

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
Учреждение образования  
«Витебский государственный технологический университет»

## **АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПРОИЗВОДСТВЕ**

Методические указания по выполнению практических работ  
для студентов специальности  
1-36 07 02 «Производство изделий на основе трехмерных технологий»

Витебск  
2022

УДК 621.7

Составители:

А. Л. Климентьев, А. Н. Гришаев

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским  
советом УО «ВГТУ», протокол № 6 от 02.03.2022.

**Аддитивные технологии в производстве**: методические указания по выполнению практических работ / сост. : А. Л. Климентьев, А. Н. Гришаев. — Витебск : УО «ВГТУ», 2022. — 63 с.

Методические указания являются руководством по выполнению практических работ по учебной дисциплине «Аддитивные технологии в производстве». Изложены общие правила и последовательность выполнения работ по изготовлению модели изделия с помощью аддитивной установки на основе FFF-технологии, приведено руководство и описан порядок использования установки для вакуумного литья. Предназначены для студентов специальности 1-36 07 02 «Производство изделий на основе трехмерных технологий».

УДК 621.7

© УО «ВГТУ», 2022

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	5
1 ИЗГОТОВЛЕНИЕ МОДЕЛИ С ПОМОЩЬЮ АДДИТИВНОЙ УСТАНОВКИ НА ОСНОВЕ FFF-ТЕХНОЛОГИИ .....	6
1.1 Подготовка модели в программе-слайсере Cura Ultimaker.....	6
1.1.1 Интерфейс Cura Ultimaker .....	6
1.1.2 Настройка параметров печати.....	6
1.1.3 Добавление принтера .....	18
1.1.4 Настройки параметров принтера .....	19
1.2 Изготовление модели на установке аддитивных технологий .....	21
1.2.1 Подготовка модели в программе-слайсере .....	21
1.2.2 Выбор параметров печати .....	21
1.2.3 Предварительный просмотр .....	25
1.2.4 Экспорт G-кода .....	27
1.2.5 Калибровка стола.....	27
1.2.6 Заправка филамента .....	29
1.2.7 Печать модели с карты памяти .....	32
2 ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПОЛИМЕРНОЙ ФОРМЫ НА ОСНОВЕ АДДИТИВНОЙ МОДЕЛИ .....	35
2.1 Этапы изготовления полимерной формы .....	35
2.1.1 Общие сведения о технологии литья в полимерные формы .....	35
2.1.2 Изготовление мастер-модели .....	35
2.1.3 Изготовление силиконовой формы .....	36
2.1.4 Изготовление отливок .....	37
2.1.5 Постобработка отливок.....	37
2.2 Порядок использования установки вакуумного литья MK-MINI .....	38
2.2.1 Описание установки .....	38
2.2.2 Руководство по использованию установки MK-MINI .....	39
2.2.3 Работа с установкой MK-MINI .....	43
2.2.4 Порядок изготовления формы.....	47
2.3 Производство изделий .....	52
2.3.1 Подготовка силиконовой формы .....	52
2.3.2 Расчет необходимого количества смолы .....	53
2.3.3 Подготовка .....	53
2.3.4 Процесс литья .....	54
2.3.5 Восстановление.....	55
2.4 Производство изделий с применением пистолета с картриджами .....	56

2.4.1 Подготовка .....	56
2.4.2 Впрыск .....	57
2.4.3 Восстановление.....	57
2.5 Управление программой.....	58
2.5.1 Хранение программы .....	58
2.5.2 Вызов программы .....	58
2.5.3 Функция пилообразного зуба.....	59
2.5.4 Запуск пилообразной программы .....	59
2.5.5 Изменение пилообразной программы.....	60
2.6 Смолы и аксессуары.....	60
2.6.1 Смолы .....	60
2.6.2 Цвета .....	60
2.6.3 Армирующие волокна.....	61
2.7 Меры предосторожности .....	61
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	62

## ВВЕДЕНИЕ

В рамках учебной дисциплины «Аддитивные технологии в производстве» предусмотрено выполнение ряда работ в соответствии с общей моделью процесса аддитивного производства (АП). Работы выполняются в рамках предусмотренных программой учебной дисциплины лабораторных и практических занятий.

Общая модель процесса АП включает в себя следующие стадии [1, с. 32]:

- 1) проектирование модели в среде соответствующего программного обеспечения;
- 2) преобразование модели в STL формат;
- 3) перенос результирующего файла в аддитивную установку и необходимое манипулирование этим файлом;
- 4) настройка установки для изготовления модели;
- 5) изготовление модели на аддитивной установке;
- 6) извлечение модели из аддитивной установки;
- 7) последующая обработка модели (при необходимости);
- 8) применение полученной модели.



[1, с. 32, рис. 1.2]

# 1 ИЗГОТОВЛЕНИЕ МОДЕЛИ С ПОМОЩЬЮ АДДИТИВНОЙ УСТАНОВКИ НА ОСНОВЕ FFF-ТЕХНОЛОГИИ

## 1.1 Подготовка модели в программе-слайсере Cura Ultimaker

Поскольку не все аддитивные установки позволяют непосредственно манипулировать stl-файлами перед изготовлением модели, может потребоваться предварительно подготовить ее к печати. Подготовка модели к «печати» рассмотрим на примере специализированного программного обеспечения — программы-слайсера Cura Ultimaker, которая является одним из популярных решений в области программного обеспечения 3D-печати. Базовая версия программы-слайсера Cura распространяется компанией Ultimaker бесплатно (<https://ultimaker.com/software/ultimaker-cura>).

### 1.1.1 Интерфейс Cura Ultimaker

Основное окно программы-слайсера Cura Ultimaker представлено на рисунке 1.1.

