



«МАТИ»-Российский Государственный технологический университет
им. К.Э. Циолковского



Кафедра: Технология проектирования и производства двигателей
летательных аппаратов

Технологии аддитивного производства



Быстрое прототипирование

В настоящее время на различных стадиях проектирования и производства новых изделий начинают широко применяться методы послойного формирования трехмерных объектов непосредственно на основе их компьютерных моделей, которые называют технологиями быстрого прототипирования (Rapid Prototyping) или настольного производства (Desktop Manufacturing) или аддитивного производства.

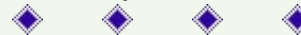
Полученные объекты могут использоваться:

- При конструировании сложных изделий, для создания их макетов;
- В качестве формообразующей оснастки для различных видов точного литья, в том числе выплавляемых моделей;
- Как мастер-модели при изготовлении электродов-инструментов для электроэрозионной и электрохимической обработки;
- При выполнении исследовательских работ для визуализации газо- и гидродинамических потоков внутри прозрачных моделей, изучения аэродинамических свойств, оптимизации геометрии деталей проточной части и др.;
- Для изготовления единичных деталей из пластика, керамики металлических и других материалов.



Развиваются несколько направлений послойного изготовления трехмерных объектов, основанных на:

- световой и лазерной стереолитографии;
- лазерной резке тонких листов из различных материалов (LOM – процесс);
- выборочном (селективном) лазерном спекании порошковых материалов;
- выборочном (селективном) электроннолучевом спекании порошковых материалов;
- послойном наложении разогретой полимерной нити;
- струйном напылении (объемной печати) и др.



Лазерная стереолитография

При лазерной стереолитографии (ЛС), спроектированный на компьютере трехмерный объект выращивается из жидкой фотополимеризующейся композиции (ФПК), последовательными тонкими (0,05-0,2 мм) слоями, формируемыми под действием сканирующего лазерного луча. ЛС получают сложные модели, достоинствами которых являются высокая точность, прочность, прозрачность, влагостойкость, легкость обработки поверхности, возможность склейки и т.д.



Параметры	Композиция НИЦТЛ-1	Композиция ИПЛИТ-1
Жидкий полимер		
Плотность, г/см ³	1.21	1.15
Вязкость, сП	260	540
D_p^* , мм	0.16	0.19
E_c^* , мДж/см ²	4.2	4.1
Усадка, %	14	7
Отвержденные образцы		
Ударная вязкость, кДж/см ²	6.3	2.6
Предел прочности, МПа	28	89
Твердость Нв, МПа	162	140

*) Параметры уравнения, связывающего толщину отвержденного слоя h с экспозиционной дозой E : $h = D_p \ln(E/E_c)$

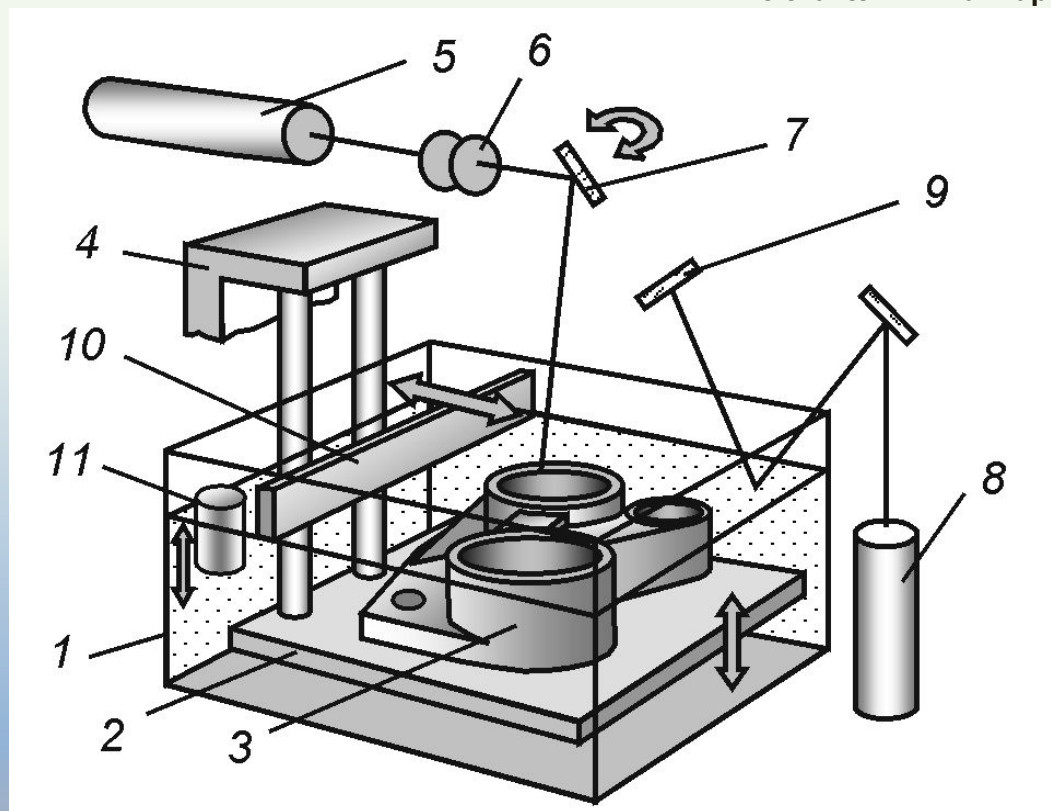
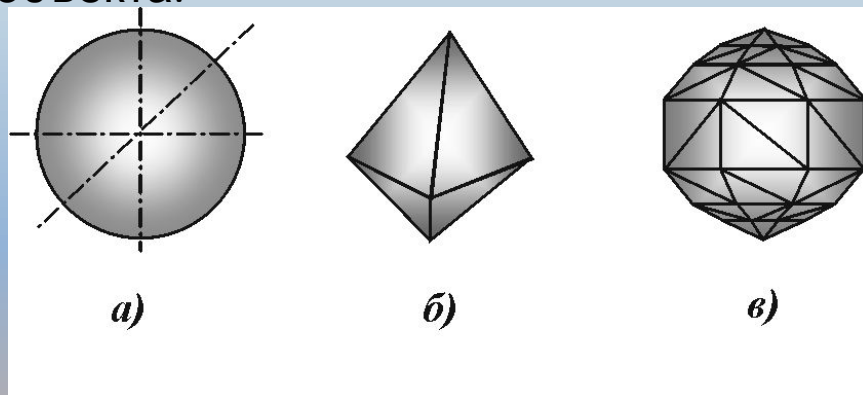


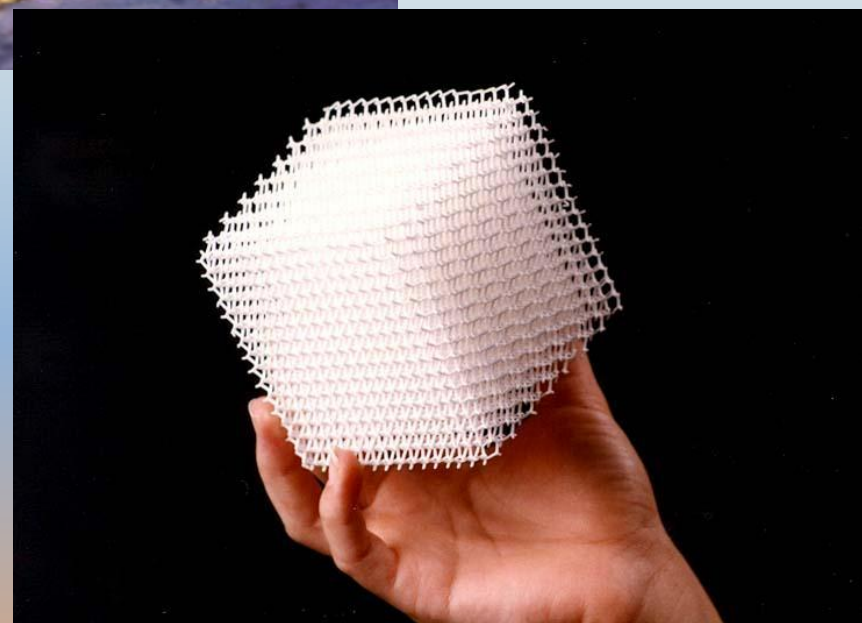
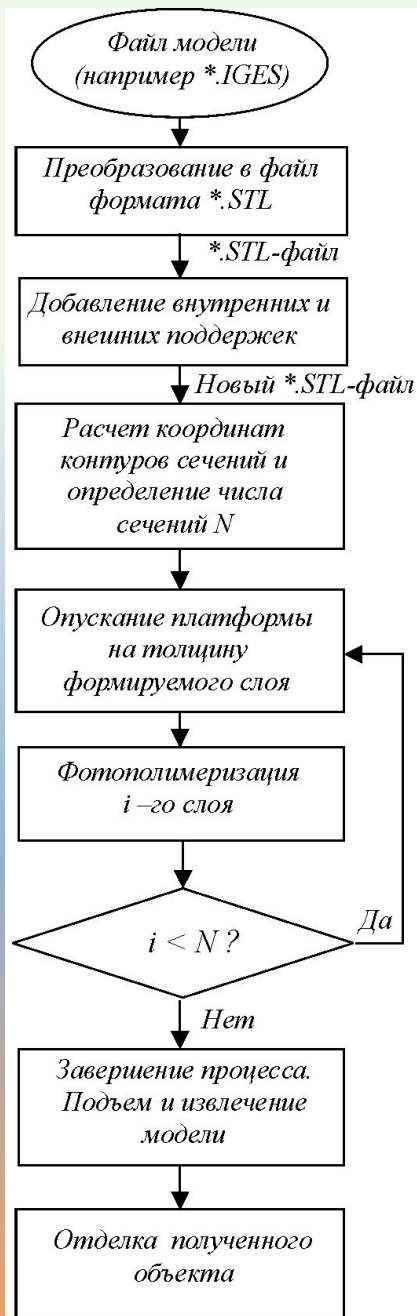
Схема установки для лазерной стереолитографии: 1 – ванна с фотополимером; 2 – платформа; 3 – модель; 4 – подъемный механизм; 5 – HeCd-лазер; 6 – линзы; 7 – система зеркал; 8 - HeNe-лазер; 9 – датчик уровня жидкости; 10 – нивелир; 11 - цилиндр



Для ЛС, как и других способов быстрого прототипирования, основанных на процессах послойного синтеза, используются математические модели в формате STL. В его основе лежит метод 3-х мерной триангуляции поверхности модели. Трехмерная триангуляция осуществляется треугольниками (рис. 2) и может быть сглажена геометрическими фигурами более высокого порядка, за счет чего достигается повышение точности синтезируемой поверхности. Использование триангуляции позволяет упростить расчет координат точек контуров сечений объекта.



