

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА  
(национальный исследовательский университет)» (СГАУ)

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ С  
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОБОРУДОВАНИЯ ЛАБОРАТОРИИ  
АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

Методические указания к лабораторной работе

Работа выполнена по мероприятию блока 1 «Совершенствование образовательной деятельности» Программы развития СГАУ на 2009 – 2018 годы по проекту «Разработка образовательных стандартов СГАУ по специальности 160700.65 – Проектирование авиационных и ракетных двигателей и направлению подготовки бакалавров 160700.62 – Двигатели летательных аппаратов со сквозной документацией и создание исследовательских лабораторных работ и прогрессивных технологий лекционных заданий»

Соглашение № 1/4 от 03.06.2013 г.

САМАРА 2013

УДК 621.74 (075)+621.75(075)

ББК 34.6я7+39.55я7

P177

Авторы-составители: **Рамзаева Елена Анатольевна,**  
**Смелов Виталий Геннадьевич,**  
**Нехорошев Максим Владимирович,**  
**Вдовин Роман Александрович,**  
**Кокарева Виктория Валерьевна**

Компьютерная верстка: Н.В. Николаева

**Разработка технологических процессов с использованием оборудования лаборатории аддитивных технологий** [Электронный ресурс]: электрон. метод. указания к лаб. работе / М-во образования и науки РФ, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т); авт.-сост. Е.А. Рамзаева, В.Г. Смелов, М.В. Нехорошев, Р.А. Вдовин, В.В. Кокарева. - Электрон. текстовые и граф. дан. (6,6 Мбайт). - Самара, 2013. - 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

Рассмотрены основные технологии быстрого прототипирования, проведен анализ технологий и оборудования лаборатории, показана последовательность технологических процессов при работе с 3D-принтером EDEN-350.

Методические указания предназначены для студентов факультета «Двигатели летательных аппаратов»: бакалавров специальности 160700.62 – Двигатели летательных аппаратов, изучающих дисциплины: «Оборудование машиностроительных производств» (6 семестр), «Технологическое оснащение автоматизированных производств» (6 семестр), «Технологические процессы в машиностроении» (7 семестр), «Разработка оптимальных технологических процессов с использованием CAE/CAD/CAM/PDM – систем» (8 семестр) и специалистов направления 160700.65 – Проектирование авиационных и ракетных двигателей (ФГОС–3), изучающих дисциплины: «Технологическая подготовка современного производства» (9 семестр), «Инновационные производственные технологии в двигателестроении (9 и А семестр).

Разработано на кафедре производства двигателей летательных аппаратов.

© Самарский государственный  
аэрокосмический университет, 2013

## СОДЕРЖАНИЕ

1 Основные технологии быстрого прототипирования .....	5
1.1 Этапы создания прототипа.....	14
1.3 Технологии и оборудование лаборатории.....	16
2 Изготовление прототипа детали с помощью 3D-принтера EDEN 350.....	23
2.1 Расчет стоимости печати.....	34
Список использованных источников .....	37

## **Цель и задачи лабораторной работы**

Цель работы: провести анализ способа изготовления деталей в лаборатории аддитивных технологий, изучить основы технологии быстрого прототипирования.

В ходе лабораторной работы студентам предстоит решить следующие задачи:

1. Рассмотреть основные технологии быстрого прототипирования;
2. Изучить основное технологическое оборудование аддитивного производства;
3. Исследовать процесс 3D-печати деталей ГТД.

## 1 Основные технологии быстрого прототипирования

В отличие от традиционных технологий, таких как механическая обработка или литьё, все RP-системы представляют собой установки для послойного синтеза моделей (выращивания). Исходным материалом для работы любой RP-системы является *трёхмерная твердотельная компьютерная модель* изделия, созданная в любой программе 3D-моделирования (AutoCad, Solid Works, Catia, Unigraphics NX и др.) Она сохраняется в формате файла STL (STL – формат файла, широко используемый для хранения трехмерных моделей объектов для использования в технологиях быстрого прототипирования, обычно, методом стереолитографии. Информация об объекте хранится как список треугольных граней, которые описывают его поверхность, и их нормалей), затем в программном обеспечении RP-машины она разбивается на плоские слои с одинаковой толщиной.

Установка быстрого прототипирования выстраивает полученные слои из модельного материала последовательно, один за другим, до получения завершённой трёхмерной модели. Работы ведутся в автоматизированном режиме без влияния человеческого фактора. Таким образом, время изготовления модели не зависит от сложности геометрии, а определяется только размерами прототипа. Это является одним из серьёзных преимуществ систем быстрого прототипирования по сравнению с традиционными технологиями, такими например как механообработка или литьё.

В настоящее время на рынке представлен ряд RP-систем, производящих модели с помощью различных технологий и из всевозможных материалов. Все имеющиеся системы для быстрого прототипирования работают по схожему, послойному принципу построения физической модели, который заключается в реализации трех этапов:

- считывание трёхмерной геометрической информации из CAD-систем в формате STL. Все CAD-системы твёрдотельного моделирования способны транслировать файлы в формате STL;
- разбиение трёхмерной цифровой модели на поперечные сечения (слои) с помощью специальной программы, поставляемой с оборудованием;
- построение сечений детали слой за слоем снизу вверх до тех пор, пока не будет получен физический прототип цифровой модели.



Рисунок 1 – Идеология технологии быстрого прототипирования

Слои, располагающиеся снизу вверх, один над другим, физически связываются между собой. Построение прототипа продолжается до тех пор, пока поступают данные о сечениях CAD-модели.

Работа некоторых RP-систем основана на фотополимеризации – химическом процессе, при котором жидкая смола (полимер) превращается в твёрдый полимер под воздействием на неё ультрафиолетового излучения или излучения видимой части спектра. Другие RP-системы работают с использованием тепловых процессов для построения физических моделей. Это технологии, при которых термопластический материал выдавливается из

инжекционных головок, образуя слои, последовательность которых образует физическое тело: технологии спекания порошковых материалов и «склеивание» листовых материалов.

Среди основных *задач RP-технологий* необходимо отметить:

- получение литейных синтез-моделей для литья изделий повышенной сложности по выплавляемым и выжигаемым моделям из конструкционных сталей и сплавов цветных металлов;
- вакуумное литье пластмасс, прочность и жесткость прототипов делает их удобными для вакуумного литья тонких пластмассовых компаундов при малых и средних объёмах производства. Прочность моделей, полученных по технологиям LOM, SLA, FDM, SLS, позволяет им выдерживать высокое напряжение при литье;
- визуализация и функциональные проверки прототипов;
- проверка собираемости прототипов.