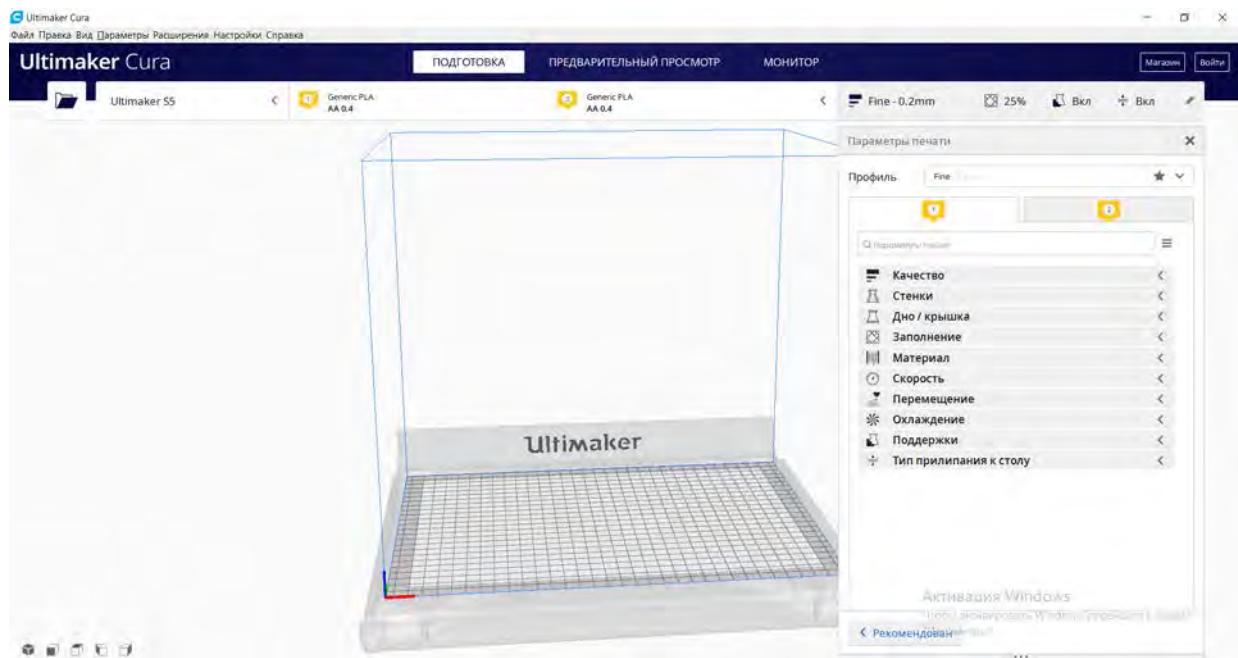


Рисунок 1.1 — Интерфейс программы-слайсера Cura Ultimaker

### 1.1.2 Настройка параметров печати

Для первоначальной настройки параметров печати можно изменить значения ряда параметров печати, при этом значения ряда других параметров можно оставить по умолчанию.

На первом этапе для настройки параметров печати устанавливаются параметры в разделе «*Качество*» (рисунок 1.2).

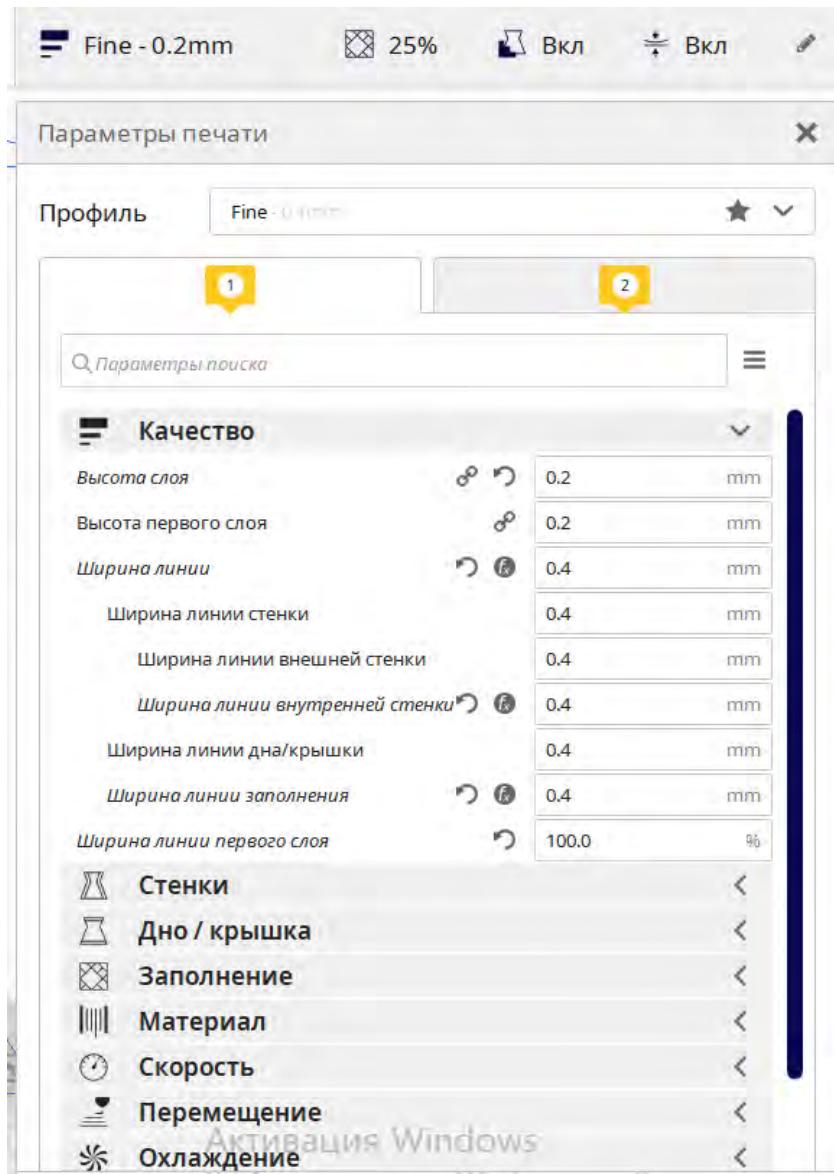


Рисунок 1.2 — Окно настройки параметров печати в разделе «Качество»

Настройка параметра «Высота слоя» определяет разрешение печати по высоте, при этом чем меньше значение этого параметра, тем поверхность модели будет более гладкая, а слоистость менее заметной. Для нормального качества рекомендуется выбрать значение примерно равное половине значения диаметра установленного сопла ( $0,5 \cdot D_{\text{сопла}}$ ), но не более 75% от значения диаметра и не менее 0,1 мм.

Настройка параметра «Высота первого слоя» используется для увеличения адгезии и возможной компенсации неровности поверхности стола. Чаще всего рекомендуется ставить значение, равное величине слоя.