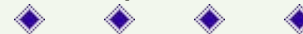
Триангуляция сферы: а – сфера; б – грубая триангуляция; в - тонкая триангуляция



Этапы создания объекта



«МАТИ»-Российский Государственный технологический университет
им. К.Э. Циолковского



Кафедра: Технология проектирования и производства двигателей
летательных аппаратов



Технология SGC (Solid Ground Curing)

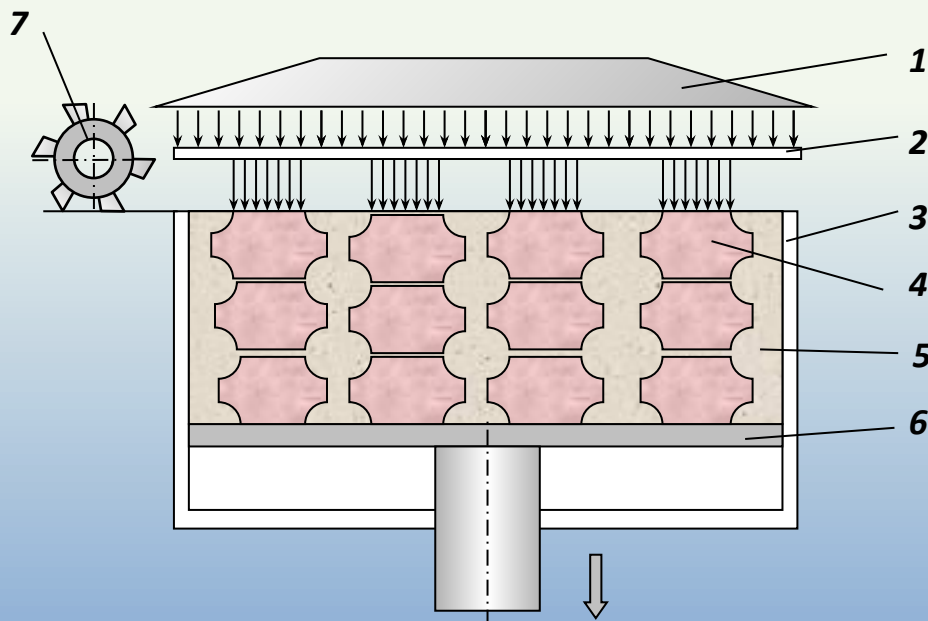


Схема процесса SGC: 1 – источник ультра-фиолетового излучения; 2 – стекло с системой тонера; 3 – камера; 4 – полимеризованные объекты; 5 – поддерживающая восковая композиция; 6 – платформа; 7 - фреза



С помощью специального тонера на стеклянной пластине создаётся прозрачное изображение соответствующего сечения объекта, образующее его фотомаску 2. На поверхность рабочего стола распылением наносится тонкий слой смолы, в заданную позицию устанавливается фотомаска, и на несколько секунд включается ультрафиолетовая лампа. В результате происходит полимеризация слоя смолы в местах соответствующих прозрачным участкам фотомаски. Не отвердевшая смола удаляется и образовавшаяся полость заполняется расплавленным быстро затвердевающим воском 5.

Построенный слой фрезеруется фрезой 7 для получения гладкой поверхности на заданной высоте. Далее деталь вновь подвергается воздействию ультрафиолетового излучения для окончательного формирования слоя. Затем процесс повторяется: создаётся фотошаблон для следующего слоя, опускается платформа 6, по рабочему столу распределяется новый слой жидкой смолы, и т.д.

Точность моделей составляет $\sim 0,08$ мм. Время формирования каждого слоя 70... 120 сек при толщине слоя 0,1... 0,2 мм.



«МАТИ»-Российский Государственный технологический университет
им. К.Э. Циолковского



Кафедра: Технология проектирования и производства двигателей
летательных аппаратов



Прототипы деталей, полученные по
технологии SGC

Селективное лазерное спекание (SLS)

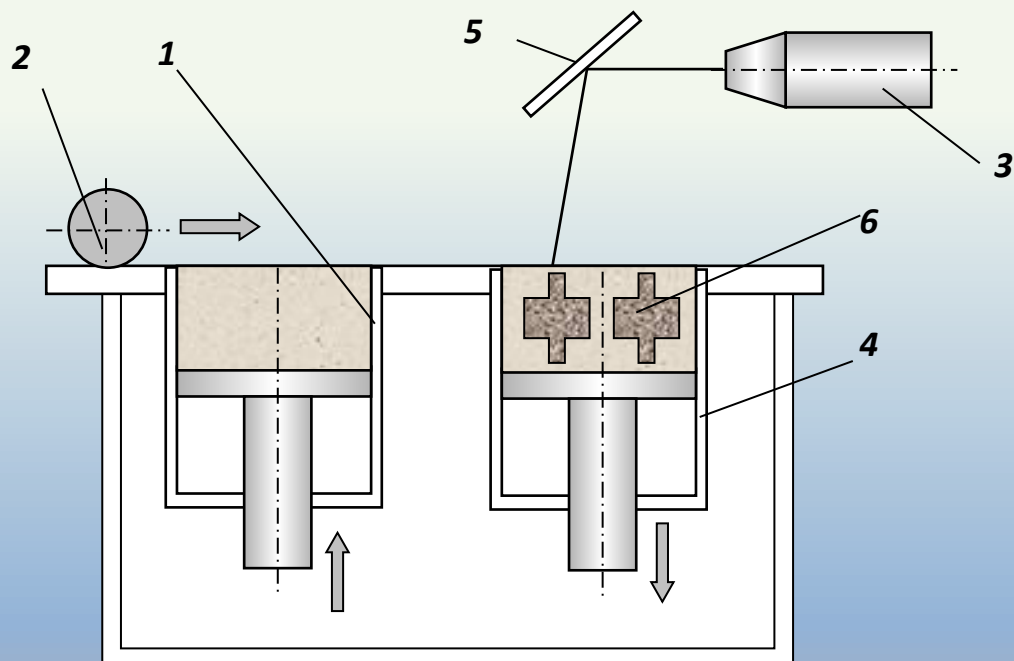


Схема процесса SLS. 1 - картридж с порошком; 2 – ролик; 3 – CO₂-лазер; 4 – рабочая камера; 5 – система отклоняющих зеркал; 6 – спекаемое изделие



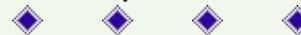
Селективное лазерное спекание (SLS) заключается в послойном спекании (плавлении) порошкового материала лазерным лучом. Тонкий слой плавящегося порошка, поступающего из картриджа 1, формируется раскатыванием роликом 2. Сканирующий луч лазера 3 обеспечивает спекание порошка в зонах, определяемых геометрией формируемого поперечного сечения. Затем наносится новый слой порошка, и процесс повторяется. Роль поддержек выполняет прикатываемый валиком порошок. Используются мелкодисперсные термопластичные быстро затвердевающие порошки, в частности, полимеров, керамик, металла.

В рабочей камере порошок предварительно подогревается до температуры близкой к температуре плавления легкоплавкой фазы, что позволяет использовать лазеры меньшей мощности и снизить тепловые деформации изделия. Чтобы избежать окисления порошка процесс выполняют в среде азота или инертного газа



Проводятся исследования по разработке технологии и оборудования с целью создания высокотемпературного SLS – процесса для получения металлических, керамических и композиционных деталей непосредственно из порошка. Одна из его разновидностей Laser-Engineered Net Shaping (LENS), предложенная фирмой Sandia National Laboratories США, позволяет получать детали из нержавеющей сталей, никелевых сплавов, и твердых сплавов на основе карбидов вольфрама и титана. Метод отличается тем, что в зону воздействия лазерного луча дополнительно вводится порошок или проволока из требуемого материала.

Для получения деталей из карбида кремния используют селективное лазерное реактивное спекание смеси порошков карбида кремния и кремния в среде, содержащей метан.

