

**Н. П. Мидуков
М. А. Литвинов**

**ИНЖЕНЕРНАЯ
И КОМПЬЮТЕРНАЯ ГРАФИКА
Технологии 3D-печати, сканирования
и моделирования деталей сложной формы**

Учебное пособие

**Санкт-Петербург
2022**

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

**«Санкт-Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна»
Высшая школа технологии и энергетики**

**Н. П. Мидуков
М. А. Литвинов**

**ИНЖЕНЕРНАЯ
И КОМПЬЮТЕРНАЯ ГРАФИКА**
**Технологии 3D-печати, сканирования
и моделирования деталей сложной формы**

Учебное пособие

Утверждено Редакционно-издательским советом ВШТЭ СПбГУПТД

Санкт-Петербург
2022

УДК 681.3 (075)
ББК 32.97я7
М 578

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор, зам. директора по научной работе Высшей школы технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна

В. С. Куров;

главный специалист-руководитель группы АО «Сибгипробум»

А. В. Кулешов

Мидуков, Н. П.

М 578 Инженерная и компьютерная графика. Технологии 3D-печати, сканирования и моделирования деталей сложной формы: учебное пособие / Н. П. Мидуков, М. А. Литвинов. — СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2022. — 80 с.

ISBN 978-5-91646-316-3

Учебное пособие соответствует программам и учебным планам дисциплин: «Инженерная и компьютерная графика», «Цифровой промышленный дизайн», «Основы робототехники и механотроники» для студентов, обучающихся по направлениям подготовки: 18.03.01 – Химическая технология; 18.03.02 – Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии; 15.03.02 – Технологические машины и оборудование; 29.03.03 – Технология полиграфического и упаковочного производства; 15.03.04. – Автоматизация технологических процессов и производств, профиль «Робототехнические системы»; 54.03.01 – Дизайн, профиль «Цифровой промышленный дизайн». В учебном пособии рассмотрены технологии 3D-сканирования и печати. Рассматриваются различные принципы изготовления изделий с помощью аддитивных технологий.

Пособие предназначено для подготовки бакалавров очной и заочной форм обучения. Практико-ориентированный материал может быть полезен для инженеров предприятий целлюлозно-бумажной промышленности, проходящих дополнительное профессиональное обучение.

УДК 681.3 (075)
ББК 32.97я7

ISBN 978-5-91646-316-3

© ВШТЭ СПбГУПТД, 2022

© Мидуков Н. П., Литвинов М. А., 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПО АДДИТИВНЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ	6
1.1. Классификация аддитивных процессов	6
1.2. Области применения аддитивных технологий.....	7
2. ТЕХНОЛОГИИ 3D-СКАНИРОВАНИЯ	16
2.1. Точность 3D-сканирования	18
2.2. Контактный способ 3D-сканирования.....	21
2.3. Бесконтактные оптические 3D-сканеры.....	23
2.4. Бесконтактный оптический сканер, работающий по принципу фотограмметрии.....	24
2.5. Лазерные 3D-сканеры.....	26
2.6. Основные производители 3D-сканеров.....	28
2.7. Программы для постобработки 3D-моделей тел и сетей 3D-сканирования.....	29
3. ТЕХНОЛОГИИ 3D-ПЕЧАТИ.....	34
3.1. 3D-моделирование деталей	34
3.2. Практика изготовления деталей экструзией с помощью 3D-принтера MegaBot Dual Kit и программы Replicator G0040	38
3.3. Повышение точности изготовления деталей с помощью 3D-принтера..	44
3.4. Подготовка 3D-модели в программе Cura 15.04.3 с последующей 3D-печатью с помощью принтера Wanhao Duplicator I3	46
3.5. Изготовления деталей с помощью 3D-технологии стереолитографии	67
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	78

ВВЕДЕНИЕ

Технологии 3D-печати и сканирования относятся к аддитивным производствам, которым нашли различные сферы применения. В последние 10 лет данная сфера стремительно развивается, а основным показателем является высокий темп роста объемов производства оборудования для 3D-печати и сканирования (рис. 1.1). Рост вызван тем, что 3D-принтеры и 3D-сканеры быстро и эффективно решают сложные высокотехнологичные и наукоёмкие задачи. За счёт роста объёмов продаж 3D-принтеров и 3D-сканеров возникла большая потребность в материалах, из которых изготавливаются изделия.

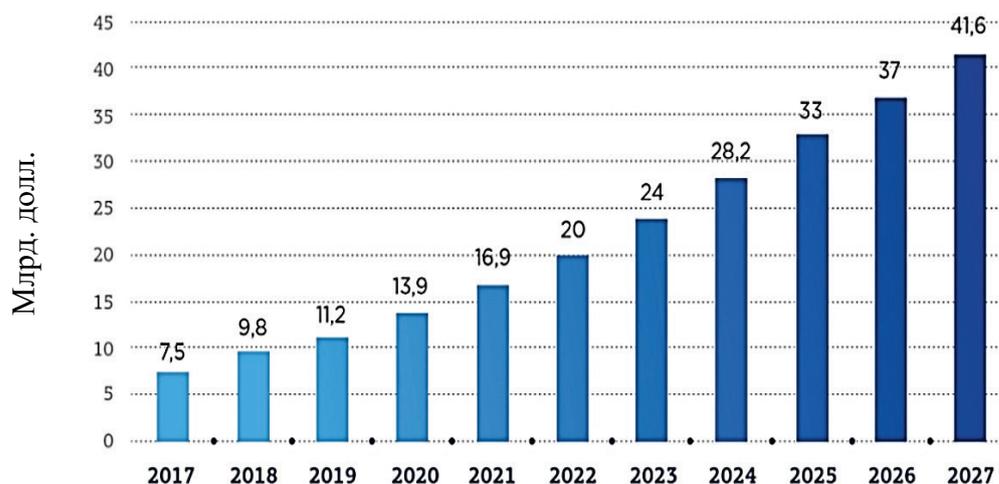


Рис. 1.1. Динамика изменения рынка аддитивных технологий. Прогноз [1]

Существует несколько основных технологий 3D-печати: технология изготовления из порошкообразного гипсополимера (*CJP*); технология изготовления путем спекания лазером частиц полимера (*SLS*); технология многоструйного моделирования из термопластика, воска или фотополимерных смол (*MJM*); технология трехмерной печати, при которой построение объекта идет за счет расплавления прутка пластика (*FDM, FFF*); технология 3D-печати, основанная на послойном отверждении жидкого фотополимерного материала под воздействием ультрафиолетового излучения (*PolyJet, SLA*); технология 3D-печати посредством лазерного плавления металлического порошка (*SLM*); технология создания тканеподобных структур из биочернил (клеток с материалом-носителем) (*3D-биопечать*) [2].

В качестве материалов для 3D-печати используются: мелкодисперсный композитный порошок на основе гипса и связующие для технологии *CJP*; порошки различных частиц полимера (полистирол, полиамиды) для технологии *SLS*; фотополимерные смолы, воски в технологии *MJM, SLA*; полилактид (*PLA*), нейлон (*Nylon*), поликарбонат (*PC*), полиэтилен высокой плотности (*HDPE*), полипропилен (*PP*), поликапролактон (*PCL*), полифенилсульфон (*PPSU*), полиметилметакрилат (*Acrylic*, оргстекло), полиэтилентерефталат (*PET*), ударопрочный полистирол (*HIPS*), древесные имитаторы (*LAYWOO-D3, Bamboo Fill, Fibre Wood*), имитаторы песчаника (*Laybrick*), имитаторы металлов (*Bronze Fill*) для экструзионной печати; фотополимерные смолы для технологий *PolyJet, SLA*; порошки на основе

различных металлов (нержавеющая инструментальная сталь; кобальт-хромовые и титановые сплавы, титановый, алюминиевый, золотой, платиновый порошки и др.) для технологии *SLM*; биоматериалы на основе комбинации полимолочной кислоты и альгината (гелеобразного вещества) для печати костных тканей, клеток человека, силикона, модифицированных стволовых клеток, желатина для 3D-биопечати (рис. 1.2) [3-7].

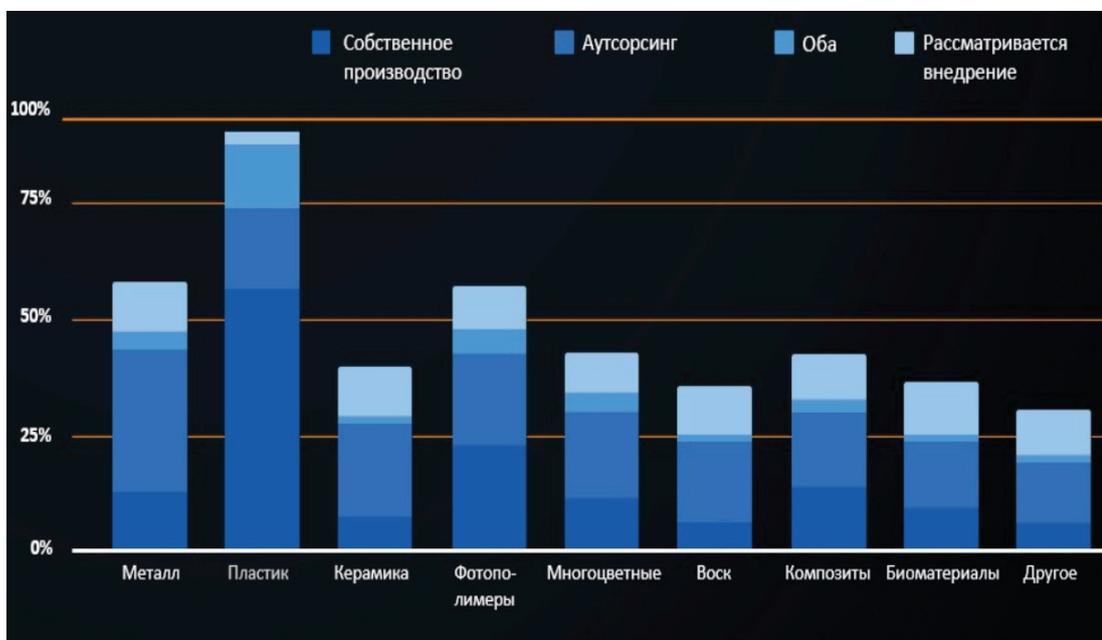


Рис. 1.2. Основные виды сырья для 3D-печати [4]

Параллельно с технологиями 3D-печати развивается направление 3D-сканирования. С каждым годом находится всё больше отраслей промышленности, в которых применяется 3D-сканер. В совокупности технологии 3D-сканирования и печати объединяют в аддитивные технологии (аддитивное производство).

Быстрое развитие аддитивных технологий, а также появление новых 3D-сканеров и принтеров создаёт дефицит кадров в этой сфере, поэтому подготовка высококвалифицированных специалистов, которые должны обладать навыками работы с 3D-принтерами и сканерами, является важной задачей для высших учебных заведений. В результате изучения материала студенты осваивают: основные способы создания трёхмерной модели геометрических объектов в графических программах; особенности 3D-сканирования; основы изготовления деталей различными методами 3D-печати. Также обучающиеся должны уметь оперировать базовыми принципами многокомпонентного 3D-проектирования, создавать и обрабатывать 3D-объекты путём сканирования, изготавливать спроектированные изделия с помощью различных технологий 3D-печати. Вышеперечисленные навыки и умения помогут молодым специалистам в освоении профессий, связанных с дизайном, техникой, медициной и архитектурой.

1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПО АДДИТИВНЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ

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

3D-сканирование, 3D-оцифровка — это способ получения данных о форме и размерах объекта в пространственном представлении путем записи x , y , z координат точек поверхности объекта и преобразования набора точек в электронную геометрическую модель при помощи специализированного программного обеспечения.

Трехмерная печать, 3D-печать — это производство объектов путем послойного нанесения материала печатающей головкой, соплом или с использованием иной технологии печати.

3D-принтер — это установка для 3D-печати [8].

1.1. Классификация аддитивных процессов

По количеству этапов:

- *многошаговый процесс (многоэтапный процесс) (multi-step process)* — это тип процесса АП, в котором детали изготавливают за две или более операции, при этом на первой стадии, как правило, обеспечивается получение заданной геометрической формы, а на последующих за счет консолидации детали формируются основные требуемые свойства используемого материала (металл, керамика, полимер, композит и др.). *Примечание:* удаление структур поддержек и операция очистки могут быть необходимы, однако в данном контексте не рассматриваются как отдельный процесс.

- *одношаговый процесс (одноэтапный процесс) (single-step process)* — это тип процесса АП, в котором детали изготавливают за одну операцию, при этом основная геометрическая форма и свойства материала достигаются одновременно.

По виду создаваемого объекта:

- *3D-сканирование*, которое связано с созданием электронной геометрической модели. По принципу действия 3D-сканирование встречается контактное и бесконтактное. В свою очередь, бесконтактное сканирование бывает лазерное и оптическое. Лазерное сканирование подразделяют на импульсное, фазовое, триангуляционное, комбинированное, а оптическое (фотограмметрия в том числе) — на активное и пассивное. 3D-сканирование встречается ручное и стационарное.

- *3D-печать* связана с созданием физического объекта. К основным способам 3D-печати можно отнести: струйное нанесение связующего вместе с порошкообразным материалом (*binder jetting*); прямой подвод энергии и материала (*directed energy deposition*); экструзия материала (*material*

extrusion); струйное нанесение материала (*material jetting*); синтез на подложке (*power bed fusion*); листовая ламинация (*sheet lamination*); фотополимеризация в ванне (*vat photopolymerization*); комбинированная (*combination*) (рис. 1.3).

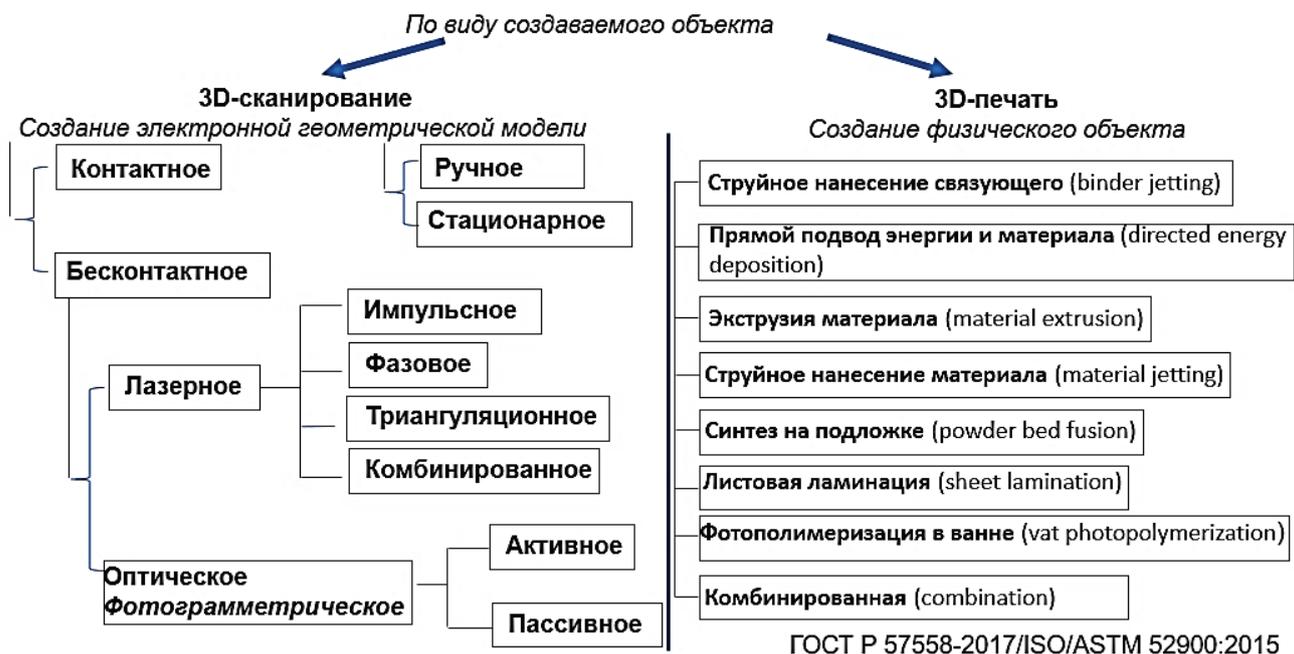


Рис. 1.3. Классификация аддитивных процессов по виду создаваемого объекта [8]

1.2. Области применения аддитивных технологий

Интенсивное развитие аддитивных технологий (до 40 % в год по объёму инвестиций в мире) связано с широким применением технологий 3D-сканирования и 3D-печати в различных отраслях промышленности.

Одним из наиболее популярных направлений использования 3D-сканеров сегодня стал *реверс-инжиниринг (обратный инжиниринг)*. Эта сфера использования 3D-сканеров набрала большую популярность в условиях дефицита запасных частей иностранного оборудования. Обратный инжиниринг благодаря 3D-сканированию позволил сократить время на составление технической документации деталей оборудования, в том числе в целлюлозно-бумажной, химической, нефтегазовой промышленности, а также в автомобиле- и авиастроении.

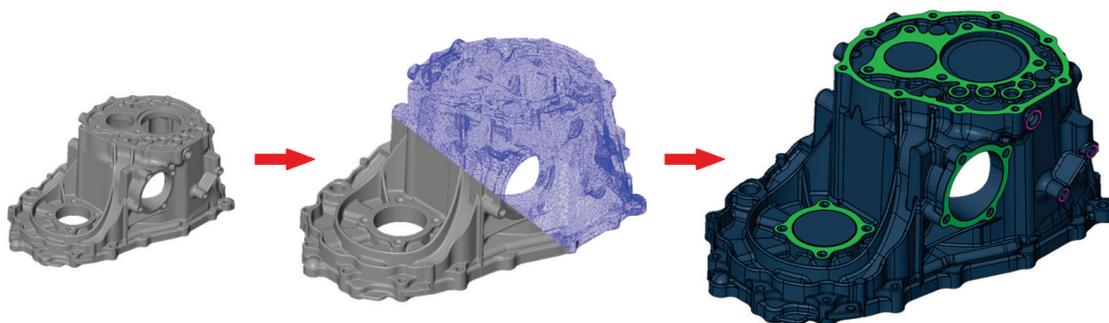


Рис. 1.4. Реверс-инжиниринг детали

На рис. 1.4. представлены основные этапы реверс-инжиниринга: подготовка детали сложной формы к 3D-сканированию; 3D-сканирование; обработка облака точек и создание 3D-модели детали.

Обратный инжиниринг необходим, если производитель, он же и поставщик, закончил изготовление оригинальной детали либо предоставил неадекватную документацию на оригинальный дизайн. В отдельных случаях первоначальный производитель может исчезнуть, но клиенту нужна деталь, от которой зависит работа машины. Встречаются ситуации, когда проектная документация на деталь была утеряна или никогда не существовала. Реверс-инжиниринг также необходим при усовершенствовании и доработке существующего изделия, при анализе деталей конкурентов, который позволяет лучше изучить новые возможности деталей и узлов для совершенствования их производства и характеристик, что даёт возможность получить конкурентные методы изготовления, разработать и усовершенствовать деталь. В отдельных случаях реверс-инжиниринг позволяет решить проблему отсутствия исходной модели системы автоматического проектирования (САПР), что не позволяет модифицировать производство либо решить проблему отсутствия желания или возможности поставщика предоставить запасную часть оборудования, либо необоснованное завышение цен на запасные части.

В целом, реверс-инжиниринг — это быстрый и лёгкий способ обновить устаревшие материалы или устаревшие производственные процессы с помощью более современных и менее дорогих аддитивных технологий [9].

Широкое применение 3D-сканеры нашли в архитектуре и промышленном дизайне (рис. 1.5).

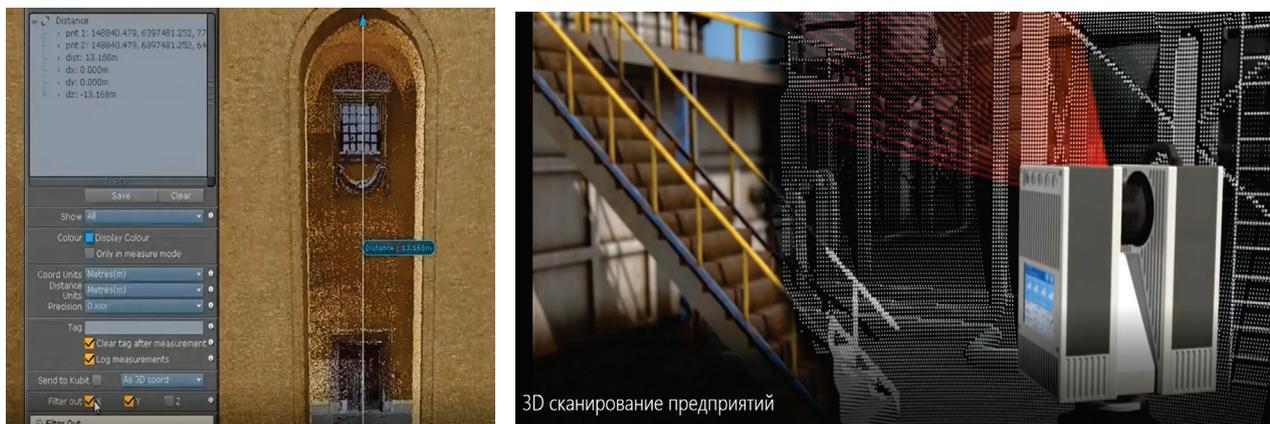


Рис. 1.5. 3D-сканирование в архитектуре и промышленном дизайне

Оцифровка зданий исторического и культурного наследия позволила облегчить и ускорить восстановление утраченных и разрушенных сооружений. Благодаря 3D-сканерам были оцифрованы музейные экспонаты и архитектурные ценности, которые стали доступны в цифровом формате для населения.

Использование 3D-сканеров в промышленном дизайне связано с оцифровкой зданий, цехов, складов, помещений предприятий, что существенно ускоряет получение готового проектного решения.

3D-сканирование местности, помещения также позволяет зафиксировать обстоятельство дорожно-транспортных происшествий или мест преступления, что облегчает работу правоохранительных органов.

Автомобилестроение получило новый виток развития благодаря 3D-сканированию (рис. 1.6).

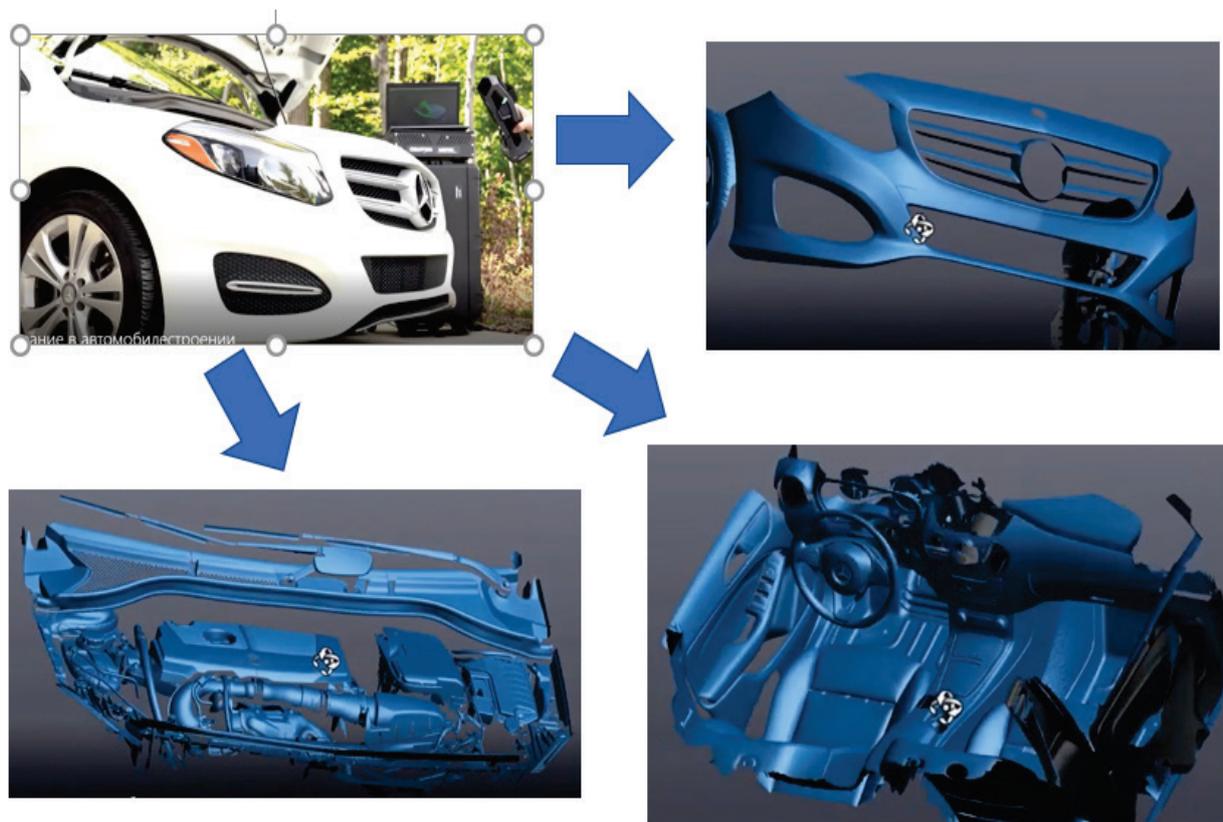


Рис. 1.6. Оцифровка деталей и узлов автомобиля

Оцифровка деталей и узлов позволяет быстро и эффективно создавать дизайн нового автомобиля, а также контролировать качество, инспектировать процесс сборки, осуществлять виртуальную сборку, что снижает вероятность остановов конвейера, уменьшает количество бракованных экземпляров [9].

В начале XX века был выполнен протез ноги человека с помощью аддитивных технологий. Изделие не уступало по характеристикам тем протезам, которые выполнялись вручную и на станках, однако его стоимость снизилась на порядок. Технология 3D-печати изменила индустрию протезирования, благодаря чему больше людей с ограниченными возможностями были обеспечены искусственными частями тела (рис. 1.7). Позже с развитием технологии экструзионной печати стали появляться ортезы из пластика, которые повторяли форму частей тела человека.

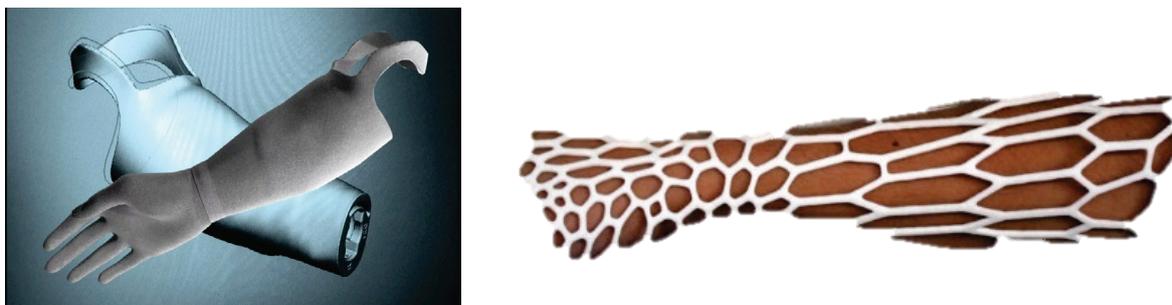


Рис. 1.7. Изготовленные с помощью 3D-принтера протез (слева) и ортез (справа)

В отличие от гипсовых ортезов, при использовании которых нет возможности помыть повреждённое место, нет контакта кожного покрова с воздухом, пластиковые ортезы не имеют этих недостатков, что способствует скорейшему заживлению. Также пластиковые ортезы меньше ограничивают человека в движении. Это одно из важных направлений развития аддитивных технологий в медицине. Например, 3D-сканирование в медицине широко используется при создании 3D-модели частей тела, после чего изготавливаются функциональные протезы и ортезы с помощью 3D-принтеров. Также аддитивные технологии нашли применение в медицине при моделировании и планировании в пластической хирургии, косметологии, стоматологии. 3D-сканирование и 3D-печать позволили быстро и эффективно изготовить мягкий шлем для ребёнка, дали возможность отследить изменения костной ткани детей. Благодаря аддитивным технологиям было реализовано цветное и фактурное сканирование раны, что позволило оперативно выбрать необходимый метод лечения.

Широкое использование аддитивные технологии получили в дизайне одежды, в рекламе и искусстве. 3D-сканер позволяет создать 3D-модель человека в полный рост, что даёт возможность подобрать и изготовить индивидуальную одежду для человека без посещения в модельный салон. Для покупки одежды нужно только отправить в магазин файл 3D-модели по электронной почте и ждать доставку. Часто услугами 3D-сканирования пользуются дизайнеры при создании новых коллекций одежды. Во многом упрощается взаимодействие модельеров и изготовителей одежды, так как благодаря 3D-сканированию можно спроектировать и визуальнo проверить цветовую гамму, комбинацию различных фасонов одежды, что снижает время и затраты на создание прототипов одежды и обуви.



Рис. 1.8. Использование технологии 3D-сканирования и печати в дизайне одежды, обуви и в создании моделей статуэток

В комбинации 3D-сканирования с печатью моделируют и изготавливают прототипы одежды и обуви, соответствующие индивидуальным параметрам, используют всевозможные оригинальные решения в дизайне изделий, в частности, украшений, оцифровывают коллекции одежды, бижутерии, мебели и предметов интерьера, разрабатывают и визуализируют необычный и ландшафтный дизайн.

Большой интерес к 3D-сканированию возник в образовании. В школах проводятся конкурсы по 3D-моделированию, сканированию и печати, а в интернете можно найти большое количество онлайн курсов для детей, в которых бесплатно можно пройти обучение по построению несложных фигур. В старших классах школьники осуществляют 3D-сканирование произведений искусства, оцифровывают гравюры, статуи, инсталляции, оцифровывают собственные проекты, масштабируют произведения искусства, за короткое время получают прототипы изделий. Благодаря большому интересу к 3D-сканированию среди школьников созданы архивы 3D-моделей, виртуальные каталоги. Университеты, в которых готовят инженеров, проводят практические уроки по 3D-сканированию деталей и их узлов, а также целых механизмов, а стоматологические клиники при медицинских вузах сканируют и разрабатывают ортодонтические модели зубов и зубочелюстных конструкций с их последующим изготовлением с помощью 3D-принтеров и практическим тестированием. Это всё преподаётся студентам, а полученные навыки они применяют на практике.

Одним из направлений развития нефтегазовой промышленности является использование аддитивных технологий, а именно 3D-сканирования, при диагностике качества трубопроводов [10, 11].

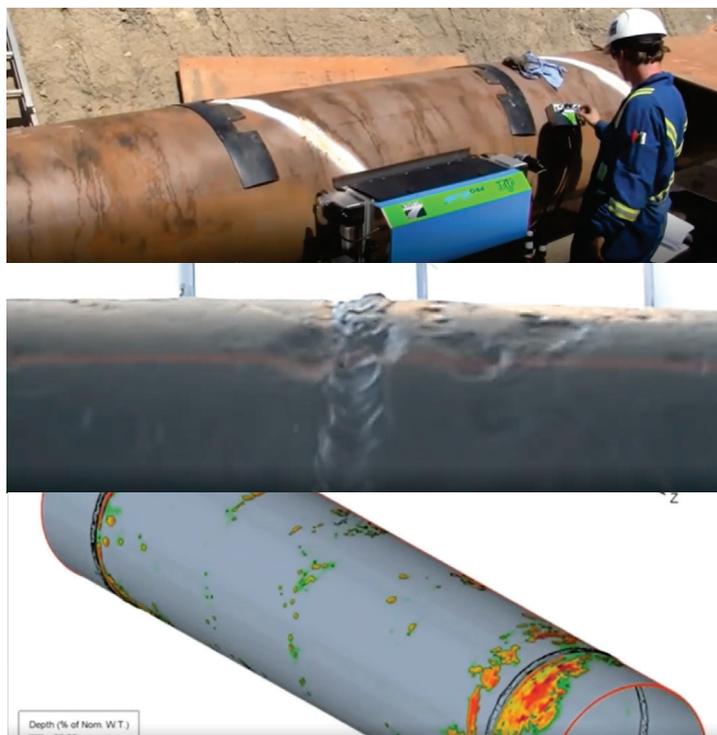


Рис. 1.9. Контроль за состоянием трубопроводов в нефтегазовой промышленности с помощью 3D-сканера

3D-сканеры позволяют мониторить состояние трубопроводов большой протяжённости, что даёт возможность быстро оценить коррозию и механические повреждения нефтегазового трубопровода (рис. 1.9). С помощью специальных 3D-сканеров осуществляется проверка состояния трубопровода снаружи и внутри.

3D-сканирование является основой робототехники. По существу, многие конструкции 3D-сканеров выполняют функцию роботов, так как в автоматическом режиме меняют своё местоположение, что позволяет им с высокой точностью создавать 3D-модель объекта. Робот, изображенный на рис. 1.10, представляет собой 3D-сканер, результатом работы которого является облако точек, из которого автоматически создана поверхность детали.