Значение параметра «Ширина линии» рекомендуется принимать равным значению диаметра сопла. Если уменьшить значение этого параметра относительно значения диаметра сопла, то линии материала будут укладываться плотнее. Если же увеличить, то между линиями материала появится расстояние/зазор.

Далее настраивается ряд параметров печати в разделе «Стенки» (рисунок 1.3).

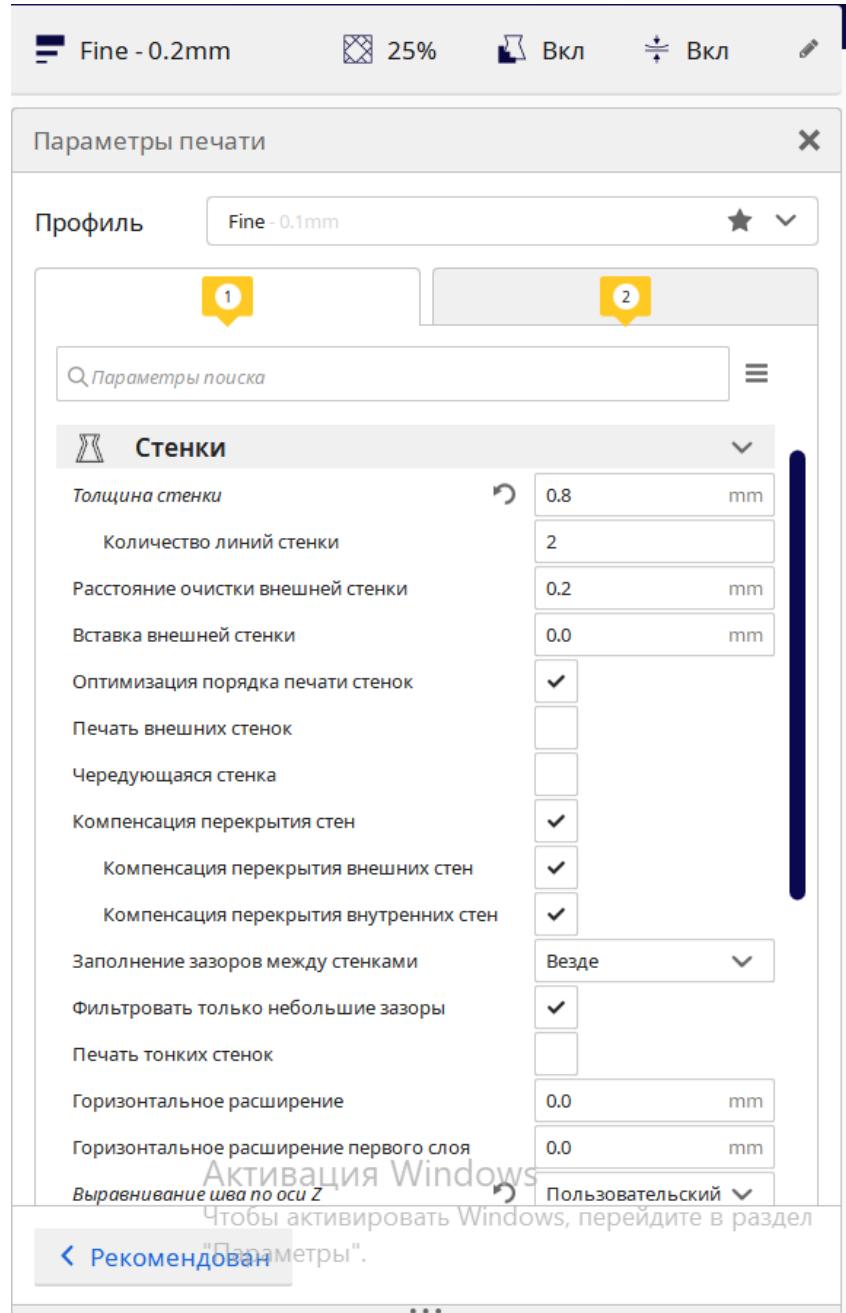


Рисунок 1.3 — Окно настройки параметров печати в разделе «Стенки» (начальный фрагмент)

Настройка параметров «Толщина стенки» и «Количество линий стенки» осуществляется исходя из следующих соображений: 2 линии периметра — нормальное качество; 3 линии периметра — высокая прочность; 4 линии периметра — очень высокая прочность.

Параметр «Расстояние очистки внешней стенки» выбирается из диапазона значений от  $0.5 \cdot D_{\text{сопла}}$ , до  $D_{\text{сопла}}$ .

Параметр «*Печать внешних стенок*» рекомендуется не включать для всех видов пластика.

Установка флага в параметре «*Фильтрация небольших зазоров*» хорошо сказывается на прочности изделия.

Параметр «*Печать тонких стенок*» отвечает за печать стенок, которые тоньше диаметра сопла.

Параметры «*Горизонтальное расширение*» и «*Горизонтальное расширение первого слоя*» при установке в них не нулевых значений приводят к тому, что слайсер построит эквидистантную модель с указанным смещением. При этом при установке значения с минусом отступ от каждой поверхности будет реализован в направлении внутрь от исходного контура, а с плюсом — наружу.

В параметре «*Выравнивание шва по оси Z*» лучше всего выбирать вариант “пользовательский” (рисунок 1.4). В данном случае точку можно выбрать так, чтобы шов был на незаметной части модели (например на задней стенке).



Рисунок 1.4 — Окно настройки параметров печати в разделе «Стенки» (финальный фрагмент)

Далее настраивается ряд параметров печати в разделе «*Дно/крышка*» (рисунок 1.5).

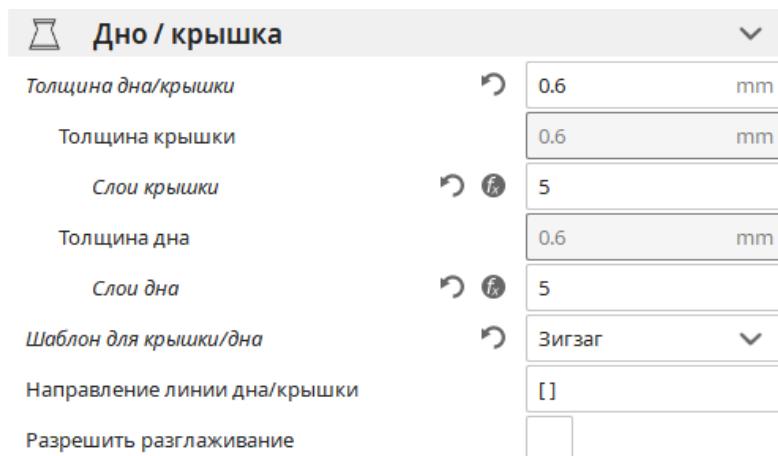


Рисунок 1.5 — Окно настройки параметров печати в разделе «*Дно/крышка*»

Для параметра «*Толщина дна*» рекомендуется выбирать 3–5 слоев, для параметра «*Толщина крышки*» — 3–5 слоев.