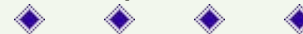


Параметр	Значение параметра
Формат файла	STL
Толщина спекаемого слоя	76...500 мкм
Тип и мощность лазера	CO ₂ -лазер, 50 Вт
Защитный газ	Азот, аргон
Габариты рабочего объема	∅305мм, высота 380 мм
Производительность	12...25 мм /ч

Основные параметры установки Sinterstation 2000



«МАТИ»-Российский Государственный технологический университет
им. К.Э. Циолковского

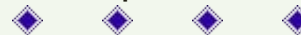


Кафедра: Технология проектирования и производства двигателей
летательных аппаратов

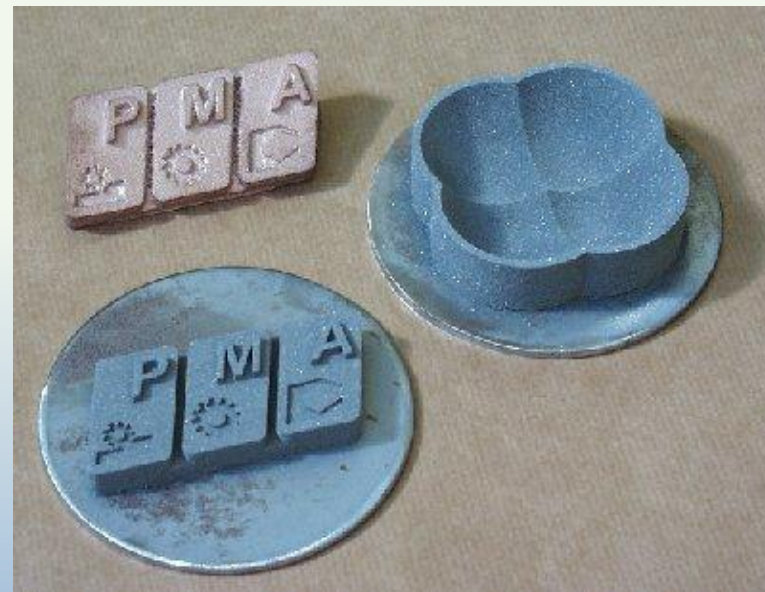




«МАТИ»-Российский Государственный технологический университет
им. К.Э. Циолковского



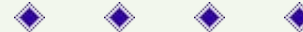
Кафедра: Технология проектирования и производства двигателей
летательных аппаратов



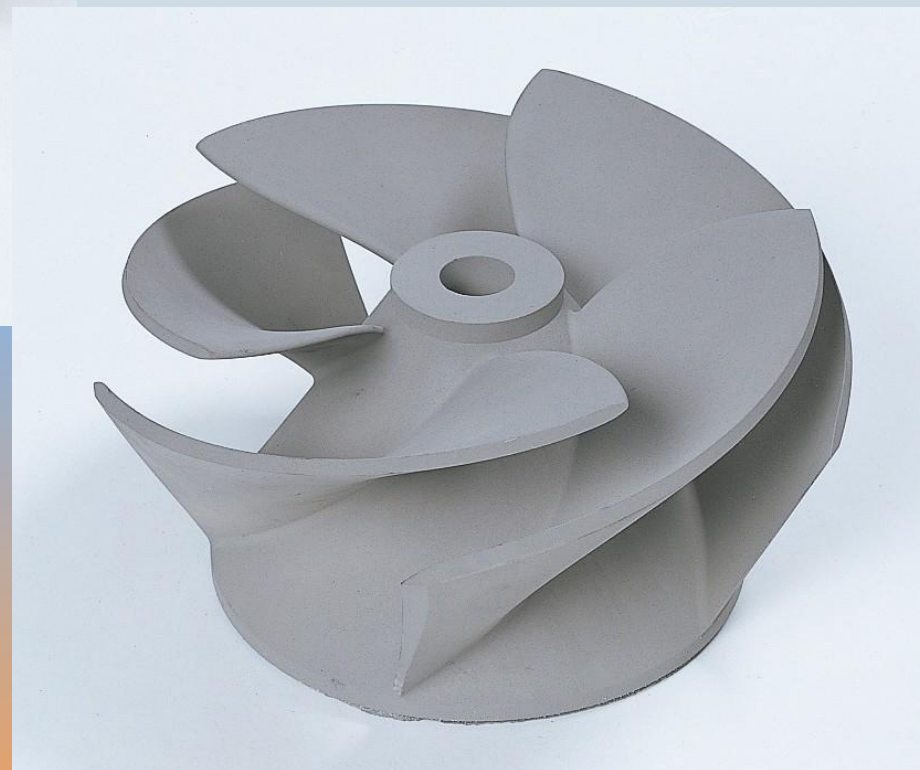
Плавление порошка происходит под действием YAG:Nd лазерного луча мощностью 100 ватт. Диаметр фокусного пятна 70-200 мкм. Толщина наносимого слоя порошка 20-100мкм. В установке могут быть изготовлены изделия размером до 300x350x300мм. В настоящий момент эта установка обладает наибольшей зоной изготовления из существующих на рынке установок СЛП.



«МАТИ»-Российский Государственный технологический университет
им. К.Э. Циолковского



Кафедра: Технология проектирования и производства двигателей
летательных аппаратов





«МАТИ»-Российский Государственный технологический университет
им. К.Э. Циолковского



Кафедра: Технология проектирования и производства двигателей
летательных аппаратов



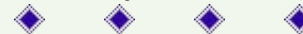
**После формирования и
спекания**



**После пропитки
бронзой**



**После финишной
обработки**



Для лазерного селективного спекания песчаных форм, в частности, используется установка EOSINT S 750. Она имеет размер рабочей зоны 720×380×380 мм. Толщина отдельного формируемого слоя – 0,2 мм, скорость формирования формы - 2500 см³/ч (для сравнения, при отверждении связующим на ProMetal® S-15™, 7500 см³/ч). Формовочный материал – плакированный полимером песок. После SLS получают сырую форму, отверждаемую в два этапа. Сначала поверхностное отверждение с помощью газовой горелки, затем объемное – в печи при температуре 300...350°С. Точность получаемых моделей несколько выше, чем при отверждении связующим.



ЛОМ - процесс

ЛОМ – процесс (Laminated Object Manufacturing) - технология изготовления изделий способом вырезания лазерным лучом или специальным ножом сечений из специальной бумаги или листового пластика толщиной 0,01...0,05 мм с последовательным автоматическим приклеиванием каждого слоя на "выращиваемый" объект.

Построение начинается с наложения слоя клейкой бумаги на рабочую платформу. После этого лазер вырезает контур первого слоя и разрезает на квадраты излишки материала, который во время построения играет роль поддерживающей структуры. Затем вырезается общий прямоугольный контур (обойма), не позволяющая кубикам размеченного для удаления материала отделяться в процессе построения. Платформа опускается, бумага подается вперед. Новый слой соединяется с предыдущим за счет прикатки разогретым валиком. Эти действия повторяются, пока не будет построена вся деталь.

Изделие, снимаемое с установки, имеет вид прямоугольного блока. Излишки материала, окружающего деталь, уже разделены на кубики, которые удаляются вручную.