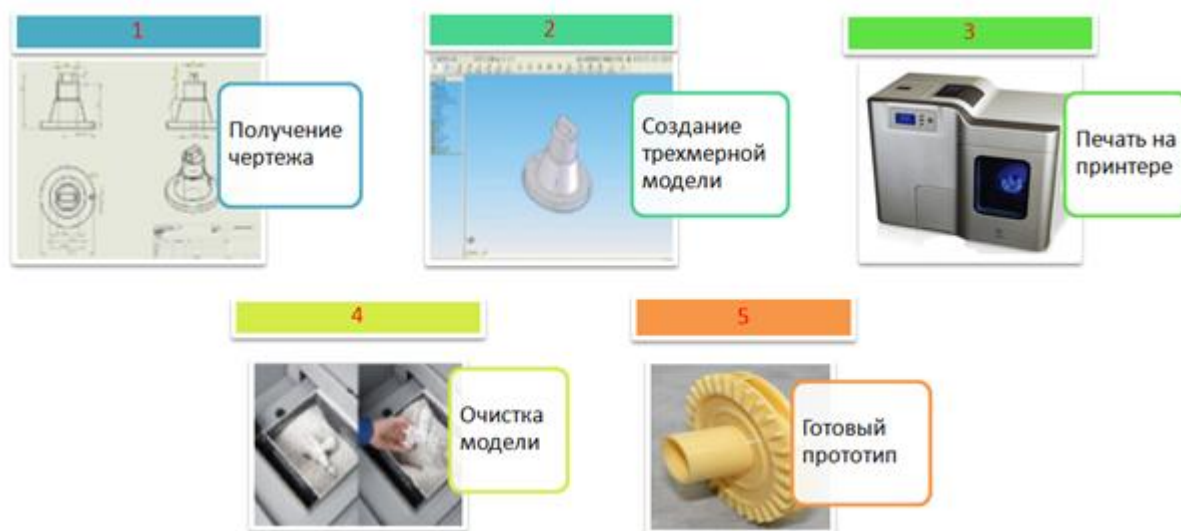


Рисунок 2 - Этапы создания прототипа

Существуют следующие основные технологии быстрого прототипирования:

- стереолитография (STL – stereolithography);
- отверждение на твёрдом основании (SGC – Solid Ground Curing);

- нанесение термопластов (FDM – Fused Deposition Modeling);
- 3D-печать (технология PolyJet фирмы Objet Geometries);
- распыление термопластов (BPM – Ballistic Particle Manufacturing);
- лазерное спекание порошков (SLS – Selective Laser Sintering);
- моделирование при помощи склейки (LOM – Laminated Object Modeling);
- технология многосопельного моделирования (MJM – Multi Jet Modeling).

### ***Стереолитография - SLA***

Самым распространенным способом изготовления прототипа заданного изделия является стереолитография (SLA – StereoLithography Apparatus – стереолитографическое оборудование) (рисунок 1). Этот метод был разработан первым и на сегодняшний день является наиболее распространенным способом быстрого прототипирования. Метод необычайно популярен, чему способствует достаточно низкая стоимость готового прототипа. Стереолитография основана на послойном нанесении и затвердевании жидкого фотополимера, который является основой полученной модели.



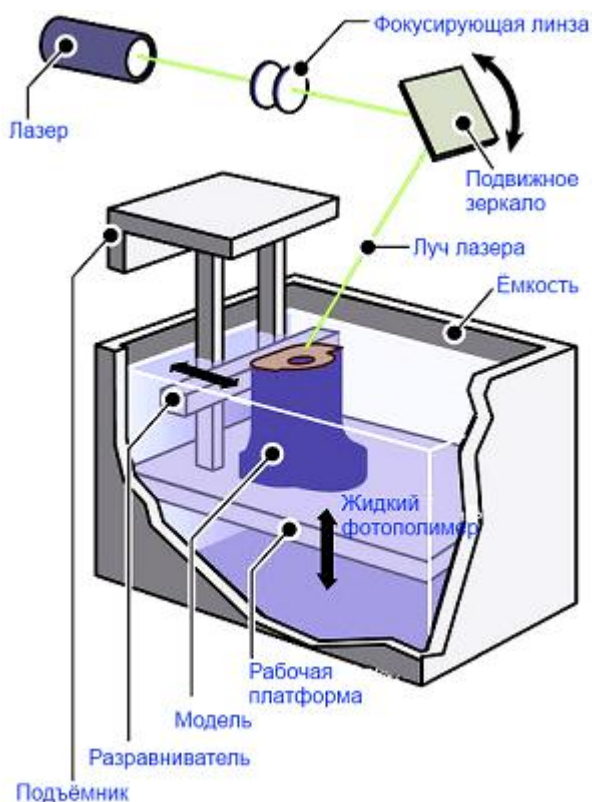


Рисунок 3 – Принцип действия стереолитографии

Основой стереолитографии является локальное изменение фазового состояния однородной среды (переход «жидкость – твердое тело») в результате фотоинициированной в заданном объеме полимеризации. Суть фотоинициированной полимеризации состоит в создании с помощью инициирующего, например, лазерного излучения в жидкой реакционно-способной среде активных центров (радикалов, ионов, активированных комплексов), которые взаимодействуя с молекулами мономера инициируют рост полимерных цепей. Следствием этого является изменение фазового состояния среды, т.е. в облученной области образуется твердый полимер. Поскольку активные центры появляются только в облученной области, то и полимеризация протекает преимущественно в ней, т.е. достигается пространственная селективность фотоинициированной полимеризации. Активные центры образуются при взаимодействии ФПК (фотополимеризующая композиция) с излучением из определенного

спектрального диапазона. Эта спектральная селективность позволяет, в частности, проводить полимеризацию в условиях естественного освещения.

Используя разные способы облучения можно получить на поверхности ФПК полимерную пленку (плоскость), трек (линию) или керн (точку). Эти элементы можно использовать для формирования физических копий трехмерных объектов по их компьютерным моделям. Платформа, на которой «выращивается» деталь, устанавливается ниже поверхности ФПК на расстоянии равном толщине первого слоя. На поверхности ФПК формируется изображение, соответствующее первому сечению объекта. В облучаемой области образуется пленка твердого полимера.

Готовое изделие обладает достаточной твердостью, жесткостью, устойчивостью к воздействию механических нагрузок. Полимерная основа прекрасно клеится, легко окрашивается в различные цвета, поддается несложной механической обработке, обеспечивает хорошие визуальные параметры поверхности. Основным недостатком данного метода является высокая хрупкость полученных моделей.

### *Лазерное спекание порошков – SLS*

Как следует из названия, в качестве рабочего органа применяется лазерный луч, последовательно спекающий порошковый материал по контуру каждого слоя. Порошковой основой могут выступать полимеры, керамика или металлический порошок. Тонкий слой порошкового сырья укладывается на рабочую поверхность, а затем луч лазера спекает его в нужных местах. Так происходит формирование твердого макета, соответствующего 3D-модели. Быстрое прототипирование металлических моделей, на сегодняшний день, возможно только этим методом (рисунок 2).

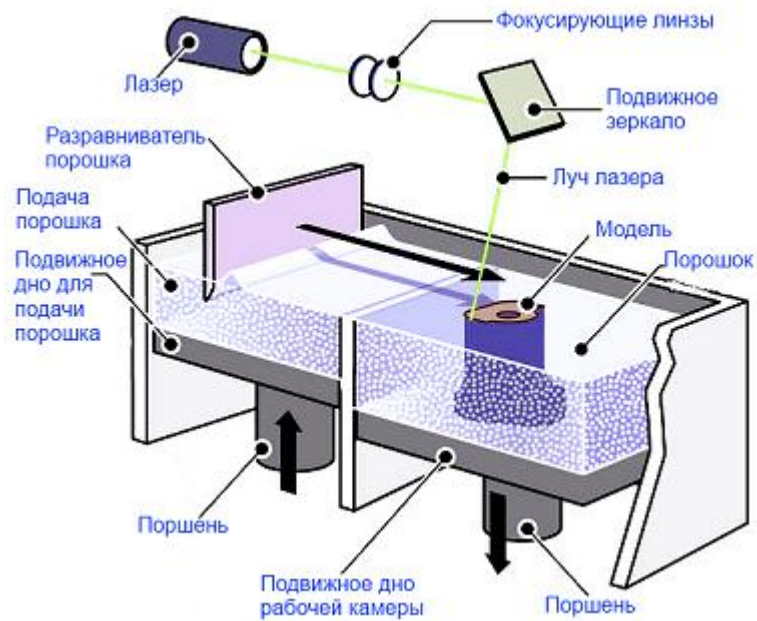


Рисунок 4 - SLS технология

В SLS печати используются материалы, близкие по своим свойствам к конструкционным маркам: металл, керамика, порошковый пластик. Порошковые материалы наносятся на поверхность рабочего стола и запекаются лазерным лучом в твёрдый слой, соответствующий сечению 3D модели и определяющий её геометрию. Оборудование для SLS-печати изготавливают следующие заводы: 3D Systems, F&S Stereolithographietechnik GmbH, The ExOne Company / Prometal, EOS GmbH.