Параметр «Шаблон для крышки/дна/начального слоя» определяет, как будут выкладываться эти элементы. Почти всегда целесообразно использовать «зигзаг».

Далее настраивается ряд параметров печати в разделе «Заполнение» (рисунок 1.6).

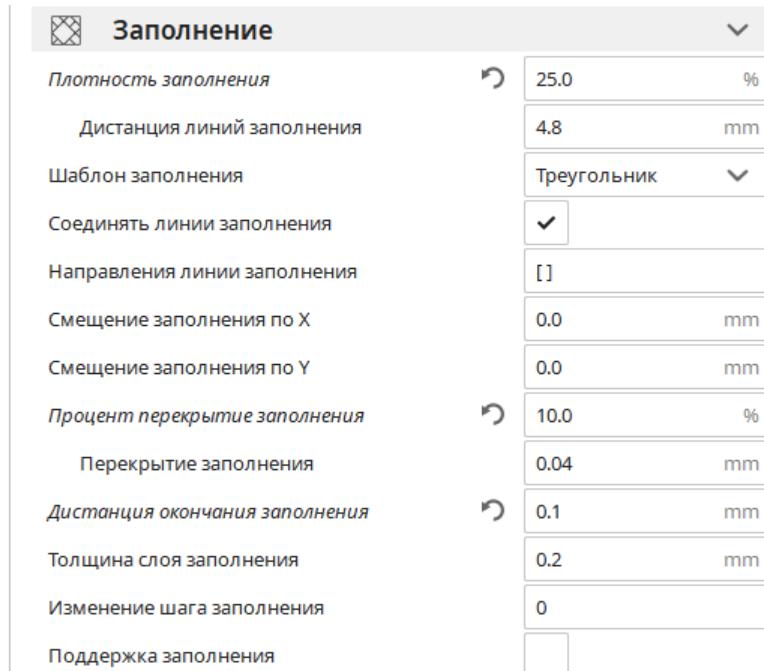


Рисунок 1.6 — Окно настройки параметров печати в разделе «Заполнение»

Значение параметра «Плотность заполнения» необходимо подбирать исходя из соображения скорости печати, прочности и расхода материала. Минимальное значение этого параметра составляет 10%, для обеспечения нормального качества — 15–35%.

Параметр «Дистанция линий заполнения» определяет расстояние между линиями. Выбор значения данного параметра зависит от плотности и целесообразно, чтобы значение было не более 5 мм.

Параметр «Процент перекрытие заполнения» определяет, на сколько линии заполнения заходит на оболочку. Нормальное значение для данного параметра — 5–15%.

Значение параметра «Дистанция окончания заполнения» рекомендуется ставить в четверть от значения диаметра сопла ( $0,25 \cdot D_{\text{сопла}}$ ).

Параметр «Толщина слоя заполнения» определяет возможность печати заполнения более толстыми слоями, чем внешние периметры.

Параметр «Изменение шага заполнения» используется для художественных моделей (когда прочность модели не так важна, как ее внешний вид). Данный параметр позволяет сделать заполнение в нижней части реже, а по пути к крышке увеличить его плотность на указанное количество шагов.

Далее настраивается ряд параметров печати в разделе «Материал» (рисунок 1.7).

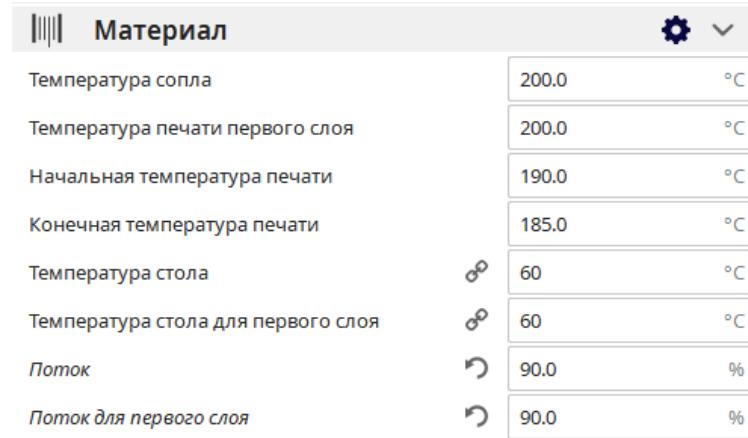


Рисунок 1.7 — Окно настройки параметров печати в разделе «Материал»

Параметр «Температура сопла» устанавливается согласно рекомендуемым значениям температуры для используемого пластика.

Значения параметров «Начальная температура печати» и «Конечная температура печати» не должны быть ниже значений нижнего предела температуры для используемого пластика.

Значение параметра «Температура рабочего стола» выбирается равным значению температуры стеклования пластика, например, для PLA — 60 °C; PETG — 80 °C; ABS — 105 °C.

Далее настраивается ряд параметров печати в разделе «Скорость» (рисунок 1.8).

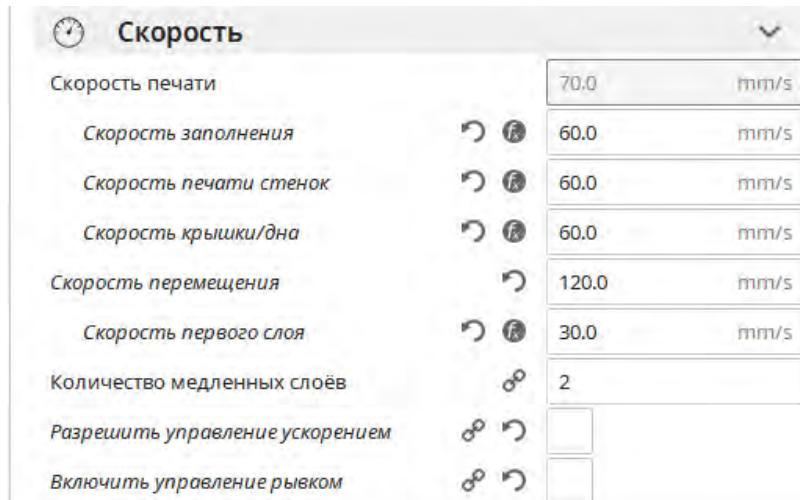


Рисунок 1.8 — Окно настройки параметров печати в разделе «Скорость»

Значение *скорости перемещения* должно быть в пределах разумного для кинематики используемого принтера.