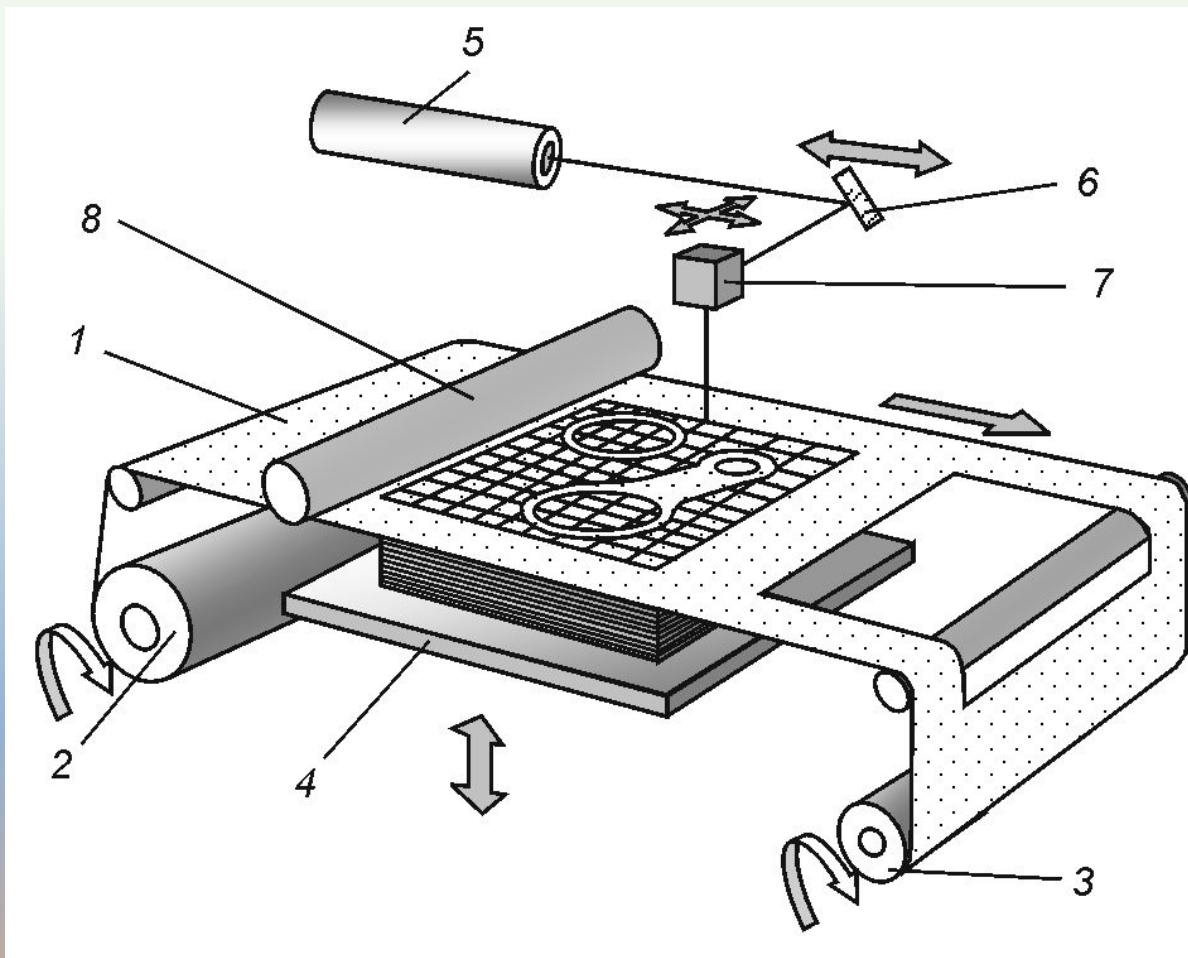
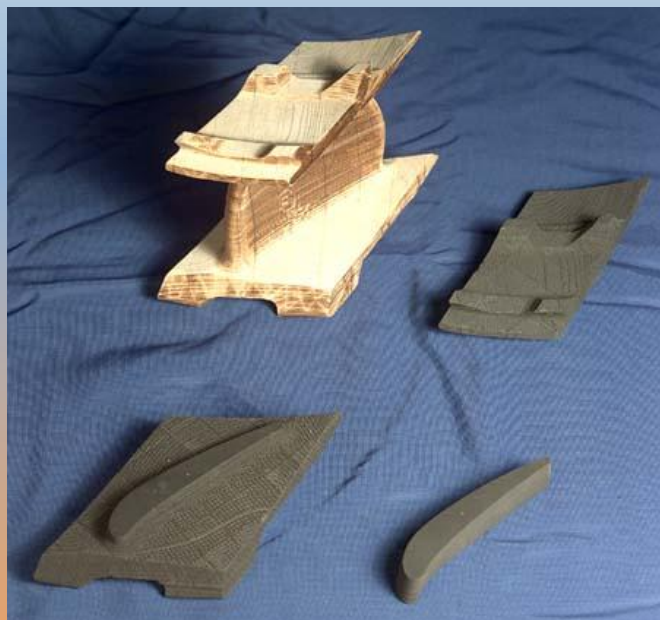
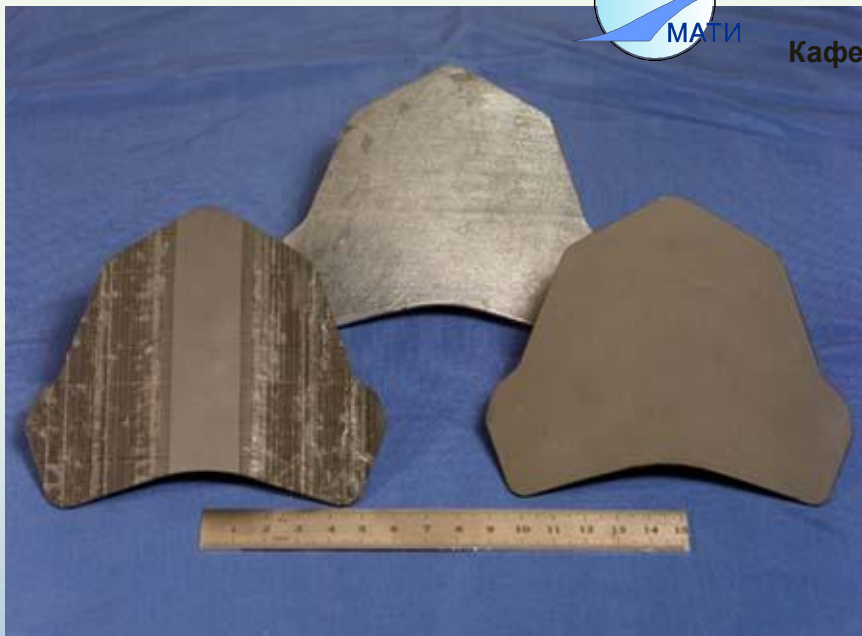
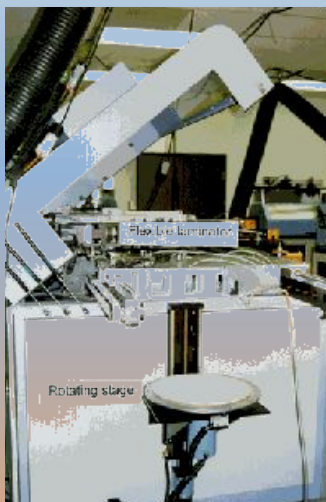
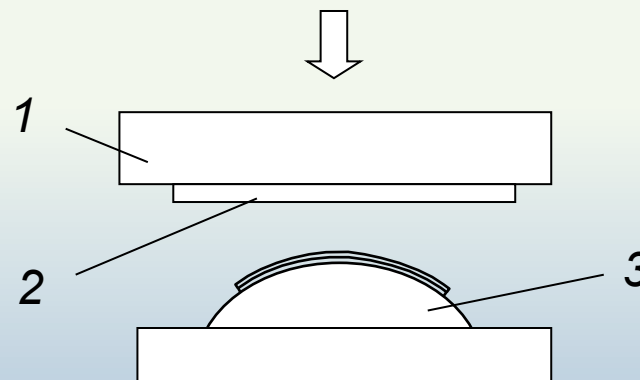
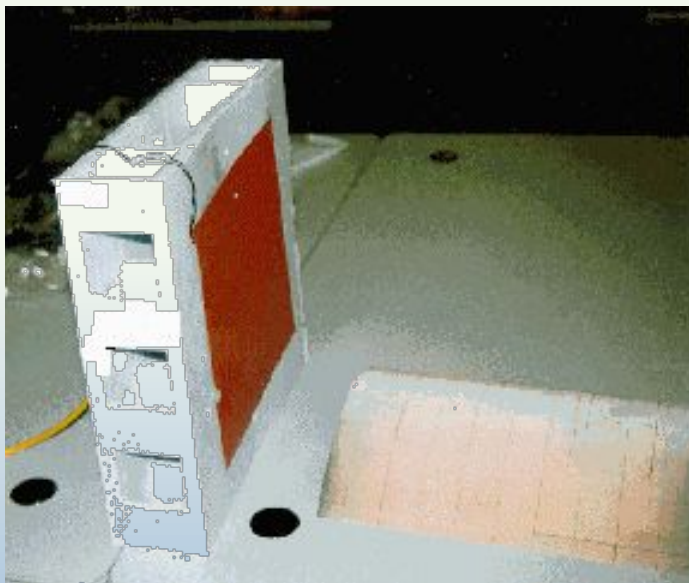
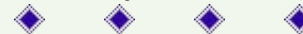


Схема LOM-процесса: 1 – лента; 2 – рулон; 3 – ведущая бабина;
4 – платформа; 5 – лазер; 6 – зеркало; 7 – оптическая головка;
8 – термовалик

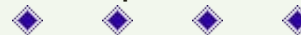


Модель	LOM-2030H	LOM-1015Plus
Максимальный размер детали	813×559×508 мм	381×254×356 мм
Точность построения	±0,25 мм	±0,25 мм
Мощность CO ₂ -лазера	50 Вт	25 Вт
Диаметр луча лазера	0,203...0,254 мм	
Листовой материал	бумага, пластик, керамика, композиты и другие материалы, покрытые связующим веществом	
Толщина материала	50...500 мкм	
Форма материала	рулон, ширина до 711 мм, ∅356 мм	рулон, ширина до 356 мм, ∅356 мм
Способ ламинирования	Прикатка валиком нагретым до 70...400°C	
Операционная система	MS WINDOWS NT	
Скорость резания, мм/сек	610	380
Программное обеспечение	LOMSliceTM	
Формат файла	STL	
Габариты	Установка: 2060×1410×1400 мм, пульт: 590×830×1400 мм, подача бумаги: 640×1040×910 мм	1226×743×1308 мм





Получение створок сопла из
керамокомпозитов SiC/SiC



Технология FDM

Технология *Fused Deposition Manufacturing* (FDM) основана на послойном наложении разогретой полимерной нити. Для формирования объектов используется термопластичный материал в виде нити диаметром 1,78 мм, подаваемый через экструзионную головку. В экструзионной головке материал нагревается до полужидкого состояния и выдавливается через сопло диаметром 0,1...1 мм с контролируемой скоростью. При перемещении головки материал тонкими слоями наносится на подложку. Последующие слои накладываются на предыдущие формируя объемное изделие. Наиболее часто для создания моделей способом FDM используют ABS-пластик (сополимер акрилонитрила, бутадиена и стирола), который поставляются в катушках. Применяют также литейный воск, полиолефин, полиамид.



Метод позволяет формировать сравнительно крупные объекты, например, на установке FDM Quantium их габариты достигают 600×500×600 мм при точности $\sim 0,1$ мм. Толщины слоев составляют 50...760 мкм. На этих установках используются две экструзионные головки: одна - для построения детали, а другая - для осаждения материала поддержки. После изготовления модели материал поддержки вымывается водным раствором в ультразвуковой ванне, а модель остается при этом гладкой и чистой, без рисков и царапин, с сохранением мельчайших деталей. Это дает неограниченные возможности построения деталей со сложной внешней и внутренней геометрией.

Поддержки для детали могут формироваться из того же полиэфирного материала, что и сама деталь, а в месте соединения поддержки с моделью система создает перфорацию, что облегчает процесс удаления поддержек.