### ***Технология нанесения термопластов – FDM***

Быстрое прототипирование, выполняемое по технологии FDM (Fused Deposition Modeling), происходит за счет послойного наложения на контур создаваемого изделия восковой или поликарбонатной нити (рисунок 5).

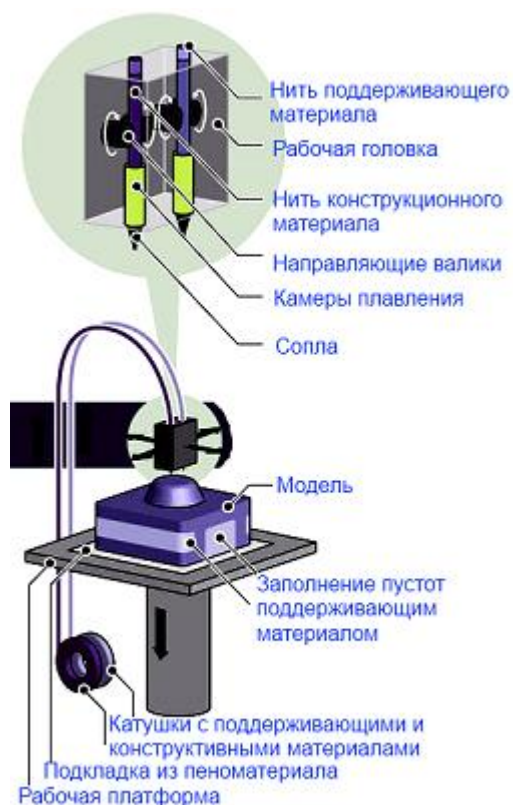


Рисунок 5 – Принцип действия селективного лазерного спекания порошков

Технология FDM печати заключается в следующем: выдавливающая головка с контролируемой температурой разогревает до полужидкого состояния нити из ABS пластика, воска или поликарбоната, и с высокой точностью подаёт полученный термопластичный моделирующий материал тонкими слоями на рабочую поверхность 3D принтера. Слои наносятся друг на друга, соединяются между собой и отвердевают, постепенно формируя готовое изделие.

Технология FDM применяется для изготовления единичных образцов продукции. В настоящее время 3D принтеры с технологией FDM печати изготавливаются компанией Stratasys Inc.

## Технология PolyJet

PolyJet - послойное распыление фотополимера с последующей полимеризацией каждого слоя с помощью освещения ультрафиолетовой лампой.

Печатающий блок 3D-принтера одновременно, тонкими слоями в 16 или 30 мкм, распыляет материал модели и поддержки, согласно данным математической модели. Каждый слой полимеризуется светом ультрафиолетовой лампы сразу же после нанесения. В итоге получается модель, не требующая какой-либо дополнительной обработки поверхности. Модель, отпечатанную по технологии PolyJet, можно использовать сразу же после завершения процесса печати (рисунок 6).

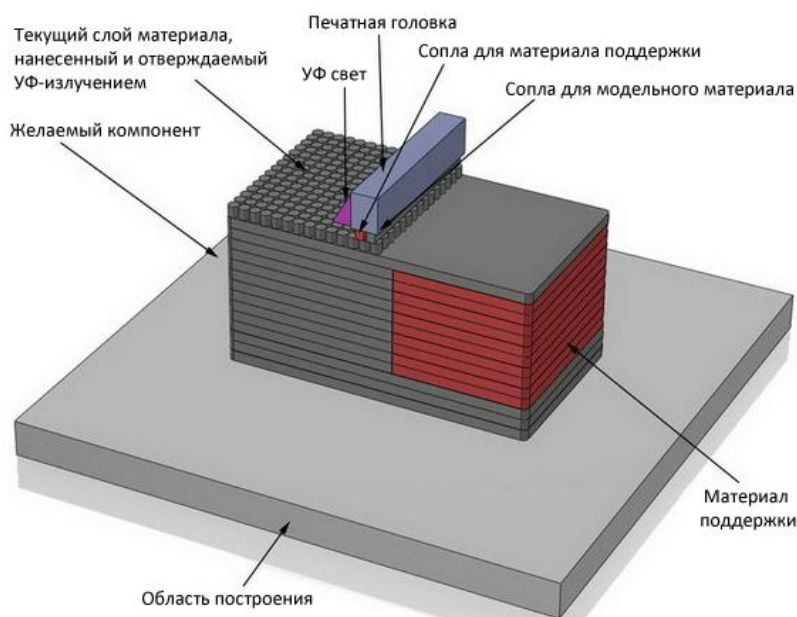


Рисунок 6 –PolyJet

В процессе 3D-печати образуются «висящие» и «нависающие» элементы. Для предотвращения их обрушения, все пустоты под такими элементами заполняются специальным материалом поддержки. Например, для 3D принтера Eden350V таким материалом является FullCure 705 Support – универсальный материал поддержки модели, используемый со всеми

модельными материалами, прозрачный, легко удаляется водой в станции промывки.

Детали, выращенные по технологии PolyJet, обладают различными свойствами в зависимости от используемого материала. Материалы различаются между собой по механическим, термическим, электрическим и химическим характеристикам. Например, полупрозрачный материал FullCure 720 может применяться для выращивания прототипов, в которых присутствуют внутренние объёмы или требуется прозрачность. 3D-печать способна передавать не только внешние поверхности, но и показывать внутренние объёмы. Однотонный материал Durus, аналогичный полипропилену, может применяться для создания элементов типа защелок, которые будут использоваться многократно. Гибкий материал Tango позволяет печатать прототипы гибких изделий.

#### **Задания для студентов:**

1. Приведите примеры технологического оборудования для каждой технологии аддитивного производства;
2. Изучите принцип работы данного оборудования.

#### **1.1 Этапы создания прототипа**

Начальным этапом быстрого прототипирования является создание компьютерной математической модели, на основе которой будет «выращиваться» сам композитный прототип. Это делается без дополнительной оснастки, по электронным данным. Выполненные модели-прототипы отличаются высокой прочностью и точностью изготовления. При необходимости готовый прототип может доработаться (к примеру, доработка фактуры поверхностей).

В целях подготовки специалистов в области быстрого прототипирования рассмотрим *пример применения аддитивных технологий при технологической подготовке производства.*

Первым этапом при подготовке производства является этап конструирования, который начинается с выбора современной лицензионной САД-системы. Затем необходимо определиться, каким образом будет получена 3D-модель реального прототипа. Возможно предложить, по крайней мере, два решения этого вопроса: процесс моделирования возложить на высококвалифицированного инженера-конструктора, который способен по имеющимся чертежам воссоздать 3D-прототип реальной детали, либо же использовать современный подход и применить систему 3D-сканирования, которая позволяет решить задачу обратного инжиниринга – цифровое описание изделий. В результате на выходе планируется получить объемную модель изделия в одной из специализированных программных сред.