Значение *скорости первого слоя* желательно устанавливать меньше значения скорости основной печати, т. к. желательно печатать помедленнее, чтобы обеспечить лучшее прилипание первого слоя к основанию платформы.

Параметр «*Количество медленных слоев*» лучше ставить 1 или 2.

Далее настраивается ряд параметров печати в разделе «*Перемещение*» (рисунок 1.9).

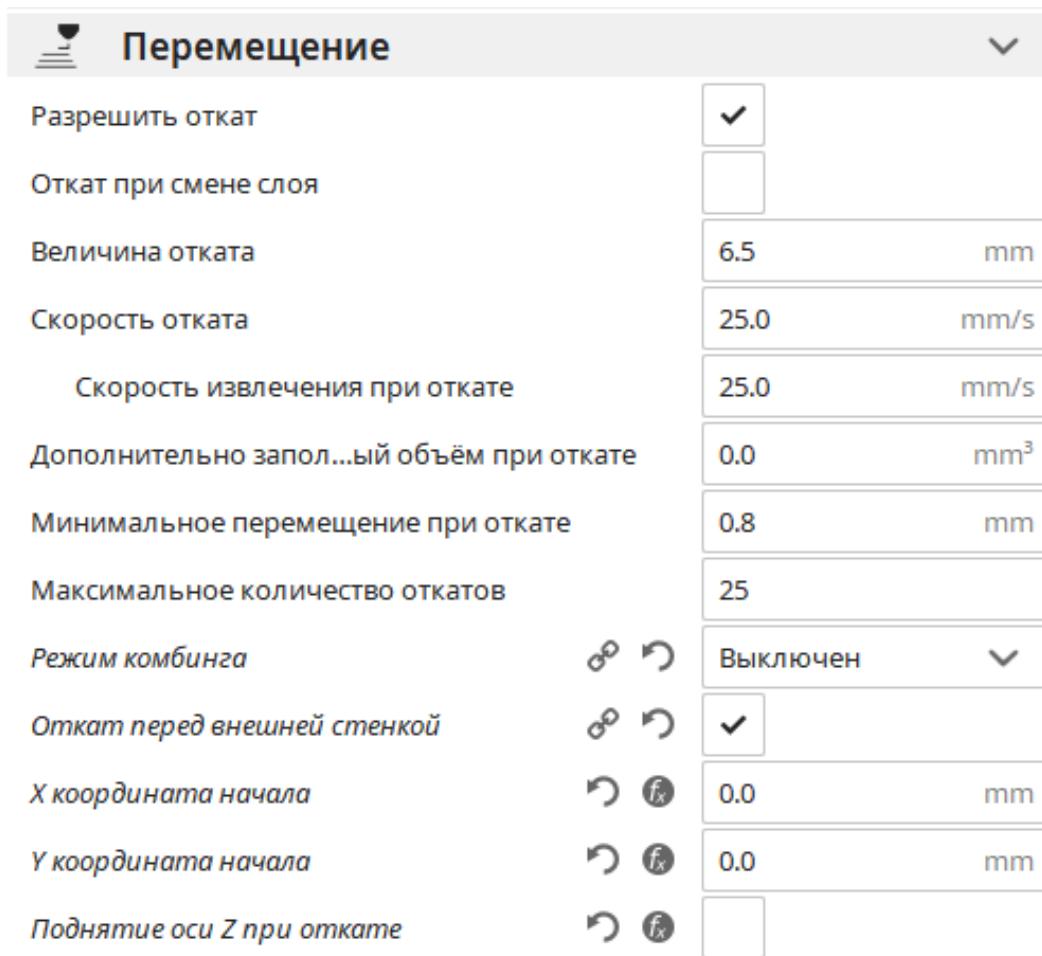


Рисунок 1.9 — Окно настройки параметров печати в разделе «*Перемещение*»

Флаг «*Откат при смене слоя*» устанавливается, если шов очень сильный.

Значения величины отката рекомендуется выбирать исходя из следующих рекомендаций:

- для экструдеров типа Bowden: 5–7 мм;
- для экструдеров типа Direct 1–3 мм.

Минимальное перемещение при откате позволяет избежать очень часто повторяющихся откатов. Рекомендуется выбирать значения из диапазона: минимальное значение, равное  $2 \cdot D_{\text{сопла}}$ , максимальное значение  $5 \cdot D_{\text{сопла}}$ .

Далее настраивается ряд параметров печати в разделе «*Режим комбинга*» (рисунок 1.10).