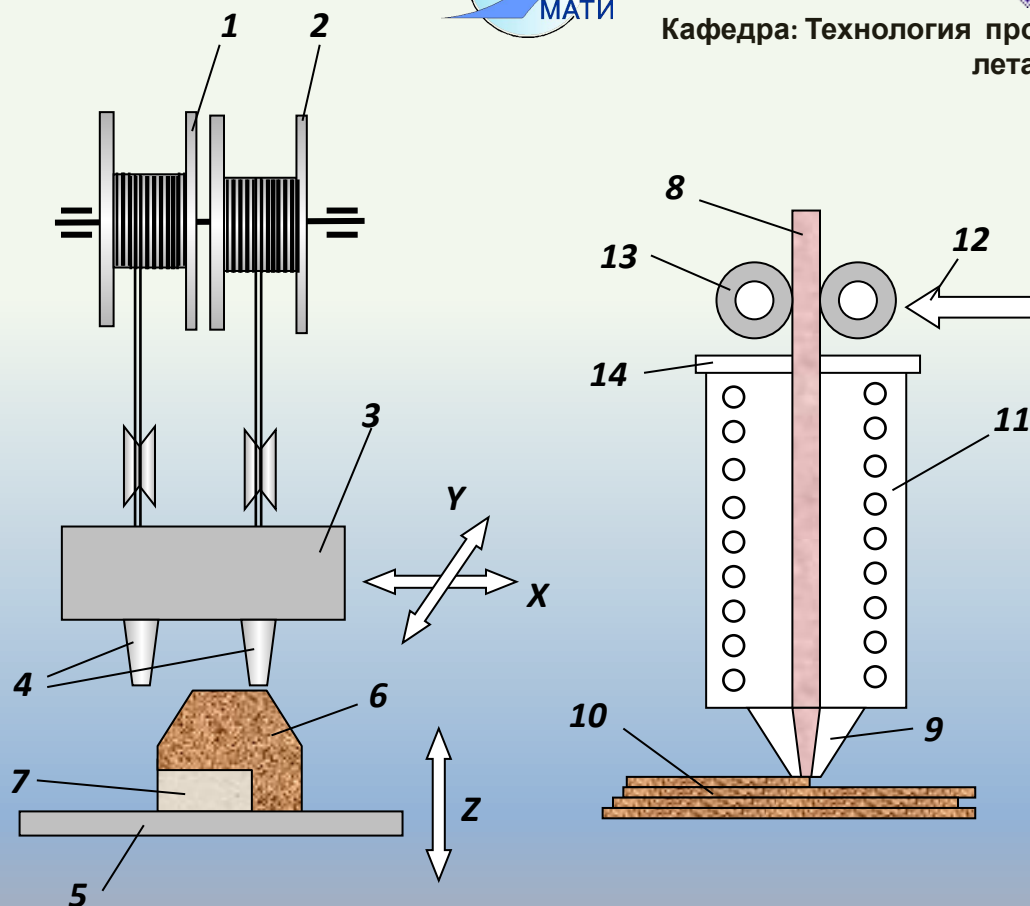


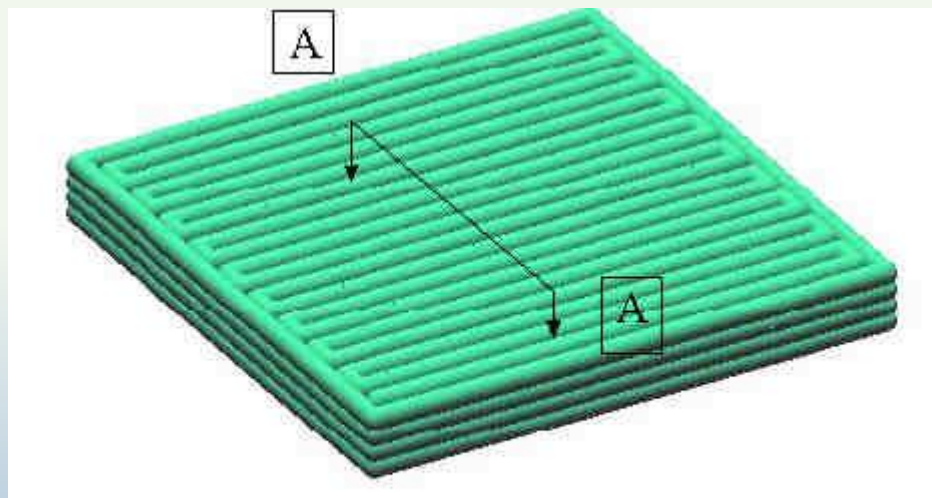
Схема процесса FDM (а) и экструзионная головка (б): 1, 2 – катушки с нитями из материала поддержки и основного материала соответственно; 3 – головка с фильерами; 4 – экструзионные головки; 5 – платформа; 6 - формируемое изделие; 7 – поддержка; 8 – нить; 9 – фильера; 10 – слои изделия; 11 – нагреватель; 12 – подача охлаждающего воздуха; 13 – механизм подачи нити; 14 – изолирующая панель



«МАТИ»-Российский Государственный технологический университет
им. К.Э. Циолковского



Кафедра: Технология проектирования и производства двигателей
летательных аппаратов





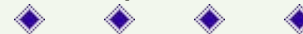
Лаборатория технологии проектирования и производства двигателей
петательных аппаратов



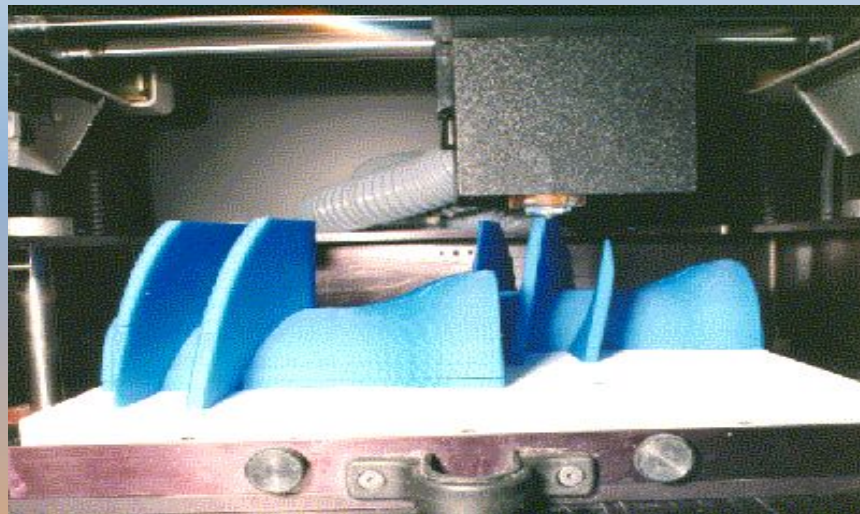
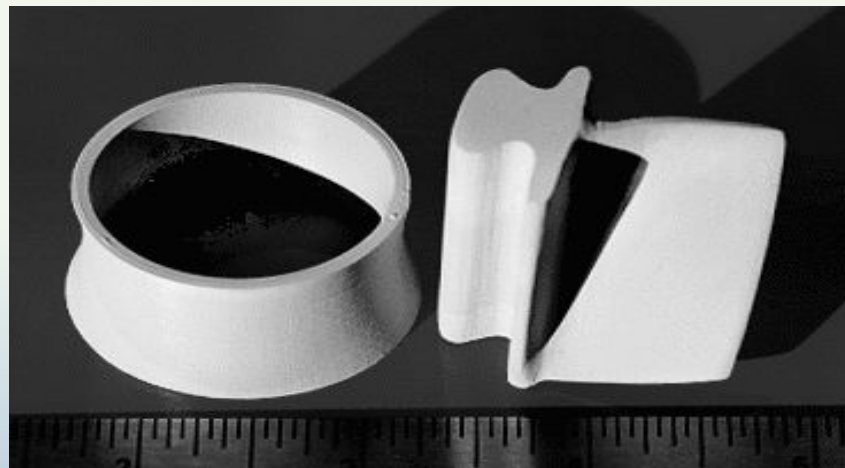
Рис.13 Пример прототипов, изготовленных из ABS пластика по технологии FDM



«МАТИ»-Российский Государственный технологический университет
им. К.Э. Циолковского

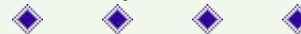


Кафедра: Технология проектирования и производства двигателей
летательных аппаратов





«МАТИ»-Российский Государственный технологический университет
им. К.Э. Циолковского



Кафедра: Технология проектирования и производства двигателей
летательных аппаратов