На втором этапе в зависимости от поставленной задачи, необходимо выбрать САЕ-программный продукт, в котором произвести все необходимые расчеты. В нашем случае, смоделированную 3D-модель завихрителя планируется интегрировать в САЕ-систему ProCast, которая позволяет проанализировать и полностью смоделировать существующий технологический процесс заливки завихрителя, рассчитать коэффициент усадки, на который вносится поправка при реальном литье, определить эффективность стояка, прибылей и питателей, выявить пустоты, проанализировать скорость остывания заливки и прочее.

Данный шаг является очень важным этапом, так как определяет конечный результат всего процесса заливки и от того, насколько грамотно проанализирована виртуальная технология литья, зависит процент выходной годной продукции.

Третьим этапом служит непосредственно *технология производства изделия*, которая в свою очередь условно разделяется на следующие этапы:

- I. Изготовление мастер-модели завихрителя с помощью 3D принтера Objet Eden 350;
- II. Создание силиконовых эластичных пресс-форм по получаемой мастер-модели и последующее вакуумное литье в них литейного воска;
- III. Изготовление оболочковых форм из сыпучих огнеупорных формовочных составов;
- IV. Литье по выплавляемым моделям с применением вакуумной машины ProfiCast SGA 3500 для литья металлов.

### 1.3 Технологии и оборудование лаборатории

Представленная технологическая цепочка в полной мере реализуется в лаборатории аддитивных технологий. Оборудование лаборатории представлено на рисунке 7. А на рисунках 8-13 приведены примеры изготовления деталей ГТД с помощью данного оборудования.

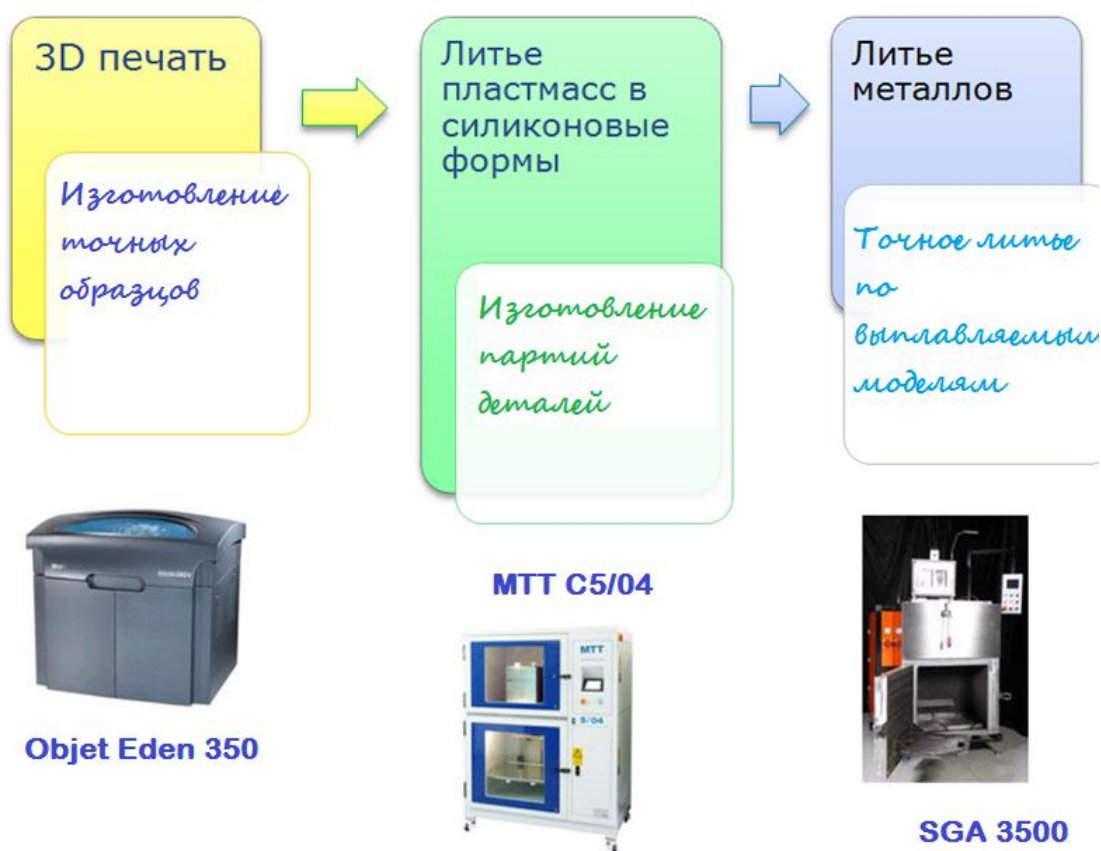


Рисунок 7 – Оборудование лаборатории





Рисунок 8 – Примеры изготовления деталей на 3D-принтере



Рисунок 8 – Примеры изготовления деталей с помощью установки МТТ С5/04

Полученные восковые модели деталей используются для получения оболочковых керамических форм и в дальнейшем для изготовления отливок.

Технология вакуумного литья в силиконовые формы применяется для малосерийного выпуска деталей из пластика (от 1 шт. до 500 шт.). Гибкость формы позволяет отливать детали относительно сложной конфигурации, которые невозможно изготовить при применении металлических пресс-форм. Дегазация материала перед заливкой в форму позволяет исключить поверхностные дефекты и пористость структуры. Используются двухкомпонентные полиуретаны, которые обладают различными физико-механическими свойствами, полиуретаны имитирующие по физико-механическим свойствам резину различной твердости, а также прозрачные полиуретаны для изготовления оптических деталей, термостойкие материалы.

Принцип изготовления деталей по технологии литья в эластичные формы заключается в абсолютно точном копировании модели. Форма изготавливается простой заливкой полимеризующегося силикона вокруг модели. Модель удаляется из силиконовой формы после надреза формы по поверхности разъема. Литьевые смолы смешиваются в вакуумной камере установки, управляемой компьютером, и автоматически заливаются в силиконовую форму.

Ниже представлен пример изготовления пластмассой крыльчатки насоса для электрохимической установки, так как старая крыльчатка изнашивалась в процессе эксплуатации оборудования. В качестве мастер-модели взяли реальную металлическую деталь.

*Изготовление крыльчатки насоса  
электрохимической установки  
(мастер модель – изношенный образец)*



Суть способа литья  
пластика в  
следующем:



Изготавливается мастер-модель. Моделью может служить любой необходимый предмет (прототип, изделие)



Заливаем модель силиконовой композицией (в вакууме) – силиконовая форма



Заливаем в вакууме силиконовую форму двухкомпонентной пластмассой – готовая деталь

Рисунок 10 – Изготовление деталей из пластика по технологии литья в силиконовые формы

Литье в силиконовые формы экономит до 90% материальных затрат и затрат времени на изготовление, если сравнивать с изготовлением образца по традиционной технологии. Это делает возможным простое и быстрое изготовление прототипов любых форм, текстур и цветов. Эти детали могут быть использованы для отработки конструкции, для механических испытаний, проверки функциональности и пригодности формы и оценки изделия потребителем. Благодаря новой технологии вакуумного литья, изготовление дорогостоящих металлических форм для литья, которые часто изменялись по несколько раз, так же, как и затраты времени, которые составляли порой по несколько месяцев, остались в прошлом.

После получения восковых моделей приступаем к сборке литникового дерева (модельного блока). Оптимальное количество восковок и тип литниково-питающей системы рассчитывается с помощью САЕ-анализа.