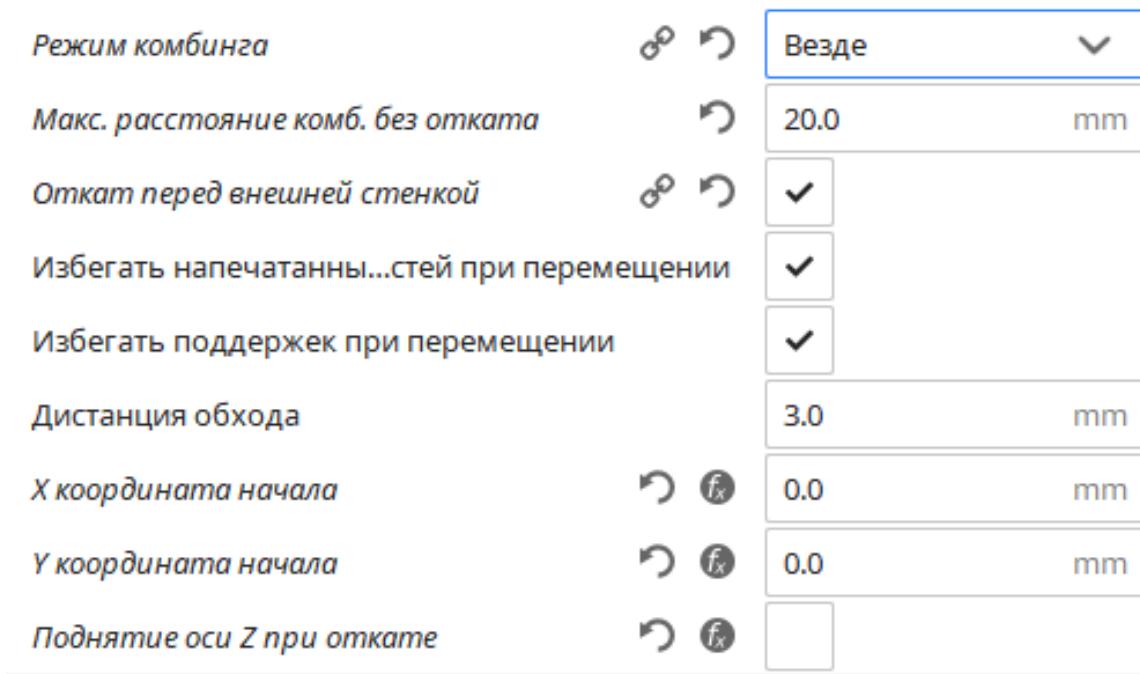


Рисунок 1.10 — Окно настройки параметров печати в разделе «Режим комбинга»

Иногда крайне нежелательно, чтобы сопло двигалось по уже напечатанным частям, так как оно может задеть или оставить борозду. В этом случае можно использовать эту настройку, так как она заставляет слайсер искать пути перемещения таким образом, чтобы избегать уже напечатанных участков. При этом ретракты во время комбинга выключаются, т. е. пока сопло находится внутри модели, ретрактов выполняться не будет.

*Максимальное расстояние комбинга без откатов* нужно для того, чтобы не допустить очень длительных перемещений без отката (нормальное значение 20–50 мм).

Параметр «Дистанция обхода» определяет, на каком расстоянии от модели будет двигаться сопло.

При установке значений параметров «X координата начала» и «Y координата начала» следует руководствоваться следующими рекомендациями:

- если принтер с 1 экструдером, следует выставить значения по обоим параметрам равные нулю;
- если принтер с 2 экструдерами, то значения обоих параметров лучше поставить равные координатам центра стола.

Далее настраивается ряд параметров печати в разделе «Охлаждение» (рисунок 1.11).

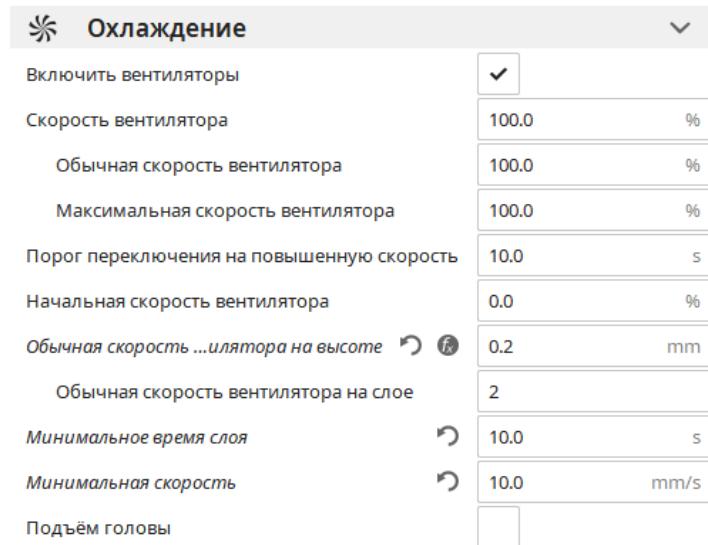


Рисунок 1.11 — Окно настройки параметров печати в разделе «Охлаждение»

Вентиляторы охлаждения должны быть включены для всех видов пластика. При этом значение параметра «Скорость вентилятора» ставится исходя из типа пластика и мощности системы, для пластиков PLA рекомендуется устанавливать 100%; для PETG — 50–100%; для ABS — 0–20%; для SBS — 0–50%.

Параметр «Начальная скорость вентилятора» определяет скорость вращения вентилятора для первого слоя.

Далее настраивается ряд параметров печати в разделе «Поддержки» (рисунок 1.12).

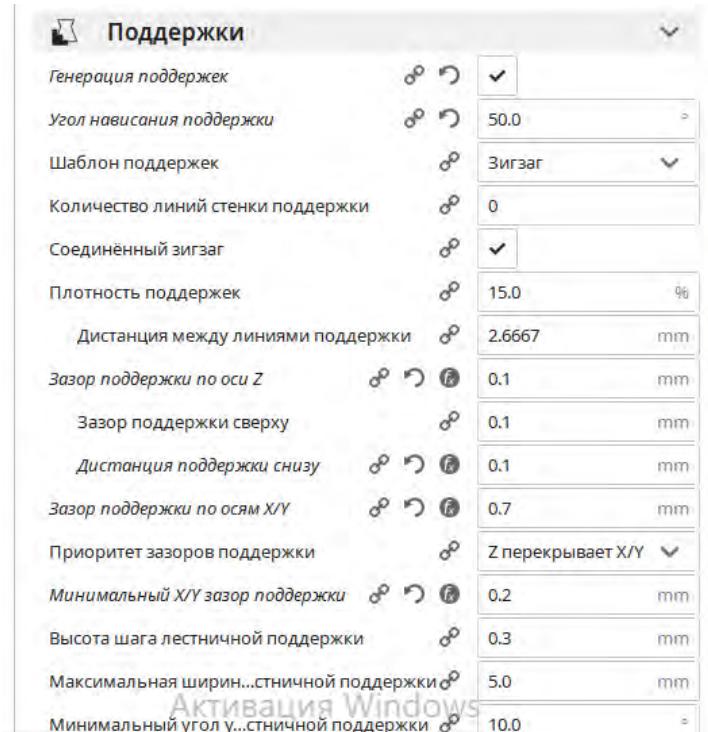


Рисунок 1.12 — Окно настройки параметров печати в разделе «Поддержки» (начальный фрагмент)

При выборе значения параметра «Шаблон поддержек» рекомендуется устанавливать «зигзаг», т. к. при таком шаблоне поддержки легче удаляются и сама модель печатается нормально. Для сложных ситуаций может понадобиться выставить «концентрический».