Stratasys Inc FDM TITAN



Stratasys Inc. FDM 1650



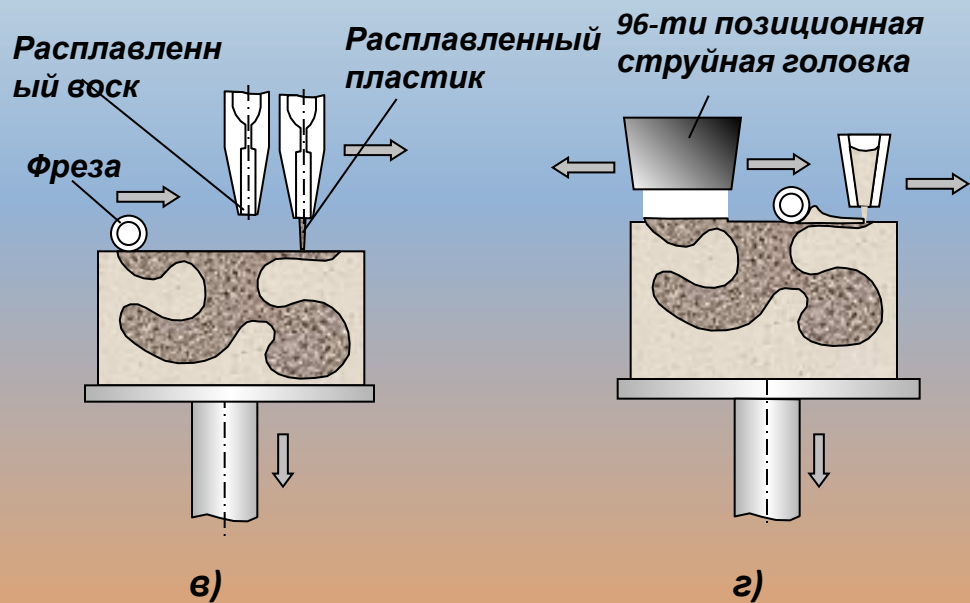
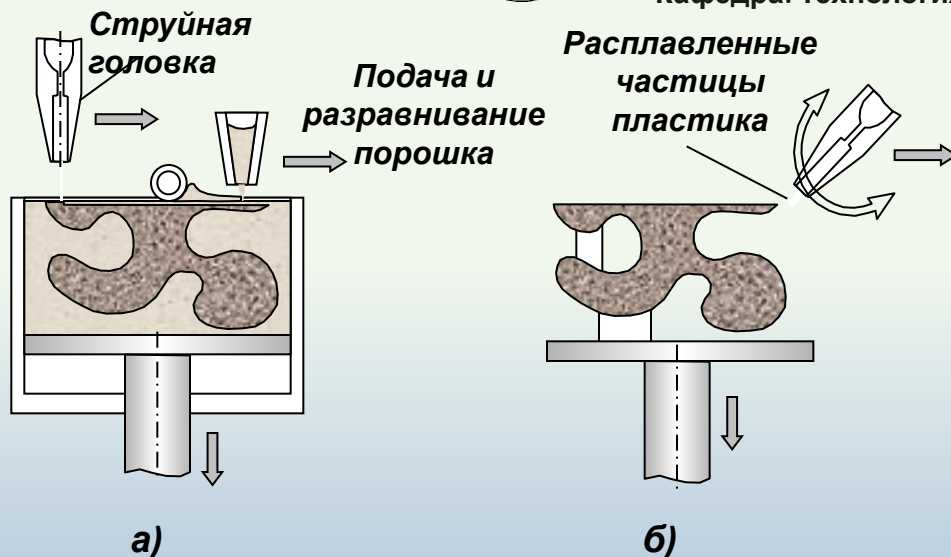
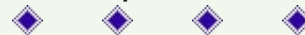
Объемные (3D) принтеры

Объемные (3D) принтеры используются в основном для визуализации сложных объектов при проектировании.

Объемные принтеры строят физические модели из материала, подаваемого из одной или нескольких струйных головок. Наиболее часто используются две группы способов: струйного формирования моделей напылением слоев воскообразных материалов и на основе послойного нанесения и связывания порошковых материалов связующими на водной основе.

Обычно 3D принтеры не дают высокой точности и прочности готового прототипа, однако механических свойств таких прототипов достаточно для визуализации разрабатываемого изделия. Стоимость прототипов, изготовленных на 3D принтерах, составляет от 15 до 35 долларов.

Для размещения 3D принтеров не требуется специальных приспособлений и помещений, они могут устанавливаться непосредственно, у рабочего места конструктора. Кроме этого, 3D принтеры не используют вредные материалы или процессы.

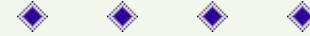


Различные конструкции
объемных принтеров: а -
фирмы Soligen (США); б –
ВРМ (США); в - Model Maker
фирмы Sanders (США); г -
Multi-Jet Modeling фирмы
3D Systems



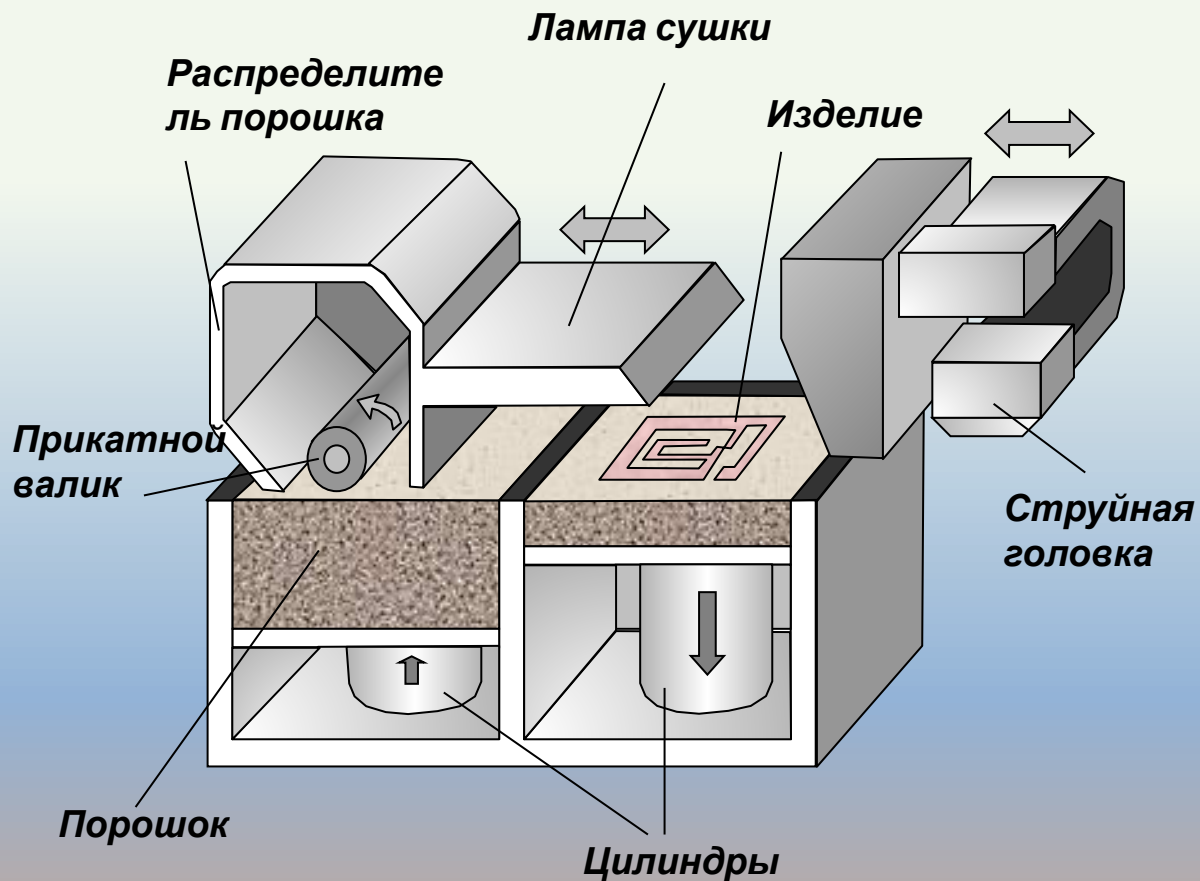
В принтерах работающих по схемам (а), (г) в качестве материала для изготовления моделей используются специальные желатиновые, крахмально-целлюлозные порошки или гипс. Жидкий клей на водной основе, поступающий из одной или многоструйных (96, 128) головок, связывает частицы порошка, формируя контур одного сечения модели. Затем рабочая ёмкость опускается на толщину одного слоя; по всему объёму ёмкости, распределяется новый слой порошка, инжекционная головка напыляет связующее на контур следующего сечения, и т.д. Используя связующее разного цвета, можно получать цветные и многоцветные модели.

В 3D принтерах, работающих по баллистическому принципу (схема б), предложенному фирмой ВРМ (США), формирование модели производится разбрызгиванием пластика или воска пьезоэлектрической головкой. Капли попадают в точно определенное место, застывая и образуя, таким образом, деталь. Головка образует капли размером 50 мкм с частотой 12500 капель в секунду.

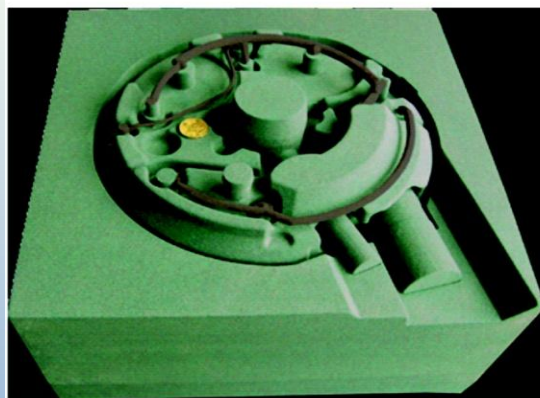


Во многих случаях не требуется формирование "поддержек", использования растворителей или процессов доработки модели. Иногда формируют поддержки из водорастворимого полимера (полиэтилен-гликоля), которые удаляются после синтеза модели.

В объемных принтерах работающих по схеме (в) используются две экструзионные головки наносящие слои материалов с разными температурами плавления. После формирования модели более низкоплавкий материал, выполняющий роль поддержки, удаляется выплавлением.



Конструкция объемного принтера ProMetal



«МАТИ»-Российский Государственный технологический университет
им. К.Э. Циолковского

Кафедра: Технология проектирования и производства двигателей
летательных аппаратов



Установка S-Print™ для получения
песчаных форм размерами 750×380×400
мм.