После монтажа модельного блока можно приступить непосредственно к изготовлению керамической оболочковой формы, в которую будет заливаться металл. Технологический цикл изготовления состоит из трех этапов, повторяющихся несколько раз, в зависимости от требуемого количества слоев. Первый этап: обмазка модельного блока суспензией. Для разных слоев могут использоваться разные суспензии. Вторым этапом изготовления керамической оболочковой формы - обсыпка песком. Третьим этапом изготовления формы - сушка керамического слоя в инфракрасной камере, которая поддерживает постоянную температуру на поверхности слоя, что позволяет ей не перегреваться. Далее цикл из трех этапов повторяется столько раз, сколько слоев предусмотрено в форме. Обычно это бывает 6-8 раз. В результате получается керамическая форма с толщиной стенки около 6 мм.

После того, как керамическая форма высушена, необходимо выплавить воск из формы. Если мастер-модель была выполнена из полистирола или других материалов, происходит выжигание мастер-модели в специализированной печи для выжигания.

Затем форма устанавливается в печь, где происходит ее обжиг при температуре 850°C, благодаря чему прочностные характеристики полученной оболочковой формы значительно превосходят характеристики оболочковых форм, произведенных по традиционной технологии.

На установке ProfiCast SGA 3500 разогретая форма устанавливается на заливочную машину, где и происходит, собственно, заливка металла.



Рисунок 11 - Изготовление керамических форм



Рисунок 12 – Работа на установке ProfiCast SGA 3500

Кроме вышеперечисленного оборудования в лаборатории есть импульсная лазерная установка для ремонта и восстановления технологической оснастки HTS-Mobile 300. Она предназначена для *ремонта и восстановления пресс-форм и штампов* методом лазерной импульсной наплавки. Благодаря возможности перемещения излучателя лазера по трем координатам и большим размерам рабочего пространства, в котором размещается обрабатываемое изделие и ведется технологический процесс, ремонтно-восстановительные работы могут выполняться на крупногабаритных изделиях весом до нескольких тонн.

Лазерная установка HTS-300 Mobile предназначена для выполнения следующих технологических операций:

- восстановление дефектов пресс-форм, штампов, оснастки, инструмента посредством лазерной наплавки избыточного материала;
- лазерная сварка изделий конструкционных сталей, металлов и сплавов;
- лазерное термоупрочнение инструмента.





Рисунок 13 - Лазерная установка HTS-300 Mobile

## 2 Изготовление прототипа детали с помощью 3D-принтера EDEN 350

В качестве примера к данной лабораторной работе будет рассмотрена подготовка к распечатке на 3D-принтере модели детали «Втулка», изготовленной из стали 45 (рисунок 14).

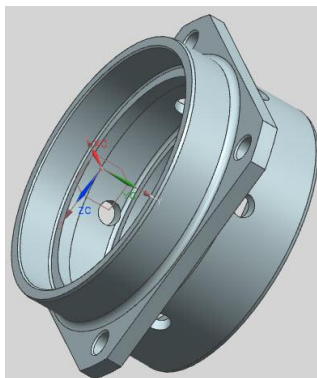



Рисунок 14 - Изображение 3D-модели детали «Втулка»

1. Необходимо отредактировать деталь для печати на 3D-принтере, для этого следует **открыть Siemens NX**.

2. В окне программы необходимо нажать кнопку «Открыть»  и выбрать файл **Primer.x\_t** – модель в формате Parasolid.

В открывшейся модели имеются такие элементы, как отверстия, фаски и скругления (рисунок 15). Эти элементы получаются механической обработкой, соответственно их не должно быть на модели заготовки.

3. Воспользуйтесь **функцией синхронного моделирования** для удаления этих элементов.

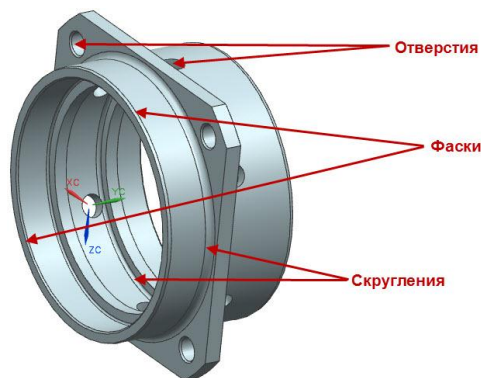
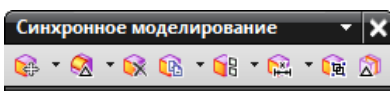


Рисунок 15 - Элементы модели, требующие удаления

4. На панели инструментов программы необходимо найти панель

синхронного моделирования  - активизировать

команду «**Удалить грань**» .

5. **Ликвидируем фаски со скруглениями**, для этого последовательно выбираем их в открывшемся окне (рисунок 15).



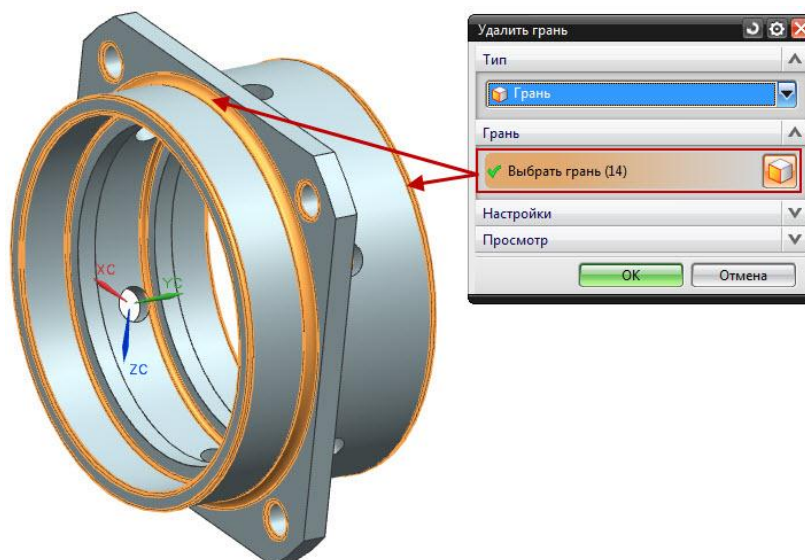


Рисунок 16 - Удаление с модели фасок и скруглений

**6.** Аналогично удаляем отверстия (4 на фланце и 6 на цилиндрической поверхности) (рисунок 17).

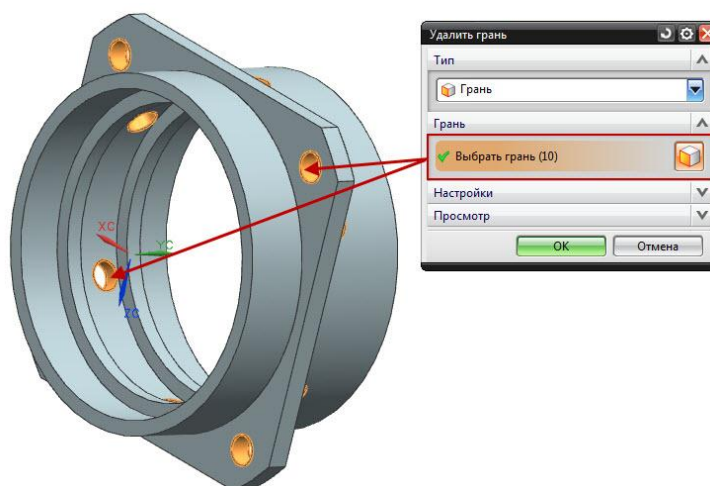


Рисунок 17 - Удаление с модели отверстий

После этих преобразований модель будет иметь вид, показанный на рисунке 18.