Значение параметра «Количество линий стенки поддержки» лучше оставлять нулевым, но при наличии очень маленьких областей рекомендуется ставить значение «1». Это помогает уплотнить маленькие поддержки.

Значение параметра «Зазор поддержки при оси Z» выбираем в диапазоне от 0,1 до 0,2. При больших значениях поддержки легче будет отделить, но при этом ниже будет качество нижней поверхности.

Флаг «Разрешить связующий слой поддержки» рекомендуется всегда устанавливать (рисунок 1.13). Включение этого параметра помогает добиться лучшего качества нависающих областей.

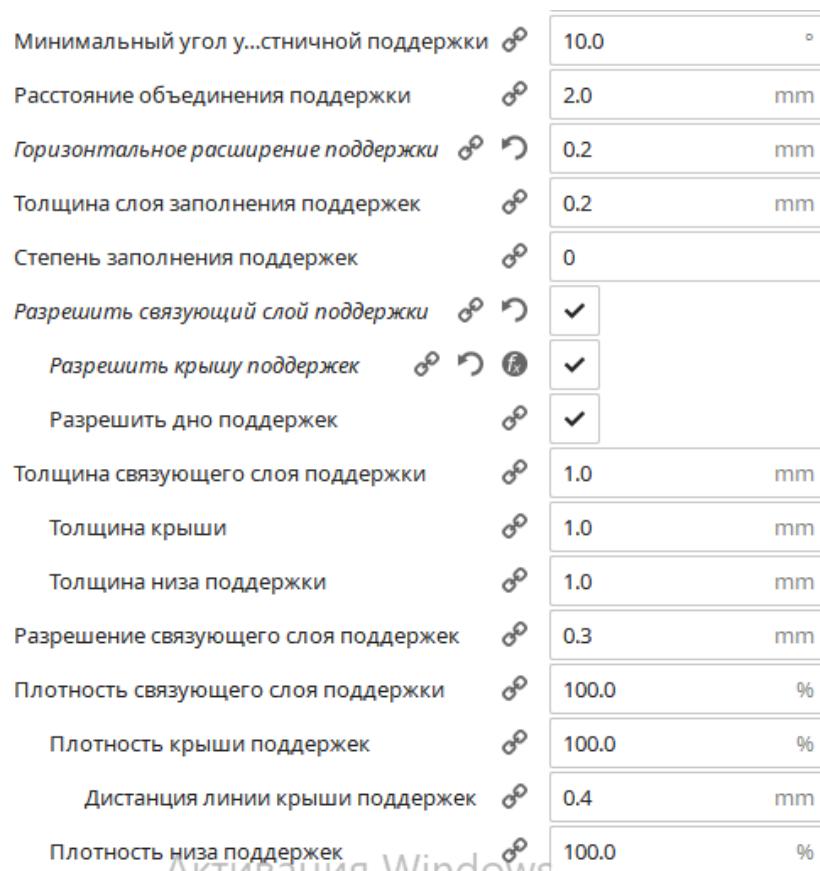


Рисунок 1.13 — Окно настройки параметров печати в разделе «Поддержки» (промежуточный фрагмент)

Значения *плотности связующего слоя поддержки* и *плотности низа поддержек* рекомендуется устанавливать в диапазоне 50–80%. Большие значения позволяют обеспечить лучшее качество, но при этом поддержки сложнее отделять от изделия.

Флаг «Использовать башни» всегда устанавливаем (рисунок 1.14).

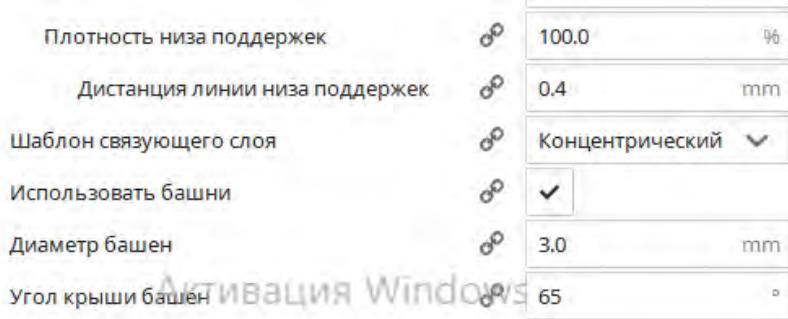


Рисунок 1.14 — Окно настройки параметров печати в разделе «Поддержки» (финальный фрагмент)

Далее настраивается ряд параметров печати в разделе «*Тип прилипания к столу*» (рисунок 1.15).

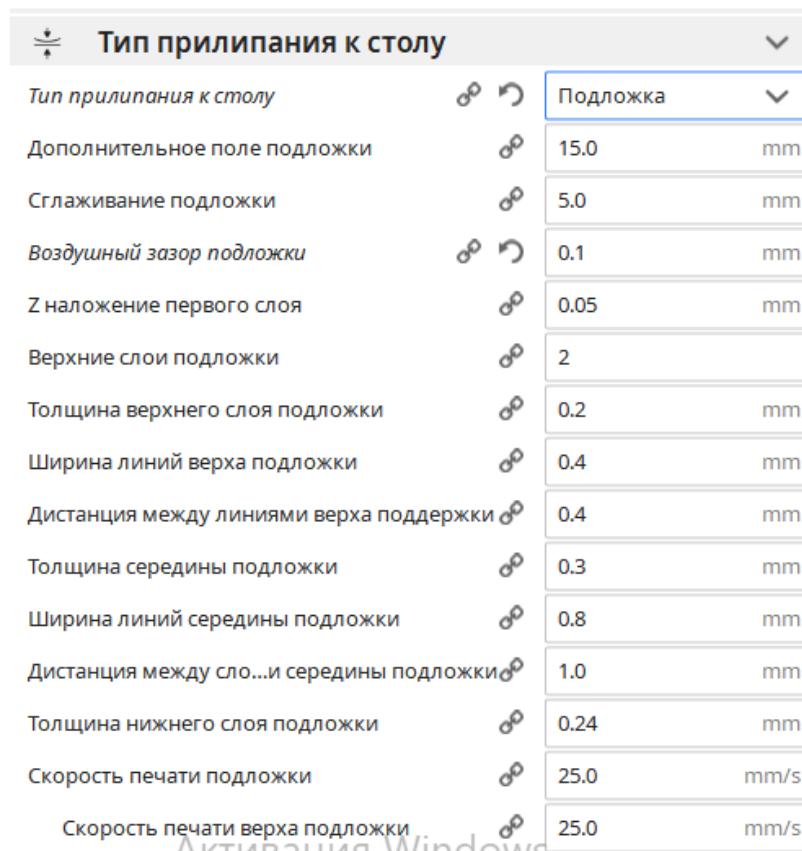


Рисунок 1.15 — Окно настройки параметров печати в разделе «*Тип прилипания к столу*» (начальный фрагмент)