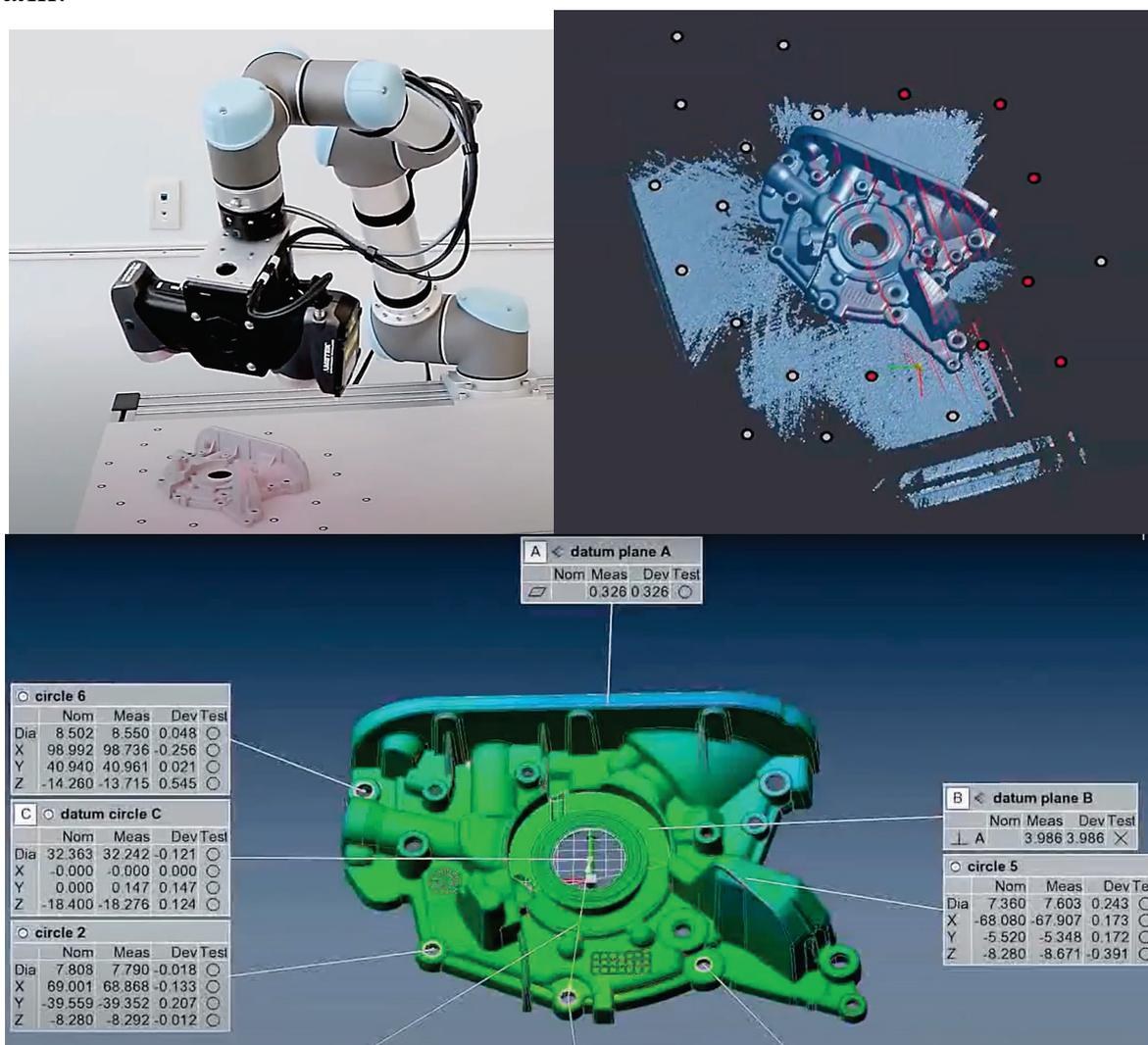


Рис. 1.10. Создание 3D-модели детали роботом путём 3D-сканирования

В отличие от 3D-сканирования, 3D-печать имеет больше сфер применения. Результаты использования 3D-принтеров продолжают удивлять людей. Например, первый в мире металлический мост, изготовленный по технологии лазерного спекания порошков, вызвал всеобщее удивление у жителей Лондона (рис. 1.11).

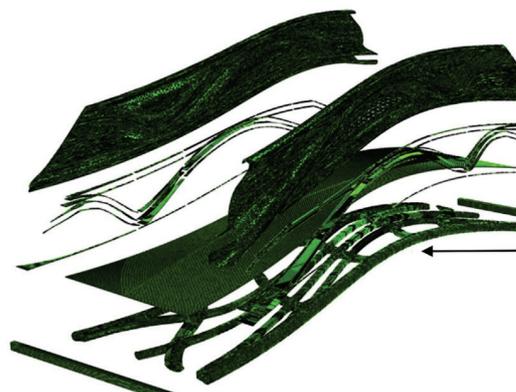


Рис. 1.11. Первый в мире мост, построенный по технологии лазерного спекания металлического порошка [7]

В архитектуре и строительстве 3D-принтеры используются эффективно на протяжении последних десяти лет. Существуют целые кварталы из домов, построенных с помощью 3D-принтера. Строительство зданий и сооружений с помощью аддитивных технологий позволяет ускорить работу. Кроме того, 3D-принтер способен построить дом сложной формы по проекту заказчика.

Наиболее значимым открытием в области медицины, которое связано с применением аддитивных технологий, является 3D-печать сердца подопытной крысы. Сердце было создано с помощью биопринтера из специальных биочернил (рис. 1.12). Тот же материал был использован для создания уха человека, которое обладало капиллярно-пористой структурой для проникновения крови и питательных веществ.

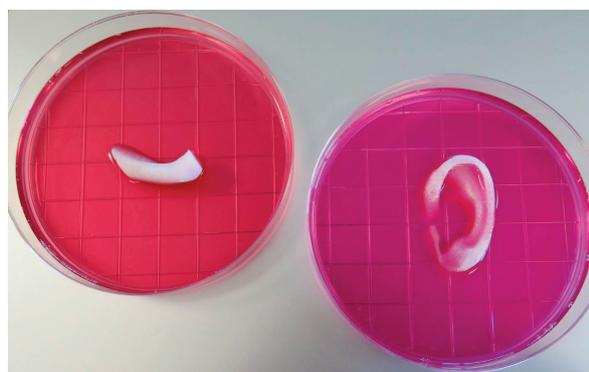


Рис. 1.12. Сердце крысы (слева), уши человека, созданные с помощью 3D-принтера из биочернил (справа) [12,13]

На сегодняшний день изобретения, представленные на рис. 1.12, являются самыми высокотехнологичными изделиями, созданными человеком с помощью 3D-принтера. Кроме того, медицина использует 3D-печать при формировании костных, кожных и мышечных тканей после сложных операций, протезирование частей тела, зубов, а также при изготовлении ортезов.

Широкое распространение 3D-печать получила в ювелирной промышленности благодаря тому, что прототипы изделий, полученных с помощью 3D-принтера, намного дешевле тех, которые изготавливали из

драгоценных материалов. Важно отметить, что изготовление прототипа ювелирного изделия с помощью 3D-принтера осуществляется без потерь драгоценного материала. Процесс создания ювелирного изделия представлен на рис. 1.13.

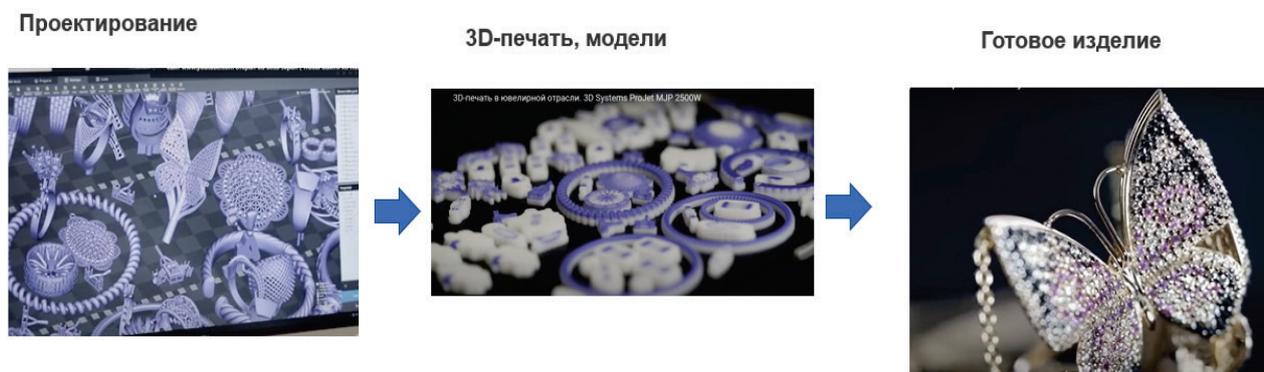


Рис. 1.13. Этапы создания прототипа ювелирного изделия

С развитием аддитивных технологий ювелирная промышленность получила следующие возможности: создание изделий сложнейшей формы в краткие сроки, в том числе очень мелких образцов с высокой точностью; создание неповторимых моделей будущих изделий с геометрией любой сложности; снижение расходов, связанных с потерей драгоценных металлов; изготовление до тридцати всевозможных моделей за один раз.

С появлением 3D-принтеров в машино-, авиа-, автомобилестроении также появились новые направления эффективного развития (рис. 1.14).



Рис. 1.14. Создание деталей и узлов автомобилей с помощью 3D-принтеров

При мелкосерийном производстве автомобилей, машин и самолётов 3D-печать существенно повысила эффективность производства деталей и узлов, при этом значительно сократилось время на прототипирование, а по качеству прототип порой превосходил деталь, изготовленную вручную и на станках. Практически полностью отсутствуют потери материала при производстве деталей и узлов машин с помощью 3D-принтеров, кроме того, существует возможность придавать особые свойства прототипам за счёт применения различных композиций материалов. Ко всему прочему, стоимость прототипов существенно ниже при использовании 3D-печати, несмотря на то,

что детали имеют сложную форму. Так как процесс изготовления детали осуществляется на одном оборудовании (3D-принтере), то и вероятность образования брака снижается, в отличие от традиционного способа производства, где каждая из операций (токарная, фрезерная, сверлильная) осуществляется на разных станках, разными людьми.

По аналогии с 3D-сканированием, 3D-печать нашла применение в текстильной промышленности.



Рис. 1.15. Использование 3D-принтеров в текстильной и обувной промышленности

Образцы одежды и обуви, изготовленные с помощью 3D-принтера, нашли широкое применение при изготовлении новых коллекций. Аддитивные технологии дают возможность создателям одежды и обуви изготовить опытные партии у себя дома.

2. ТЕХНОЛОГИИ 3D-СКАНИРОВАНИЯ

3D-сканер – это периферийное устройство, анализирующее форму предмета и на основе полученных данных создающее его 3D-модель [8]. 3D-сканеры относятся к технологиям, которые появились сравнительно недавно, но быстро развиваются.

Возможность копирования (считывания) изделий, обливок, сложных форм с помощью 3D-сканера держалась долгое время в секрете. Открытая информация о 3D-сканерах появилась в конце 80-х годов прошлого века. Одними из первых были контактные сканеры, которые при соприкосновении с копируемыми объектами давали сигнал о расположении его в пространстве, за счёт чего создавалось облако точек. Сотни точек создавали образ копируемой поверхности. Сегодня этот принцип стал основой детских игрушек, ручных, контактных сканеров, которые могут быть изготовлены из подручных материалов (картона и набора гвоздей) в домашних условиях (рис. 2.1)



Рис. 2.1. Самодельный ручной сканер (контактный)

Единичные экземпляры сложных сканирующих устройств, работающих по принципу контакта тысяч элементов с поверхностью, позволяли копировать объекты с приемлемой точностью. Основной проблемой при работе с такими 3D-сканерами была сложная обработка данных. Точность сканирования определялась количеством контактных элементов, как правило, была невысокой.

С начала 1990 г. мир стал быстро меняться за счёт появления и развития цифровых технологий. Практически сразу после появления компьютеров на рынке аддитивных технологий стали появляться оптические 3D-сканеры. Для массового потребителя 3D-сканеры стали доступны практически в одно время с 3D-принтерами в начале XXI века.

Сегодня многообразие 3D-сканеров сложно классифицировать, но наиболее широко распространённые принципы 3D-сканирования можно распределить по схеме, представленной на рис. 2.2.

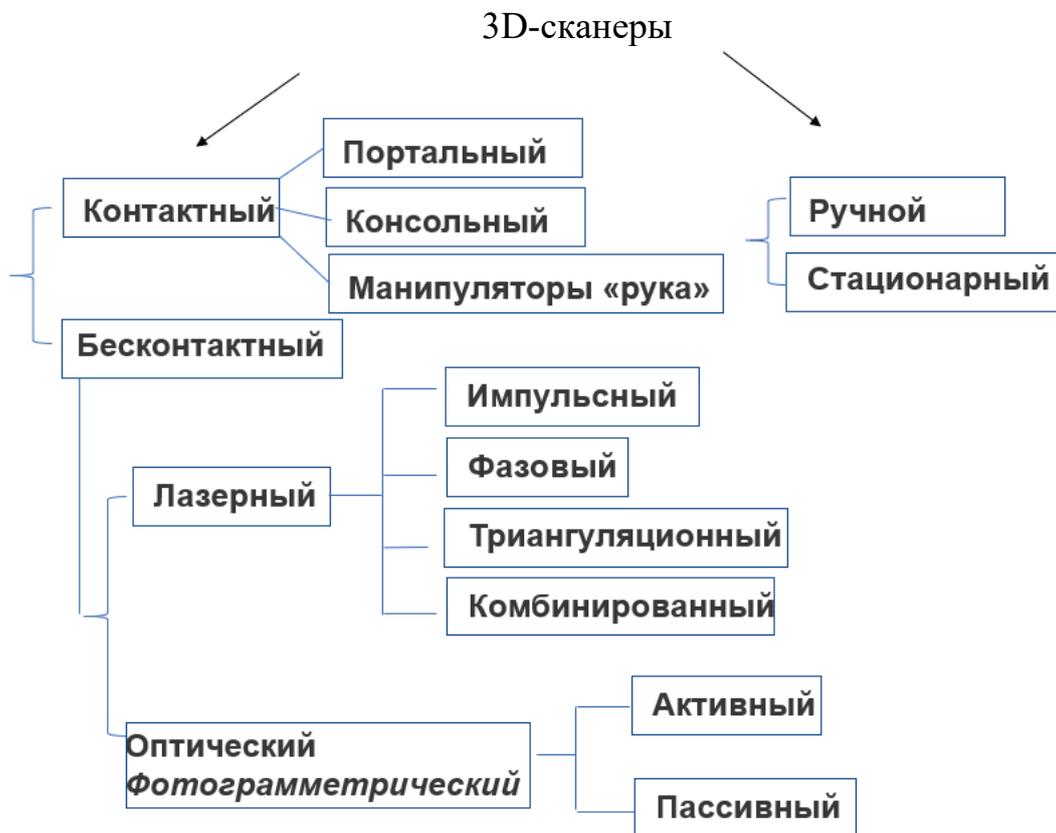


Рис. 2.2. Классификация 3D-сканеров

Каждый из приведённых на схеме 3D-сканеров обладает особыми характеристиками. Тип 3D-сканера определяет удобство эксплуатации. Например, ручные 3D-сканеры используются чаще, так как они транспортабельны и удобны, но в точности сканирования могут уступать стационарным. В то же время стационарные 3D-сканеры могут быть ограничены в размерах сканируемого объекта. Бесконтактные сканеры (лазерные и оптические) имеют камеры, количество и разрешение которых определяет точность при создании 3D-модели.

Важной характеристикой 3D-сканера является скорость сканирования. В большинстве случаев скорость контактного 3D-сканирования ниже, чем бесконтактного. Лазерные 3D-сканеры характеризуются высокой точностью при значительном расстоянии до объекта, тогда как оптические, работающие по принципу фотограмметрии, более доступные и дешёвые. Кроме того, существует ряд дополнительных характеристик 3D-сканеров: характеристики проектора; распознавание цвета, текстуры; особенности программного обеспечения; выходной формат создаваемых файлов; совместимость с операционной системой; энергопотребление; материал и размеры корпуса. Перечисленные дополнительные характеристики тоже могут определить выбор способа 3D-сканирования в конкретных случаях.

2.1. Точность 3D-сканирования

При выборе 3D-сканера не рекомендуется ориентироваться на показатель точности 3D-сканирования, который указан в паспорте оборудования. Точность сканирования – это показатель, который зависит от многих факторов. Даже самый высокоточный и дорогой 3D-сканер может оказаться неэффективным в руках неумелого инженера, в то же время смартфон с функцией 3D-сканирования может довольно точно сформировать облако точек из фотографий, что позволит добиться погрешности 3D-сканирования в несколько миллиметров.

Однако технология 3D-сканирования в большей степени определяет точность получаемых 3D-моделей. В зависимости от типа сканирования (контактного, оптического или лазерного) зависит разрешение 3D-сканера, которое определяется удалённостью друг от друга точек, полученных в ходе сканирования объекта. Для каждого типа устройства это значение разное. Минимально возможное расстояние между точками сканирования зависит от размера объекта, разрешающей способности камеры. Самая маленькая область объекта должна состоять не менее чем из двух точек сканирования. Если необходима точность в 100 мкм, то самый маленький изгиб или шероховатость должны быть как минимум в 200 мкм. На точность 3D-сканирования влияет детализация, которая также определяется размером сканируемой детали. В большинстве случаев детализация 3D-сканеров составляет 1 мм.

Точность 3D-сканирования определяется условиями, которые были организованы перед созданием 3D-модели. Также ошибки в 3D-сканировании возникают при сшивке фотографий (при фотограмметрии). Одна и та же фотография, которую программа анализирует для формирования 3D-образа, может представить в разных значениях размера одной и той же грани. Программа не всегда сделает правильный выбор значения размера, что скажется на точности 3D-сканирования. Больше всего таких ошибок возникает, когда 3D-сканер не зафиксирован (ручные 3D-сканеры). Кроме того, на точность 3D-сканирования влияет шероховатость объекта, неравномерность и неоднородность поверхности. В большинстве случаев (оптические или лазерные 3D-сканеры) на 3D-сканирование оказывает влияние свет, который по-разному преломляется или отражается от поверхности объекта. Освещение меняется при смене угла камеры, изменении расстояния детектора от сканируемого объекта.

В ходе 3D-сканирования может возникнуть непредсказуемое обстоятельство, которое повлияет на точность создания 3D-модели. В идеальных условиях сканируемый объект не должен менять свою форму при разном расположении. Например, при сканировании человека в режиме стоя или лёжа размеры будут отличаться, так как наше тело под действием сил тяжести или реакции опоры деформируется. Поэтому при формировании единого 3D-образа человека точность модели будет далека от идеала, если она будет формироваться по снимкам, выполненным в режиме стоя, лёжа, сидя.

Если при сканировании тело движется или сканер меняет своё расположение, то это также приводит к потере точности. В идеальных условиях

объект и 3D-сканер должны быть неподвижными. Однако в большинстве случаев это невозможно, так как сканируемые объекты обладают сложной формой, в связи с чем необходимо создание облака точек из нескольких ракурсов, для чего нужно поворачивать объект или сканер. Деталь может содержать отверстия, полости, грани, скрытые за элементами сканируемого объекта.

Практически установлено, что лучше сканировать светлые объекты, чем тёмные, так как программы, встроенные в 3D-сканеры, распознают тёмные области как пустоты. Для того, чтобы снизить негативный эффект, связанный с наличием темных областей, рекомендуется использовать специальные средства, которые позволяют придать матовый цвет объекту. Таким образом, устраняются прозрачность и блеск поверхности детали, которые отрицательно влияют на точность 3D-сканирования.

Идеальной для 3D-сканирования является матовая и плоская область, которую не нужно поворачивать. Наиболее проблемными участками при 3D-сканировании являются отверстия. На наш взгляд, крайне «неблагодарный труд» – добиваться высокой точности при сканировании отверстий. Предпочтительно оставить отверстие «в покое» и использовать программу, позволяющую корректировать 3D-модель. Например, во многих графических программах, позволяющих создавать и редактировать 3D-модели, можно вырезать отверстие заданного размера, с резьбой, со сложной конфигурацией. В идеале геометрия сканируемого объекта должна быть правильной, с чёткими границами.

Рекомендуется, чтобы весь объект при каждой снимке находился в области 3D-сканирования. В противном случае, при совмещении фрагментов возникает ошибка, которая может существенно повлиять на точность 3D-сканирования. Идеальным расположением объекта является перпендикулярное к поверхности. Обычно поверхность сканера, на котором располагается деталь (матового цвета) чёрная. Лазерные и оптические сканеры рекомендуется перед началом прогреть до рабочей температуры и откалибровать, тогда снизится вероятность возникновения ошибки при 3D-сканировании. Калибровка стола, процесс сканирования, должны проводиться при одной и той же освещённости, одинаковом расположении 3D-сканера. Поэтому рекомендую жёстко зафиксировать 3D-сканер к столу, который не сдвигается, не шатается. Рядом с 3D-сканером не должны располагаться предметы, которые оказываются в области сканирования и влияют на освещённость. Обратите внимание на то, при каком освещении вы калибруете и при каком освещении сканируете. Время суток, в некоторых случаях, тоже может сказаться на точности 3D-сканирования. Следует зафиксировать даже такую деталь, как температура поверхности, на которой располагается деталь при калибровке и 3D-сканировании.

Сложно сказать, нужно ли повысить или понизить яркость освещения для повышения точности 3D-сканирования. В каждом конкретном случае яркость освещения может играть как положительную, так и отрицательную роль. Поэтому необходимо предварительно произвести 3D-сканирование при различной освещённости для того, чтобы определиться с уровнем света.

Возможность равномерно менять уровень освещённости может благоприятно сказаться на качестве сканирования детали. Закрытое помещение или шкаф, в котором располагается 3D-сканер, позволит не только создать равномерный и стабильный свет, но и поддержать постоянную температуру, которая может повлиять на размер деталей. Это особенно важно в тех случаях, когда размер детали измеряется в метрах, при этом точность сканирования может ухудшиться на десятые доли миллиметра при изменении температуры в 10 °С. Этот факт связан с тем, что при нагревании деталь может расширяться, при охлаждении сужаться в разной степени в зависимости от природы материала. В закрытом корпусе, помимо поддержания постоянной температуры, можно расположить камеры на одинаковом расстоянии от сканируемой области объекта, что также может повысить точность 3D-сканирования.

Особое внимание к точности уделяется, когда объект формируется из нескольких отсканированных фрагментов. В момент совмещения фрагментов погрешности не избежать. Существенное влияние оказывает то, по какому принципу совмещены объекты. Если объекты совмещаются по геометрическим отличительным показателям, то точность будет зависеть от того сколько было взято отличительных показателей и какова точность сканирования каждого из них. Например, берём 3 поверхности и 3 грани, которые вошли в одну область сканирования, а четвёртая поверхность – в другую. Точность сканирования всей детали будет зависеть от того, в какой степени совпадут размеры трёх поверхностей и граней в двух вариантах 3D-сканирования. Такой принцип сшивки наиболее предпочтительный с точки зрения повышения точности, но более трудоёмкий. Он потребует хороших навыков работы в программах для последующей обработки сканированных 3D-моделей.

Наиболее распространённым способом сшивки является маркировка (рис. 2.3), которая потребует перед осуществлением 3D-сканирования установить маркеры, представляющие собой наклейки контрастного цвета, расположенные в хаотичном порядке.



Рис. 2.3. Деталь, подготовленная маркерами (матированная) для 3D-сканирования [26]

В некоторых случаях маркеры могут располагаться на определённом расстоянии, которое фиксируется фотограмметрической системой для повышения точности сканирования.

2.2. Контактный способ 3D-сканирования

К контактному 3D-сканеру относят координатно-измерительные машины (КИМ) (*coordinate measuring machine (CMM)*). С развитием цифровых технологий, а именно с появлением компьютерных программ, способных создавать модели по облаку точек, координатно-измерительные машины были отнесены к контактным 3D-сканерам, которые обладают высокой точностью сканирования. Современные КИМ оснащены программными продуктами, которые создают 3D-модели в различных форматах. В большинстве случаев КИМ относятся к стационарным видам 3D-сканеров, точность которых снижается в основном из-за деформации рамы. Высокая точность работы контактных 3D-сканеров характерна для устройств, оснащённых рамами, изготовленными с минимальными допусками к параллельности, перпендикулярности, соосности. Для снижения негативного воздействия на точность от внешних вибраций КИМ устанавливают на тяжёлый фундамент (рис. 2.4).



Рис. 2.4. Типы координатно-измерительных машин

КИМ напоминают промышленные станки с числовым программным управлением (ЧПУ) на массивном основании, но вместо шпинделя крепится измерительная головка с рубиновым шариком на конце. 3D-сканирование, или контроль геометрических размеров, производится контактным способом, при этом щуп медленно подходит к измеряемому объекту, регистрируя малейшее касание. Также существуют системы с подвижными механизмами, в которых установлены высокоточные энкодеры (специальные датчики, преобразующие перемещение в сигналы). При перемещении сканирующего органа оператором эти датчики фиксируют перемещение всей системы и на основе этих данных строят трехмерную модель изделия.

Прототипом современных контактных 3D-сканеров стала КИМ, схема которой представлена на рис. 2.5. Основным рабочим элементом КИМ является измерительная головка, которая контактирует с поверхностью детали, установленной на столе. Измерительная головка перемещается по координатам

X, Y, Z за счёт стойки, поперечины, салазки, направляющих. Рабочий элемент приводится в движение за счёт пневмостанции.

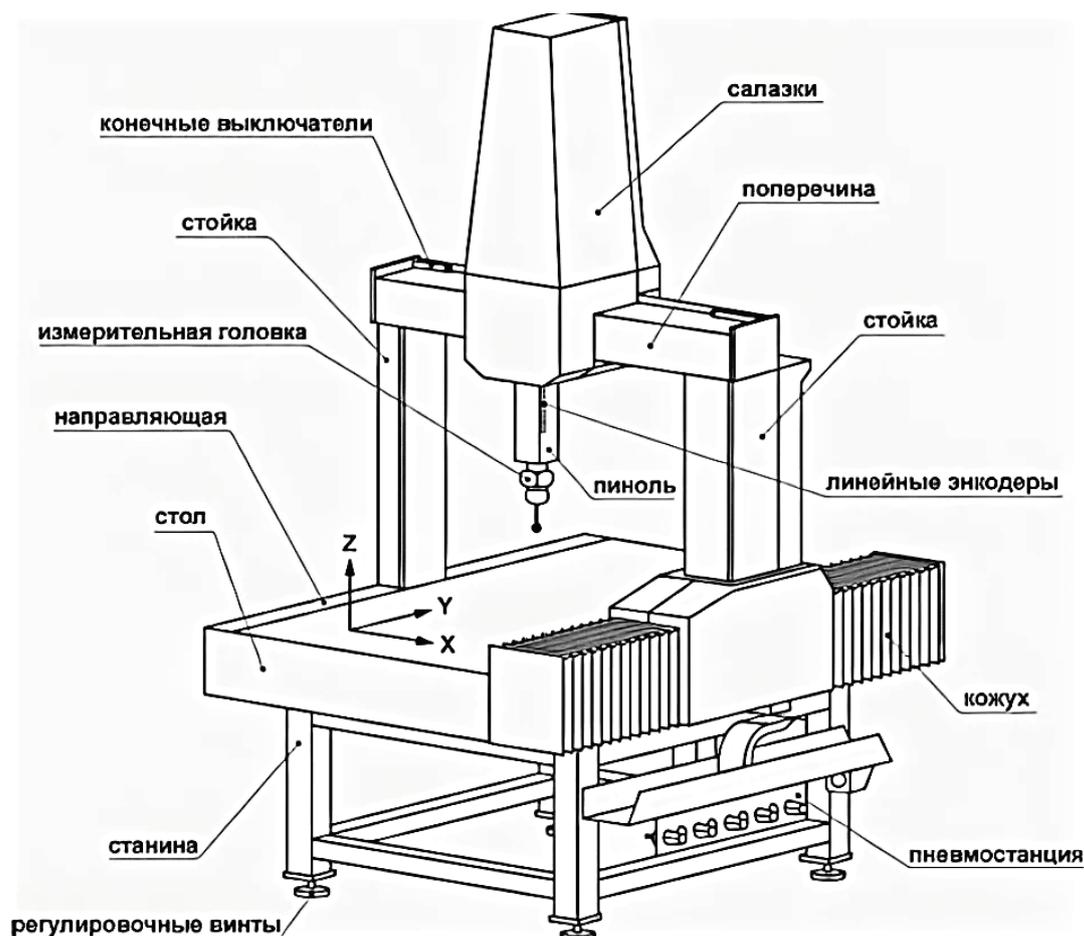


Рис. 2.5. Стационарная КИМ – прототип контактного 3D-сканера

Вся конструкция КИМ жёстко закреплена на станине. Для создания облака точек сложной поверхности измерительная головка может поворачиваться, что позволяет менять угол её наклона относительно сканируемой детали. На рис. 2.6. представлены различные варианты измерительных головок контактных 3D-сканеров.



Рис. 2.6. Измерительные головки 3D-сканеров (координатно-измерительных машин)

Современные контактные 3D-сканеры оснащены модулем позиционирования в пространстве, что позволило создать ручные портативные устройства (рис. 2.7). Такая конструкция контактного 3D-сканера облегчила процесс 3D-сканирования, несущественно снизив точность создания 3D-модели деталей.



Рис. 2.7. Конструкции современных портативных контактных 3D-сканеров: 1 – 3D-сканер *Handy Probe* от *Creaform*; 2 – 3D-сканер *Faro Arm Edge*

Производитель 3D-сканеров *Handy Probe* заявляет точность сканирования контактных устройств – 0,025 мм, скорость измерения – до 80 замеров в секунду, размеры измеряемой детали – от 0,2 до 6 м. Общий вес устройства, представленного на рис.2.7, 1 не превышает 6,5 кг, при этом активная часть, которая располагается в руке, весит 0,5 кг. Рекомендуется производить замеры при температуре от 5 до 40 °С.

2.3. Бесконтактные оптические 3D-сканеры

Бесконтактные 3D-сканеры (оптические, лазерные) в отличие от контактных характеризуются высокой скоростью создания большого массива точек. Для сравнения, контактный 3D-сканер создаёт до 80 замеров в секунду, а бесконтактный способен создавать до 1,5 млн точек в сек. Бесконтактные 3D-сканеры в основном подразделяют на оптические и лазерные. Основным рабочим элементом оптических 3D-сканеров является измерительная оптика. Оптическая система присутствует и в лазерных 3D-сканерах, но использование лазера существенно меняет характеристики 3D-сканирования, поэтому лазерные 3D-сканеры относят к отдельной категории.

Более доступными и распространёнными являются оптические (SL) 3D-сканеры, которые работают по принципу стандартного видеопроектора, проецирующего на объект набор чередующихся между собой черных и белых

полос. Для запечатления сдвигов и искажений полос используется одна или две камеры. Таким образом, получают точки смещения, по которым создаётся объект в 3D-пространстве (рис. 2.8).

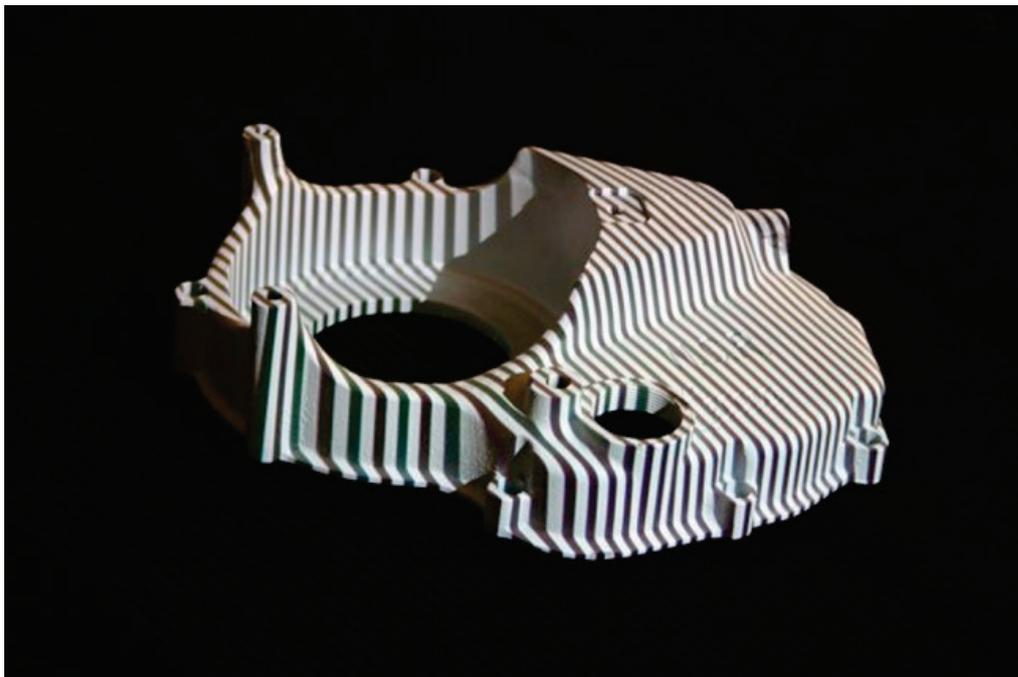


Рис. 2.8. Проецирование полос света на сканируемую деталь с помощью оптического (SL) 3D-сканера

Преимуществами данного способа 3D-сканирования являются: лучшее считывание данных при низком освещении; возможность работы с 3D-сканером в домашних условиях; высокая скорость 3D-сканирования (некоторые системы могут сканировать объекты в движении); высокая точность сканирования (3D-сканеры этого типа практически не уступают лазерным (примеры: *Artec Eva*, *RVScanner*, *OptiNum*)).

2.4. Бесконтактный оптический сканер, работающий по принципу фотограмметрии

Количество 3D-моделей, полученных по принципу оптического сканирования, а именно фотограмметрии, быстро растёт благодаря тому, что этим способом 3D-сканирования оснащены современные смартфоны. Существует ряд бесплатных приложений, доступных в *Google Play*, *App Store*, которые позволяют по серии снимков объекта создавать 3D-модель. Точность 3D-сканирования с помощью фотограмметрии существенно уступает точности лазерного 3D-сканирования и во многом определяется качеством и подготовкой фотоснимков, а также их количеством. Правильно организованное и равномерное освещение, большое количество камер, расположенных со всех ракурсов и имеющих высокое разрешение, и высококачественная оптическая система позволяют получить 3D-модель изделия с высокой точностью.

Фотограмметрия была успешно использована при создании фильмов в 3D-формате. В СССР для этого были использованы специальные стереофотокамеры, которые состояли из трёх и более окуляров.