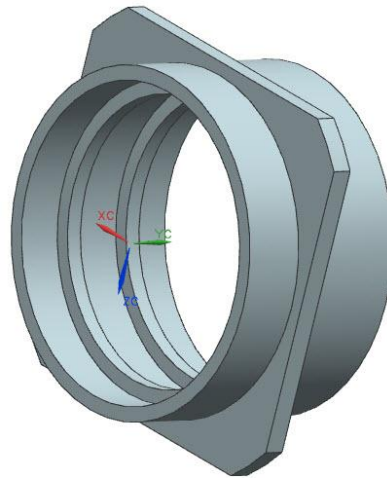



Рисунок 18 - Вид модели после удаления фасок, скруглений и отверстий

Теперь необходимо на модели нарастить припуск. Как известно припуски на механическую обработку назначаются в соответствии с ГОСТ 26645-85 «Отливки из металлов и сплавов. Допуски размеров, массы и припуски на механическую обработку».

Для получения точных размеров заготовки необходимо на каждую обрабатываемую поверхность в зависимости от вида механической обработки назначить припуск, а затем произвести расчет размерных цепей.

**7. Назначаем припуск** на все поверхности *2 мм*, его хватит, чтобы получить качественные и точные поверхности последующей механической обработкой.

**8.** На панели инструментов необходимо активизировать «*Синхронное моделирование*» команду «*Смещение области*» .

**9.** В открывшемся окне последовательно **выбрать поверхности** к которым необходимо нарастить припуск (в данном случае это все имеющиеся поверхности) (рисунок 19).

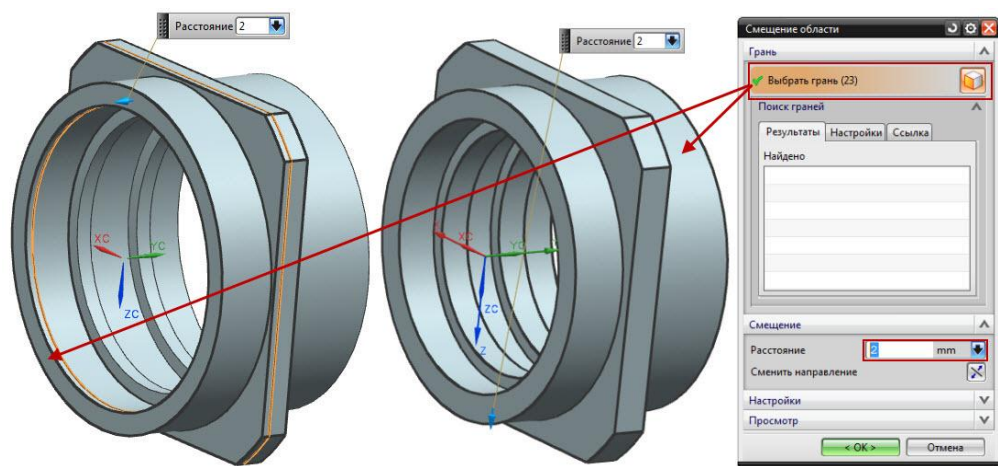



Рисунок 19- Нарращивание припуска на модель

Объем твердого металла при обыкновенной температуре всегда меньше объема его в расплавленном состоянии. Это свойство расплавленных металлов уменьшать свой объем при остывании называется в литейном деле усадкой. Уменьшение объема отливки, против объема литейной формы (или модели), носит название *кубической усадки*, а уменьшение каждого линейного размера отливки против соответствующего линейного размера формы или модели называется *линейной усадкой*. Усадка является одним из важнейших литейных свойств сплавов.

Линейная усадка большинства сплавов колеблется в пределах 0,7-2,2% (углеродистой стали 1,2-2,2%, серого чугуна 0,7-1,3%, силумина 1-1,2%, магниевых сплавов 1-1,6%, бронзы 1-1,5%). Соответственно для стали 45 из которой изготовлена деталь «Втулка» усадка будет составлять 2%. Таким образом, имеющаяся модель необходимо увеличить на 2%.

**10.** Откройте функцию «*Масштабирование тела*» . В появившемся окне в разделе «*Тип*» нужно указать равномерно, в разделе «*Тело*» выбрать имеющуюся модель, а в разделе «*Масштаб*» – 1,02 (рисунок 20).

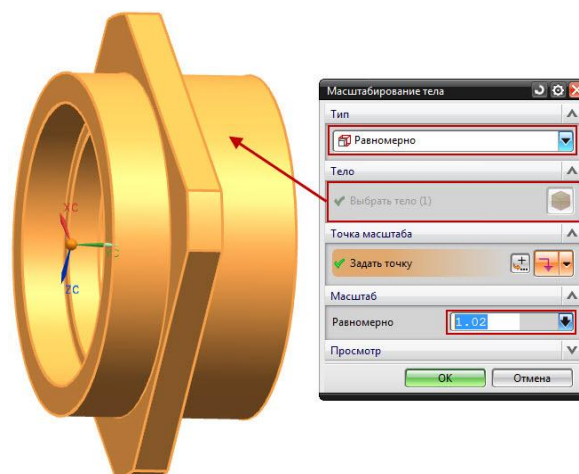



Рисунок 20 - Масштабирование модели согласно усадке металла

Теперь для лучшей проливаемости и образования бездефектной заготовки необходимо наложить радиусы скругления на прямые углы. Первым делом необходимо создать скругление между фланцевой частью и цилиндрическими поверхностями. Для этого нам необходимо узнать размеры толщин фланцевой и цилиндрической частей, а затем подставить эти значения в формулу расчета радиуса.

11. Выберите «Измерение расстояния»  (рисунок 21) в открывшемся окне в разделе «Тип» выбираем «Расстояние в проекции», в разделе «Вектор» указываем направление размера, а затем указываем сначала точку на первом торце, а затем на втором, после чего появится всплывающее окно с реальным размером (9,18 мм).

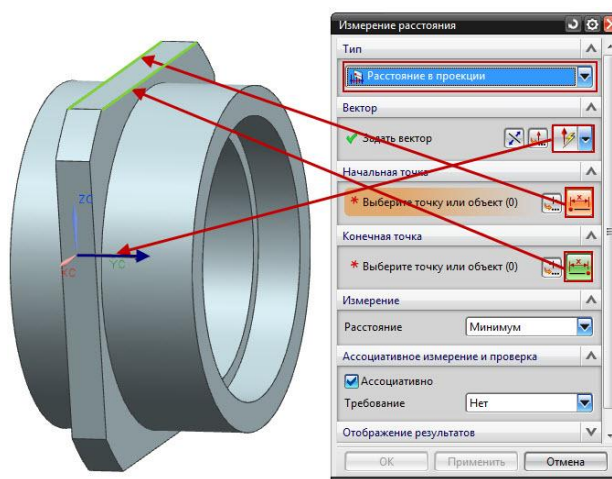



Рисунок 21 - Измерение толщины фланцевой части

По аналогии измеряется размер толщины цилиндрической части, этот размер составляет  $7,65 \text{ мм}$ .

Подставляем полученные размеры в формулу и получаем следующий радиус:

$$r = \frac{T+t}{3} = \frac{9,18+7,65}{3} = 5,61 \approx 6 \text{ мм}$$

12. На панели инструментов активизировать команду «Скругление»  (рисунок 22), затем выбирать ребра, где требуется скругление, в окне «Радиус 1» указать  $6 \text{ мм}$ .

