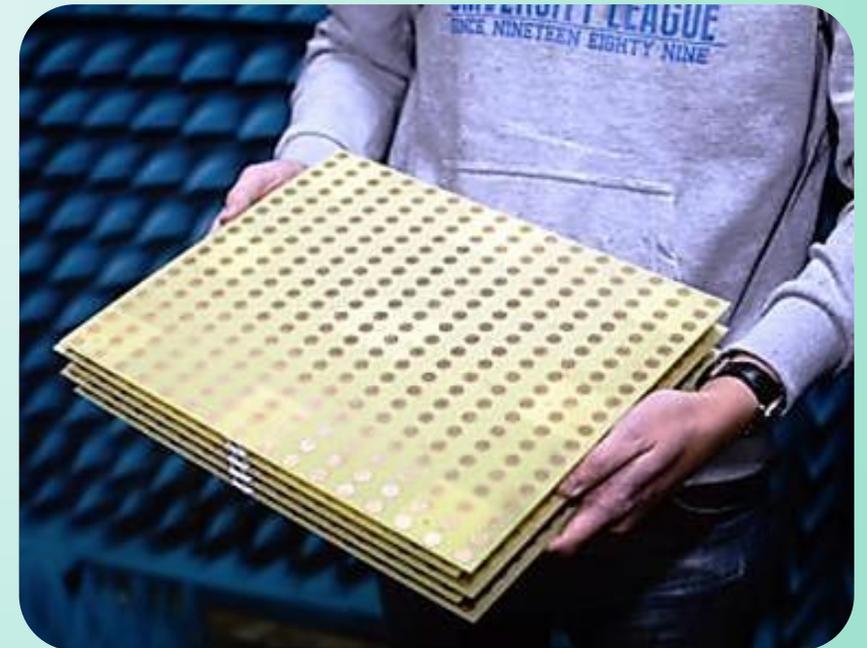


Внешний вид филаментов с содержанием углеродного волокна 3, 5 и 10 вес.%



# Метаматериалы

- › Специальные композиционные материалы, которые получаются искусственной модификацией внедряемых в них элементов
- › Изменение структуры осуществляется на наноуровне, что дает возможность менять размеры, формы и периоды решетки атома, а также иные параметры материала
- › Благодаря искусственному преобразованию структуры, модифицированный объект приобретает совершенно новые свойства, которых нет у материалов природного происхождения



# Гибридные материалы

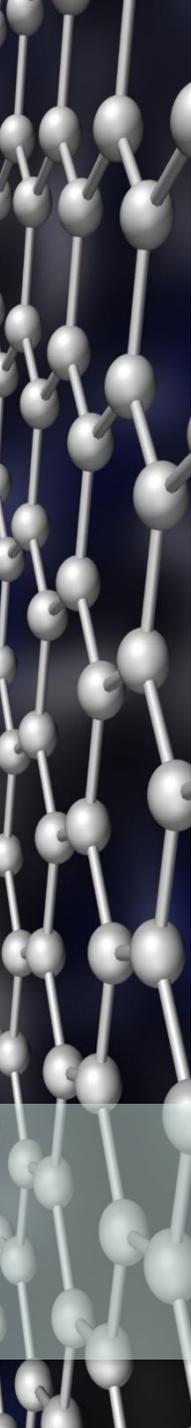


- › **Гибридные материалы** (англ. hybrid materials) получают за счет взаимодействия химически различных составляющих (компонентов), органических и неорганических, формирующих определенную (кристаллическую, пространственную) структуру, отличающуюся от структур исходных реагентов, но часто наследующую определенные мотивы и функции исходных структур

- › **Гибридные наноструктурные материалы** - новое направление в материаловедении
- › Композиты особого типа, обладающие свойствами, не достижимыми при использовании их отдельных составляющих
- › **Архитектуру** гибрида, определяемую формой и расположением «элементарных кирпичиков», из которых он составлен, можно рассматривать как дополнительную степень свободы, использование которой в разработке новых материалов может привести к радикально новым свойствам

# Ключевые вопросы

- › Основные этапы проектирования изделия. Роль материалов.
- › Чем обусловлена необходимость учёта при проектировании упрочняющих и защитных слоёв и покрытий и сварки.
- › Место аддитивных технологий в цифровизации производств.
- › Аддитивные технологии и материалы для них. Примеры применения материалов в аддитивных технологиях.
- › Особенности строения и структура металлических материалов, формируемых в условиях аддитивных технологий и их свойства.
- › Привести примеры современных трендов по созданию перспективных материалов.
- › Перечислить уникальные свойства, присущие перспективным материалам и примеры их применения.



**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!**