Рис. 2.9. Система камер и освещения для создания 3D-модели по принципу фотограмметрии

После получения массива из фотографий, снятых с разных ракурсов, они сшиваются вместе, за счёт чего создаётся 3D-модель по определенным алгоритмам программы. Этот метод при умелой настройке можно назвать самым быстрым 3D-сканированием. Такие компании, как *Infinite*, *Realities* использовали для создания фотограмметрических установок от 50 до 120 высокоскоростных камер, что позволило им получить максимально реалистичные 3D-модели. По принципу фотограмметрии компания *Google* сшивает аэрофотоснимки и создаёт трехмерные, топографические модель земли (рис. 2.10), которая нам доступна в смартфонах.

Фотограмметрия с помощью одной камеры существенно замедляет процесс 3D-сканирования, так как потребуются перемещения камеры вокруг объекта для создания большого количества фотографий, чтобы получить максимально хороший результат. Но это наименее затратное решение, так как из оборудования понадобится только одна камера и несколько программ. В зависимости от качества полученных снимков могут получиться хорошие или же посредственные результаты 3D-сканирования.

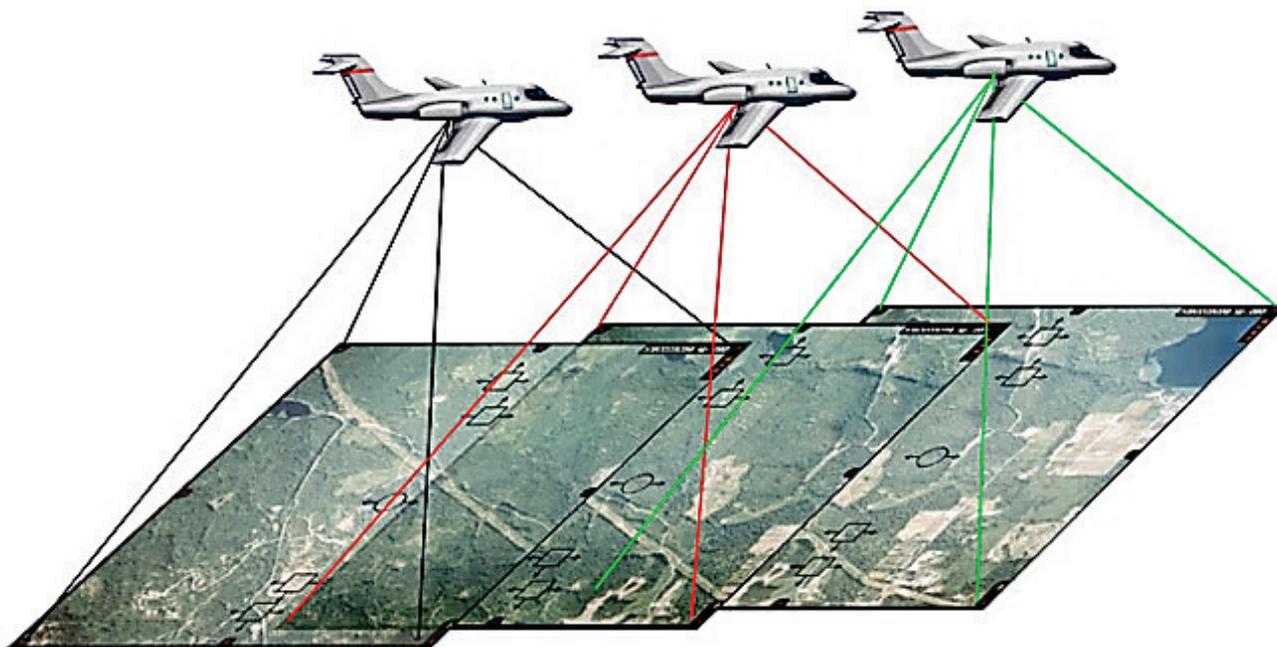


Рис. 2.10. Создание трёхмерных топографических моделей Земли по принципу фотограмметрии

Фотограмметрия основана на алгоритмах обработки цифрового изображения, в ходе чего программа определяет уникальные особенности на снимках, по объединению которых создается 3D-модель объекта. Основным преимуществом фотограмметрии перед другими способами 3D-сканирования является доступность. На практике можно получить 3D-модель с помощью только одной камеры, что упрощает создание 3D-изображения. Недостатком является низкая точность 3D-сканирования, которая зависит во многом от качества и количества подготовленных фотографий исследуемого объекта.

Еще одним преимуществом фотограмметрии, в отличие от способов лазерного 3D-сканирования, является возможность создания 3D-моделей в цветном формате. Однако лазерное 3D-сканирование обладает более высокой точностью вне зависимости от удалённости сканируемого объекта.

2.5. Лазерные 3D-сканеры

Лазерные 3D-сканеры в основном подразделяют на импульсные, фазовые, триангуляционные, комбинированные (рис. 2.2). Импульсные 3D-сканеры работают по принципу лазерного дальномера. В трехмерном пространстве рассчитывается скорость перемещения лазерного импульса с точки, в которой установлено устройство, до объекта и обратно (рис. 2.11). Если объединить все данные, получится облако точек в трехмерном пространстве.

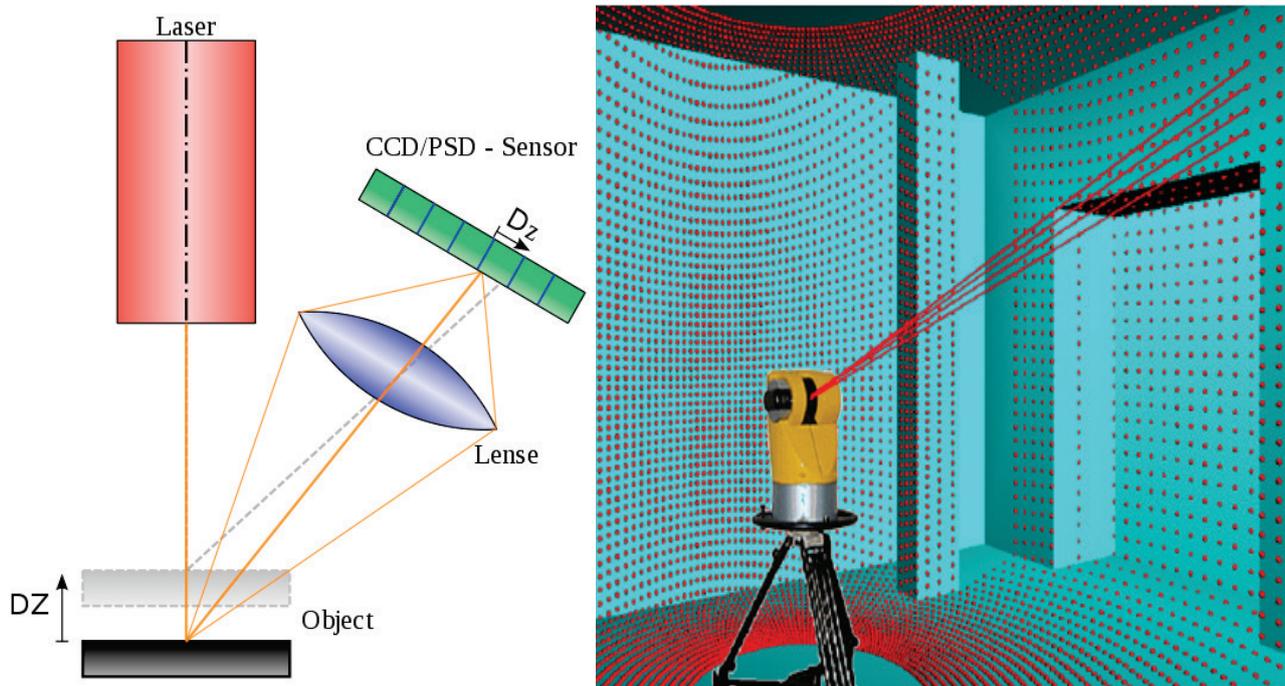


Рис. 2.11. Схема работы лазерного сканера

Импульсный метод определения расстояния позволяет создать облако точек с точностью до 10–20 мм при дистанции до объекта в один километр. Точность 3D-сканирования объектов в помещении, например, при промышленном дизайне, составляет примерно один миллиметр. Скорость сканирования превышает более 1 млн точек в секунду. Характеристики лазерных 3D-сканеров разного назначения отличаются. Наибольшее распространение получили 3D-сканеры, которые используются в архитектуре и в промышленном дизайне. Например, для съёмки цеха предприятия широкое распространение нашли импульсные лазерные 3D-сканеры, которые устанавливаются на треногу. Точность определения таких устройств порядка 5–7 мм на дистанции до объекта 50 м. Максимальное расстояние, которое рекомендуют производители не превышает 500 м. Импульсные лазерные 3D-сканеры создают порядка 50 000 точек/сек, размер которых составляет около 6 мм, а поле зрения 3D-сканера равно 270/360 градусов.

Более точное 3D-сканирование, по сравнению с импульсными лазерными 3D-сканерами, характерно для 3D-сканирования, основанного на фазовом сдвиге, при этом дальность сканирования существенно снижается (средняя дальность до 200 м), а точность 3D-сканирования повышается за счёт того, что импульсный принцип определения расстояния дополняется измерением фазового сдвига.

Максимально возможная точность 3D-сканирования достигнута при формировании 3D-модели объекта лазерной триангуляцией (в стационарном расположении источников лазера, исследуемого объекта и оптической системы) (рис. 2.12). Часто этот принцип используется в портативных 3D-сканерах, принцип работы которых заключается в том, чтобы записать положение объекта относительно поля зрения камеры.

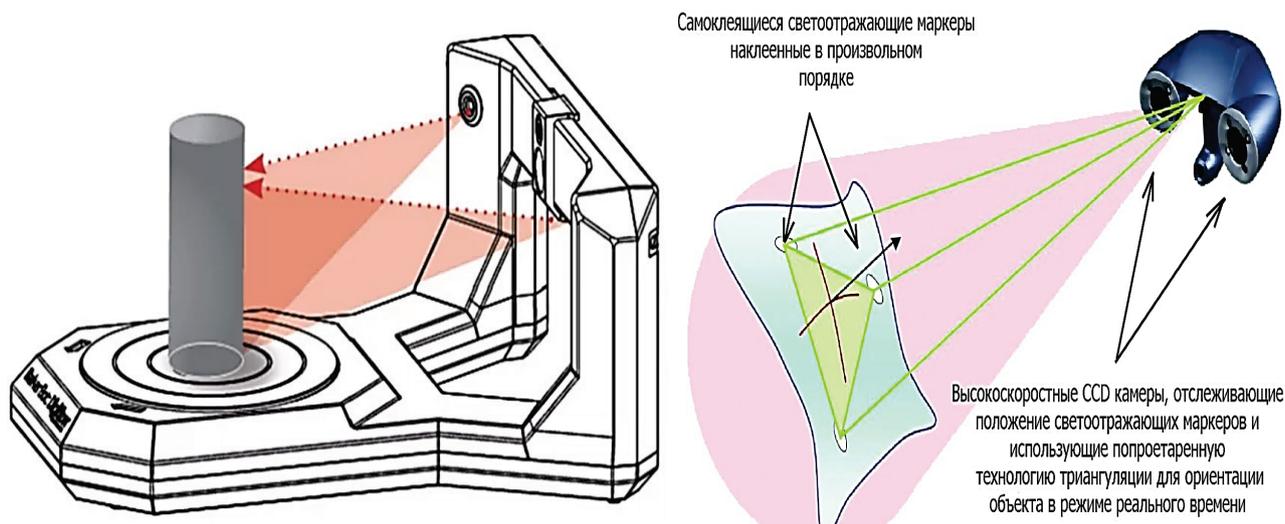


Рис. 2.12. Принцип триангуляции в стационарных (слева) и портативных (справа) 3D-сканерах [29]

Портативные лазерные 3D-сканеры, работающие по принципу триангуляции, снабжены устройствами позиционирования в пространстве в режиме реального времени, что существенно удорожает конструкцию. Кроме того, устройство позиционирования 3D-сканера в пространстве в режиме реального времени также может быть причиной снижения точности 3D-сканирования.

2.6. Основные производители 3D-сканеров

В условиях быстро растущего рынка аддитивных технологий производителей 3D-сканеров в мире с каждым годом становится всё больше. Наиболее известные на рынке компании-производители 3D-сканеров представлены в табл. 2.1.

Таблица 2.1 – Основные производители 3D-сканеров в мире

 <p>Artec 3D Россия http://www.artec3d.com/</p>	 <p>RangeVision Россия http://rangevision.com/</p>	 <p>Texel Россия http://texel.graphics</p>
 <p>Thor3D Россия http://thor3dscanner.com/</p>	 <p>- Creaform Inc. Германия http://www.creaform3d.com</p>	 <p>MakerBot Industries, LLC США http://makerbot.com</p>

 <p>Open Technologies Srl Италия http://www.scanner3d.it/ru/</p>	 <p>Fuel 3D Technologies Limited США http://www.fuel-3d.com/</p>	 <p>DAVID 3D Solutions GbR Австралия http://www.david-3d.com/</p>
 <p>SHINING 3D TECH Китай http://www.shining3d.com/</p>	 <p>AICON and Breuckmann Германия http://aicon3d.com</p>	 <p>3D Systems США http://www.3dsystems.com/</p>

Приятно отметить, что российские компании активно продвигают на рынок аддитивных технологий свои 3D-сканеры, не уступающие по своим характеристикам зарубежным аналогам.

2.7. Программы для постобработки 3D-моделей тел и сетей после 3D-сканирования

При 3D-моделировании размеры деталей, поверхностей, объектов задаются и проверяются с помощью графических программ, например, *AutoCAD*; *CorelDRAW*; *3Ds Max* и др. Проектировщик или дизайнер создаёт 3D-модель заранее зная основные размеры. Некоторые неизвестные на предварительной стадии размеры могут быть определены в процессе формирования 3D-модели. Использование программ, работающих с векторным форматом файлов, позволяет определить неизвестные на ранних стадиях проектирования размеры с высокой точностью. Изготовленный объект по чертежам или по 3D-модели практически точно повторяет размеры. Ошибка между размерами, заданными при проектировании, и реальными размерами связана с погрешностью оборудования, с помощью которого изготавливается объект. Например, при экструзионной 3D-печати из пластика эта ошибка связана с усадкой полимера, при стереолитографии – с усадкой жидкой затвердевшей смолы. При 3D-печати металлических изделий лазером из порошка ошибка возникает из-за неравномерного нанесения слоя сырья, плавления (обжига) металла и др. Наибольшее соответствие размеров изготовленной детали с размерами, заданными в графической программе, характерно для изделий, полученных с помощью станков с ЧПУ, однако при этом теряется много материала.

В отличие от 3D-моделирования, 3D-сканирование связано с большими погрешностями. При обратном инжиниринге или прототипировании, то есть при высоких требованиях к соответствию размеров проектируемого и изготавливаемого объекта точность должна быть настолько высокой, что

практически ни один из способов 3D-сканирования не обходится без доработки 3D-модели. После 3D-сканирования потребуется дополнительная «очистка» полученного из облака дочек объекта и геометрическое 3D-моделирование. Для этих целей используются специальные программы, среди которых есть доступные простые и бесплатные. Функциональные возможности программ для постобработки разные. Одним из основных критериев выбора той или иной программы для постобработки 3D-модели является возможность импорта и экспорта файлов в форматы, которые открывают «слайсеры» (программы, позволяющие подготовить файл 3D-модели для 3D-печати). Кроме того, программа должна редактировать и создавать объёмные фигуры, вытягивать, вращать, перемещать, соединять объекты.

Одна из самых распространённых программ, которая используется для постобработки 3D-моделей, полученных после 3D-сканирования, является *Blender* [30]. Программа *Blender* первое время считалась сложной для восприятия из-за неудобного интерфейса. Но благодаря большому набору функциональных возможностей эта программа набрала популярность среди профессиональных дизайнеров. Значимую роль в распространении этого программного продукта сыграла поддержка создателей *Blender*. Большое количество видеуроков от разработчика Тона Розендаля, форумов, хороших отзывов от профессионалов позволили начинающим пользователям использовать профессиональную, но в тоже время бесплатную программу.

Blender — профессиональное свободное и открытое программное обеспечение для создания трёхмерной компьютерной графики, включающее в себя средства моделирования, скульптинга, анимации, симуляции, рендеринга, постобработки и монтажа видео со звуком, компоновки с помощью узлов *Node Compositing*, а также создания 2D-анимаций. В настоящее время пользуется большой популярностью среди бесплатных 3D-редакторов в связи с его быстрым стабильным развитием и технической поддержкой [15]. Основные характеристики программы представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2– Характеристики программы Blender

Автор	Тон Розендал (NL)
Разработчик	Blender Foundation, 1998 г
Написана на	Си, C++ и Python
Операционная система	Linux, Mac OS, Windows
Читаемые форматы файлов	.blend, Obj, COLLADA, Alembic, 3DS, FBX, Biovision Hierarchy, PLY, X3D, STL, SVG, DXF, glTF, IFC
Создаваемые форматы файлов	.blend, Obj, COLLADA, Alembic, 3DS, FBX, PLY, X3D, STL, SVG, DXF, glTF, IFC

Blender позволяет поддерживать разнообразные геометрические примитивы, включая полигональные модели, систему быстрого моделирования в режиме *subdivision surface (SubSurf)*, кривые Безье, поверхности *nurbs*, *metaballs* (метасферы), скульптурное моделирование и векторные шрифты.

Программа осуществляет динамику мягких тел (включая определение коллизий объектов при взаимодействии), динамика твёрдых тел на основе физического движка *Bullet*.

Преимуществом программы *Blender* является её распространённость, во многом связанная с отлаженной поддержкой. Сложный интерфейс с большим количеством команд и функциональных возможностей не стал преградой для большого количества пользователей. Благодаря перечисленным преимуществам *Blender* часто преподаётся в университетах, в частности, в вузах, где подготавливают дизайнеров, инженеров-проектировщиков. Особенно востребован *Blender* среди специалистов, которые работают с 3D-сканнерами и 3D-принтерами. Для профессионалов *Blender* интересен тем, что дает возможность работать со сложными моделями, экспортировать и импортировать файлы различных форматов, что позволяет осуществлять совместную работу с мощными профессиональными программами, такими как *AutoCAD*, *SolidWorks*, *Coral Draw*, *Photoshop* и др.

Более простым и удобным в эксплуатации программным продуктом является *TinkerCAD*. Эта программа была разработана компанией *Autodesk*. В отличие от всех остальных рассматриваемых программ *TinkerCAD* нет необходимости устанавливать на компьютер. *TinkerCAD* – это онлайн сервис и среда моделирования для работы с 3D-объектами и электронными схемами. Несмотря на открытость и бесплатный доступ, *TinkerCAD* имеет богатые функциональные возможности редактора. Для работы в учебной аудитории программа предлагает возможность работать в группе, обмениваться готовыми результатами, предлагает доступ к библиотеке 3D-моделей и к системам удаленной 3D-печати. Основные характеристики программы *TinkerCAD* представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Основные характеристики программы *TinkerCAD*

Автор	Кай Бекман (Kai Backman) и Микко Мононен (Mikko Mononen) 2011 год
Разработчик	Autodesk
Написана на	Си, C++ и Python
Операционная система	Linux, Mac OS, Windows
Читаемые форматы файлов	STL, OBJ, X3D colors, VRML colors и в векторном формате SVG

Основными преимуществами программы *TinkerCAD* являются: простота; отсутствие необходимости установки программного продукта; доступ с любого компьютера, подключённого к Интернету; хорошая поддержка от разработчиков, представленная в многочисленных видеоуроках.

Несмотря на простоту, *TinkerCAD* позволяет создавать объекты сложной формы, состоящие из большого количества деталей, благодаря распространённым для профессиональных программ командам: размещение формы (можно добавлять существующие на сайте или импортировать собственные); корректировка объектов (линейка позволяет вводить точные размеры); объединение элементов для создания сложных фигур; выравнивание объектов по оси; дублирование аналога 3D-массива; создания 3D-моделей с последующей 3D-печатью с высокой точностью (рис. 2.14).

TinkerCAD хорошо согласуется с 3D-принтерами, но обрабатывать сложные массивы точек и поверхности, полученные при 3D-сканировании, будет сложно. Для этого предпочтительны специализированные программы.

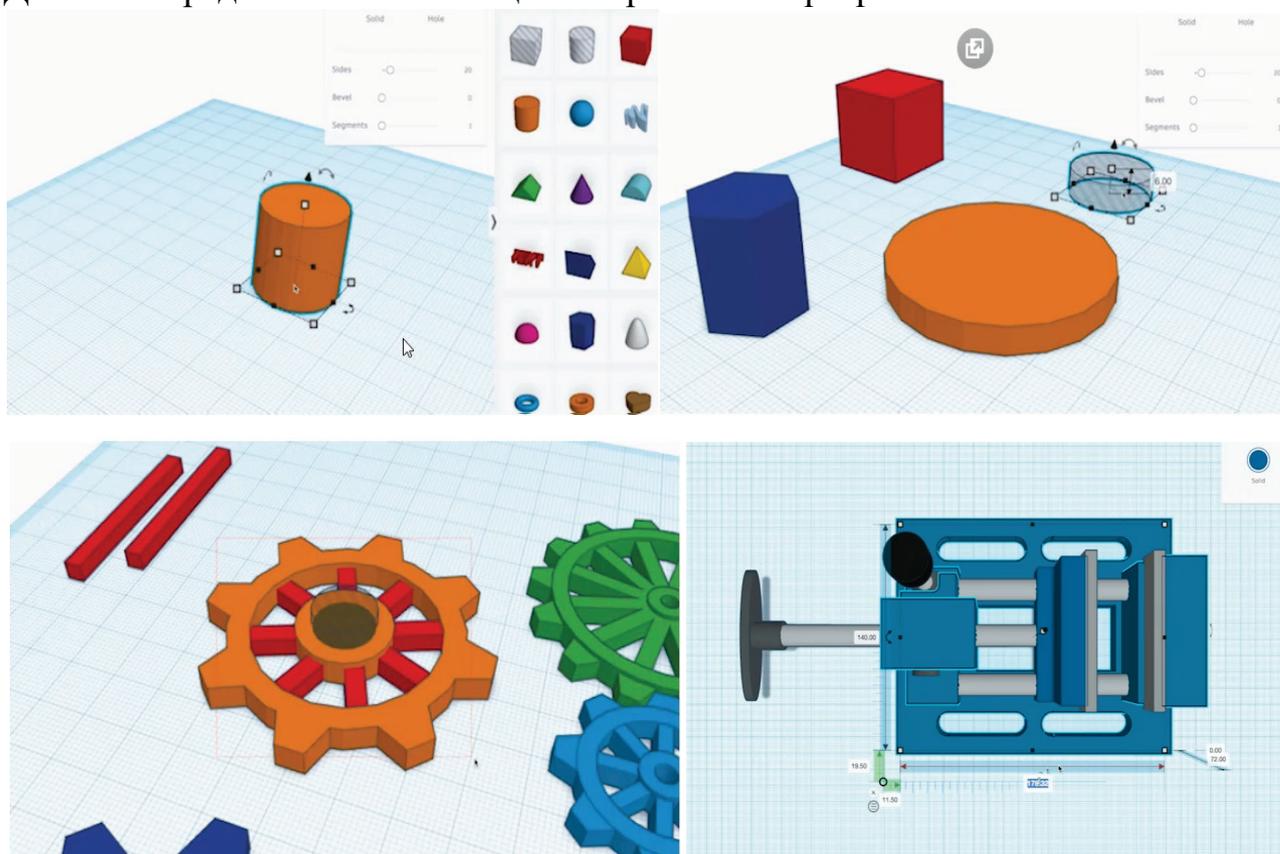


Рис. 2.14. Основные возможности программы *TinkirCAD* [16]

Например, программа *Meshmixer* – ещё один продукт от *Autodesk*. Программа неплохо себя зарекомендовала при обработке 3D-моделей сложных деталей перед 3D-печатью и после 3D-сканирования. Согласно информации, представленной в источнике [17], *MeshMixer* от *Autodesk* — это профессиональное программное обеспечение от известной компании, основная функциональность которой сосредоточена на дополнительной настройке уже имеющейся 3D-модели для дальнейшей 3D-печати. Разработчики заявляют, что главной особенностью софта является создание поддержек, которыми являются дополнительные опоры фигур для высококачественной 3D-печати определенных деталей. Благодаря огромному

количеству встроенных инструментов и функций, *MeshMixer* считают гибкой в настройках и универсальной программой.

Таблица 2.4 – Характеристики программы «MeshMixer»

Автор	Райан Шмидт 2011 год
Разработчик	Autodesk
Написана на	Си, C++ и Python
Операционная система	Linux (wine), Mac OS, Windows
Читаемые форматы файлов	STL, OBJ, X3D colors, VRML colors и в векторном формате SVG

Программу *Meshmixer* можно использовать в совокупности с другими. Она существенно облегчает процесс создания поддержек, которые необходимы при 3D-печати объекта. Поэтому программа предназначена не для доработки 3D-моделей (хотя необходимый функционал для редактирования тоже есть), а для создания комплекса подложек для последующей 3D-печати. Своего рода аналог «слайсера» 3D-принтера. Важно отметить, что не все «слайсеры» (программы для кодировки 3D-модели в файл формата *.gcode*) могут быть использованы для создания подложек. Кроме функций создания подложек, *Meshmixer* выполняет стандартные функции с 3D-моделями (перенос, вращение, позиционирование, зеркало и др.), перемещает файлы в рабочее пространство программы (быстро и удобно), имеет библиотеку различных конфигураций сеток (рис. 2.15).

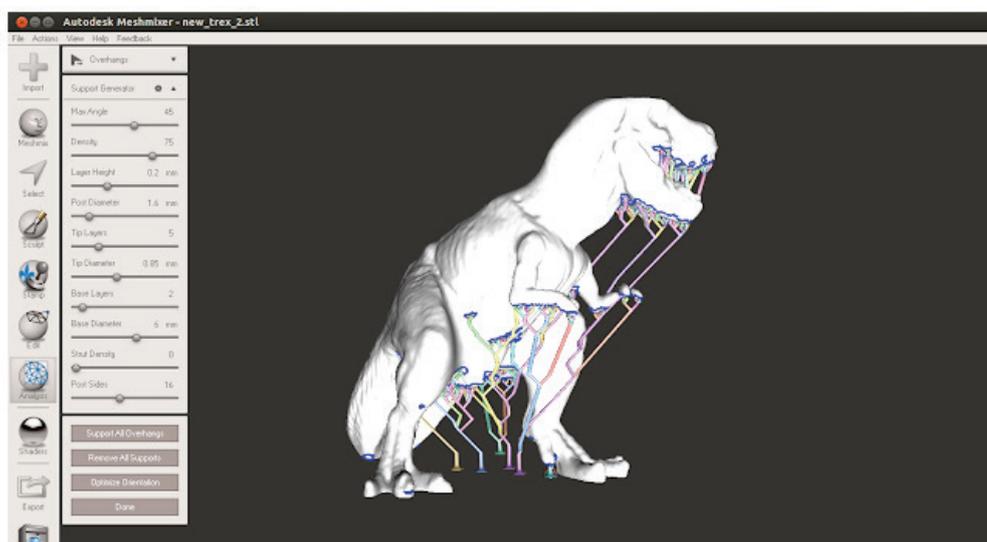


Рис. 2.15. Создание поддержек в программе *MeshMixer*

К основным преимуществам программы можно отнести: бесплатный и открытый доступ; хорошая совместимость с большим количеством других программ, в частности с *AutoCAD*, *Inventor*, *SolidWorks*; большая библиотека шаблонов и объектов; создание и редактирование поддержек для 3D-печати.

3. ТЕХНОЛОГИИ 3D-ПЕЧАТИ

На сегодняшний день технологии 3D-моделирования и 3D-печати активно развиваются и находят широкое применение в различных отраслях промышленности. 3D-моделирование осуществляется в графических программах. Наиболее широко используется программа *AutoCAD*, в которой есть команды, необходимые для создания 3D-модели сложной формы [18]. Программа *AutoCAD* обладает обширным набором инструментов, подходящих для решения различных задач, связанных с построением 3D-моделей, и одной из целей обучения студентов является выбор наиболее оптимальных из них.

В результате 3D-моделирования получается необходимый для изготовления детали файл. Одним из способов получения детали является 3D-печать. Существуют различные технологии 3D-печати, которые имеют свои преимущества и недостатки, но в целом главным плюсом 3D-печати является возможность изготовления изделий сложной формы. Из существующих технологий 3D-печати наиболее доступной и широко распространённой является печать экструзией полимера [1]. 3D-принтеры продолжительное время применялись в университете только для реализации научных проектов, результаты которых были представлены в работах [20-28]. Оборудование 3D-лаборатории СПбГУПТД неоднократно использовалось студентами старших курсов при реализации экспериментальной части выпускных квалификационных работ, результаты которых были представлены в открытой печати. Сегодня, в условиях широкого применения 3D-принтеров, своевременно включить изучение 3D-печати в образовательный процесс студентов.

3.1. 3D-моделирование деталей

В рамках существующего курса «Инженерная и компьютерная графика» студенты создают 3D-модель в программе *AutoCAD* с дальнейшим её оформлением на чертеже в соответствии с ГОСТ. Целью 3D-моделирования этой же детали является подготовка её к 3D-печати. На рис. 3.1 представлены этапы моделирования детали сложной формы. Основными из них являются построение полилинии в 2D-пространстве, выдавливание построенной области, вычитание ненужных элементов (например, цилиндра для построения отверстия, параллелепипеда для построения углубления под инструмент), объединение дополнительных областей детали, а также 3D-поворот, перенос и создание пользовательской системы координат.