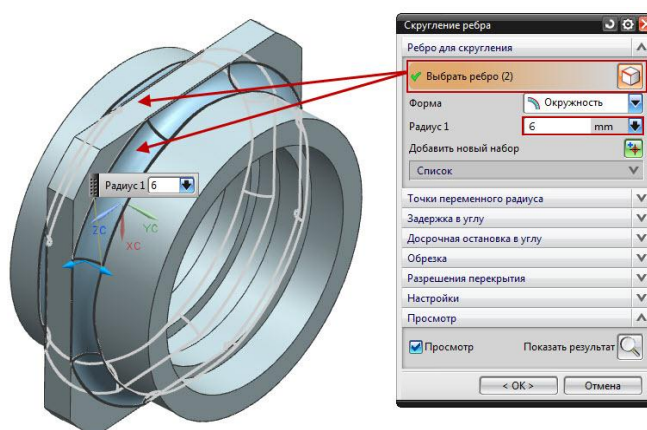


Рисунок 22 - Наложение скруглений

Аналогично поступаем с внутренними поверхностями. Радиус скругления там получается  $5 \text{ мм}$  (рисунок 23).

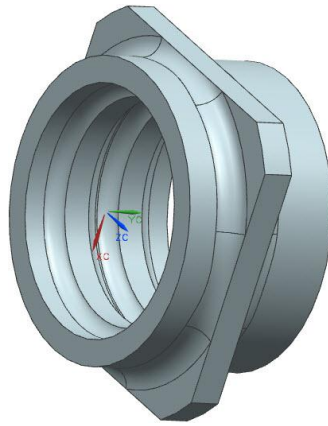


Рисунок 23 - Модель после наложения основных скруглений

На все остальные острые ребра наложим радиус  $1\text{ мм}$ , который позволит детали лучше пролиться без образования дефектов.

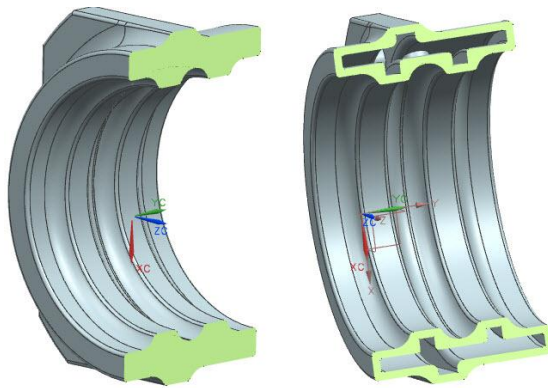


Рисунок 24 - Модель после наложения всех скруглений и с начальными контурами детали

**13.** Необходимо **сохранить модель** в формате **STL** для последующей печати на 3D-принтере. Для этого заходим в меню «*Файл*», затем «*Экспорт*» и выбираем **STL**.



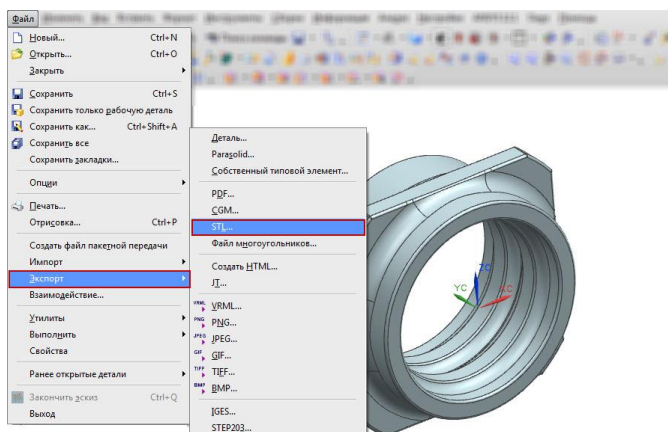


Рисунок 25 - Последовательность сохранения в формате STL

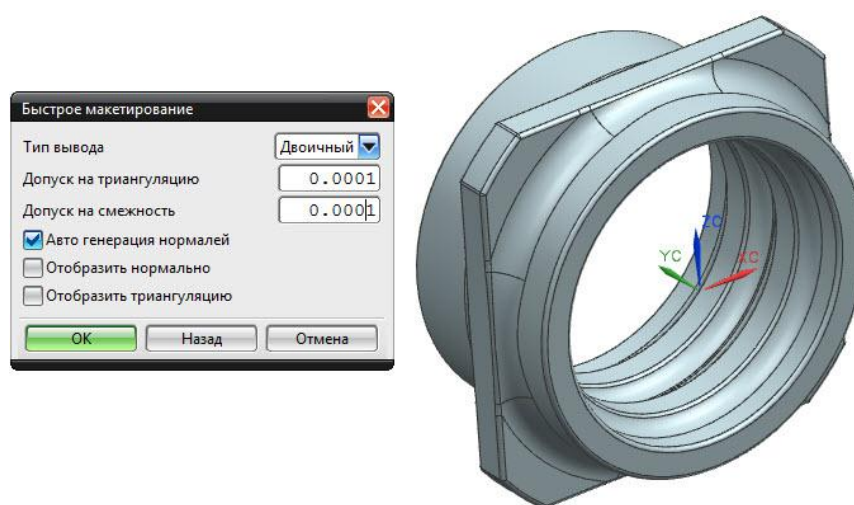



Рисунок 26 - Ввод данных по точности при сохранении в формате STL

14. В окне «**Быстрое макетирование**» в разделе «**Тип вывода**» выбрать «**Двоичный**», значения «**Допуска на триангуляцию**» и «**Допуска на смежность**» задать  $0,0001$ , в появившемся окне ввести имя модели на латинице (primer.stl), нажать **OK** и выбрать деталь для сохранения (рисунок 26).

Переходим на компьютер, подключенный к принтеру.

15. Найдите на рабочем столе ярлык программы «**Objet Studio**»  и запускаем ее. В графической части появившегося окна по правой кнопке мыши выбираем команду «**Insert**» (рисунок 27).

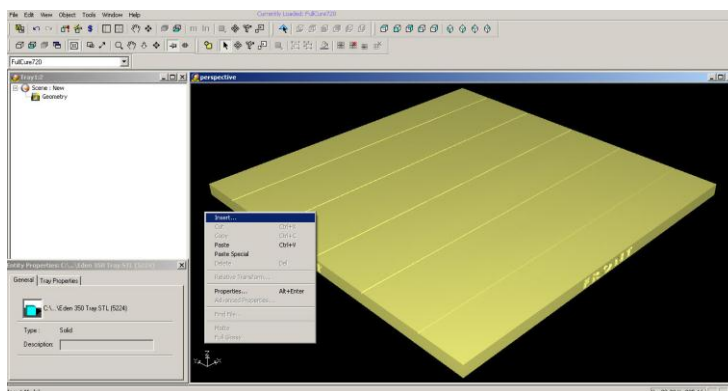


Рисунок 27- Рабочее окно программы «Objet Studio»

16. В появившемся окне выбираем созданную нами до этого деталь **primer.stl** (рисунок 28).

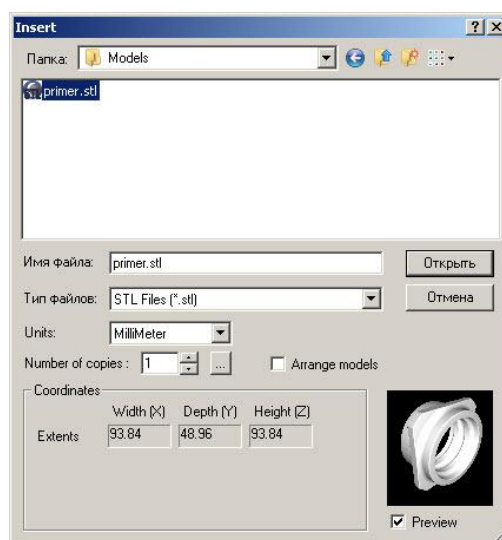




Рисунок 28 - Окно открытия файла

Открывшуюся деталь надо сориентировать на столе принтера так, чтобы стоимость распечатки была наименьшей. Печать на принтере осуществляется послойно движением стола вниз, каждый слой *16 мкм*. Габариты стола *350×350×200 мм*. При печати используются два материала основной и поддержки. Материал поддержки необходим для заполнения пустот, чтобы наносить последующие слои. Экономия будет как раз заключаться в *уменьшении массы материала поддержки* при печати модели.