«МАТИ»-Российский Государственный технологический университет
им. К.Э. Циолковского



Кафедра: Технология проектирования и производства двигателей
летательных аппаратов



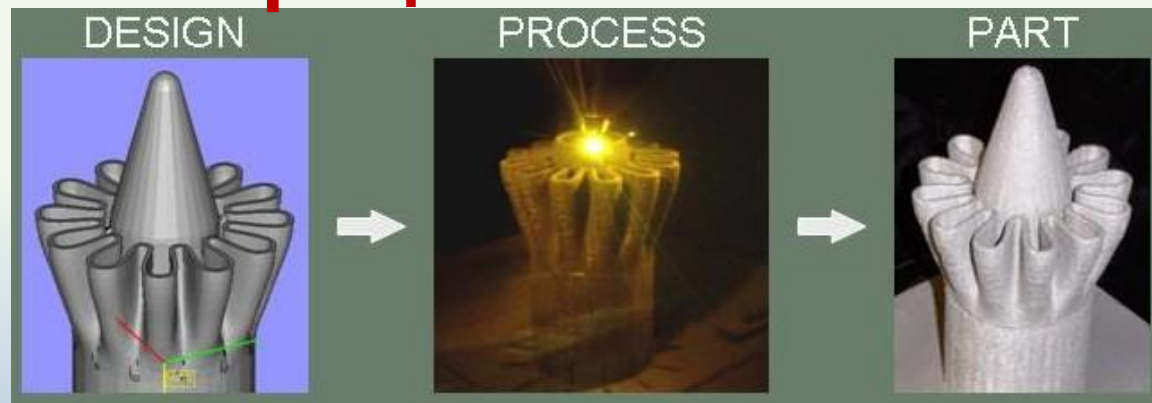
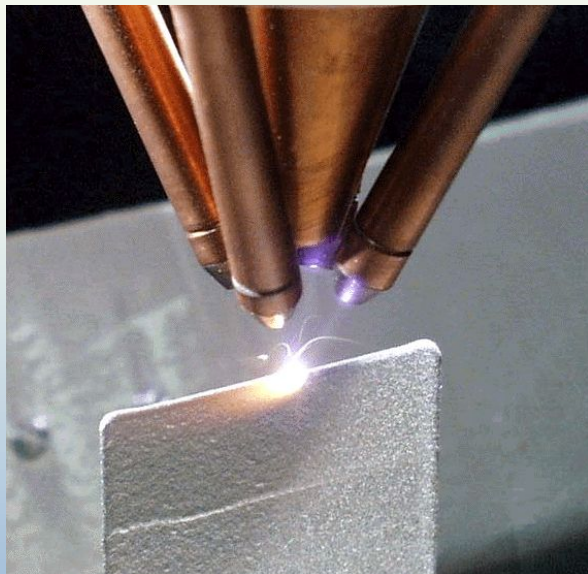
Установка ProMetal®
S-15™ для
получения песчаных
форм размерами
1500×750×700 мм.



«МАТИ»-Российский Государственный технологический университет
им. К.Э. Циолковского

Кафедра: Технология проектирования и производства двигателей
летательных аппаратов

LENS - процесс

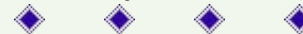


LENS (Laser Engineered Net Shaping)

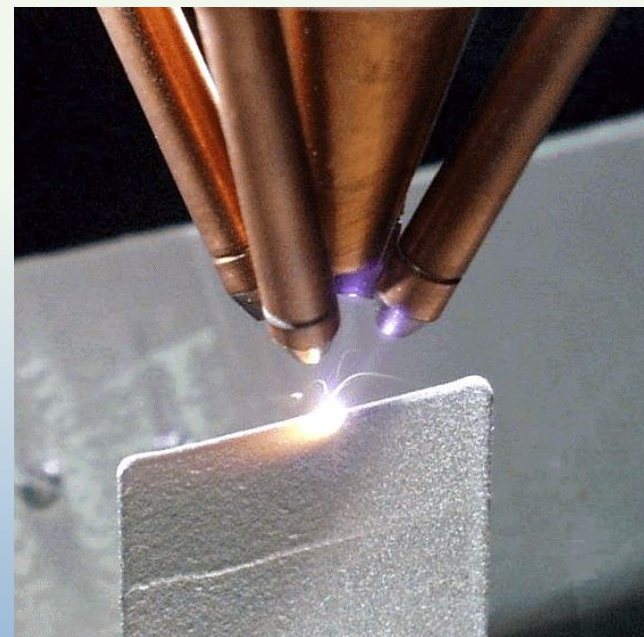




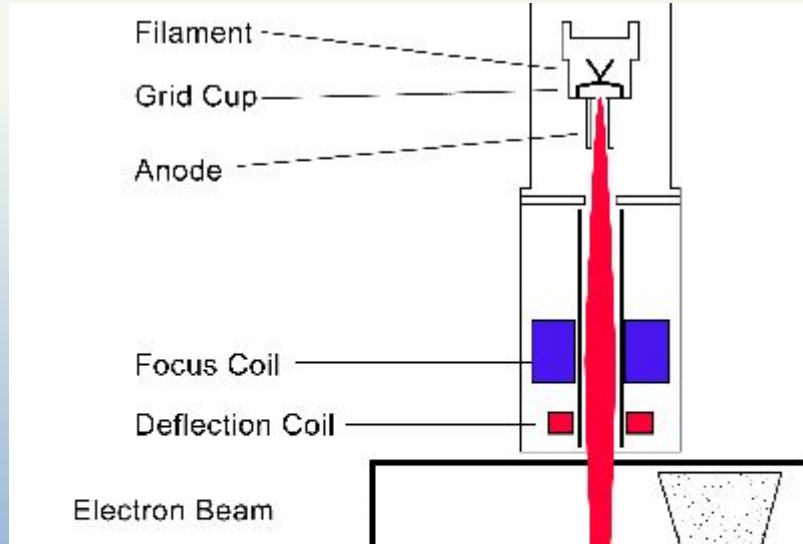
«МАТИ»-Российский Государственный технологический университет
им. К.Э. Циолковского



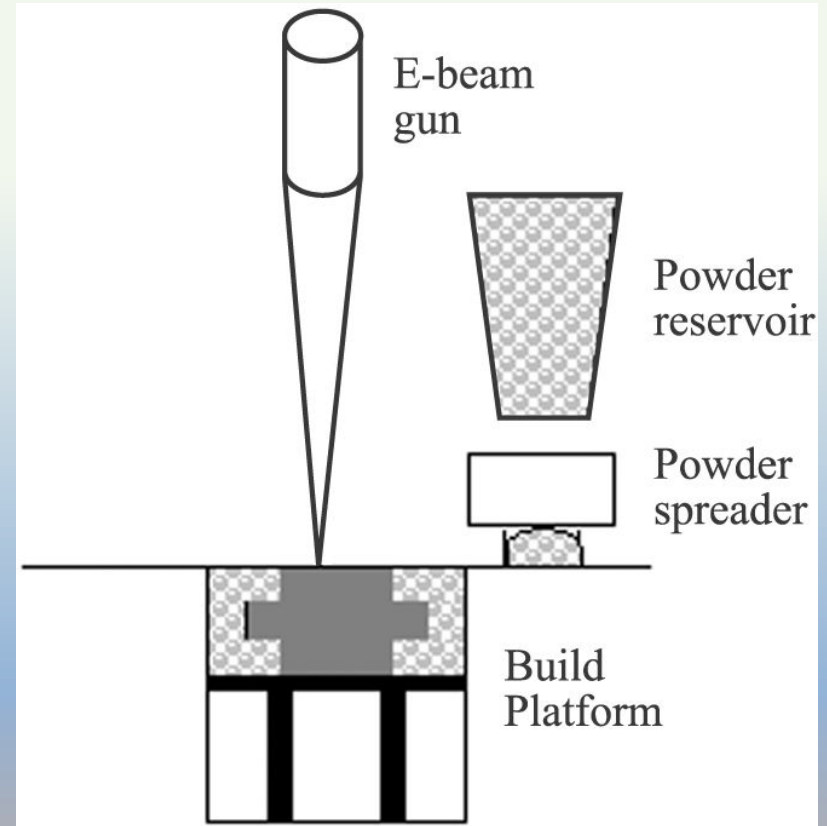
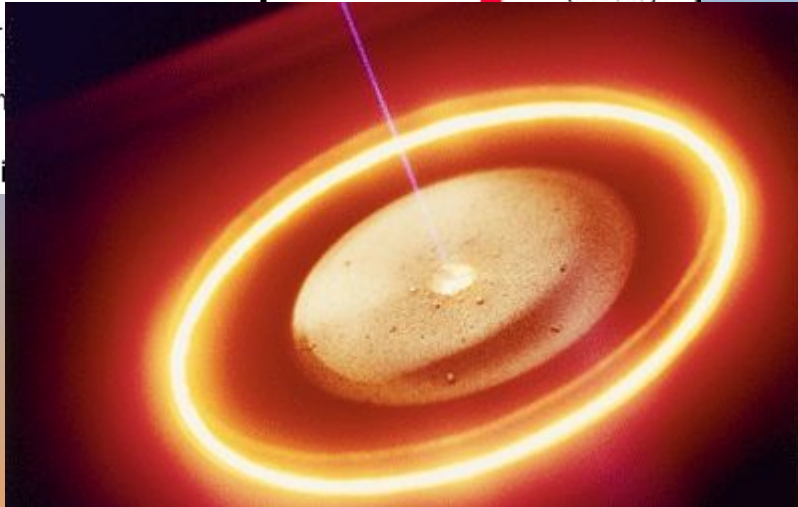
Кафедра: Технология проектирования и производства двигателей
летательных аппаратов