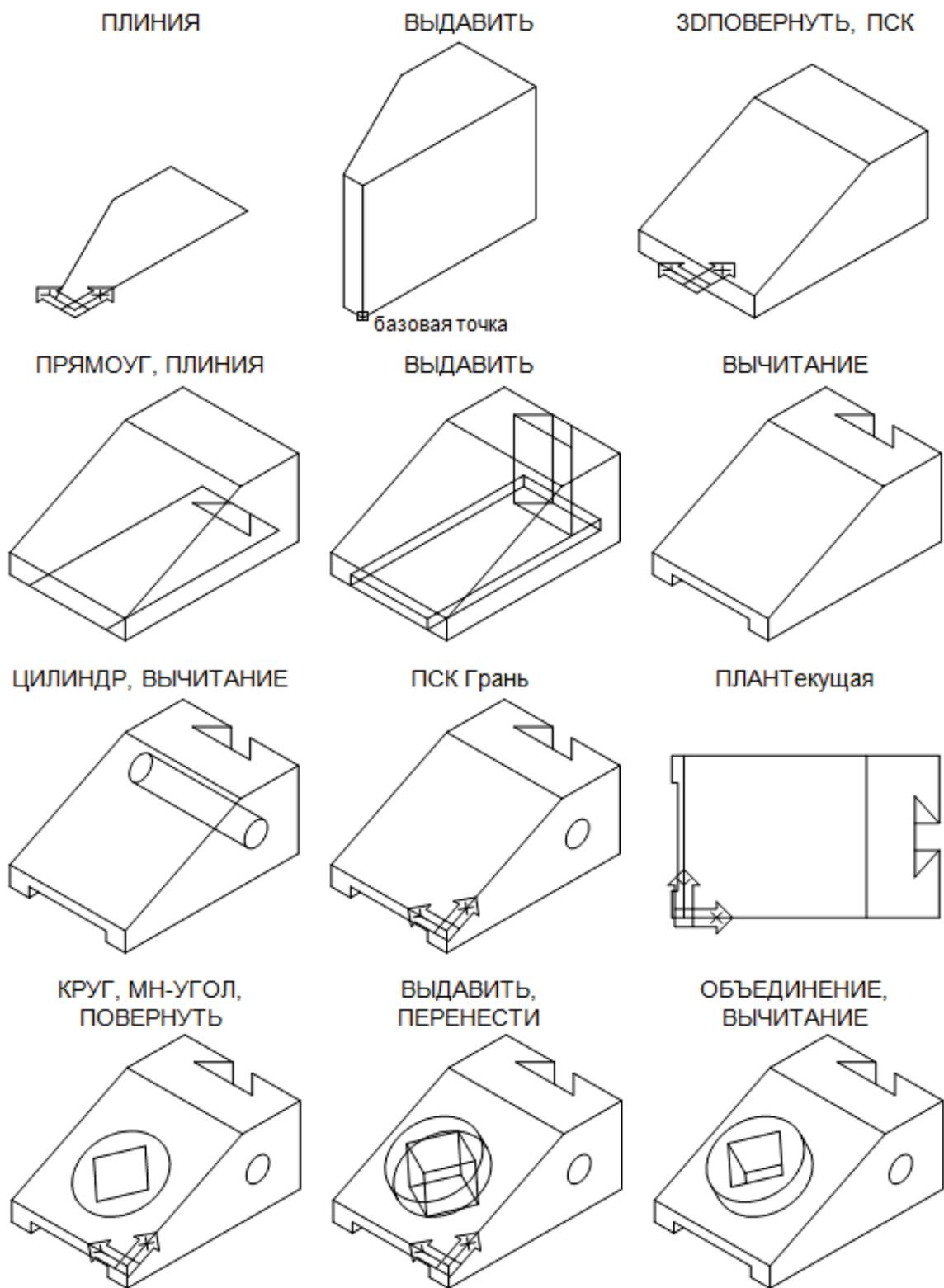
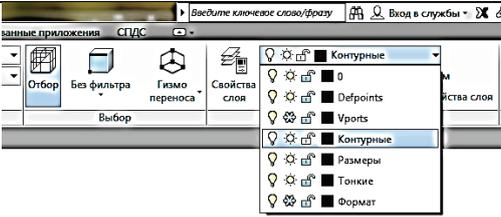
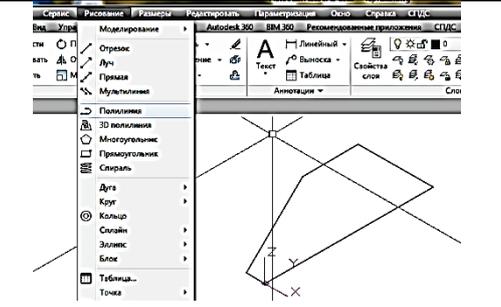
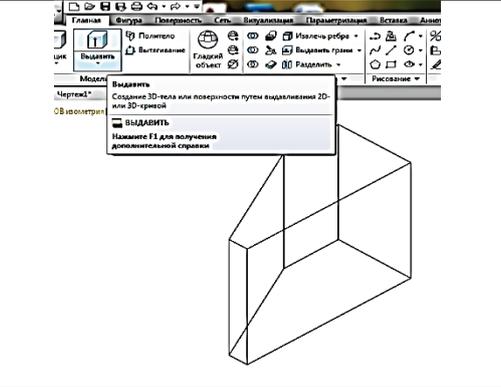
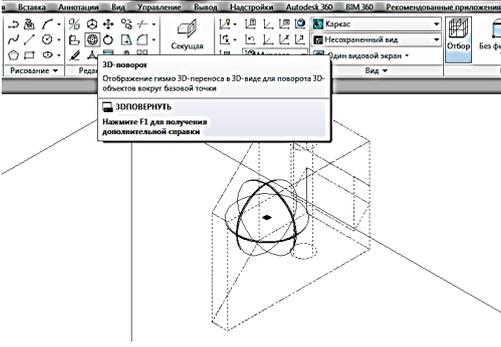
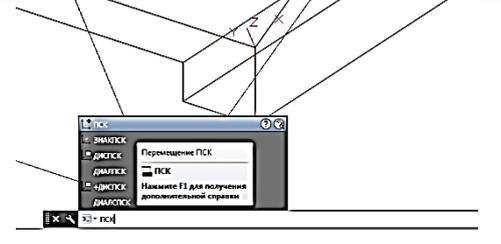
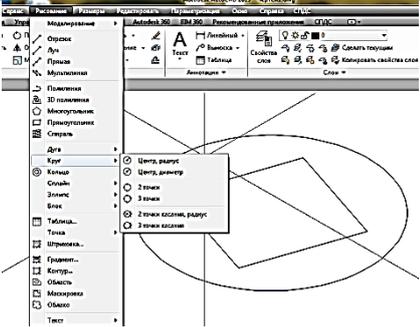
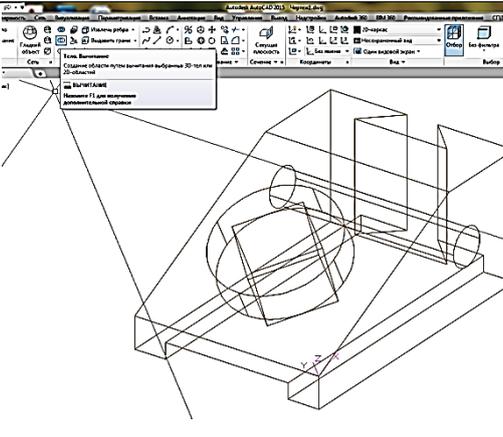
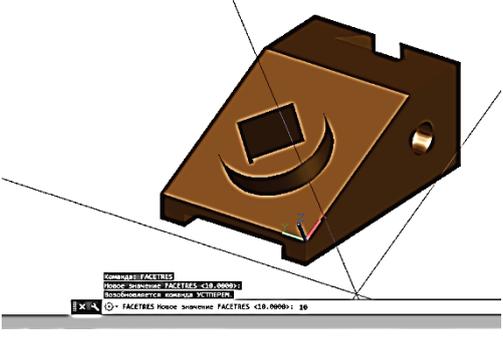
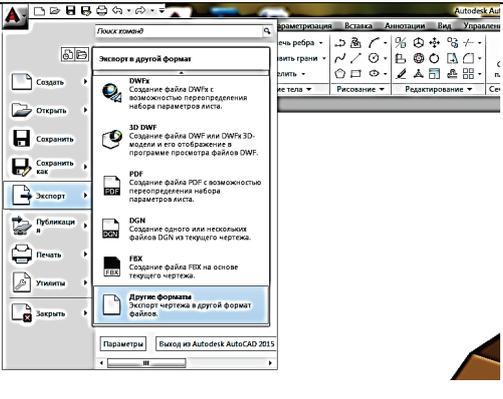


Рис. 3.1. Этапы моделирования детали сложной формы

Следует отметить, что программа *AutoCAD* постоянно совершенствуется разработчиками. Поэтому команды новых версий программы могут располагаться в разных вкладках интерфейса. В таблице 3.1 представлены команды и их расположение в рабочем пространстве *AutoCAD 2015*. Альтернативой быстрого поиска команд является использование командной строки.

Таблица 3.1 – Последовательность работы в программе AutoCAD
(этапы построения 3D модели)

Команды	Расположение
<p>В редакторе создать слои, необходимые для работы</p>	
<p>Командой «ПЛИНИЯ» построить контур боковой грани. Замыкающий сегмент полилинии построить опцией «Замкнуть»</p>	
<p>Командой «ВЫДАВИТЬ» построить контур на нужную высоту</p>	
<p>Командой «ЗДПОВЕРНУТЬ» повернуть полученное тело так, чтобы основание модели расположилось в горизонтальной плоскости. При этом необходимо задать угол поворота, равный 90°. Командой «ВЫЧИТАНИЕ» выполнить логическое вычитание пазов из основного тела</p>	
<p>Командой «ПСК» с опцией новая задать начало ПСК в центре левого нижнего ребра основания</p>	

Команды	Расположение
<p>Командами «КРУГ», а также «МН-УГОЛ» и «ПОВЕРНУТЬ» построить круг и квадрат по заданным размерам</p>	
<p>Командой «ВЫДАВИТЬ» преобразовать круг и квадрат в тела выдавливания. Командами «ОБЪЕДИНЕНИЕ» и «ВЫЧИТАНИЕ» выполнить необходимые логические операции с телами для получения законченной модели.</p>	
<p>Командой «FACETRES» выполнить сглаживание модели детали со значением 10.</p>	
<p>Экспортировать файл для дальнейшей печати в формат «.stl» для последующей печати с помощью 3D-принтера.</p>	

3.2. Практика изготовления деталей экструзией с помощью 3D-принтера MegaBot Dual Kit и программы Replicator G0040

Изготовление детали, смоделированной по инструкции, приведённой в таблице 3.1, осуществлялось с помощью 3D-принтера *MegaBot Dual Ki*, со следующими характеристиками: диаметр сопла – 0,4 мм; размер области построения – 200x200x180 мм; технология печати – *FDM\FFF*; количество экструдеров – 2 шт.; точность печати – 100 мкм; максимально возможная температура экструдера – 240 °С; материалы для печати – *PLA* (190 – 220 °С), *SBS* (225 – 240 °С).

Перед допуском к 3D-принтеру студенты должны быть ознакомлены с техникой безопасности при работе с оборудованием. Особое внимание уделяется рабочим элементам, которые нагреваются до высоких температур (рис. 3.2).



Рис. 3.2. Техника безопасности при работе с 3D-принтером MegaBot Dual Kit

Первым этапом изготовления детали является калибровка стола, определяющая качество изготовления первого слоя. Если первый слой будет нанесён в соответствии с инструкцией, представленной на рис. 3.3, то он правильно зафиксируется на рабочем столе и проблем с печатью в дальнейшем не возникнет. Для правильной калибровки стола используется лист бумаги плотностью 80 г/м², толщина которого позволяет получить оптимальное расположение экструдера относительно рабочего стола (рис. 3.3).

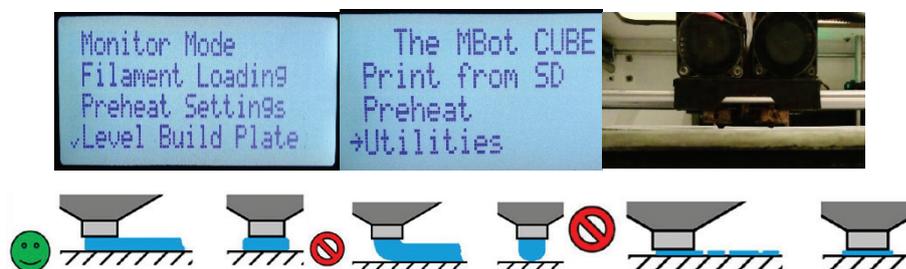


Рис. 3.3. Калибровка стола и её результат

Затем устанавливается температурный режим изготовления детали. Для конкретного пластика устанавливается определённая температура. При печати из пластика *SBS* температура экструдера должна быть не менее 225 °С (табл. 3.2).

Таблица 3.2 – Температурные режимы 3D-печати

Материал	PLA	SBS
Температура в экструдере, °C	190-220	225-240

После подогрева пластик загружается в экструдер, для чего используется функция загрузки левого или правого экструдера в зависимости от условий печати (рис. 3.4).

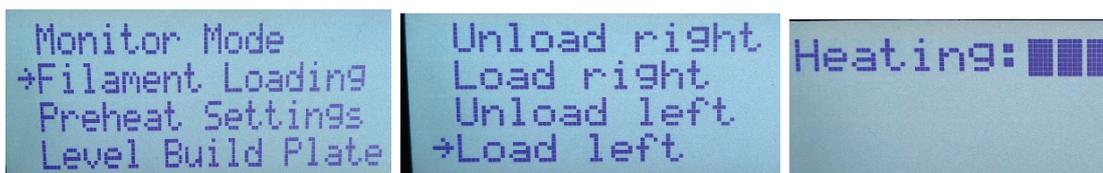


Рис. 3.4. Загрузка материала

Затем в программу *Replicator G0040* загружается файл изготавливаемой детали (рис. 3.5) в формате *.stl*.

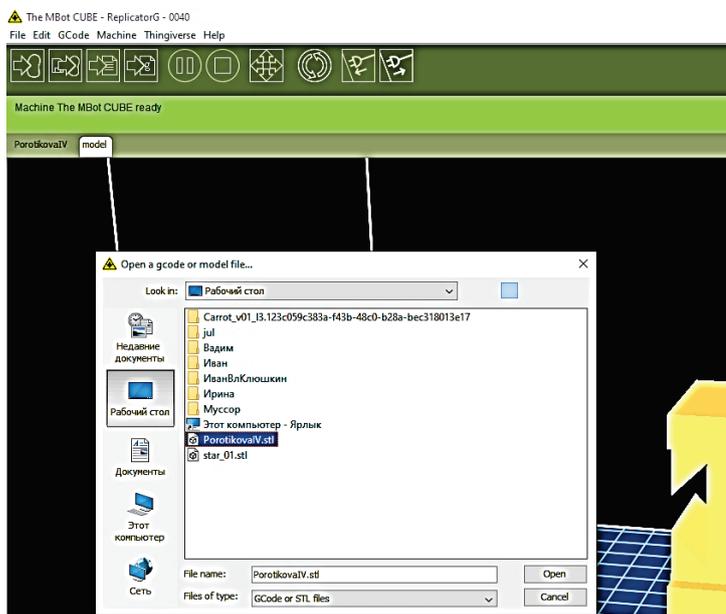


Рис. 3.5. Загрузка 3D-модели в *Replicator G0040*

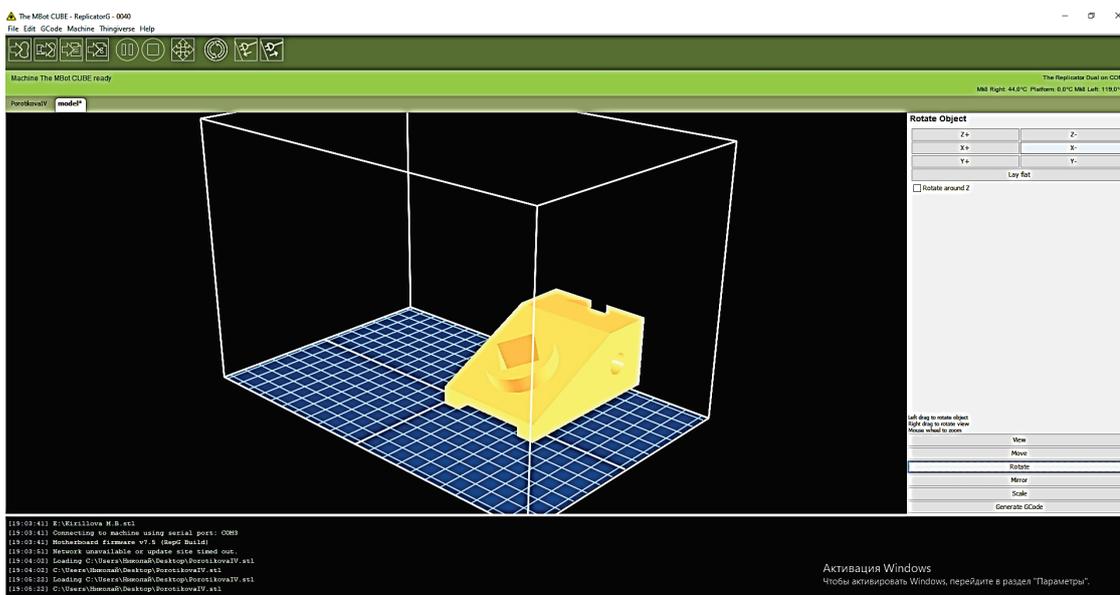


Рис. 3.6. Поворот детали *Rotate*

В программе есть опция *Rotate*, которая позволяет перевернуть деталь в нужное положение (рис. 3.6), затем развернутую деталь устанавливают на платформу, центрируют с помощью функции *Move* (рис. 3.7).

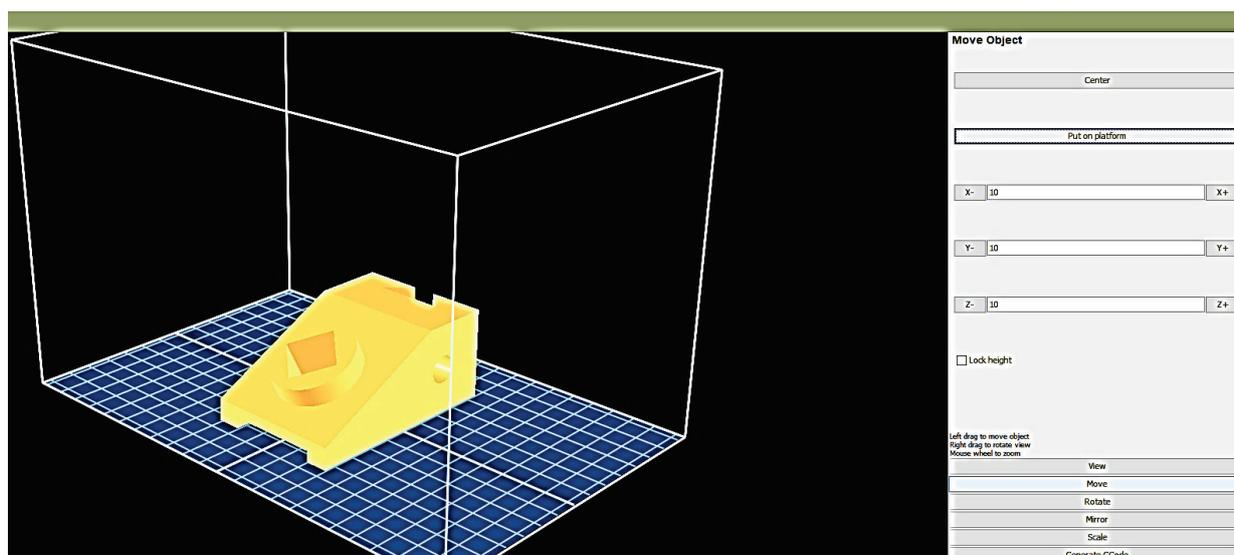


Рис. 3.7. Перемещение детали *Move*

В некоторых случаях для экономии пластика можно выбрать функцию масштабирования детали *Scale* (рис. 3.8), если работа ведется в образовательных целях. Если деталь изготавливается для практического применения, то масштаб не меняется. В данном случае задан масштаб 0,5.

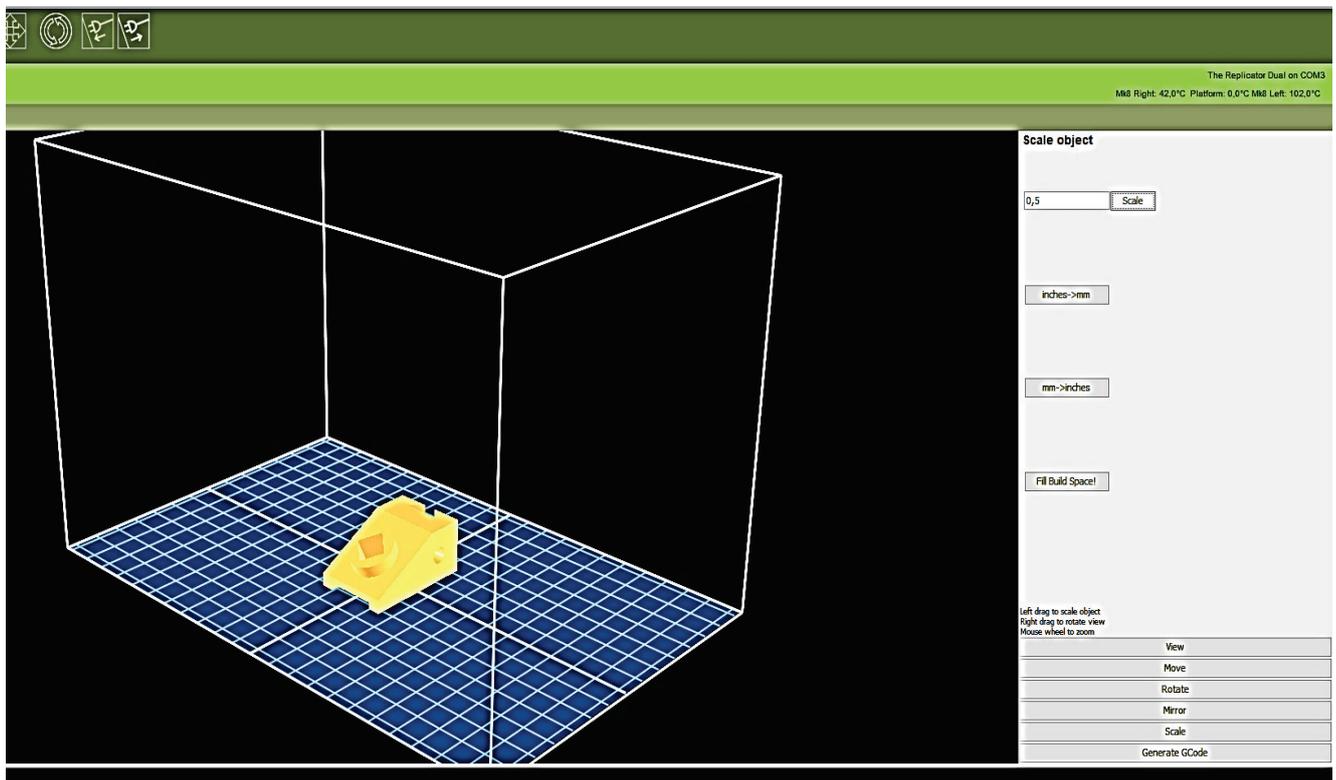


Рис. 3.8. Масштабирование детали *Scale*

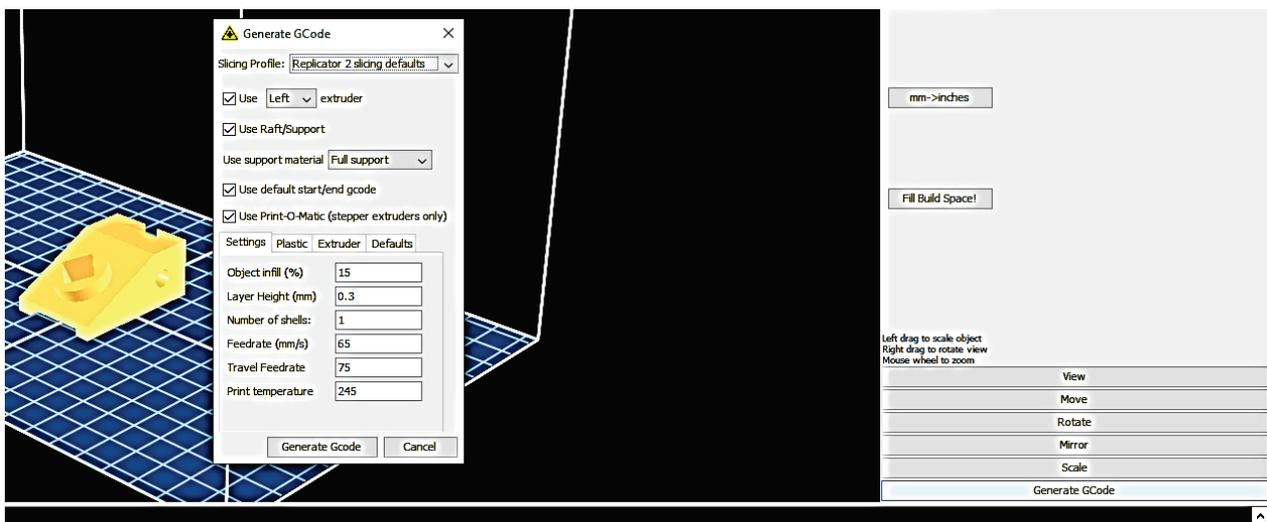


Рис. 3.9. Генерация файла формата *gcode*

После правильного расположения детали на рабочем столе выбираются параметры изготовления детали. С помощью команды *Generate GCode* генерируется файл формата *gcode* (рис. 3.9). В данном случае для экономии материала и времени был использован коэффициент заполнения 15 %. Высота слоя печати составляла 0,3 мм, что позволило, с одной стороны, быстро напечатать деталь, с другой стороны, обеспечить ей необходимое качество. Затем устанавливается скорость подачи пластика и движения экструдера. В последней графе характеристик печати задаётся температура экструдера. Изготавливаемая деталь имеет пустоты и требует создания подложек. Наличие подложек повышает расход пластика, но обеспечивает требуемое качество

детали. В данном случае использована подложка и для первого, нижнего слоя, и для пустотелых элементов.

После завершения кодировки 3D-модели запускается печать детали, при этом область под панелью задач становится желтой, и в ней появляются данные о времени печати и температуре экструдера (рис 3.10). Создавая слой за слоем, 3D-принтер изготавливает деталь сложной формы.

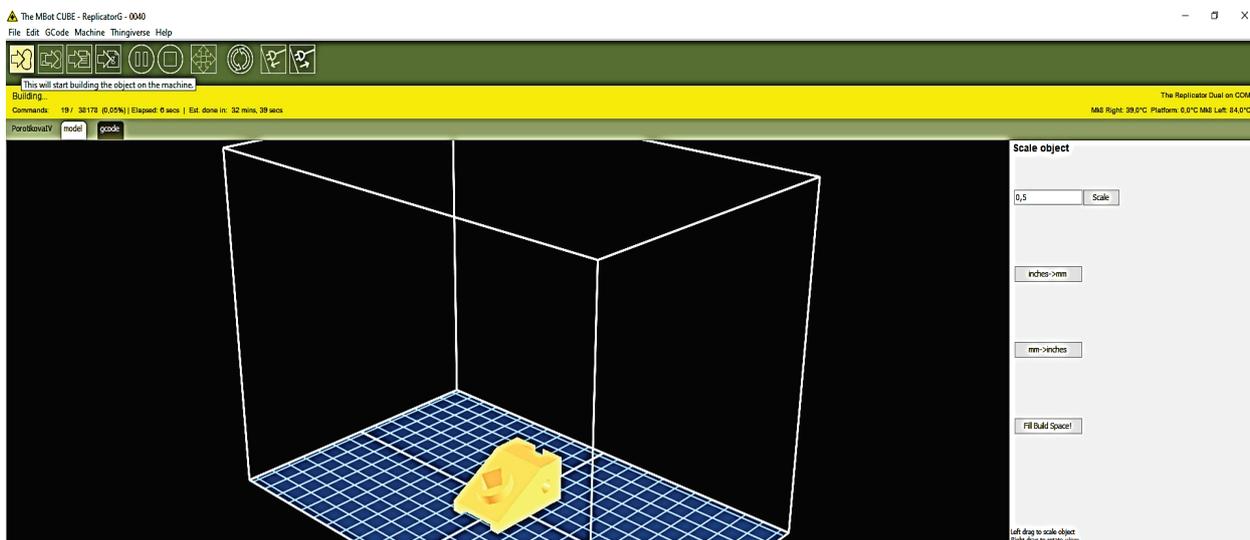


Рис. 3.10. Изготовление детали (время изготовления 32 мин. 29 сек)

Результатом работы является созданная деталь из пластика (рис. 3.11), требующая ручной обработки. Необходимо удалить элементы подложки и оценить качество печати, сделав замеры.



Рис. 3.11. Изготовленная с помощью 3D-принтера деталь

Съём детали с рабочего стола 3D-принтера осуществляется с помощью шпателя. В заключение необходимо оценить массу подложки, которая определяет потери пластика (рис. 3.12). При заданных условиях печати потери пластика составили 1,43 г (12,3%).

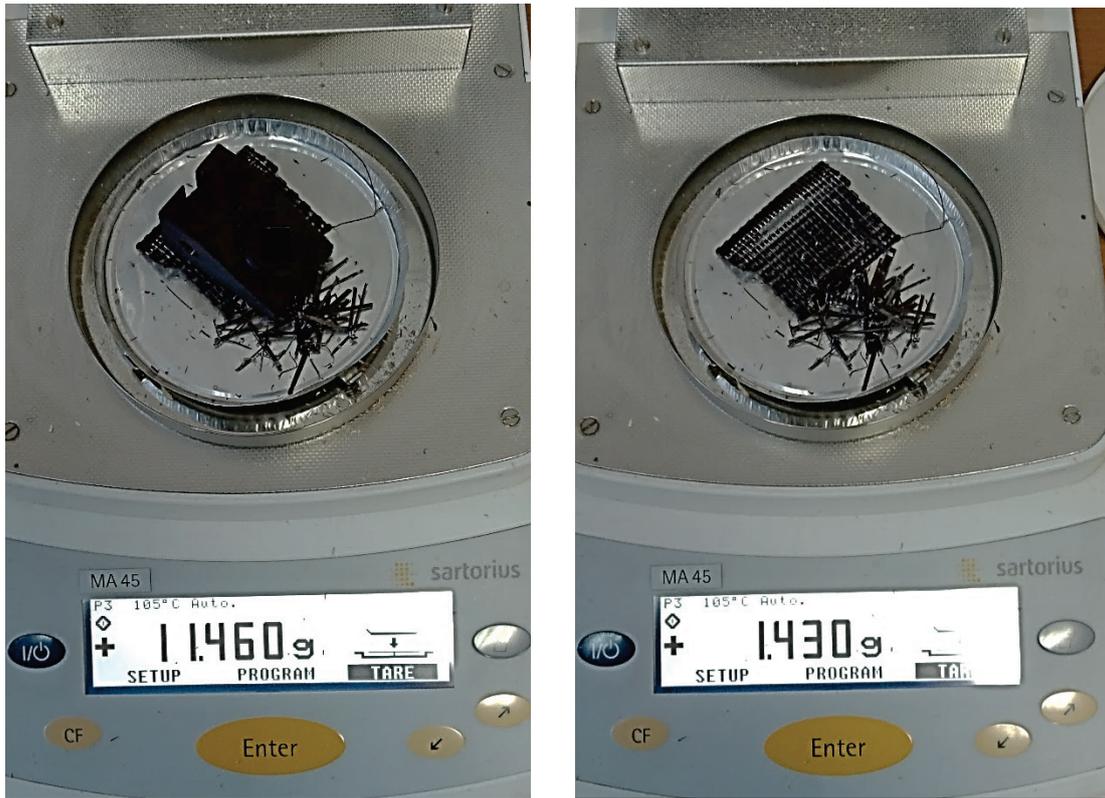


Рис. 3.12. Оценка потерь пластика при изготовлении

С помощью штангенциркуля устанавливаются размеры изготовленной детали, которые затем сопоставляются с размерами, заданными на чертеже (рис. 3.13).

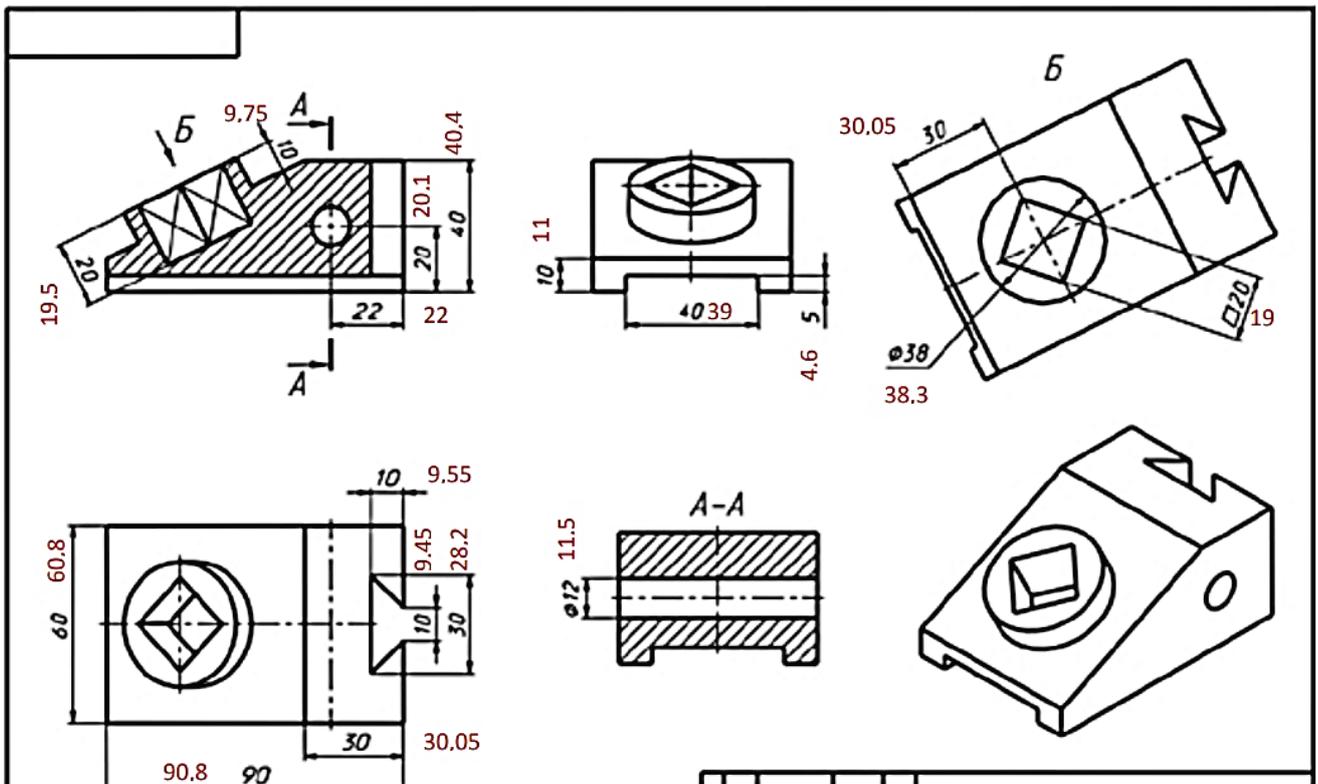


Рис. 3.13. Контроль качества изготовленной детали

Из рисунка 3.13 видно, что реальные размеры детали отличаются от заявленных на чертеже. Наибольшее отклонение в размере составило 8% (таблица 3.3).

Таблица 3.3 – Отклонение размеров изготовленной детали от заданных

Размер на чертеже, мм	Реальный размер, мм	Отклонение, %	Размер на чертеже, мм	Реальный размер, мм	Отклонение, %	Размер на чертеже, мм	Реальный размер, мм	Отклонение, %
20	19,75	1,3	5	4,6	8	10	9,55	4,5
10	9,75	2,5	30	30,05	-0,2	10	9,45	5,5
20	20,1	-0,5	38	38,3	-0,8	30	28,2	6
40	40,4	-1	20	19	5	30	30,05	-0,2
22	22	0	60	60,8	-1,3	12	11,5	4,2
10	11	-10	90	90,8	-0,9			

По представленным реальным и заданным в чертеже размерам детали можно изменить 3D-модель и добиться наиболее близкого соответствия детали, повысив качество 3D-печати.

Таким образом, созданная 3D-модель позволила изготовить деталь сложной формы с применением 3D-печати. С помощью программы *Replicator G0040* был сгенерирован файл формата *gcode*, в котором были заданы параметры печати для 3D-принтера *MegaBot Dual Kit*.

Представленные реальные размеры изготовленной детали позволяют скорректировать чертёж, по которому можно повысить качество печати. Также были определены потери пластика, связанные с формированием подложки.

3.3. Повышение точности изготовления деталей с помощью 3D-принтера

Несмотря на преимущества изготовления деталей с помощью 3D-принтера, существует и ряд недостатков, одним из которых является усадка. Усадка вызывает собой несоответствие размеров деталей изготовленного образца размерам на чертеже. Для достижения высокой точности изготовления необходимо после завершения 3D-печати обработать деталь (срезать или высверлить лишнее, отшлифовать), что требует дополнительных затрат времени и средств, поэтому повышение точности изготовления детали на этапах 3D-печати и моделирования является важной и актуальной задачей. Для решения этой задачи в графической программе *AutoCAD* строится 3D-модель, затем деталь изготавливается с помощью 3D-принтера *MegaBot Dual Kit*, после чего определяются размеры полученной детали, которые сопоставляются с размерами, заданными на чертеже. На заключительном этапе деталь изготавливается вновь с учётом коэффициента усадки, определённом для каждого размера.