В нашем случае выгоднее всего поставить деталь на торец, при том на тот, к которому ближе фланцевая часть (рисунок 29).

**17. Активизируйте команду выбора поверхности** , затем выберите эту поверхность (торец). После чего активизируйте команду,  которая укладывает деталь торцом на стол.

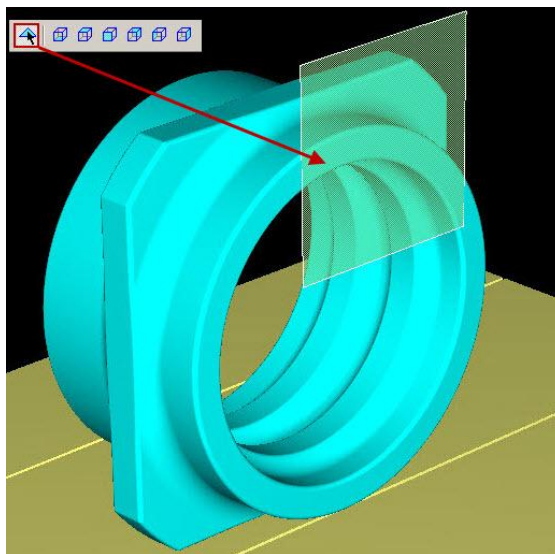




Рисунок 29 - Окно открытия файла

Теперь необходимо проверить деталь на разрывы, которые могли возникнуть при сохранении модели.

**18. Нажмите кнопку** . Если модель создана без ошибок, то в нижней строке появится надпись «Ready», в противном случае модель станет красного цвета, это означает, что она непригодна к печати.

Теперь модель необходимо расположить на столе так, чтобы было как можно меньше холостых движений печатающей головки. Это существенно снизит время печати. В идеале деталь должна находиться в верхнем левом углу. В программе «Objet Studio» существует команда позволяющая оптимально располагать деталь на столе автоматически  (рисунок 30).

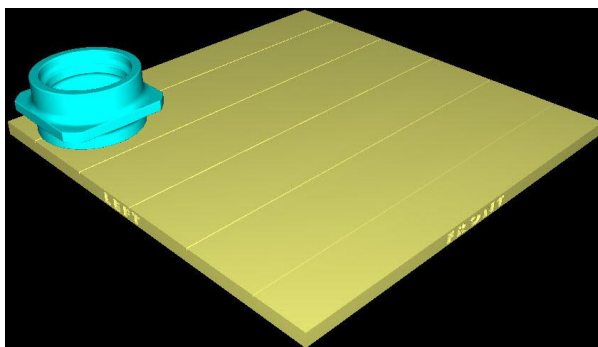



Рисунок 30 - Изображение оптимального расположения детали на столе принтера

Программа также позволяет узнать ориентировочные данные по израсходованному количеству основного материала, материала поддержки, а также о предположительном времени печати.

**19. Активизируйте кнопку .** Данные появятся в строке состояния, внизу окна программы (рисунок 31).

Model Consumption\_260 g, Support Consumption\_136 g, Building Time (HH:MM)\_06:22 Size\_40.2 MB, N. triangles\_280146

Рисунок 31 - Данные по израсходованным материалам и времени печати

По полученным данным видно, что масса основного материала составляет 260 г, материала поддержки – 136 г, а время печати составит 6,37 часа ( $6 + 22/60 = 6,37$  часа).

Теперь по этим данным необходимо рассчитать стоимость печати 3D-модели.

### 2.1 Расчет стоимости печати

Стоимость печати модели считается по формуле:

$$S = S_{mat} \cdot m_{mat} + S_{под} \cdot m_{под} + S_{раб} \cdot t_{печ} + S_{опер} \cdot t_{опер} + S_{страх} + S_{накл} + S_{приб}$$

где

$S_{mat}$  – стоимость грамма основного материала,  $S_{mat} = 20$  руб;

$m_{mat}$  – масса основного материала, г;

$S_{под}$  – стоимость грамма материала поддержки,  $S_{под}=9$  руб;

$m_{под}$  – масса материала поддержки, г;

$S_{печ}$  – стоимость печати часа на 3D-принтере, с учетом амортизации оборудования,  $S_{печ}=870$  руб;

$t_{печ}$  – время печати на 3D-принтере, час;

$S_{опер}$  – стоимость часа подготовки модели к печати,  $S_{опер}=300$  руб;

$t_{опер}$  – время которое вы потратили создавая модель,  $t_{опер}=1$  час (время создания модели рассмотренной в примере и подготовки ее к печати);

$S_{страх}$  – страховые выплаты,  $S_{страх}=(S_{опер} \cdot t_{опер}) \cdot 34,2\%$ , руб;

$S_{накл}$  – накладные расходы,

$S_{накл}=(S_{мат} \cdot m_{мат} + S_{под} \cdot m_{под} + S_{раб} \cdot t_{печ} + S_{опер} \cdot t_{опер} + S_{страх}) \cdot 17\%$ , руб;

$S_{приб}$  – прибыль,

$S_{приб}=(S_{мат} \cdot m_{мат} + S_{под} \cdot m_{под} + S_{раб} \cdot t_{печ} + S_{опер} \cdot t_{опер} + S_{страх} + S_{накл}) \cdot 7\%$ , руб;

Подставив все значения в формулу, стоимость печати пробной детали составила  $S=15484$  руб. 63 коп.

#### **Задание для студентов:**

1. Подготовьте полученную деталь для 3D-печати в NX;
2. Определите величину литейной усадки;
3. Разместите деталь на лотке *Objet Studio*, определите оптимальное расположение деталей;
4. Рассчитайте стоимость печати изделия.

## **Индивидуальный бланк отчета**

Бланк должен содержать следующие пункты:

1. Название и цель лабораторной работы;
2. Эскиз заготовки с припусками на основании полученной трехмерной модели;
3. Расчёт радиусов скруглений, величина усадки;
4. Расчёт стоимости печати на 3D-принтере детали из задания;
5. Выводы по работе.

### **Библиографический список**

1. Дошрарж, И. Производство точных отливок [Текст]/ И. Дошрарж, Я. Габриель, М. Гоушь, М. Павелка. – М.: Машиностроение, 1979. – 296 с.
2. Гини, Э.Ч. Технология литейного производства: специальные виды литья [Текст]/ Э.Ч. Гини, А.М. Зарубин, В.А. Рыбкин. – М.: Машиностроение, 2005. – 352 с.
3. Степанов, Ю.А. Технология литейного производства: специальные виды литья [Текст]/ Ю.А. Степанов, Г.Ф. Баландин, В.А. Рыбкин. – М.: Машиностроение, 1983. – 287 с.
4. Иванов, В.Н. Литье по выплавляемым моделям [Текст] / Под редакцией Я.И. Шкленника, В.А. Озерова. – М.: Машиностроение, 1985. – 568 с.
5. Ефимов, В.А. Специальные способы литья: Справочник [Текст]/ В.А. Ефимов, Г.А. Анисович, В.Н. Бабич и др. – М.: Машиностроение, 1991. – 436 с.
6. Ипатов, М.И. Организация и планирование машиностроительного производства [Текст]/ М.И. Ипатов. – М.: Машиностроение, 1988.