**Optomec Inc. Laser Engineered Net Shaping (LENS
750)**

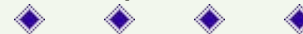


Powder
Vacuum
Bu

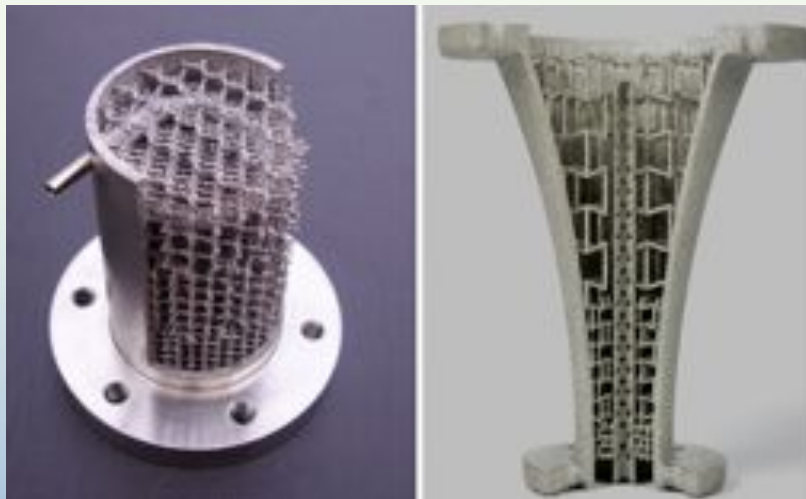


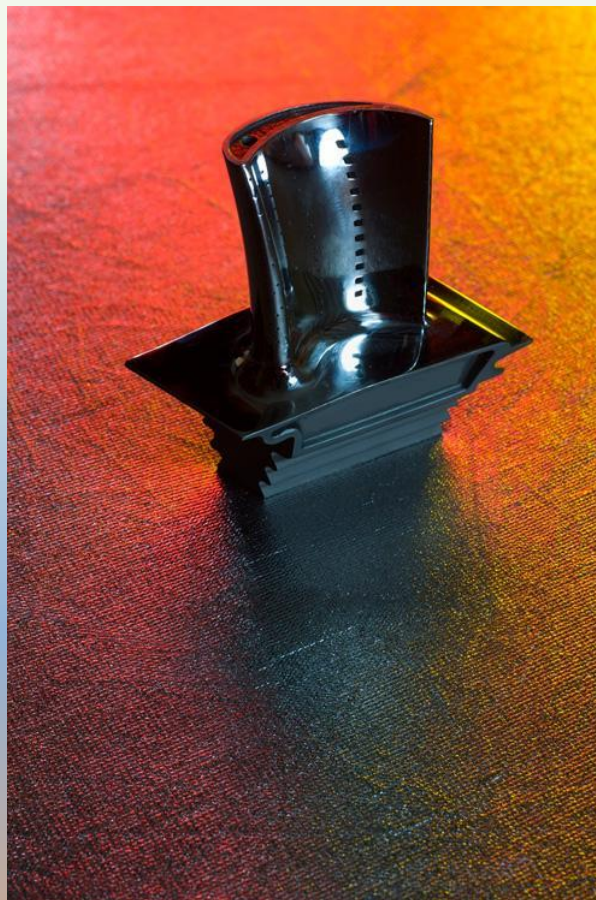
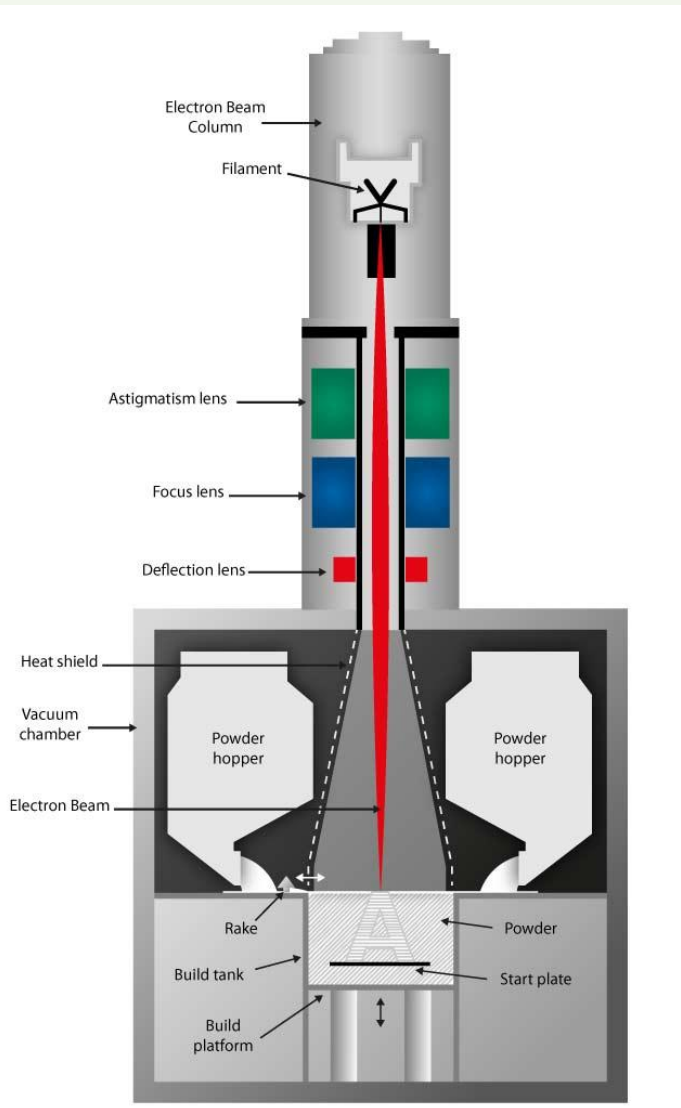


«МАТИ»-Российский Государственный технологический университет
им. К.Э. Циолковского



Кафедра: Технология проектирования и производства двигателей
летательных аппаратов







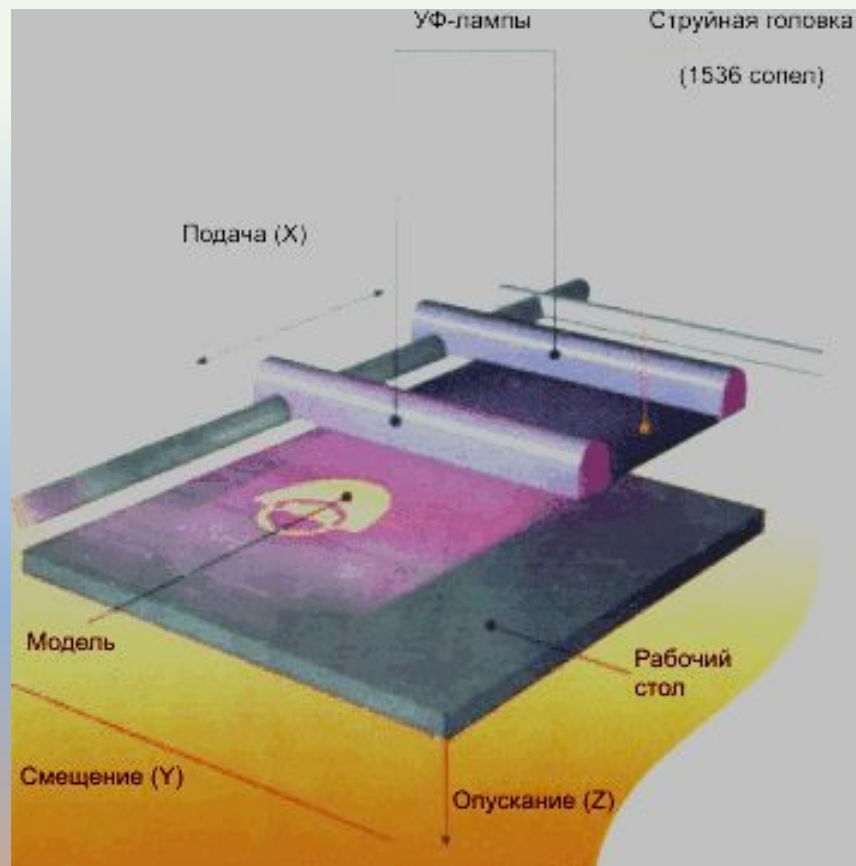
Семейство установок послойного синтеза пополнилось принципиально новым струйным 3D-принтером фирмы Objet Geometries Ltd (Израиль). Этот прибор при сравнительной простоте и дешевизне обеспечивает изготовление прототипов, сравнимых по качеству со стереолитографическими моделями.

Установка Objet Quadra менее требовательна к рабочему помещению и квалификации обслуживающего персонала. Как и в стереолитографии модель выращивается из специального светоотверждаемого пластика, но засветка производится ультрафиолетовыми лампами, а "поддержки" формируются из материала, отличного от основного, чем обеспечивается легкость их удаления.



«МАТИ»-Российский Государственный технологический университет
им. К.Э. Циолковского

Кафедра: Технология проектирования и производства двигателей
летательных аппаратов

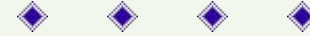




Компьютерная 3D-модель послойно печатается специальной струйной головкой, содержащей 1536 сопел, при этом тело модели печатается основным материалом, а вспомогательные элементы ("поддержки") - другим, менее прочным и более рыхлым. Оба материала отверждаются УФ-лампами. После печати каждого слоя рабочий стол, на котором выращивается модель, опускается на толщину слоя. В завершение процесса вспомогательные элементы вымываются струей воды.



«МАТИ»-Российский Государственный технологический университет
им. К.Э. Циолковского



Кафедра: Технология проектирования и производства двигателей
летательных аппаратов

**Спасибо за
внимание**