На рис. 3.14. представлена 3D-модель вновь изготавливаемой детали, полученная в программе *AutoCAD*.

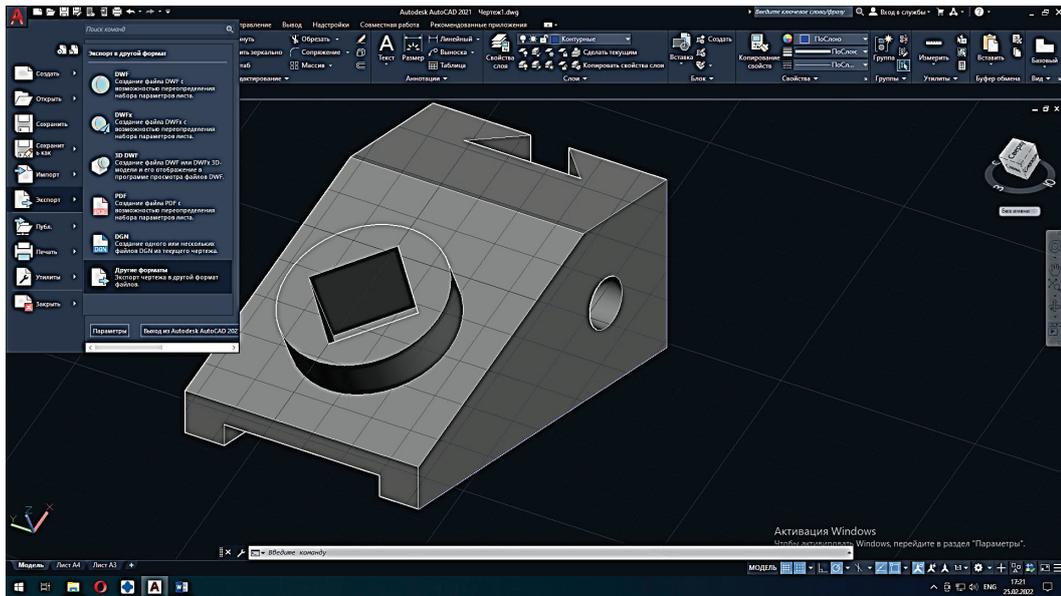


Рис. 3.14. 3D-модель детали

Результатом работы является созданная из пластика деталь, которая требует ручной обработки. Необходимо удалить элементы подложки и оценить качество печати, сделав замеры. С помощью штангенциркуля устанавливаются размеры вновь изготовленной детали, которые затем сопоставляются с размерами, заданными на чертеже (рис. 3.15).

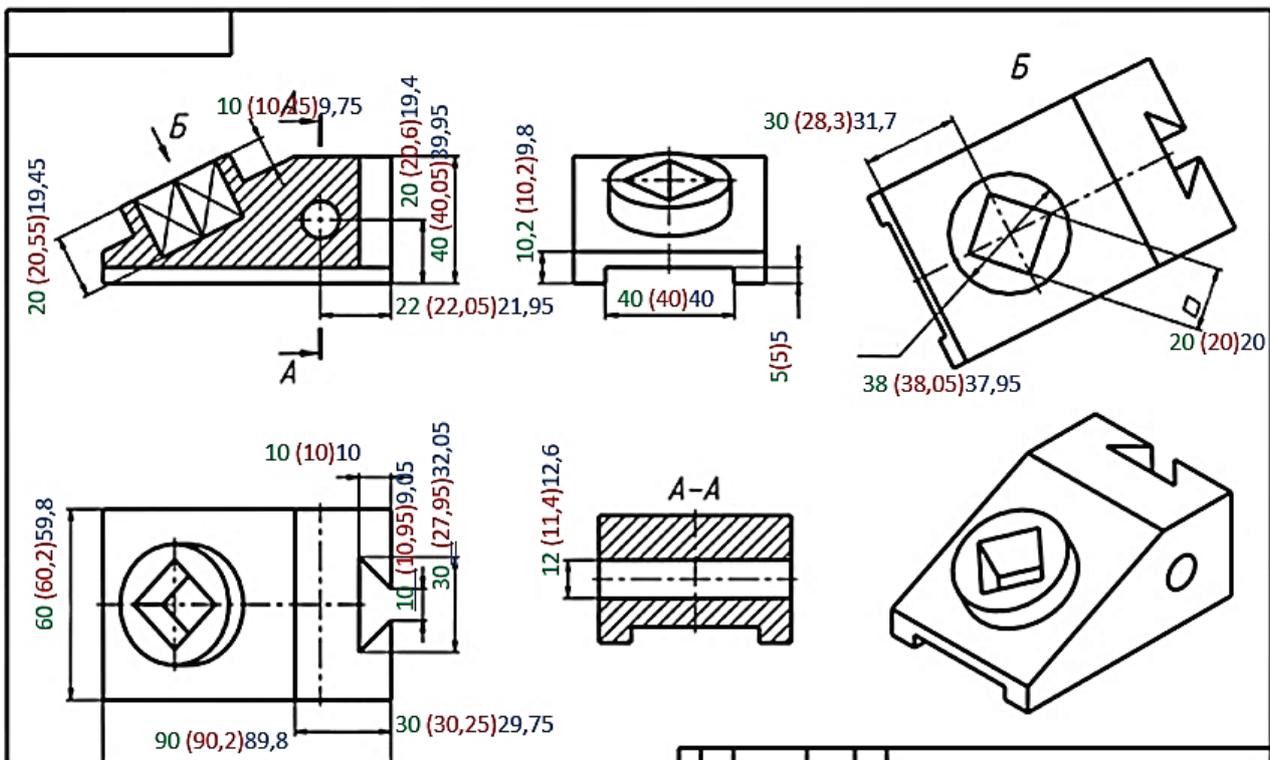


Рис.3.15. Контроль качества изготовленной детали

Из рис. 3.15 видно, что реальные размеры детали отличаются от заявленных на чертеже. Наибольшее отклонение в размере составило 8% (таблица 3.4).

Таблица 3.4 – Отклонение размеров изготовленной детали от заданных

№	Размеры на чертеже, мм	Размеры детали после 3D-печати, мм	Размеры второй 3D-модели, мм	Размеры детали после повторной 3D-печати, мм
1	20	20,55	19,45	20
2	10	10,25	9,75	10,6
3	20	20,6	19,88	19,88
4	40	40,05	20,15	39,8
5	22	22,05	21,95	22,05
6	10	10,2	9,8	10
7	40	40	40	40
8	5	5	5	5
9	30	31,7	28,3	31,9
10	38	38,05	37,95	38
11	20	19,65	20,35	20
12	60	60,2	59,8	50
13	90	90,2	89,8	90
14	10	10,2	9,8	10
15	30	30,25	29,75	30,2
16	10	10,95	9,05	10
17	30	27,95	32,05	30
18	30	30,25	29,75	30,2
19	12	11,55	12,45	12,95

Наиболее близкое соответствие действительным размерам детали с заданными на чертеже достигается повторным изготовлением детали. Из таблицы видно, что подавляющее большинство размеров детали, изготовленной повторно, соответствует тем размерам, которые были заданы на чертеже. Определённые размеры детали позволили скорректировать чертёж, по которому деталь была изготовлена вновь.

Таким образом, были определены коэффициенты усадки для каждого размера детали сложной формы, которые были учтены при повторном изготовлении, что позволило добиться высокой степени точности детали.

3.4. Подготовка 3D-модели в программе Cura 15.04.3 с последующей 3D-печатью с помощью принтера Wanhao Duplicator I3

3D-принтеры от компании *Wanhao* известны более 10 лет. Доступность этих 3D-принтеров позволила занять большую часть рынка аддитивных технологий. Вместе с тем конструкции 3D-принтеров *Wanhao* совершенствовались. По сравнению с рассмотренным в предыдущей главе 3D-принтером, *Wanhao Duplicator I3* принадлежит к поколению устройств, обладающих более широким набором функций. Производители *Wanhao*, начиная с 2012-2013 годов, добавили подогрев стола, расширенные настройки печати, а именно, подложек нижнего слоя, конфигурации заполнения, масштабирование изготавливаемых деталей в отдельных плоскостях. Были усовершенствованы процессы подачи нити, кондиционирования и подогрева стола и т. д. На рис. 3.16 представлен один из вариантов 3D-принтера 2013 года, который и сейчас

находится в продаже, благодаря ряду преимуществ и большому набору функций. В отличие от принтера, представленного в предыдущем разделе, данное устройство рекомендовалось к работе с программой *Cura*, которая отличается от программы *Replicator G0040* более широкими возможностями.

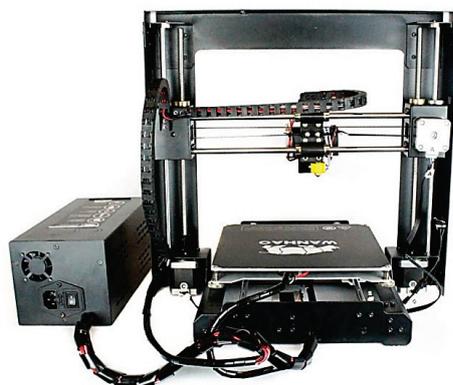
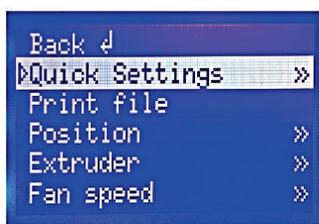


Рис. 3.16. 3D-принтер *Wanhao Duplicator I3*

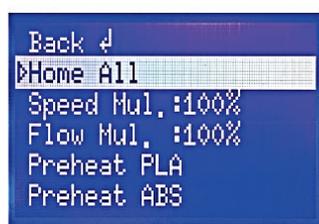
3D-принтер *Wanhao Duplicator I3* обладает следующими характеристиками: масса – 10 кг; диаметр сопла – 0,4 мм (оптимальное значение 0,2-0,3 мм); размер области построения – 200x200x80 мм; интерфейс – *USB, SD*; технология печати – *FDM\FFF*; количество экструдеров (печатающих головок) – 1 шт.; материалы для печати – *PLA, ABS, HIPS, FLEX*; поддержка – *Linux, Mac, Windows*; программное обеспечение – *Cura, Replicator*; габаритные размеры – 400x410x400 мм; скорость печати – 10—100 мм/с; максимальная температура экструдера – 260 °С; рабочая температура экструдера – 190 — 240 °С; толщина прутка – 1,75 мм; точность позиционирования по осям X, Y – 0,012 мм; точность позиционирования по оси Z – 0,0025 мм; формат файлов – *STL, OBJ, GCODE*; энергопотребление – 220 В, 240 Вт, 50 Гц, 0,89 А; страна-производитель – Китай.

Техника безопасности при работе с 3D-принтером *Wanhao Duplicator i3* аналогична принтеру *MegaBot Dual Kid* (рис. 3.2).

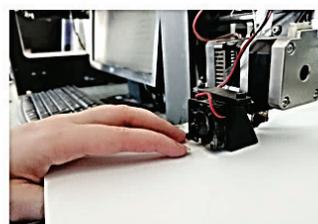
Процесс калибровки представлен на рис. 3.17.



Режим калибровки стола на дисплее



Калибровка 3D принтера бумагой 80 г/м²



Результат калибровки



Рис. 3.17. Калибровка 3D-принтера *Wanhao Duplicator i3*

После калибровки выбирается температурный режим подогрева экструдера и стола в зависимости от используемого материала (рис. 3.18).



Рис. 3.18. Загрузка пластикового прутка в *Wanhao Duplicator i3*

После загрузки 3D-принтер готов к работе. Для 3D-печати изготавливаемая деталь подготавливается в программе *Cura*, согласно рекомендации производителя 3D-принтеров *Wanhao*. Интерфейс программы *Cura* представлен на рис. 3.19.

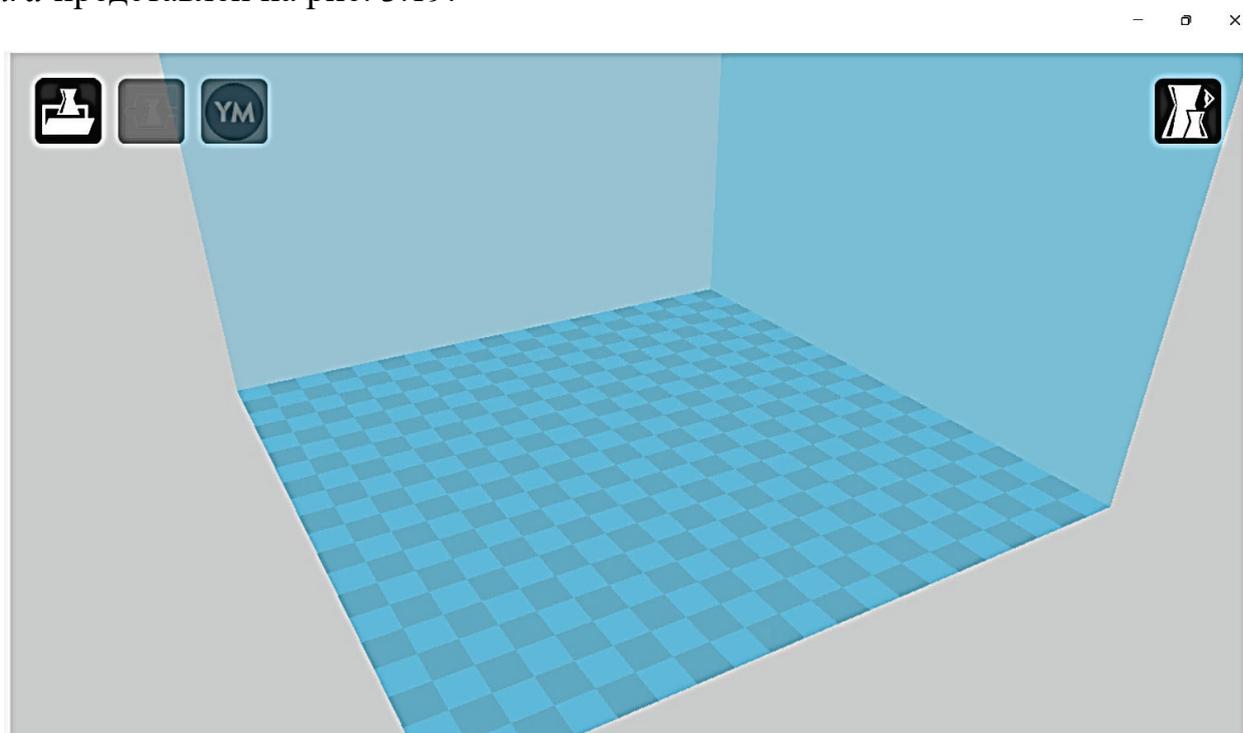


Рис. 3.19. Интерфейс программы *Cura*

Более ранние версии программы *Cura* в своих настройках не включали 3D-принтер *Wanhao Duplicator i3*, поэтому из представленного в программе списка выбирается более подходящее по характеристикам устройство *Prusa Mendel I3*. Для выбора его из списка необходимо зайти во вкладку *Other*, после

чего будет предложено устройств (*Select your machine*). По желанию можно изменить название устройства *Prusa Mendel I3* на *Wanhao Duplicator i3* (рис. 3.20).

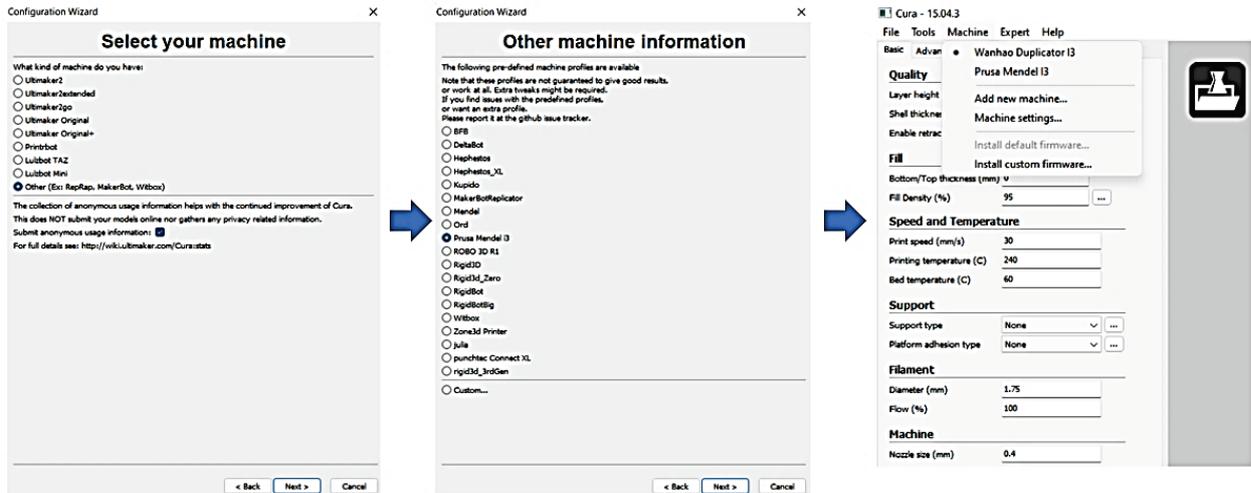


Рис. 3.20. Настройка программы *Cura* под 3D-принтер *Wanhao Duplicator i3*

После выбора машины программа откроет вкладку, где можно задать основные параметры 3D-печати: *Printer Settings* – настройки принтера; *X (Width)* – ширина 200 мм; *Y (Depth)* – глубина (длина) 200 мм; *Z (Height)* – высота 180 мм; *Extruder count* – количество экструдеров 1 шт.; *Heated bed* – подогрев стола; *Machine Center is Zero* – в данном принтере эта функция не используется; *Build area shape* – выбираем *Square* для данного принтера с квадратной рабочей областью.

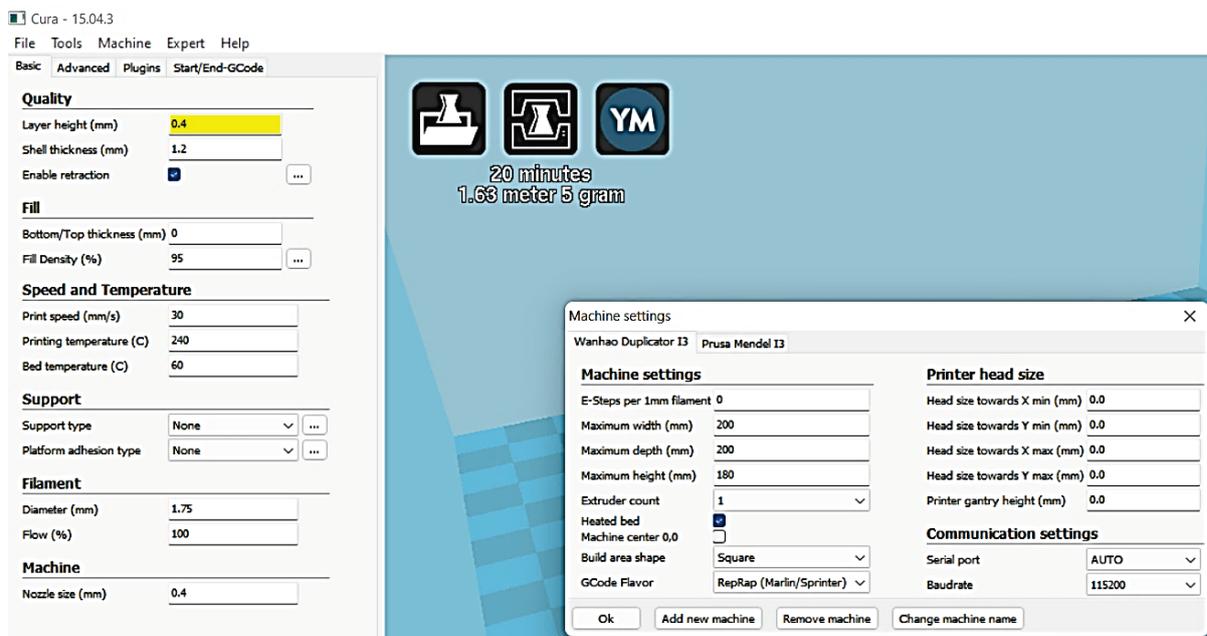


Рис. 3.21. Настройка параметров 3D-принтер *Wanhao Duplicator i3* в программе *Cura*

В настройках 3D-принтера выбираем обычный вариант кодировки *RepRap Marlin/Sprinter* для файлов формата *gcode*. Разновидностью генерирования файлов формата *gcode* через *RepRap* является обычный вариант *5D gcode*, который работает на прошивках на базе *Marlin / Sprinter*. *UltiGCode* – это версия *RepRap*, которая помещает больше настроек машин. *Gcode* от компании *MakerBot* имеет несколько изменений в способе генерации файлов *gcode*, но по-прежнему требует, чтобы программа *MakerWare* (тоже от компании *MakerBot*) генерировала файлы в формате *X3G*. Стиль *BFT* генерирует код на основе *RPM*. *Mach3* использует *A, B, C* вместо *E* для экструдеров.

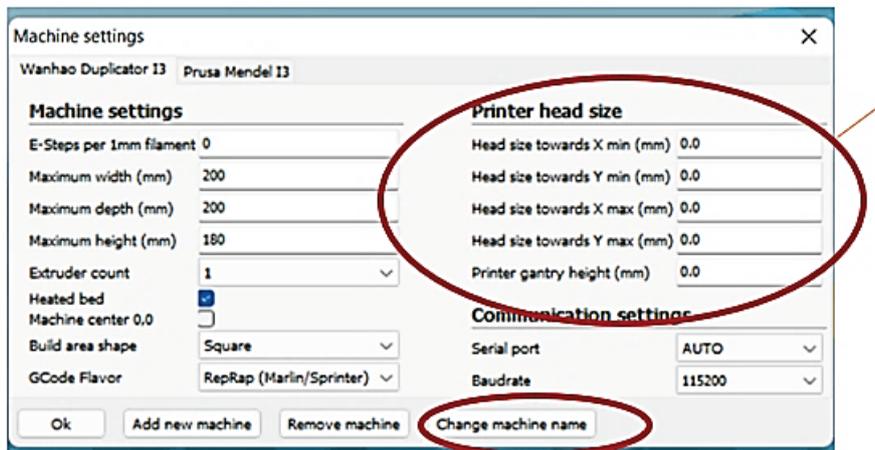


Рис. 3.22. Переименование устройства в *Wanhao Duplicator i3*

Меню, представленное на рис. 3.22 (*Change machine name*) позволяет изменить название 3D-принтера *Prusa Mendel*, предложенное в настройке, для удобства. В правом нижнем углу представлены параметры настройки коммуникации (*Communication settings*), которые определяют взаимодействие 3D-принтера с компьютером. Если печать деталей будет осуществляться через компьютер, то убедитесь, что порт *com4* позволяет компьютеру и 3D-принтеру взаимодействовать через вкладку *Serial port*. Параметр *Boudrate* по опыту рекомендуют 115200. Должно быть задано в настройках принтера *Configuration – General – Boudrate 115200*.

После настроек в программе *Cura* параметров 3D-принтера *Wanhao Duplicator i3* можно приступить к загрузке 3D-модели файла печатаемого изделия (рис. 3.23).

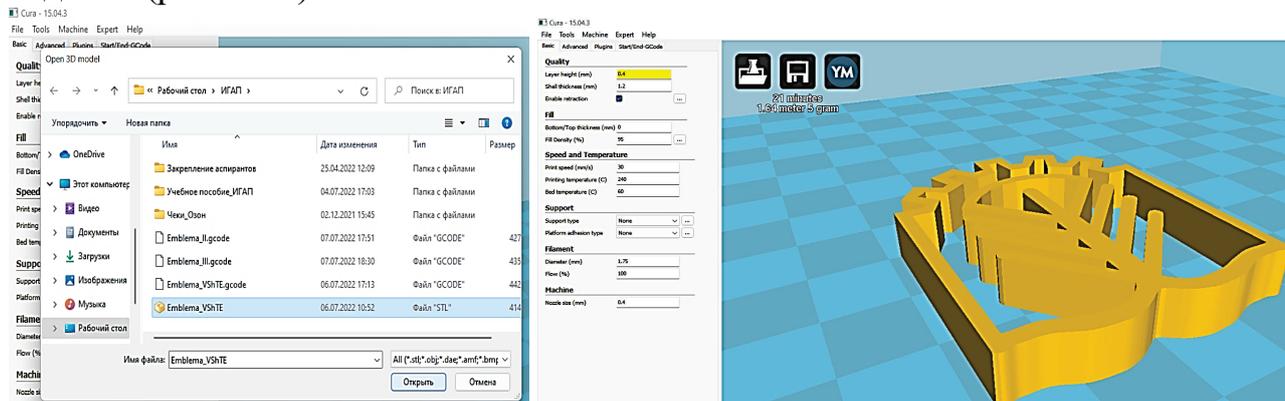


Рис.3.23. Загрузка 3D-модели файла печатаемого изделия

Для удобства работы с программой *Cura* и печати с помощью 3D-принтера *Wanhao Duplicator i3* разработчики создали стандартные режимы печати для различных видов пластика. Режимы печати учитывают скорость изготовления детали и её качество. В программе *Cura* стандартные режимы можно открыть во вкладке *Switch to quickprint* (рис. 3.24).

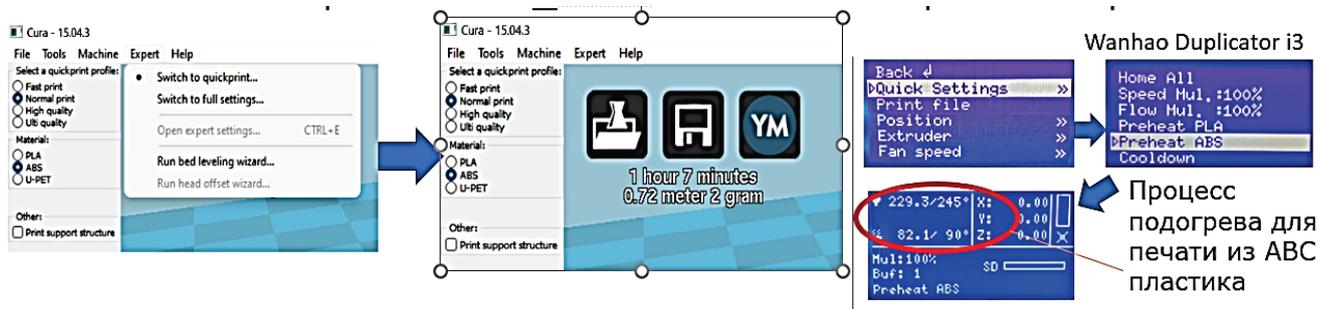


Рис. 3.24. Стандартные настройки 3D-печати

Материал, использованный при 3D-печати, определяет режим предварительного подогрева 3D-принтера. В данном случае, в программе *Cura* во вкладке *Materials* выбран пластик *ABS*, что соответствует режиму предварительного подогрева, отображённого на панели 3D-принтера *Wanhao Duplicator i3* (*Quick Settings – Preheat ABS*).

Программа *Cura* предлагает следующие стандартные настройки: *Fast print* (при генерировании *.gcode* принтер задаст небольшое количество слоёв, увеличит скорости подачи пластика, движения экструдера при печати, ходе, нанесении нижнего слоя и т.д., что приводит к увеличению скорости печати); *Normal print* (промежуточные значения показателей, приведённых выше и ниже); *High quality* (промежуточные значения показателей, приведённых выше и ниже); *Ulti quality* (высокое качество печати, которое связано со снижением до минимума толщины слоя, что приводит к увеличению их количества, уменьшению скорости печати, движения экструдера, повышению качества подложки, снижению скорости нанесения нижнего слоя, повышению толщины оболочки детали, повышению коэффициента заполнения и т.д.).

Программа *Cura* позволяет задать температуру стола и экструдера, в зависимости от пластика, например, для *PLA* температура экструдера задаётся 215 °С, а температура стола – 60 °С, для *ABS* температура экструдера – 245 °С и температура стола – 90 °С, согласно настройкам, представленным производителем 3D-принтера *Wanhao Duplicator i3* (рис. 3.25).



Процесс подогрева для печати из ABS пластика

Рис. 3.25. Предварительный подогрев экструдера и стола 3D-принтера *Wanhao Duplicator i3*

В быстрых настройках также можно задать наличие или отсутствие подложки (*Print support structure*). Принтер печатает слой за слоем снизу вверх. Благодаря поддержке можно печатать объекты сложной формы, в которых элементы детали нависают над столом. После установки всех параметров стандартной печати программа *Cura* может рассчитать время печати изготавливаемой детали, массу и длину нити пластика.

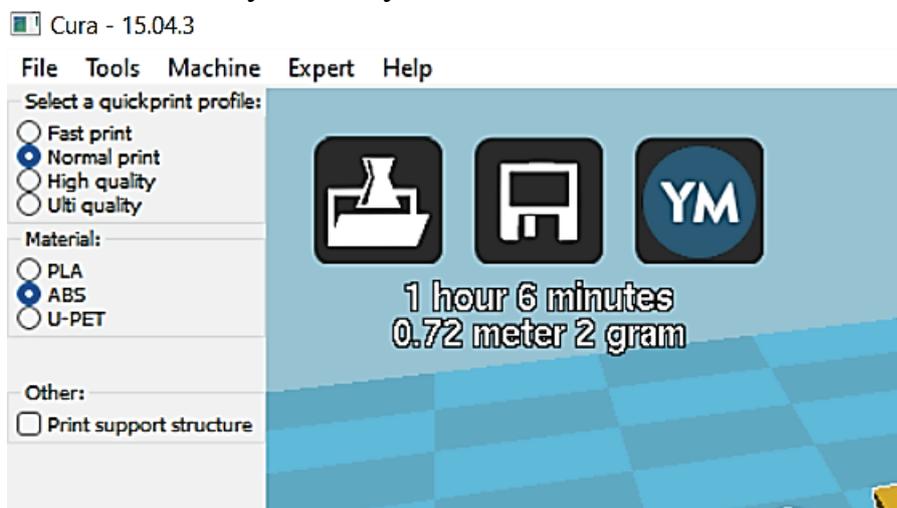


Рис. 3.26. Оценка времени печати, массы детали и длины нити пластика в программе *Cura*

Программа *Cura* позволяет менять расположение изготавливаемой детали в рабочем пространстве 3D-принтера. На рис. 3.27 представлена 3D-модель логотипа Высшей школы технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна, расположение которой, по умолчанию, находится в центре рабочего стола. При необходимости можно поменять точку обзора изготавливаемой детали (*Model orientation* – положение модели). Чтобы не запутаться при смене точки обзора, в программе *Cura* предусмотрены осевые линии (выделены чёрным цветом), центр которых физически находится в левом ближнем углу рабочей платформы 3D-принтера *Wanhao Duplicator i3*.

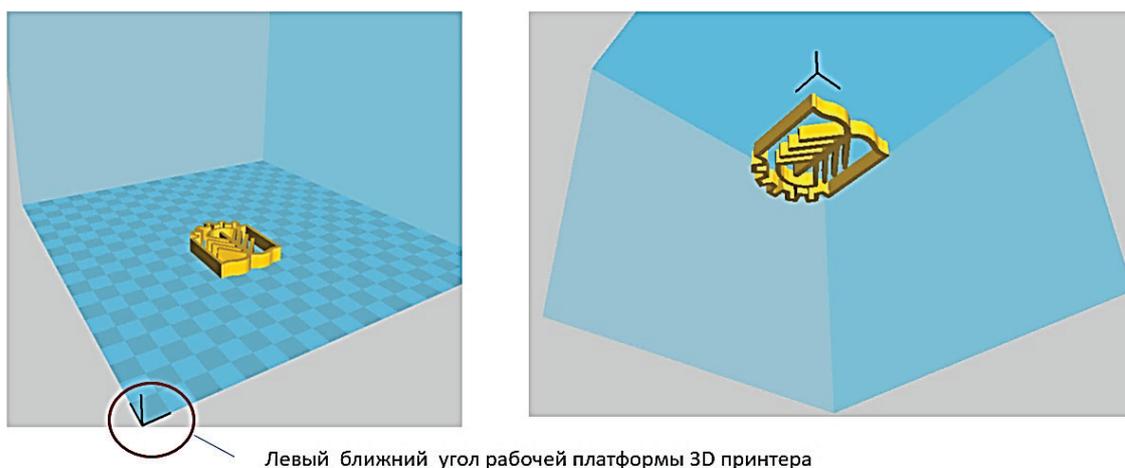


Рис. 3.27. Расположение детали в рабочем пространстве 3D-принтера *Wanhao Duplicator i3*

В некоторых случаях, а именно, если деталь имеет сложную форму и от угла её расположения будет зависеть качество, скорость печати, расход пластика, необходимо повернуть 3D-модель относительно рабочего стола. Для этого в программе *Cura* предусмотрена команда *Rotate* – вращение, которая позволяет менять угол расположения детали относительно рабочего стола 3D-принтера по трём осям (рис. 3.28). Если необходимо вернуть деталь в исходное положение (при этом деталь обычно располагается на столе в положении, при котором минимальны следующие показатели: количество слоёв; масса подложки и время печати), запускается команда *Reset*.

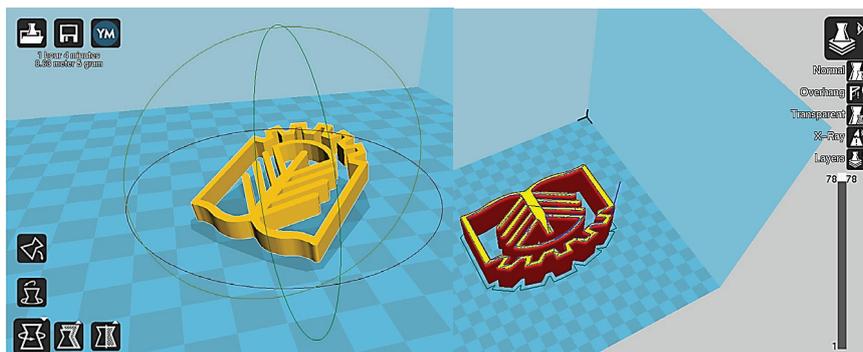


Рис. 3.28. Поворот печатаемой детали относительно рабочего стола 3D-принтера в программе *Cura*

Команда *Lay flat* позволяет расположить деталь на поверхности стола принтера. Количество слоёв при каждом выбранном положении можно посмотреть, запустив команду *Layers* в правом верхнем углу рабочего стола программы.

В отличие от программы *Replicator G0040*, описание которой было представлено в предыдущем разделе, программа *Cura* позволяет масштабировать объект с разным коэффициентом в разных плоскостях. На рис. 3.29 представлены различные коэффициенты масштаба: для оси X – 3,0; для оси Y – 1,5; для оси Z – 5,0. Результат неоднородного масштабирования представлен в рабочем пространстве 3D-принтера. Командой для неоднородного масштабирования является *Scale* при этом значок *Uniform scale* должен находиться в открытом положении замка.

Кроме команды для просмотра детали в виде слоёв *Layers* можно просматривать области и пустоты внутри детали командой *X-Ray*, визуализировать области, которые требуют поддержки командой *Overhand*, отображать полупрозрачный вид командой *Ghost*.

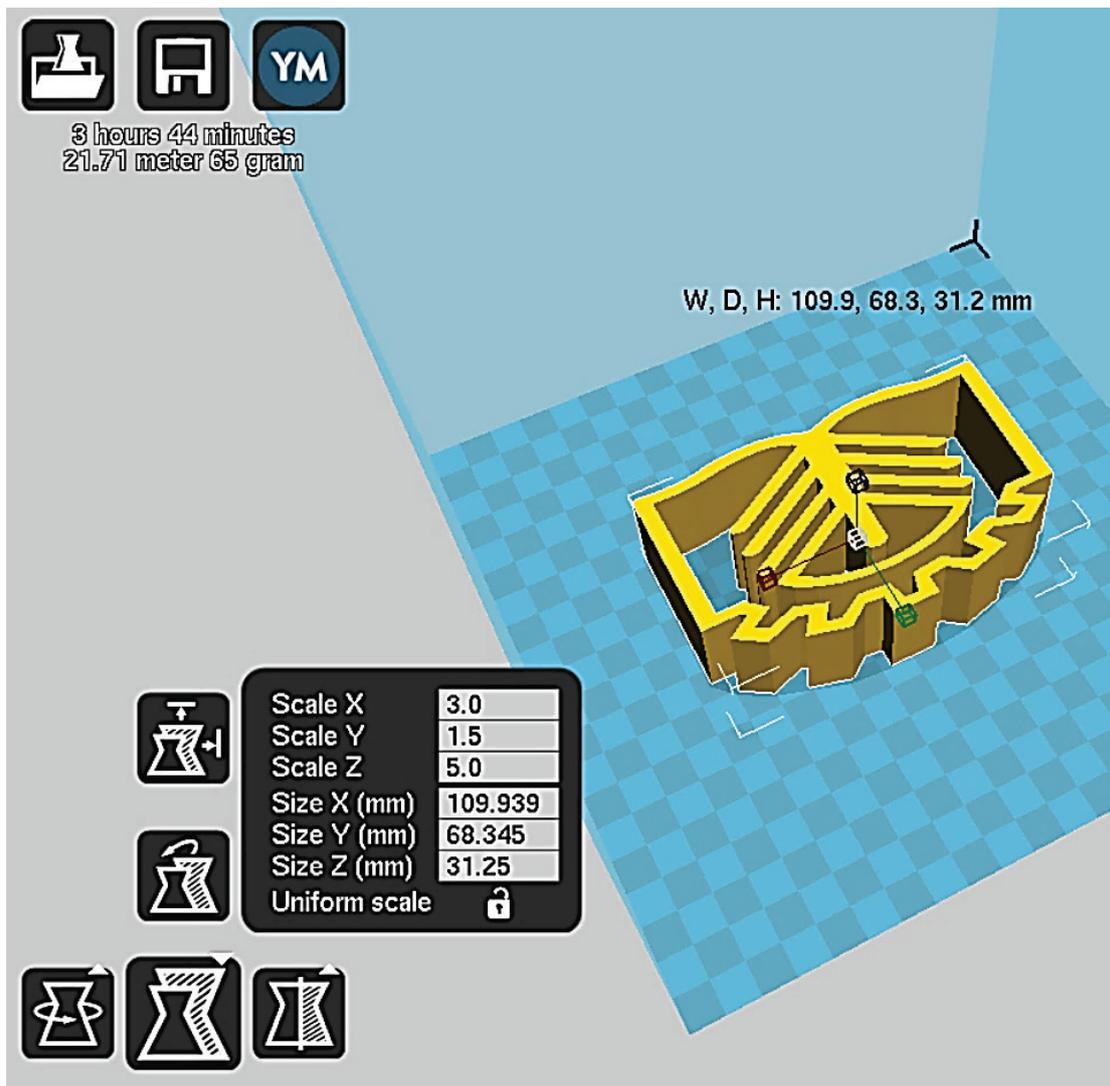


Рис. 3.29. Масштабирование объекта в программе *Cura*

Перечисленные команды позволят изготовить деталь приемлемого качества в большинстве случаев. Для достижения высокого качества детали при неоднородных свойствах пластика, либо если по разным причинам 3D-принтер стал пропускать слои или наоборот подача пластика увеличилась, что привело к снижению качества поверхности, необходимы расширенные настройки *Switch to full settings* или *Expert setting* программы *Cura* (рис. 3.30).

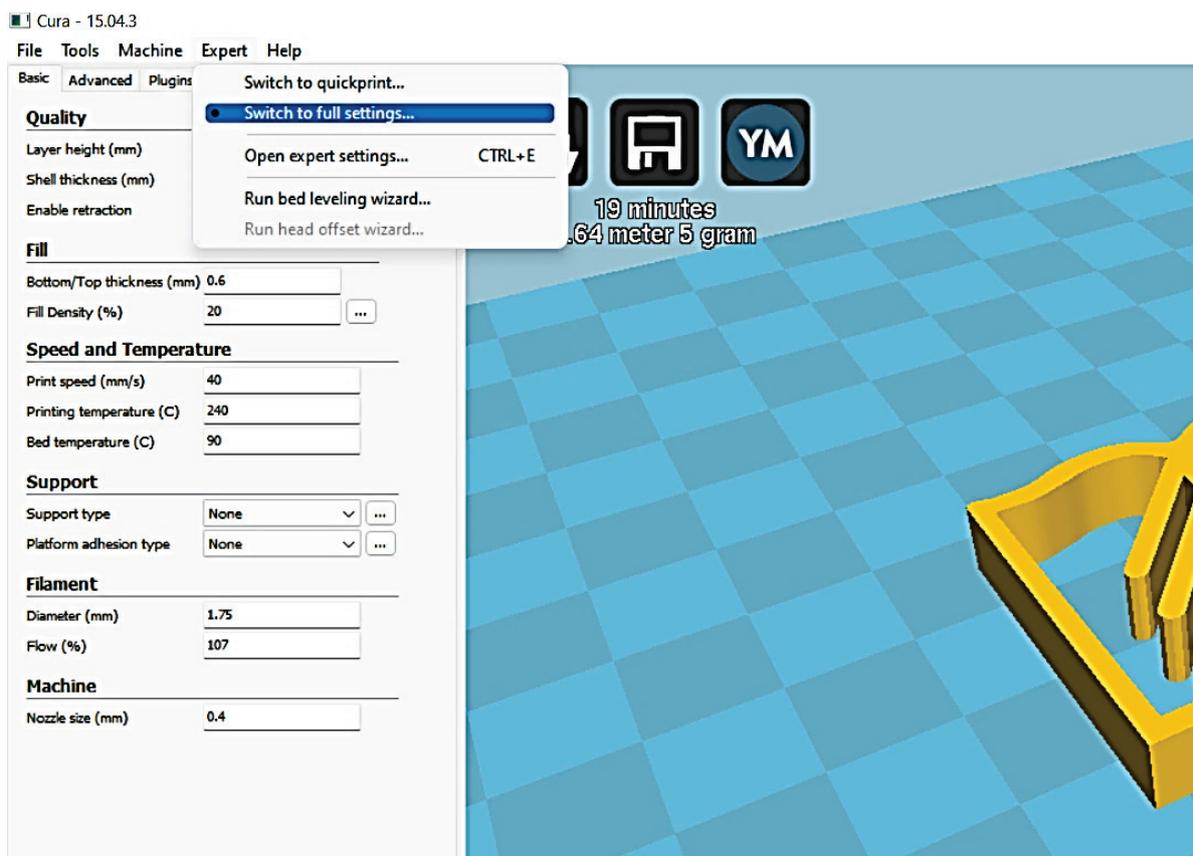


Рис. 3.30. Выбор расширенных настроек 3D-печати в программе *Cura*

Согласно расширенным настройкам, качество изготавливаемого изделия (*Quality* – качество) определяется высотой слоя *Layer height*. Для 3D-принтера *Wanhao Duplicator i3* высота слоя находится в диапазоне от 0,1 до 0,4 мм. Чем меньше слой, тем меньше шероховатость поверхности, лучше качество, но продолжительнее печать. Следующим параметром, во многом определяющим качество изготавливаемого изделия, является толщина стенки *Shell thickness*. Общая толщина внешней стенки должна быть кратной толщине слоя, например, общая 0,8 мм для двух слоёв толщиной 0,4 мм. Противоречие может вызвать остановку печати. Ещё одним параметром, который влияет на качество изделия, является регулировка подачи пластика во время движения экструдера *Retraction*.

Retraction – это процесс втягивания части пластика в нагретый экструдер перед его перемещением. Он необходим, так как давление в расплавленном пластике снижается, что снижает вероятность появления нитей между гранями детали. Не рекомендуется использовать режим *Retraction* при печати маленьких объектов. Методом проб и ошибок, прибавляя показатель на 1 мм, определяют минимальное значение показателя *Retraction*, при котором после печати отсутствуют нити пластика между гранями детали (на рис. 3.31 слева представлен результат образования нитей).

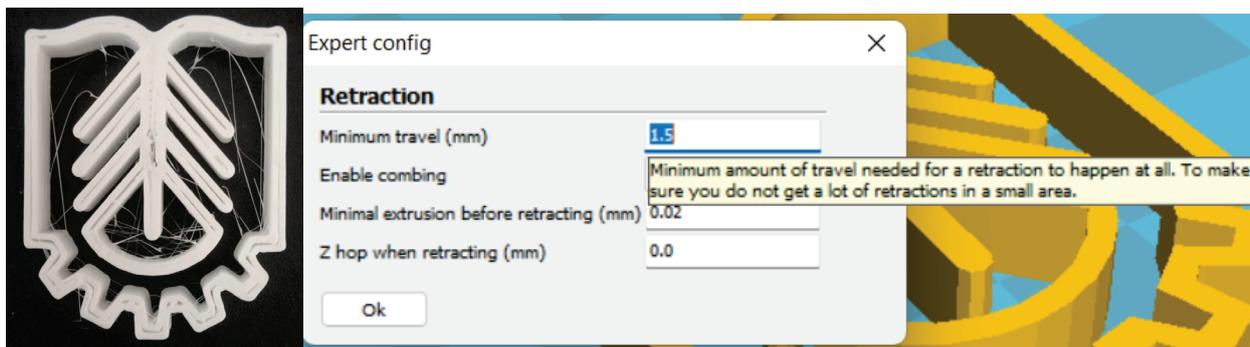


Рис. 3.31. Выбор показателя *Retraction* в программе Cura

Команда *Retraction* имеет несколько важных характеристик (рис. 3.32): скорость втягивания нити и расстояние, на которое шаговый двигатель должен втянуть расплавленную нить.

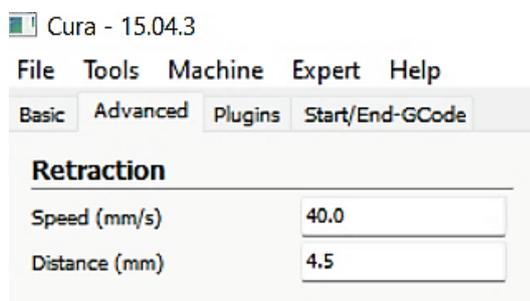
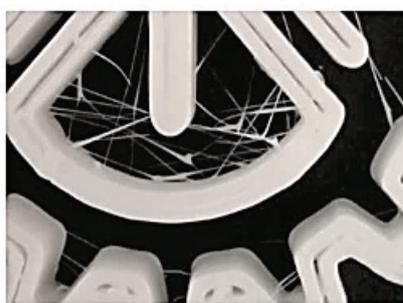


Рис. 3.32. Основные характеристики параметра *Retraction*

С одной стороны, если скорость втягивания окажется высокой, то шаговый двигатель начнёт царапать пластик, и при работе 3D-принтера возникнет стук (*Retraction speed max*). С другой стороны, если существенно снизить скорость втягивания, то может возникнуть большое количество нитей, что ухудшит качество поверхности детали (*Retraction speed min*) (рис. 3.33). *Retraction distance* – это расстояние, на которое шаговый двигатель втянет нить пластика. Если втяжка не нужна, то этот показатель равен нулю.



**Retraction speed
max**



**Retraction speed
min**

Рис. 3.33. Проблемы, возникающие при максимальной и минимальной скорости втягивания нити

В свойствах втягивания нити существует вкладка *Enable combing*, которая задаёт различные режимы: *Off* (придётся втягивать пластик, так как экструдер будет двигаться вне области изготавливаемой детали, оставляя нити); *All* (втягивать пластик не придётся, так как печать быстрая и экструдер движется только по области печати, поэтому основные наросты пластика находятся внутри детали); *No Skin* (при печати поверхности будут оставлены нити и пластиковая нить будет втягиваться только при формировании поверхностного слоя) (рис. 3.34).

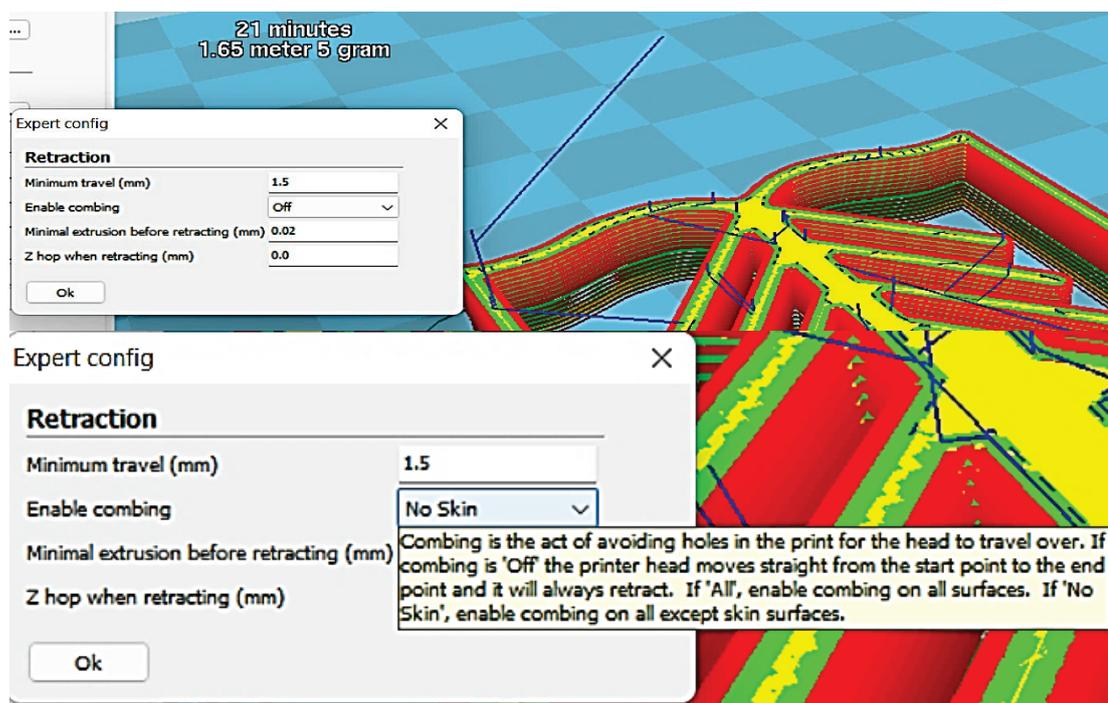


Рис. 3.34. Режимы втягивания нити во вкладке *Enable combing*

Минимальное значение *Minimum Travel* для объектов небольших размеров приведёт к необходимости шлифования детали, так как образуется много нитей между гранями детали. Режим просмотра *layers* позволяет определить, по какой дистанции будет двигаться экструдер в режиме *Retraction* (рис. 3.35).

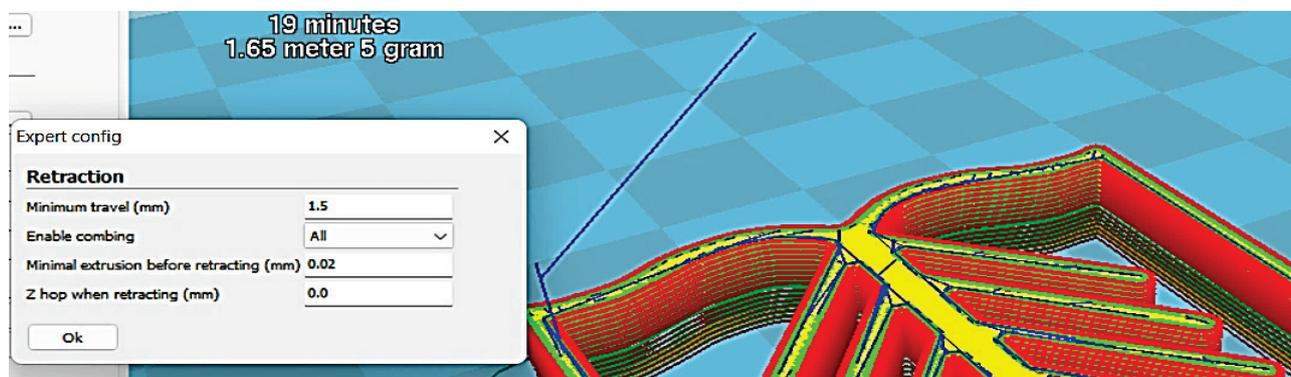


Рис. 3.35. Движение экструдера в режиме *Retraction* представлено синими линиями

Показатель минимального выдавливания перед втягиванием *Minimal extrusion before retracting* позволяет избежать сильного втягивания одного и того же куска нити, что сплющивает нить и вызывает проблемы с её стиранием при контакте с зубчатым колесом шагового двигателя в зоне подачи (рис. 3.36). В результате возникает проблема, аналогичная той, что возникает при *Retraction speed max* (рис. 3.33).

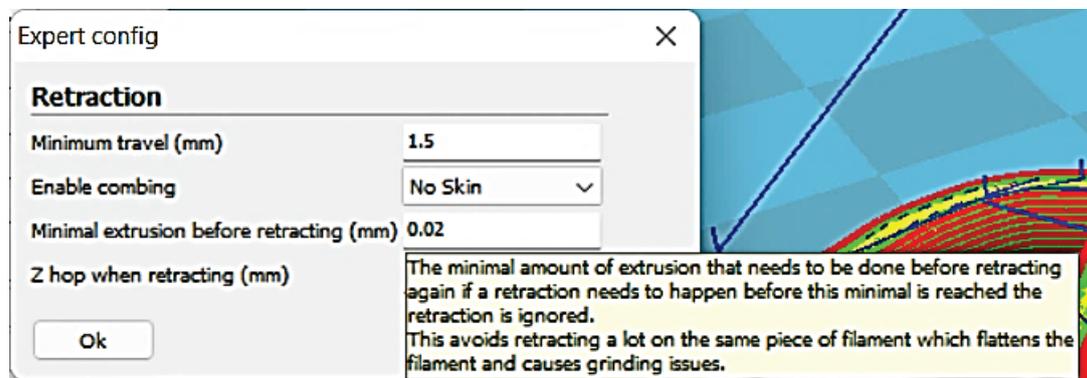


Рис. 3.36. Установка показателя минимального выдавливания перед втягиванием (*Minimal extrusion before retracting*)

При печати высоких и острых выступов в режиме *Retraction* задаётся показатель *Z hop when retraction (mm)* (минимальное выдавливание перед втягиванием), равный 0,075, при этом значении экструдер поднимается на эту величину, чтобы переместиться над изготовленной деталью.

Следующим параметром в расширенных настройках после качества является заполнение *Fill* (рис. 3.37).

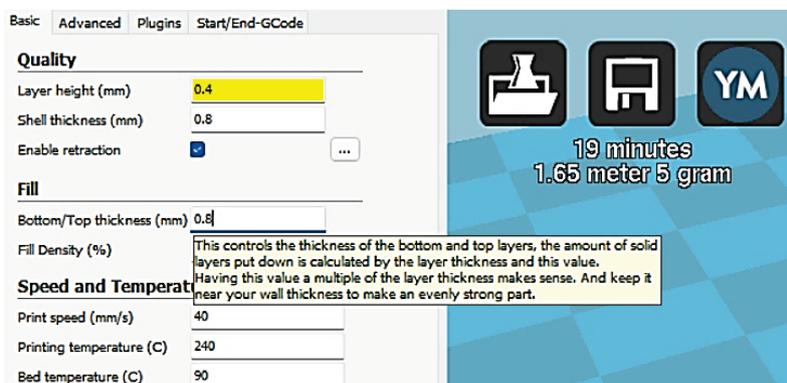


Рис. 3.37. Команда заполнения *Fill* в программе *Cura*

Показатель *Bottom/Top thickness* определяет толщину нижнего и верхнего слоев. Имеет смысл установить это значение, кратное толщине слоя (например, $0,8 = 0,4 \times 2$ – два слоя по 0,4 мм). Чтобы получилась равномерная и прочная деталь, толщина стенки должна быть больше. Однако, следует отметить, что толщина слоя повлияет на время печати и на коэффициент заполнения.

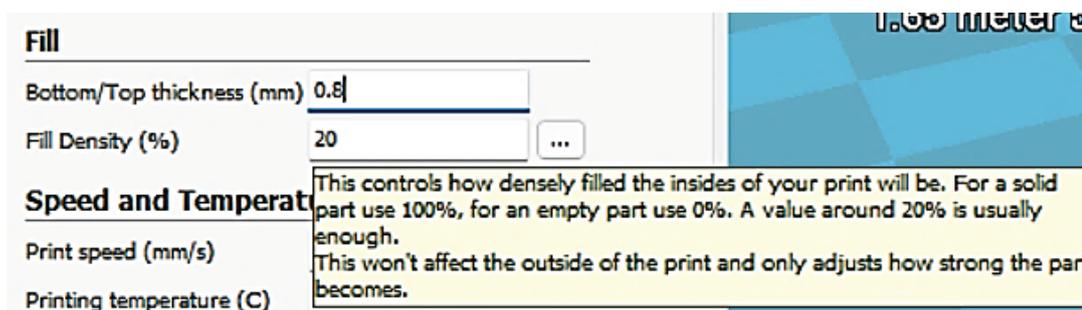


Рис. 3.38. Заполнение детали материалом

Показатель *Fill Density* определяет, насколько плотно будет заполнена внутренняя часть детали. Для полностью заполненной детали используется 100%, для пустой – 0%. Обычно достаточно значения 20%, если нет высоких требований к прочности детали. На внешнюю сторону отпечатка маленькое значение заполнения детали материалом существенно не повлияет.

Расширенные настройки предусматривают контроль и изменение скорости печати, температуры экструдера и стола, а также управление поддержкой, которая необходима для лучшей адгезии первого слоя к столу *Speed and temperature, Support*.

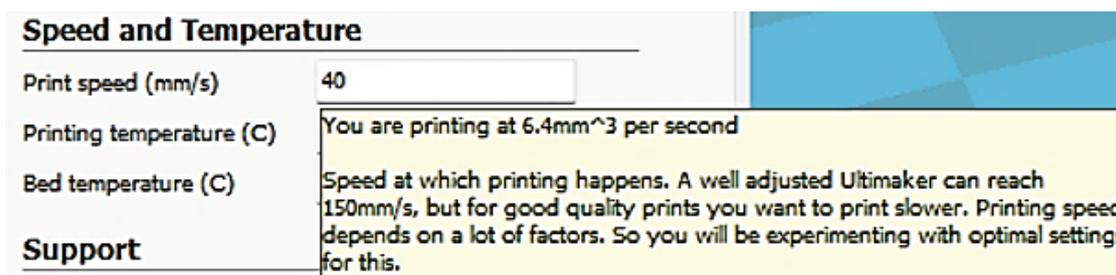


Рис. 3.39. Настройки скорости и температуры печати в *Cura*

С помощью вкладки *Print speed* (скорость печати) программа *Cura* автоматически может пересчитать скорость печати в расход пластика (кубические миллиметры пластика в секунду). Например, для 40 мм/сек расход пластика составит 6,4 мм³/сек. Максимально возможная скорость печати для 3D-принтера *Wanhao Duplicator I3* составляет 150 мм/сек. Выбор скорости печати зависит от множества факторов и устанавливается окончательно экспериментальным путём. В конечном итоге скорость печати не должна существенно ухудшить качество изготавливаемого изделия.

Выбор температуры печати и стола (*Printing temperature, Bed temperature*) зависят в большей степени от вида пластика, однако в некоторых случаях повышение температуры на 5 °C от заявленной может облегчить продавливание пластика через экструдер, а также положительно повлияет на процесс втягивания нити *Retraction* при печати.

В отличие от рассмотренной в предыдущем разделе программы *Replicator G0040*, *Cura* имеет более широкие настройки поддержки. В расширенных настройках программы можно задать параметры поддержки, основными из

которых являются: тип поддержки (*Support type*) и способ адгезии с платформой (*Platform adhesion type*) (рис. 3.40).



Рис. 3.40. Выбор параметров поддержки в программе Cura

Наиболее часто используется тип поддержки (*Touching buildplate*), который выбирается во вкладке *Support type*. Если поддержка не предусмотрена, то выбираем команду *None*. Режим *Touching buildplate* позволяет создать поддержку только там, где деталь будет касаться стола. В режиме *Everywhere* поддержка создаётся везде, при необходимости даже наносится на 3D-модель.

Расширенные настройки *Support* позволяют выбрать тип адгезии поддержки на платформе (*Platform adhesion type*) (рис. 3.41).

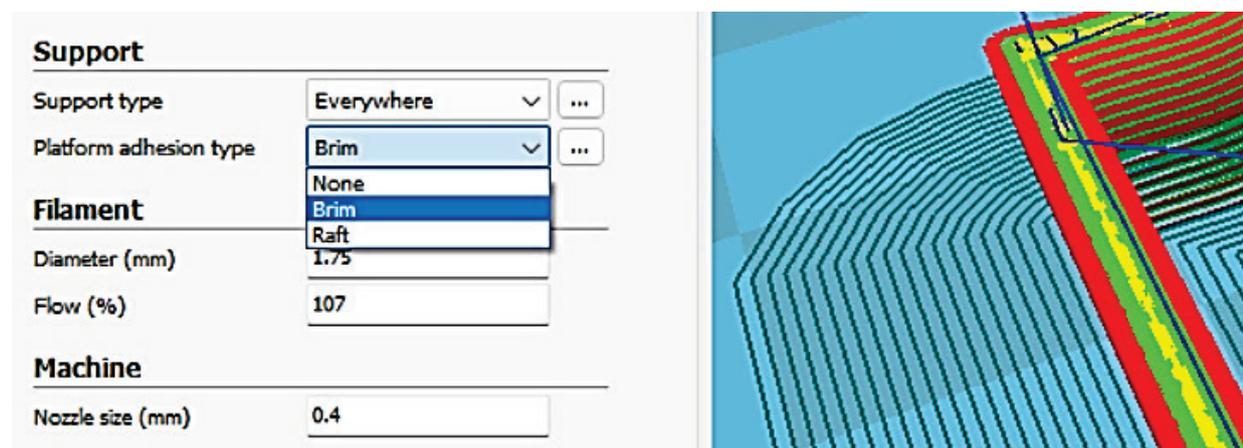


Рис.3.41. Выбор параметров адгезии поддержки к рабочему столу 3D-принтера

Во вкладке *Platform adhesion type* можно выбрать следующие параметры: *None* – без поддержки, *Brim* – кромка; *Raft* – поверхность в виде контура.

Различные варианты поддержки предназначены для предотвращения деформации в углах изготавливаемой детали. Кромка *Brim* добавляет плоскую область толщиной в один слой в виде контура нижней поверхности изготавливаемой детали, которую впоследствии легко удалить (рекомендуемый вариант). Область *Raft* добавляет толстый растр под объектом и тонкий слой между ним и изготавливаемой деталью. Обратите внимание, что включение команд *Brim* или *Raft* отключает команду *Skirt*.

Важно отметить, что тип поддержки сетка (*Grid*) очень прочная и может быть снята цельной, однако иногда излишняя прочность связана с высокой шероховатостью нижнего слоя изготавливаемой детали. Подложка в виде линии (*Lines*) представляет собой одностенные линии, которые легче отдираются, что

не требует больших усилий при удалении. Но поскольку линии менее прочные, то лучше их использовать при печати деталей со сложной конфигурацией нижней поверхности.

Важной характеристикой *Support* является показатель угла нависания поддержки относительно плоскости стола (рис. 3.42).

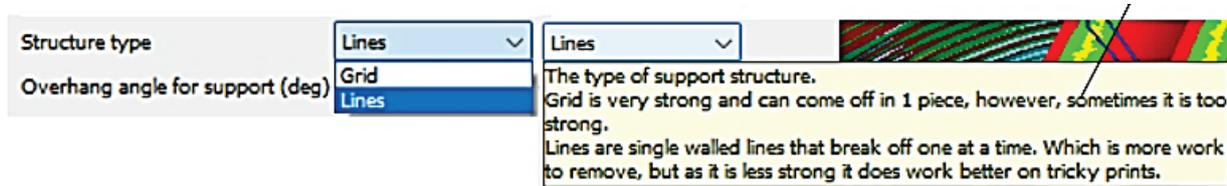


Рис. 3.42. Выбор минимального угла нависания подложки относительно стола 3D-принтера (*Overhand angel for support*)

При вертикальном расположении (угол нависания 0 градусов) подложка не нужна. Обычно при 45 градусах нависания 3D-принтер формирует неплохого качества поверхность детали. Горизонтальному расположению угла нависания соответствует показатель *Overhand angel for support*, равный 90 градусов.

Расширенные настройки программы *Cura* (рис. 3.43) позволяют задать заполнение поддержки материалом (*Support, Filament*) (рис. 3.44).

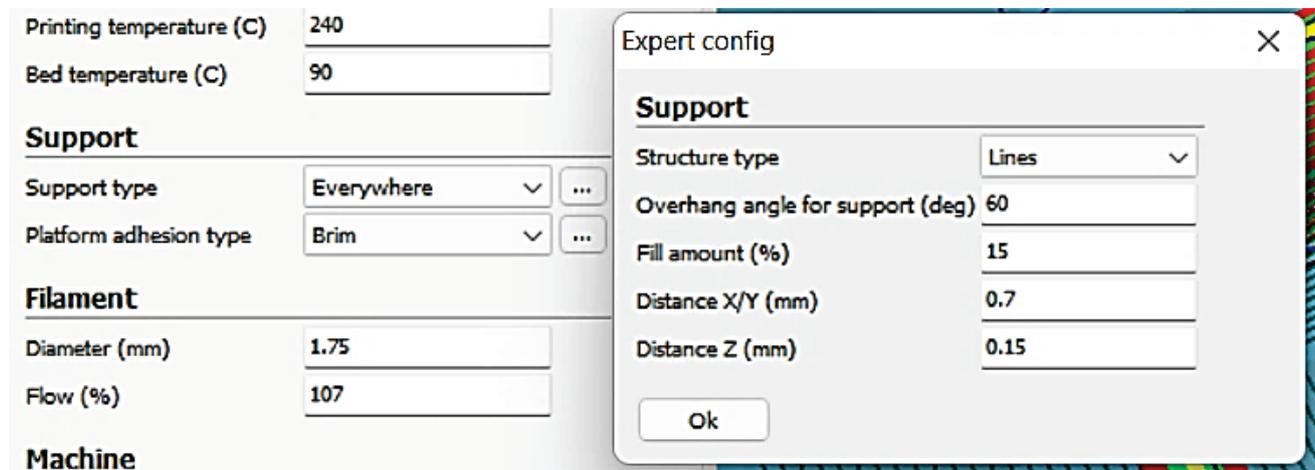


Рис. 3.43. Расширенные настройки параметров поддержки в программе *Cura*

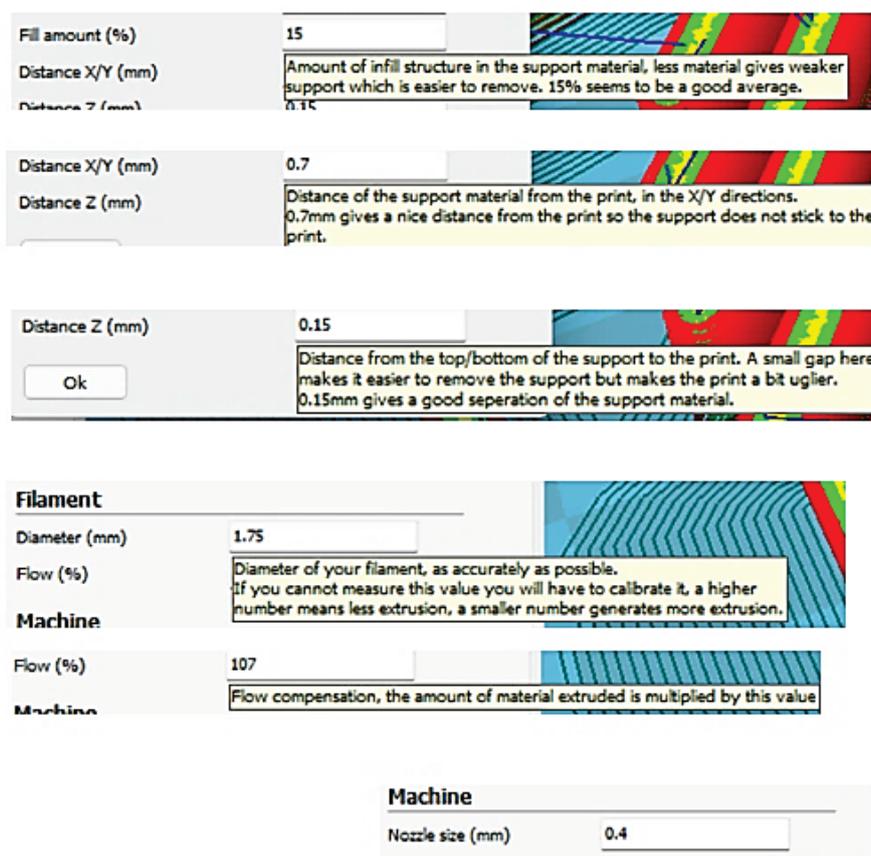


Рис. 3.44. Выбор заполнения материалом подложки (*Support, Filament*)

Параметр *Fill amount* устанавливает заполнение подложки материалом. Чем меньше материала в подложке, тем она слабее, следовательно, легче удаляется от стола 3D-принтера. На практике 15% заполнения материалом подложки достаточно. Дополнительным преимуществом программы *Cura* является возможность задавать расстояние от поддержки до поверхности детали с помощью вкладки *Distance X/Y (mm)* (дистанция по осям X/Y) (расстояние подложки от детали в направлениях X/Y). Расстояние от подложки до детали в 0,7 мм на практике оптимальное, так как при этом подложка не прилипает к основанию, в тоже время находится недалеко от детали, отчего при печати расплавленная нить не сильно провисает, не снижая качество изготавливаемого изделия. Команда *Distance Z (mm)* (дистанция по оси Z) позволяет установить расстояние от верхней (или нижней) части поддержки до нижней (или до верхней) поверхности изготавливаемой детали. Небольшой зазор в 0,15 мм облегчает удаление поддержки, при этом не сильно ухудшает поверхность детали. Во вкладке *Filament* устанавливается диаметр пластикового прутка *Diameter (mm)* (диаметр 1,75 мм либо 2,85 мм). Для данного принтера этот параметр равен 1,75 мм (стандартный диаметр пластиковой нити). Редко, когда диаметр прутка для формирования детали отличается от диаметра прутка, предназначенного для формирования подложки. Гипотетически, это возможно, если 3D-принтер обладает двумя и более экструдерами, один из которых загружен особенной нитью для формирования поддержек (например, водорастворимым пластиком для поддержки).

Команда *Flow* (подача) – это ещё одна важная настройка печати, которая определяет качество изготавливаемого изделия, позволяя компенсировать недостаток подачи экструдером пластика, если наблюдаются пропуски нанесения материала. Рекомендуется немного увеличить параметр *Flow* до 105 %, что снизит вероятность пропусков нанесения пластика.

Важным параметром, определяющим качество изготавливаемой детали и скорость печати, является размер сопла экструдера (для данного принтера равен 0,4 мм) *Nozzle size*. Чем больше диаметр сопла экструдера, тем больше максимально возможная величина слоя, при которой можно существенно уменьшить продолжительность печати, но увеличится шероховатость поверхности детали, снизится её качество.

В расширенных настройках *Advanced* параметр втягивания нити *Retraction* может встретиться повторно. При этом важно, чтобы указанный ранее показатель *Retraction* (во вкладке *Expert config*) не противоречил другому. Во вкладке *Advanced* задаются скорость и дистанция втягивания. По умолчанию программа *Cura* предлагает скорость втягивания около 40-45 мм/сек и дистанцию втягивания 4,5 мм. Эти показатели не всегда подходят, так как скорость и дистанцию скорее всего потребуется изменить при небольших размерах деталей, которые имеют острые выступы. С повышением скорости втягивания нити может возникнуть стук, который вызван срезом прутка пластика зубчатым колесом шагового двигателя, с понижением скорости могут образоваться нити между кромками детали (рис. 3.33). Скорость и дистанцию втягивания окончательно определяют экспериментально для конкретного пластика, 3D-принтера, размера детали. По опыту, оптимальной является дистанция втягивания прутка в 4,5 мм. Нулевой показатель означает, что втягивание нити (*Retraction*) вовсе отсутствует.

Во вкладке *Quality* (качество детали) можно настроить следующие параметры (рис. 3.45): толщину первого слоя (*Initial layer thickness*) (повышение толщины нижнего слоя улучшает адгезию к столу, а по умолчанию, при его значении 0,0 мм, толщина нижнего слоя будет равна толщине слоёв детали); коэффициент изменения ширины линии (*Initial layer line width*), который предназначен для экструзии первого слоя (на некоторых принтерах хорошо иметь более широкую экструзию прутка, чтобы получить лучшую адгезию к столу); обрезку низа печатаемого объекта (*Cut off object bottom*), которая позволяет снизить объект относительно плоскости стола, что может быть полезным для неровных полых нижних поверхностей деталей, при этом создаётся слишком маленький первый слой поддержки; двойное экструзионное нанесение (*Dual extrusion overlap*), которое позволяет добавить определенное количество перекрывающейся экструзии на отпечатки с двойной экструзией, что даст возможность организовать многоцветную печать.

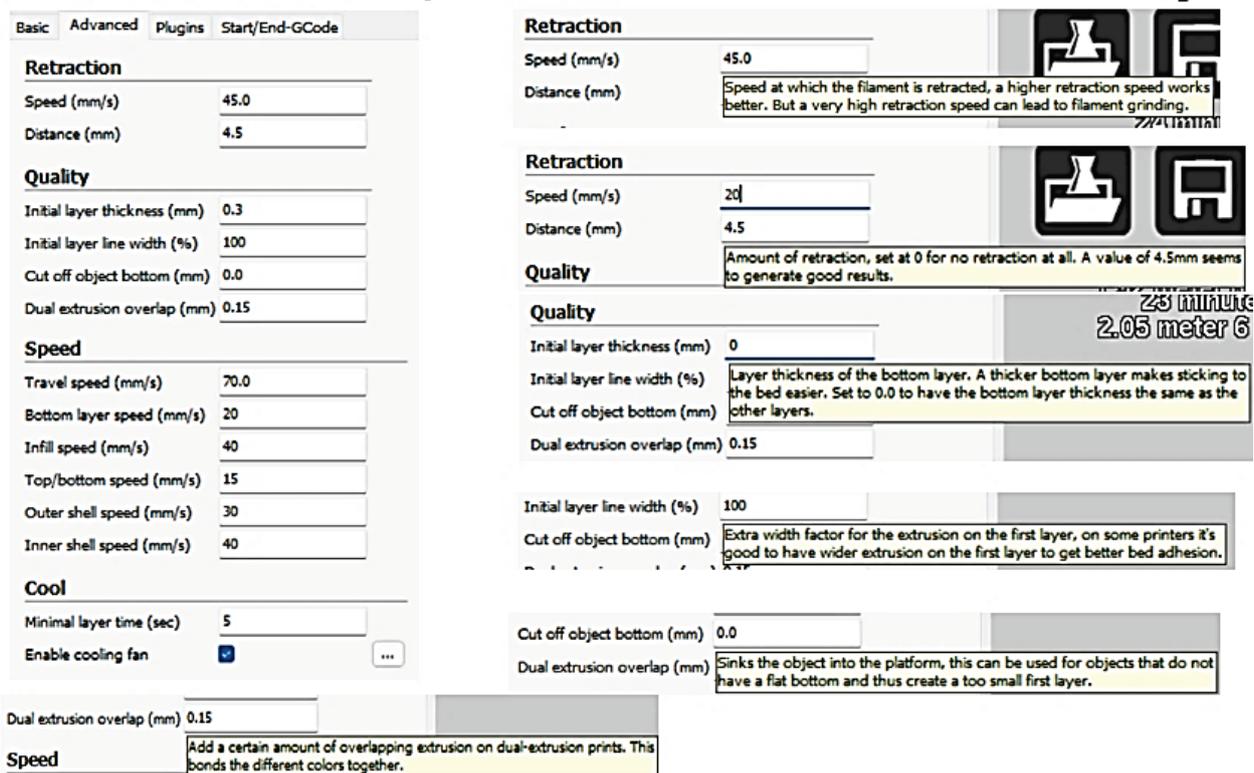


Рис. 3.45. Расширенные настройки 3D-печати в программе Cura

Во вкладке *Advanced* можно установить скорости различных узлов принтера (рис. 3.46), каждая из которых определённым образом влияет на качество печати и на скорость.

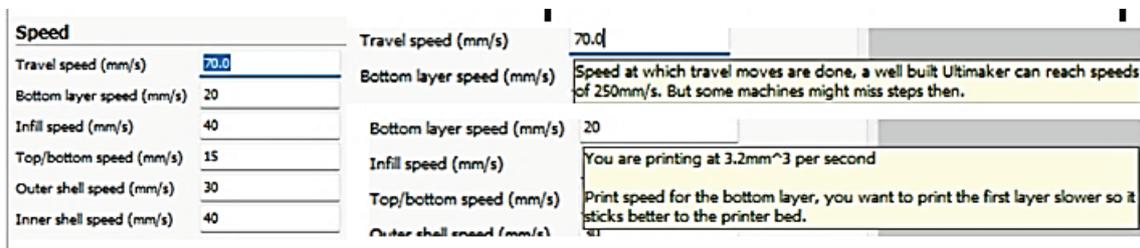


Рис. 3.46. Расширенные настройки скорости печати

Скорость перемещения экструдера (*Travel speed*) 3D-принтера *Wanhao Duplicator i3* может достигать 250 мм/сек, но при максимальной скорости можно пропустить нанесение пластика. Намного медленнее рекомендуется наносить нижний слой (*Bottom layer speed*), для того чтобы он лучше зафиксировался к столу 3D-принтера. Рационально немного повысить скорость перемещения при заполнении детали (*Infill speed*), так как это сократит время печати, но при этом качество поверхности изделия не пострадает. Если установлено значение 0 мм/с, то скорость заполнения будет равна скорости печати. В отличие от скорости заполнения, скорость, с которой печатаются верхние и нижние части детали (*Top/bottom speed*), рекомендуется снизить. Более быстрая печать верхней или нижней части детали может значительно сократить время печати, но это может негативно сказаться на качестве изготавливаемого изделия. Если установлено значение 0 мм/сек, то эта скорость будет равна скорости печати. Аналогичная

ситуация со скоростью внешней оболочки (*Outer shell speed*). Если установлено значение 0 мм/сек, то используется скорость печати. Печать внешней оболочки на более низкой скорости улучшает качество поверхности детали. Важно отметить, что большая разница между скоростью печати внутренней и внешней оболочки может отрицательно сказаться на качестве.

Более высокая скорость печати внутренней оболочки (*Inner shell speed*), чем внешней, позволит сократить время печати детали. Рекомендуется установить её значение где-то между скоростью печати внешней оболочки и скоростью печати слоёв (рис. 3.47).

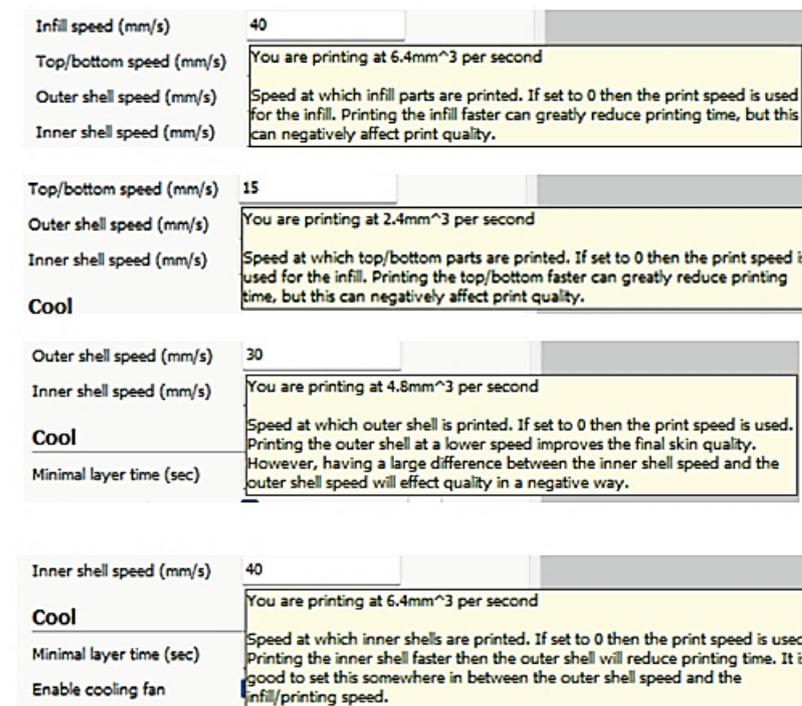


Рис. 3.47. Расширенные настройки скорости и охлаждения в программе *Cura*

Важным фактором, который определяет скорость печати, качество детали при экструзии полимера, является температура. При экструзионной печати контролируются температуры экструдера и рабочего стола, которые зависят, в большей степени, от вида материала. Контроль за температурой ведётся за счёт подачи напряжения в нагревательные элементы. Кроме того, температуру можно контролировать с помощью вентиляторов, которые позволяют регулировать режим перехода пластика из вязкого состояния в твёрдое. Режим охлаждения может повлиять на усадку пластика, которая во многом определяет несоответствие заявленных размеров 3D-модели полученным после печати детали. Уровень усадки может достигать 8% для отверстий небольшого диаметра (рис. 3.13).

Программа *Cura* позволяет контролировать следующие параметры охлаждения (рис. 3.48):

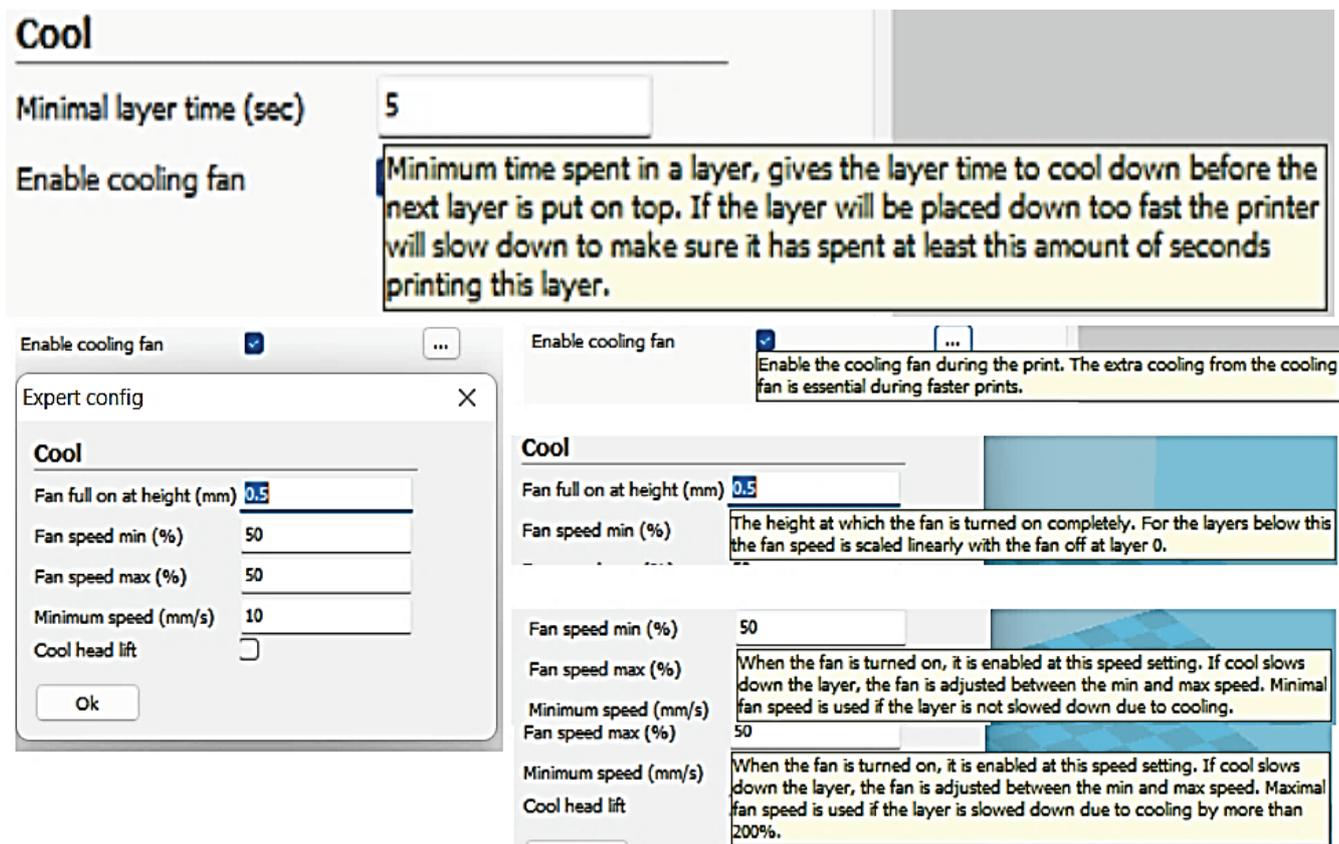


Рис. 3.48. Расширенные настройки охлаждения при 3D-печати в программе *Cura*

Minimal layer time – минимальное время нанесения слоя. Этот показатель дает возможность слою остыть, прежде чем поверх него будет нанесен следующий. Если слой будет нанесен слишком быстро принтер замедлит работу, чтобы убедиться, что заданное время перед нанесением следующего слоя будет выдержано.

Enable cooling fan – эта команда позволяет включить охлаждающий вентилятор во время печати. Дополнительное снижение температуры от охлаждающего слоя вентилятора (он предусмотрен в 3D-принтерах *Wanhao Duplicator I3*) необходимо при более быстрой печати.

Fan full on at height – устанавливает высоту, на которой вентилятор включается полностью. Для нижележащих слоев скорость вентилятора масштабируется линейно. При печати нижнего слоя, где температура близка к температуре стола 3D-принтера, вентилятор выключен.

Fan speed min – устанавливает скорость вращения вентилятора. Если охлаждение слоя замедлено, вентилятор работает со скоростью, которая находится между минимальной и максимальной. Минимальная скорость вентилятора (*Fan speed min*) используется, если слой не успевает остыть без охлаждения. Максимальная скорость вентилятора (*Fan speed max*) используется, если скорость печати слоя замедляется из-за охлаждения более чем на 200%.

Важно отметить, что минимальное время нанесения слоя может привести к замедлению 3D-печать до возникновения излишков пластика на детали, а минимальная скорость подачи защищает от этого, что является своего рода

предохранителем для скоростного режима печати. Скорость 3D-печати не может быть ниже минимальной скорости подачи.

Cool head lift – задаёт подъем экструдера, что позволяет снизить температуру нанесённого слоя при замедленном охлаждении (при минимальной скорости). Экструдер будет находиться в режиме ожидания, чтобы выдержать минимальное время формирования слоя (рис. 3.49).

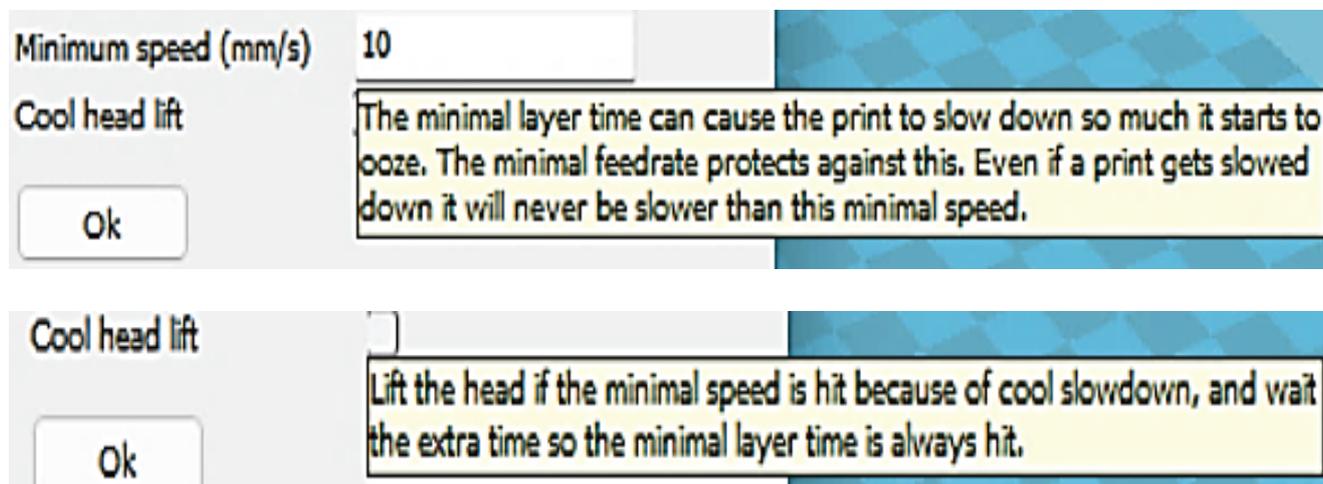


Рис. 3.49. Расширенные настройки скорости охлаждающего вентилятора при 3D-печати в программе *Cura*

3.5. Изготовление деталей с помощью 3D-технологии стереолитографии

Из существующих технологий 3D-печати принтеры, работающие по технологии печати из полимерной смолы, позволяют изготовить детали сложной формы с наибольшей точностью. Практический навык 3D-печати из фотополимерной смолы может пригодиться студентам в будущем при устройстве на работу в разные отрасли промышленности: целлюлозно-бумажную, медицинскую, ювелирную и др.

Практические навыки 3D-печати деталей по технологии стереолитографии осваиваются студентами при использовании современных 3D-принтеров, которые оснащены программами кодировки 3D-моделей в необходимый формат. Например, подготовка 3D-модели осуществлялась в программе *Chitobox*, а деталь изготавливалась из полилактидной смолы с помощью 3D-принтера *Wanhao D11 C.G.R.* В работе использовалась технология 3D-печати, основанная на послойном отверждении жидкого фотополимерного материала под воздействием ультрафиолетового излучения. Описание технологии изготовления схематично представлено на рис. 3.50.

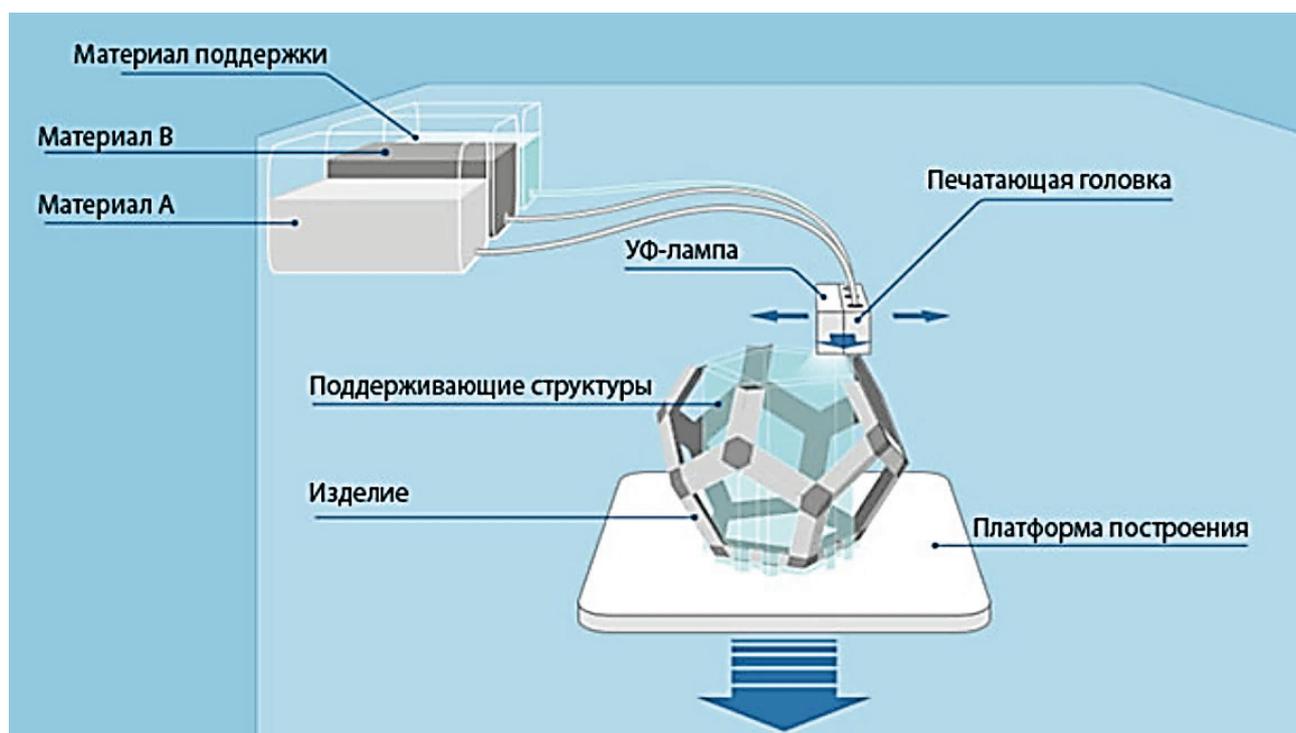


Рис. 3.50. Схема изготовления детали фотополимерной смолой

Основные характеристики 3D-принтера *Wanhao D11 CGR 8.9 Monochrom* представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Характеристики 3D принтера *Wanhao D11 CGR 8.9 Monochrom*

Материал корпуса	Сталь
Форматы файлов	Все файлы формата <i>stl</i>
Длина волны УФ	405 нм
Дополнительные датчики	Встроенная система мониторинга температуры обеспечивает своевременное отслеживание и предупреждение
Источник света	УФ-лампа 405 нм
Рабочая камера	192x120x180 мм
Толщина слоя от	35 мкм
Точность позиционирования	Z; 0,035-0,1 X/Y; 0.05 мм
Управление столом	Ручное выравнивание. Система регулировки 4 болтами
Материал для печати	Фотополимерная смола 405 нм
Скорость печати	60 мм/час (макс)
Метод печати	ЖК-стереолитография. Фотополимерный принтер
Тип корпуса	Откидывающийся вверх со стеклом, защищающим от УФ

Подготовка детали к 3D-печати осуществляется с помощью программы *Chitobox* с версией не позднее 1.7. Данная программа имеет расширенный

функционал по подготовке объектов 3D-печати. В программе присутствуют следующие команды: масштабирование в процентах и миллиметрах; поворот детали; изменение геометрии детали; создание поддержек; преобразование детали в пустотелые объекты и т.д.

Для того, чтобы открыть 3D-модель детали в программе, она должна быть сохранена в одном из форматов: *stl*; *obj*; *ctb* или *cbddlp* (последнее расширение файла генерируется программой). Первым шагом при подготовке к 3D-печати является загрузка детали в программу *Chitubox*. Для этого необходимо либо в контекстном меню, либо в строке быстрого доступа выбрать пункт *Открыть файл* (рис. 3.51). В появившемся окне выбираем необходимый файл любого из подходящих форматов, в нашем случае это файл *Model.stl*. Символы после точки в имени файла *stl* определяют его расширение (формат).

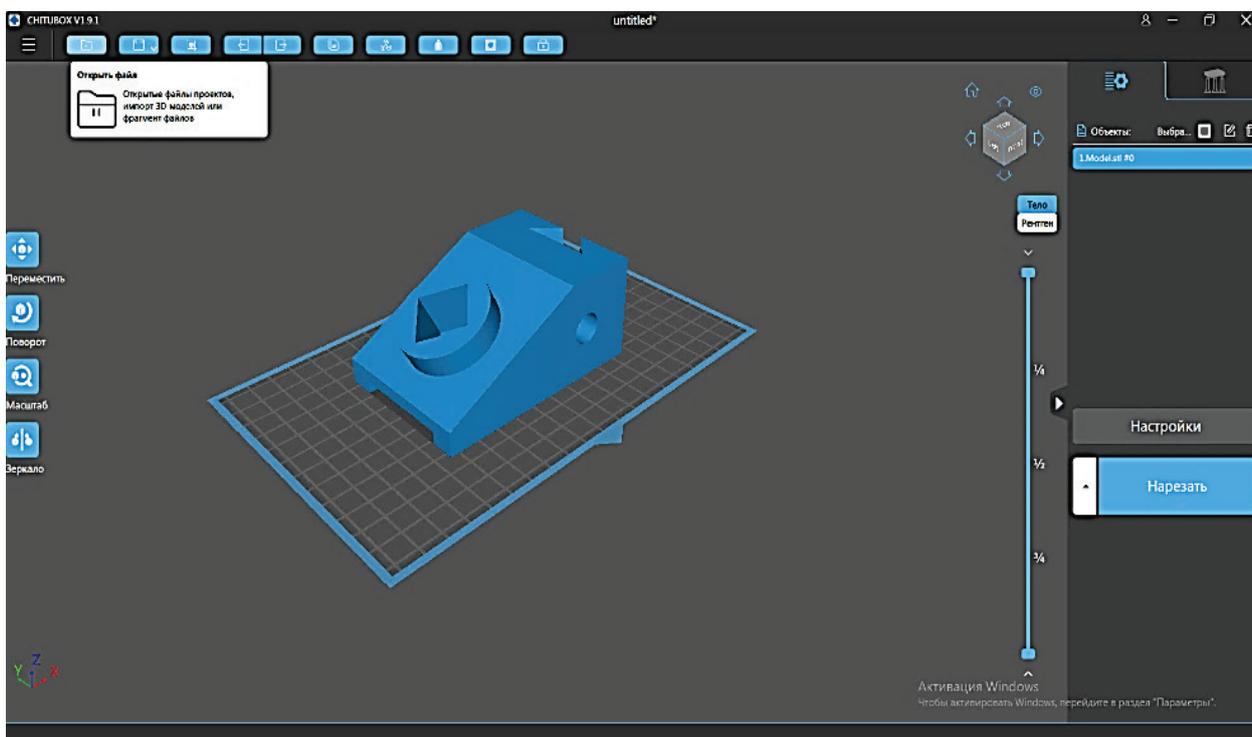


Рис. 3.51. Открытие файла 3D-модели в программе *Chitubox*

Желательно, чтобы название файла содержало только латинские символы.

После загрузки файла 3D-модель появляется в рабочем пространстве, на котором нанесена сетка для удобства (сторона каждого квадрата сетки 10 мм). Также деталь появляется в библиотеке объектов в правой части интерфейса программы. Далее при помощи команды *Масштаб* проверяем размеры детали и устанавливаем необходимый масштаб. В программе *Chitubox* можно масштабировать и менять размеры как пропорционально, так и отдельно относительно каждой оси, а для изменения режима неоднородного масштабирования необходимо убрать или поставить галочку *Фикс, Пропорции* (рис. 3.52).

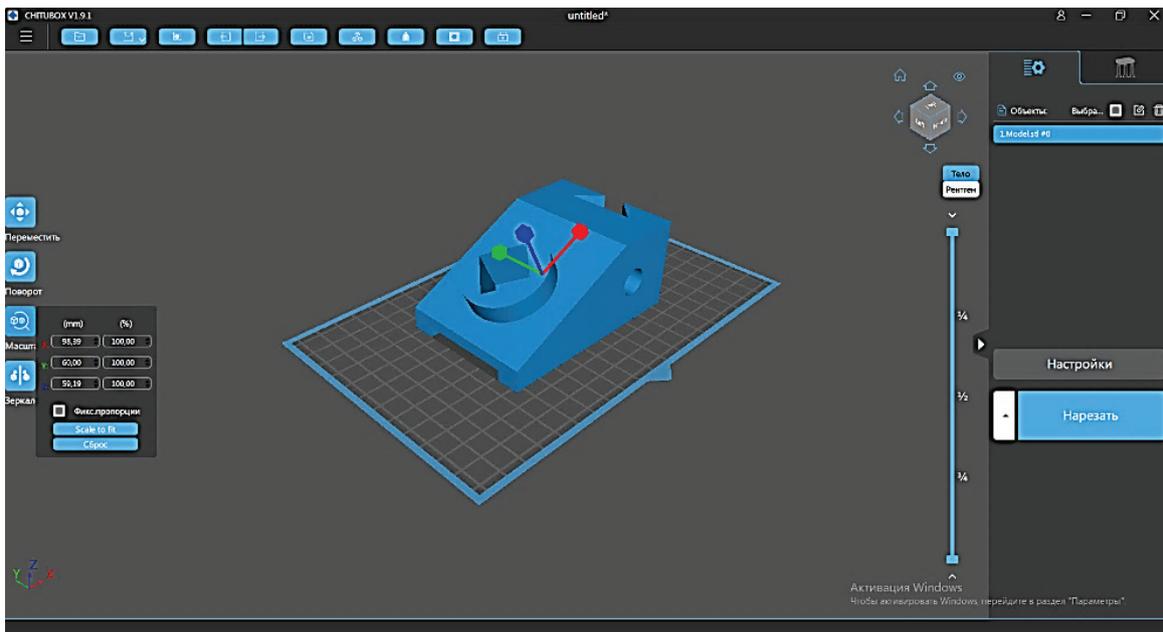


Рис. 3.52. Масштабирование детали в программе Chitubox

Затем выбираем поверхность 3D-модели, положение которой обеспечит максимально возможную поверхность контакта с рабочим столом, для лучшей адгезии. В нашем случае это фронтальная плоскость модели. Развернем объект этой плоскостью к рабочему столу. Для этого воспользуемся инструментом *Поворот* на 90 градусов вокруг оси X (рис. 3.53).

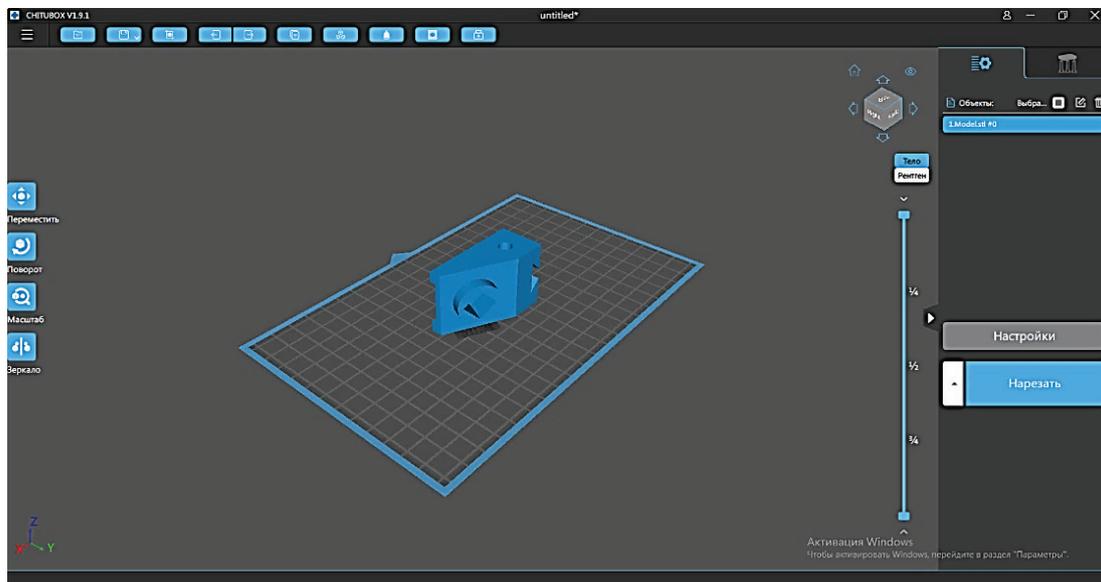


Рис. 3.53. Поворот детали в программе Chitubox

Следующий этап связан с настройкой параметров печати. Для этого необходимо нажать на кнопку *Настройки* в правой части интерфейса программы. После чего в открывшемся окне переходим во вкладку *Распечатать*. Программа позволяет задать следующие параметры 3D-печати (рис. 3.53):

1. «*Высота слоя*». Для данного принтера этот параметр варьируется в диапазоне 0,05–0,2 мм. Чем меньше высота слоя, тем точнее и качественнее получается изделие. Но при уменьшении толщины слоя, в некоторых случаях, может значительно увеличиться время печати.

2. «*Количество нижних слоев*». Данный параметр задает количество первых слоев детали, которые будут фиксировать модель к столу принтера.

3. «*Время засветки*». Этот показатель устанавливает время засветки слоев и подбирается под каждую смолу отдельно, а также зависит от высоты слоя. Как правило, смолы имеют в комплекте таблицу для подбора данного параметра. При слишком длительной засветке образуется чрезмерная усадка материала, как следствие, большое отклонение от заданных размеров. С другой стороны, слишком большое время засветки приводит к прилипанию слоя к «FEP»-пленке, ванне, что может привести к сбою процесса изготовления детали. Недостаточное время засветки приведёт к тому, что смола недостаточно затвердеет и деталь не сформируется правильно.

4. «*Время засветки низа*» задает время засветки ближайших к столу слоёв. Данный параметр подбирается так, чтобы смола в достаточной мере затвердела, создав прочное соединение между основанием детали и рабочим столом 3D-принтера. Завышение данного параметра приведёт к увеличению количества нижних слоев. Уменьшение «*времени засветки низа*» приведёт к недостаточному затвердеванию смолы, что в дальнейшем может привести к отрыву модели от стола и сбою печати.

5. «*Тип перехода*» – это значение, задающее вид перехода между нижними и рабочими слоями, оно может быть «*Линейным*» или «*Ступенчатым*». Для смол, которые в процессе печати превращаются в твердый материал, необходим «*Линейный*», а для смол, которые в процессе печати превращаются в эластичный материал, необходим «*Ступенчатый*».

6. «*Время задержки перед подъемом*» – параметр, задающий время задержки до начала подъема стола после завершения печати слоя. Данный параметр позволяет стабилизироваться и закрепиться смоле после формирования слоя.

7. «*Время задержки после подъема*» – данный параметр задает время задержки стола в верхней точке его подъема. Задержка позволяет смоле заполнить пространство, которое освободилось после формирования слоя.

8. «*Время задержки после отвода*» – параметр задает время задержки до включения светодиодной матрицы после опускания стола. Данный параметр позволяет избежать положения, когда стол еще не опустился до конца, а УФ матрица уже включилась. *Время задержки*, как правило, задаётся по умолчанию – 0 сек. Для более корректной работы 3D-принтера рекомендуется задать выше нуля. В большинстве случаев достаточно одной секунды, редко устанавливают больше.

9. «*Высота подъема*» задает высоту подъема рабочего стола от «FEP»-пленки. Данный параметр устанавливается в зависимости от коэффициента растяжения «FEP»-пленки. Слишком высокое значение параметра, увеличит время печати и не отразится на качестве детали. Слишком низкое значение

приведёт к тому, что сформированный слой не будет отрываться от «FEP»-пленки, что приведёт к сбою печати.

10. «Скорость подъема» – данный показатель задает скорость стола, с которой он отходит от «FEP»-пленки после засветки слоя. При увеличении скорости появляется опасность обрыва модели, что негативно отразится на качестве детали, а при уменьшении скорости увеличивается время печати.

11. «Нижняя скорость отвода» – значение скорости подъема стола при печати первых слоев. Так как нижние слои имеют большее время формирования, то для них потребуется большая скорость отрыва от «FEP»-пленки. Данная скорость должна быть примерно в 2 раза выше скорости подъема.

12. «Скорость ретракта» – скорость подъема стола после окончания печати (рис. 3.54).

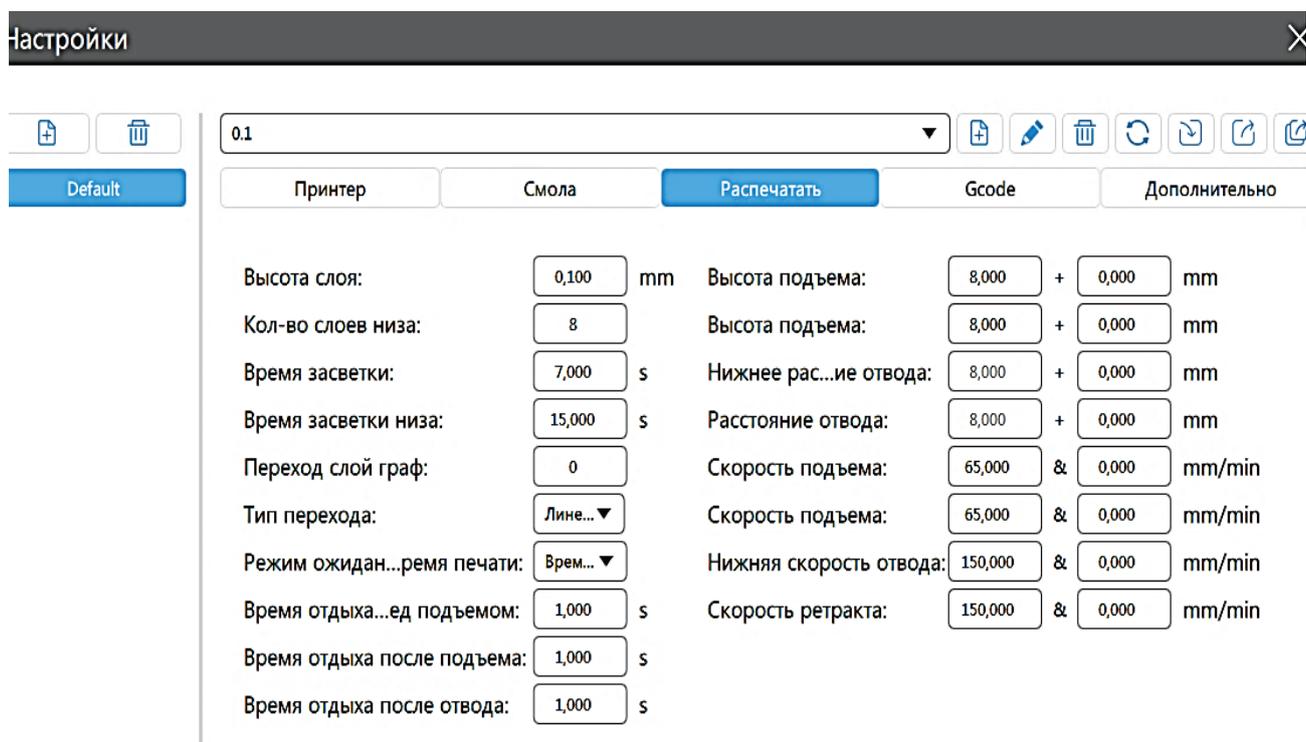


Рис. 3.54. Параметры 3D-печати жидким полимером в программе *Chitbox*

После задания всех необходимых значений печати закрываем окно настройки. После чего необходимо задать команду «Нарезать», которая запускает кодировку 3D-модели (рис. 3.55).

С этого момента запускается процесс создания «управляющего» файла для 3D-принтера (кодировка). После завершения можно будет просмотреть отдельно каждый слой модели и каждый шаг принтера с помощью «ползунка» в правой части рабочего пространства. Если всё устраивает, то сгенерированный файл сохраняется. Принтер поддерживает работу по сети, но производителем рекомендуется печать с USB-накопителя.

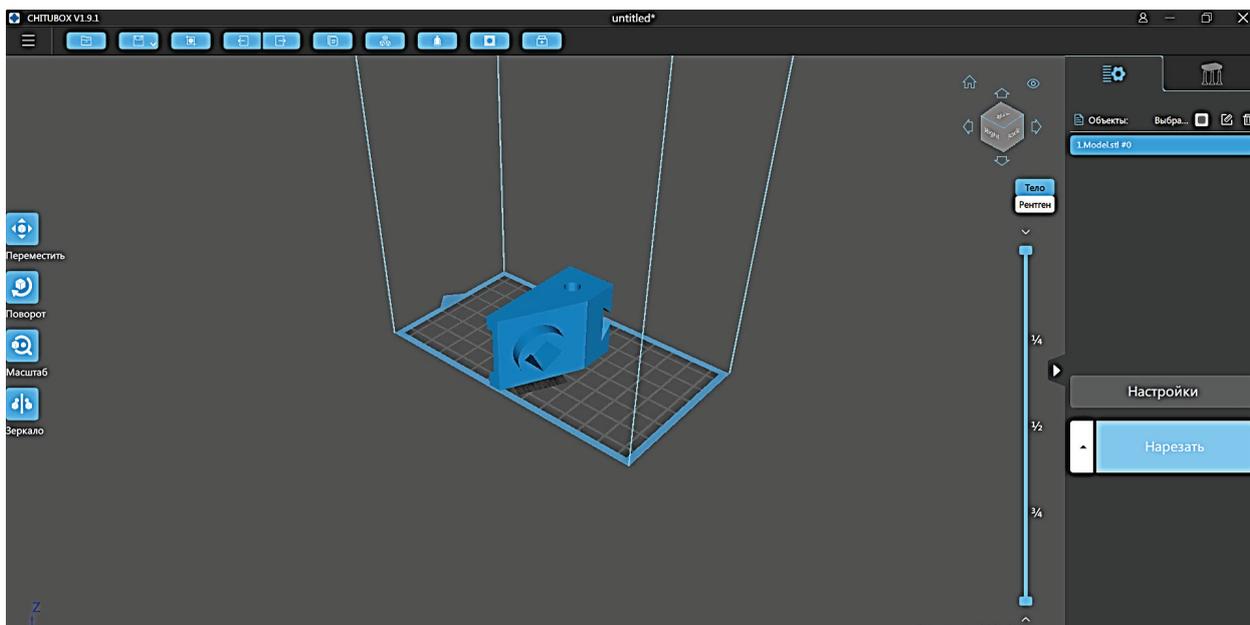


Рис. 3.55. Кодировка 3D-модели по заданным параметрам печати

После нажатия кнопки «сохранить» выбираем путь, куда необходимо сохранить файл.

Программа *Chitubox* позволяет просматривать процесс нанесения каждого слоя в отдельности, для этого необходимо установить нужный режим просмотра (рис. 5.56).

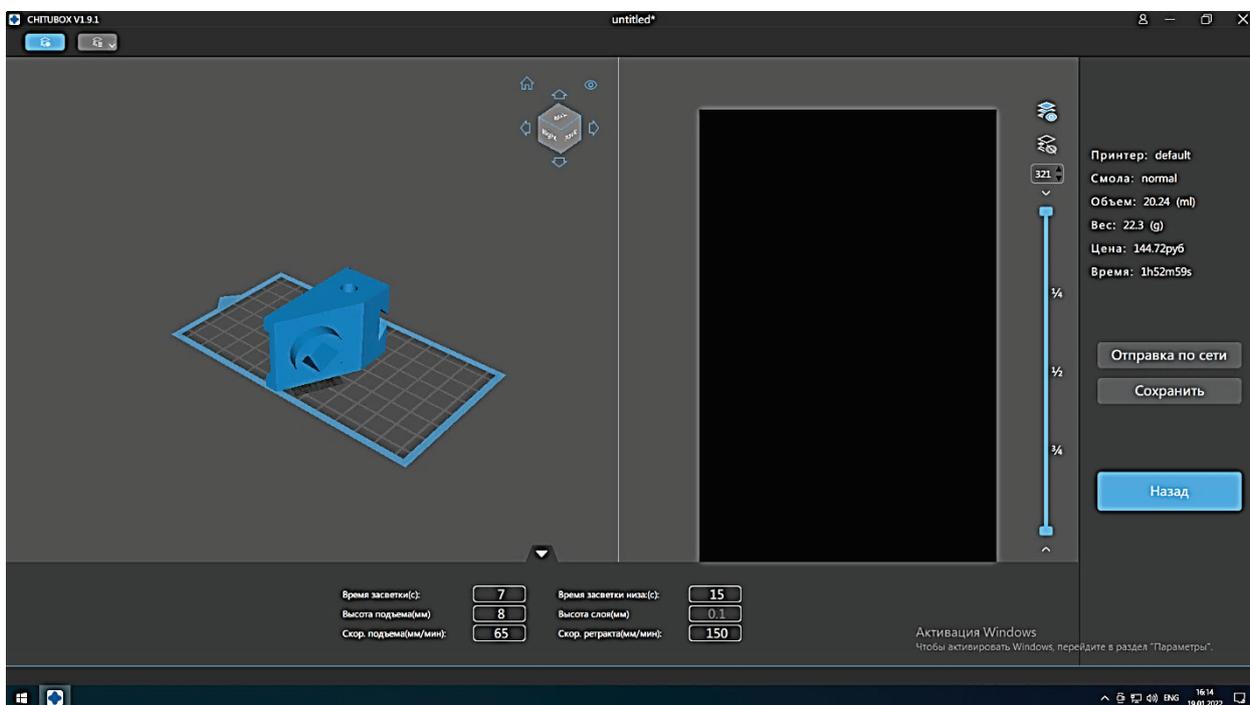


Рис. 3.56. Режим просмотра сгенерированных слоёв в программе *Chitubox*

Следующий этап – это подготовка принтера. Прежде всего, необходимо установить «ванну» с натянутой на дно «FEP»-пленкой. «Ванна» закрепляется специальными зажимами до двух упоров. После чего необходимо закрепить ее

четырьмя болтами. При закручивании болтов необходимо соблюдать определенное усилие «легкой затяжки», в противном случае повредится матрица (рис. 3.57).



Рис. 3.57. Фиксация «ванны»

После установки «ванны» необходимо залить нужное количество жидкой смолы (рис. 3.58). Перед заливкой смолу нужно размешать, и ни в коем случае *не взбалтывать!* При взбалтывании в смоле могут оказаться пузырьками воздуха, что приведёт к неоднородности изготавливаемой модели.

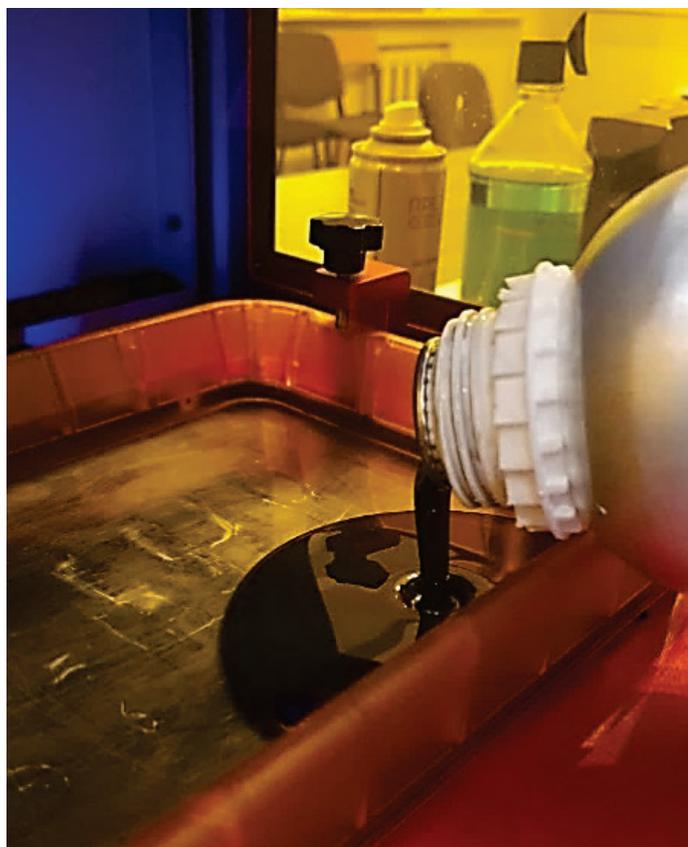


Рис. 3.58. Заливка смолы в 3D-принтер

После чего опускаем стол в «домашнюю» точку через меню, как представлено на дисплее (рис. 3.59).



Рис. 3.59. Перевод стола в «домашнюю» точку

После завершения подготовки оборудования к печати устанавливаем *USB*-накопитель в порт на лицевой стороне принтера, как показано на рис. 3.60. Заходим в меню *Print*.



Рис. 3.60. Загрузка файла детали в программу 3D-принтера

Выбираем необходимый для печати файл и нажимаем кнопку *Print* (рис. 3.61).

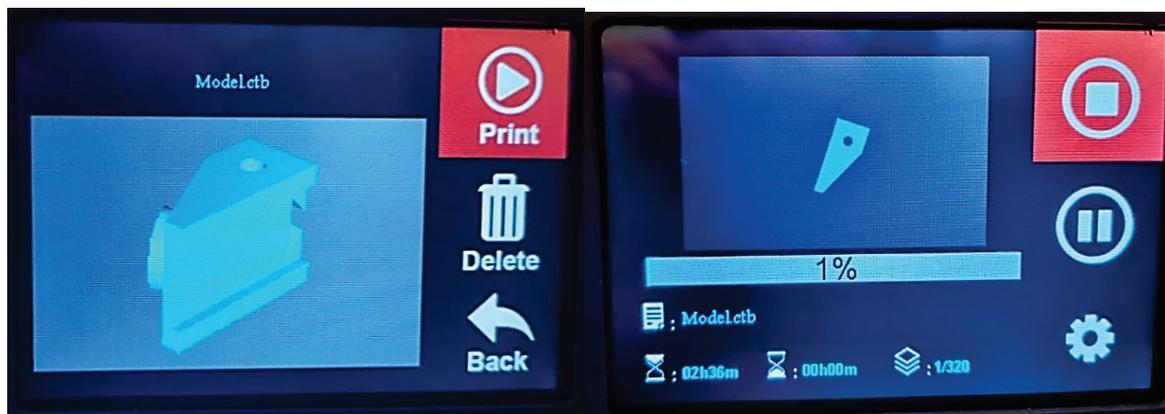


Рис. 3.61. Запуск печати 3D-принтера *Wanhao Duplicator 11 C.G.R*

После этого запускается процесс изготовления детали. На дисплее 3D-принтера будет изображение текущего слоя, процент выполнения печати, а также время и количество слоев. В процессе можно остановить печать, поставив на паузу. Также возможно изменение настройки скорости и времени засветки.

После завершения 3D-печати стол принтера поднимется на заданную высоту. Деталь снимается со стола и промывается от остатков незатвердевшей смолы спиртом или специальным растворителем (рис. 3.62). Данная процедура очень важна при печати моделей с мелкой детализацией. После промывки и просушки модели необходимо произвести конечную засветку УФ лампой в специальном шкафу. Данная процедура производится для окончательного закрепления слоев между собой для достижения максимальной прочности детали. Засветка занимает от 15 минут до 1 часа в зависимости от размеров детали.

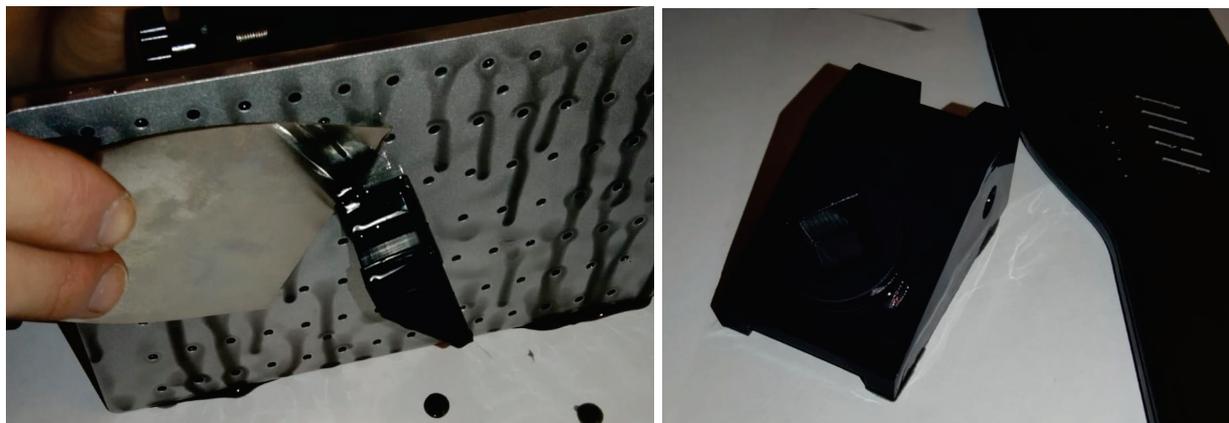


Рис. 3.62. Съём детали с рабочего стола 3D-принтера

С помощью штангенциркуля устанавливаются размеры изготовленной детали, которые затем сопоставляются с размерами, заданными на чертеже детали (рис. 3.63).

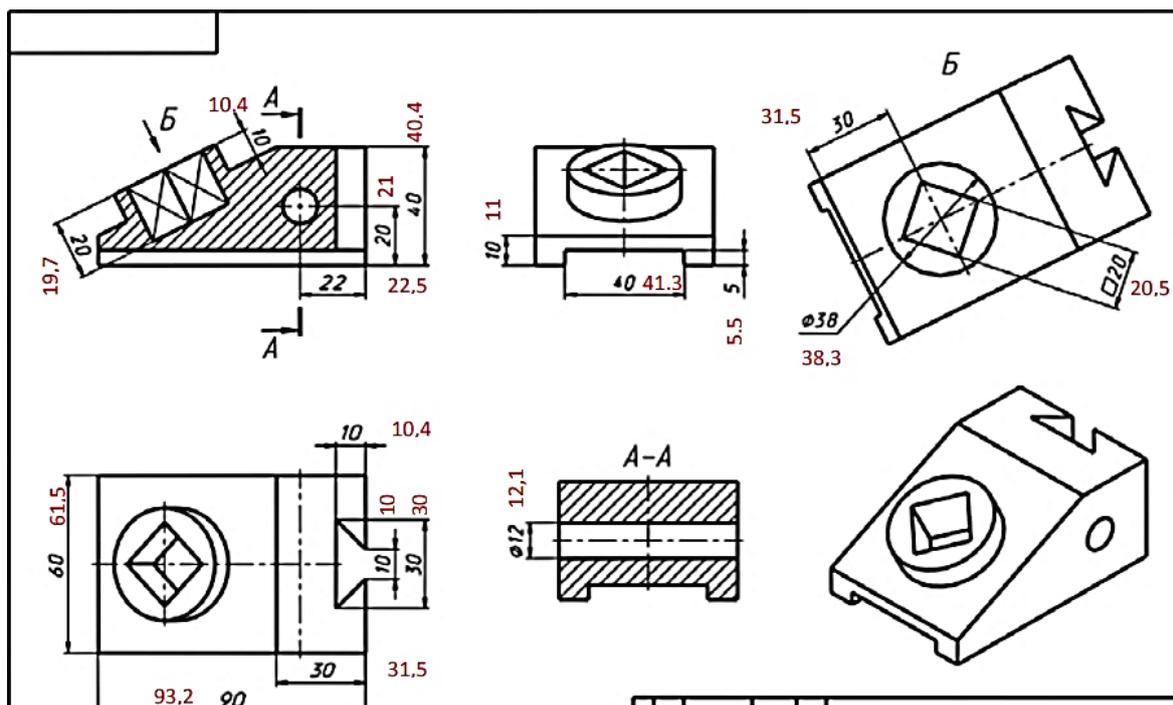


Рис. 3.63. Контроль качества изготовленной детали

Из рис. 3.63 видно, что реальные размеры детали отличаются от заявленных на чертеже незначительно. Наибольшее отклонение в размере не превысило 5% (таблица 3.6).

Таблица 1.6 – Отклонение размеров изготовленной детали от заданных

Размер на чертеже, мм	Реальный размер, мм	Отклонение, %	Размер на чертеже, мм	Реальный размер, мм	Отклонение, %	Размер на чертеже, мм	Реальный размер, мм	Отклонение, %
20	21	4,8	5	5,5	4,8	10	10	0
10	10,4	3,8	30	31,55	4,9	10	10,4	-3,8
20	19,7	-1,5	38	38,3	0,8	30	30	0
40	40,4	1	20	20,5	2,4	30	31,5	-4,8
22	22,5	2,2	60	61,5	2,4	12	12,1	-0,8
10	10,4	3,8	90	93,2	3,4			

В отличие от экструзионной печати, изготовление деталей из жидкого полимера позволяет получить более точные размеры. Усадка не превысила 4,8 % для отверстия небольшого диаметра. В отличие от экструзионной печати, элементы деталей маленьких размеров имеют большую точность. Уровень усадки распределён по-разному в плоскостях, поэтому при масштабировании необходимо это учесть. Программа *Chitobox* позволяет масштабировать размеры в разных плоскостях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Евдокимов, Н. В. Оценка использования древесных отходов в аддитивных технологиях / Н. В. Евдокимов, А. Н. Кеутаева // Вестник СПбГУПТД. Сер. 4, Промышленные технологии. – 2022. – № 1. С. 103–109.
2. Кеутаева, А. Н. Оценка возможности использования древесных отходов в аддитивных технологиях / А. Н. Кеутаева, Н. В. Евдокимов // XV международная научно-практическая конференция на английском языке «Диалог культур» : материалы конференции / ВШТЭ СПбГУПТД. – СПб, 2022.
3. Шкуро, А. Е. Технологии и материалы 3D-печати [Текст] : учебное пособие / А. Е. Шкуро, П. С. Кривоногов. – Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т. – 2017 – 101 с.
4. Евдокимов Н. В. Технология «FDM» печати в научно-педагогической деятельности вуза / Н. В. Евдокимов, М. А. Мартынов, Д. Д. Темирбулатов // Вестник СПбГУПТД. Сер. 4, Промышленные технологии. – 2021. – №4. – С. 75–82.
5. Ходер, В. Б. Наполненные фотополимерные композиции для 3D-печати методом стереолитографии (обзор) / В. Б. Ходер, И. Е. Кордикова, Г. Н. Дьякова // Труды БГТУ. Сер. 2. – 2022. – № 1. – С. 27–32.
6. Ponnusamy, P., Rizwan, R., Mechanical Properties of SLM-Printed Aluminium Alloys: National Library of Medicine – 2020. – №13 – С. 51.
7. Gardner, L., Kyvelou, P., Herbert, G., Buchanan, C. Testing and initial verification of the world's first metal 3D printed bridge. Imperial College London, UK. – 2020. – Vol. 172. – 10 p.
8. ГОСТ Р 57558-2017/ISO/ASTM 52900: 2015. Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы [Текст] – Введ. 2017–12–01.
9. Обратный инжиниринг. – Текст : электронный // DFM Технологии : [сайт]. – 2022. – URL: <https://dfmplastic.ru/revers-inzhiniring> (дата обращения: 06.09.2022).
10. Автостроение. – Текст : электронный // 3D SCANTECH : [сайт]. – 2022. – URL: <https://www.3d-scantech.com/ru/applications/automotive/> (дата обращения: 06.09.2022).
11. 3D-сканеры в образовании и науке. – Текст : электронный // GLOBATEK 3D : [сайт]. – 2022. – URL: <https://globatek.ru/3d-wiki/otrasli-primeneniya-3d-skanerov/obrazovanie-i-nauka> (дата обращения: 06.09.2022).
12. 3D-сканеры в нефтегазовой отрасли. – Текст : электронный // GLOBATEK 3D : [сайт]. – 2022. – URL: <https://3d.globatek.ru/3d-scanners/scan-neft/> (дата обращения: 06.09.2022).
13. Murphy, S. V., De Coppi, P., Atala, A. Opportunities and challenges of translational 3D bioprinting. Nature Biomedical Engineering. – 2020. – Vol 4. 370–380.
14. Shapira, A., Dvir, T. 3D Tissue and Organ Printing–Hope and Reality. Advanced Science. – № 18. – 2021. – 18 p.
15. Blender : сайт. – URL: <https://www.blender.org/> (дата обращения 06.09.2022). – Режим доступа: для всех пользователей. – Текст: электронный.
16. Программа Blender 3D. – Текст : электронный // Junior: [сайт]. – 2022. – URL: <https://junior3d.ru/article/blender-3d.html> (дата обращения 06.09.2022).

17. Autodesk Tinkercad : сайт. – 2022. – URL.: <https://www.tinkercad.com/things> (дата обращения 06.09.2022).
18. Подробный обзор программы Autodesk MeshMixer. – Текст : электронный // Junior: [сайт]. – 2022. – URL: <https://junior3d.ru/article/meshmixer.html> (дата обращения 06.09.2022).
19. Кишко, А. В. Компьютерное твердотельное моделирование [Текст]: учебное пособие / А. В. Кишко, Н. В. Евдокимов, И. В. Поротикова. – СПб: ВШТЭ СПбГУПТД, 2019. – 50 с.
20. Midukov, N. P., Fadeeva, M. A., Kaurov, P. V., Kurov, V. S., Gashin P. A. 3D technology in production of sealed containers for chemical industry devices. *Journal of Industrial Engineering and Management*. – 2016. – Vol. 7. – № 3. – Pp. 125-128.
21. Мидуков, Н. П. Исследование поперечного среза многослойного картона с использованием технологии ионной резки / Н. П. Мидуков, В. С. Куров, К. Х. Эрматова, А. С. Смолин, П. А. Сомов // *Химия растительного сырья*. – 2019. – №4. С. 387–397.
22. Midukov, N. P., Kazakov, Ya.V., Heinema, S., Kurov, V.S., Smolin, A.S. Investigation of transverse section of multi layered paperboard by ion cutting technique. *Fiber Chemistry*. – 2020.–Vol. 52. – № 1. – Pp. 51–57.
23. Литвинов, М. А. Новый подход к оценке связеобразования волокон в бумаге и картоне / М. А. Литвинов, Д. Р. Тужилов, Н. П. Мидуков, В. С. Куров // *Известия высших учебных заведений. Промышленные технологии*. – 2020. – №2. – С.101–106.
24. Литвинов, М. А. Инновационные технологии в исследовании микроструктуры многослойных волокнистых материалов / М. А. Литвинов, Д. Р. Тужилов, М. Яндушкина, Н. П. Мидуков, В. С. Куров // *Известия высших учебных заведений. Промышленные технологии*. – 2020. – №3. – С 45-53.
25. Мидуков, Н. П. Теоретические основы производства многослойного картона из макулатуры [Текст] / Н. П. Мидуков, В. С. Куров. – СПб.: Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений, 2021. – 358 с.
26. Федоскин, И. А. Технология и дизайн при изготовлении рабочего колеса центробежного насоса с помощью 3D-технологий / И. А. Федоскин, Н. П. Мидуков и др. // *Известия высших учебных заведений. Промышленные технологии*. – 2020. – №3. – С. 85-89.
27. Богданова, А. Н. Разработка режимов измельчения березовой коры в мельнице / А. Н. Богданова, Д. А. Мелькова, Н. П. Мидуков, А. А. Пиндюрина, И. Р. Смирнов // *Известия высших учебных заведений. Пром. технологии*. – 2020. – №4. – С. 81-87.
28. Мидуков, Н. П. Использование 3D печати для создания элементов оборудования химической технологии / Н. П. Мидуков, В. С. Куров // *Известия вузов. Технология легкой промышленности. СПбГУПТД*. –2021. – № 3. – С. 132–137.

Учебное издание

**Мидуков Николай Петрович
Литвинов Максим Алексеевич**

Инженерная и компьютерная графика

**Технология 3D-печати, сканирования
и моделирования деталей сложной формы**

Учебное пособие

Редактор и корректор Е. О. Тарновская
Техн. редактор Д. А. Романова

Учебное электронное издание сетевого распространения

Системные требования:
электронное устройство с программным обеспечением
для воспроизведения файлов формата PDF

Режим доступа: http://publish.sutd.ru/tp_get_file.php?id=202016, по паролю.
- Загл. с экрана.

Дата подписания к использованию 03.11.2022 г. Рег. № 5029/22

Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД
198095, СПб., ул. Ивана Черных, 4.