Параметр «*Тип прилипания к столу*» рекомендуется выставлять в значение «подложка», что позволит сформировать достаточно массивную структуру в несколько слоев, которая хорошо прилипает к столу, а к ней, в свою очередь, хорошо прилипнет изделие.

Значение параметра «*Дополнительное поле*» рекомендуется в диапазоне 5–20 мм.

Параметр «Сглаживание подложки» определяет радиус углов подложки и помогает им лучше прилипать к основанию стола, рекомендуемое значение — 5 мм.

Параметр «Воздушный зазор подложки» определяет расстояние между подложкой и собственно изделием, рекомендуется значение этого параметра устанавливать равным 0,1–0,2 мм.

Значение параметра «Z наложение первого слоя» выбирается равным половине величины зазора (0,5·Зазор).

Значение *скорости печати подложки* (рисунки 1.15 и 1.16) рекомендуется выбирать для скорости низа — 15 мм/с и для скорости остальных частей — 30–50 мм/с.

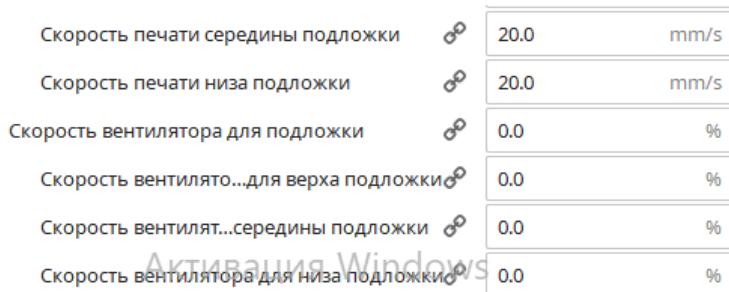


Рисунок 1.16 — Окно настройки параметров печати в разделе «*Тип прилипания к столу*» (финальный фрагмент)

В случае если параметр «*Тип прилипания к столу*» установлен в значение «Юбка», что позволяет сформировать вокруг изделия несколько линий, отстоящих на некотором расстоянии от контура изделия, необходимо настроить ряд соответствующих параметров печати (рисунок 1.17).



Рисунок 1.17 — Окно настройки параметров печати для типа прилипания к столу «Юбка»

Значения параметра «Количество линий юбки» рекомендуется устанавливать 3–5; «Дистанция до юбки» — 3–10 мм; «Минимальная длина юбки/каймы» — 500 мм.

В случае если параметр «*Тип прилипания к столу*» установлен в значение «Кайма», что позволяет сформировать вокруг изделия несколько линий, увеличивающих площадь соприкосновения изделия со столом и улучшающих

адгезию изделия к столу, необходимо настроить ряд соответствующих параметров печати (рисунок 1.18).



Рисунок 1.18 — Окно настройки параметров печати для типа прилипания к столу «Кайма»

Значение параметра «Минимальная длина юбки/каймы» рекомендуется устанавливать, как и для юбки, — 500 мм; «Количество линий каймы» — 3–10.

### 1.1.3 Добавление принтера

При необходимости (если это не сделано ранее) можно осуществить добавление конкретной модели принтера в программе-слайсере. Для этого необходимо в главном меню программы выбрать «Параметры» → «Принтер» → «Добавить принтер» (рисунок 1.19).

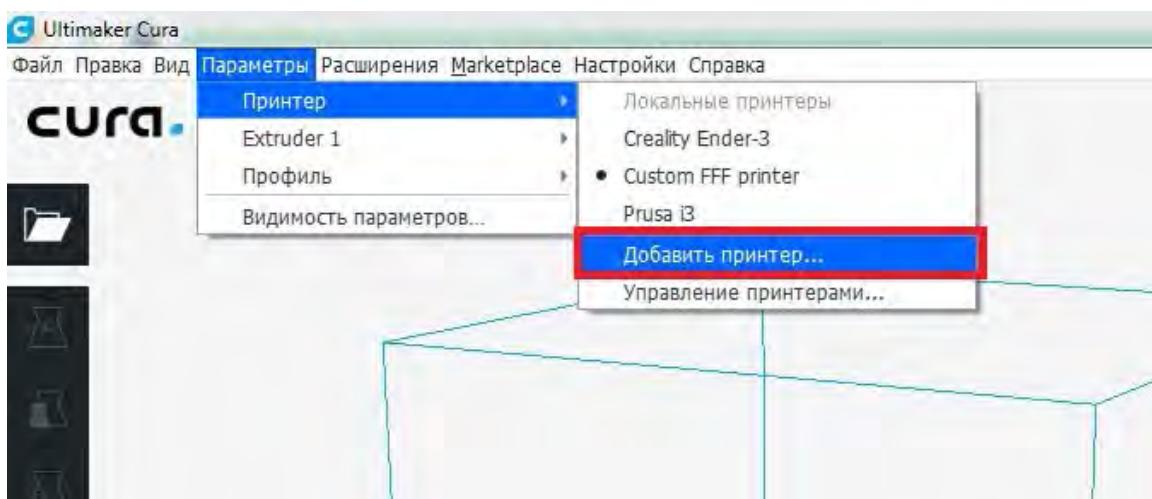


Рисунок 1.19 — Добавление принтера

В открывшемся окне «Добавление принтера» необходимо выбрать установленную модель принтера. Если установлен принтер Ultimaker, то можно выбрать модель из предложенного списка (рисунок 1.20). Если же используется принтер другого производителя, то необходимо раскрыть список «Other» и также из предложенного списка выбрать установленную модель принтера.

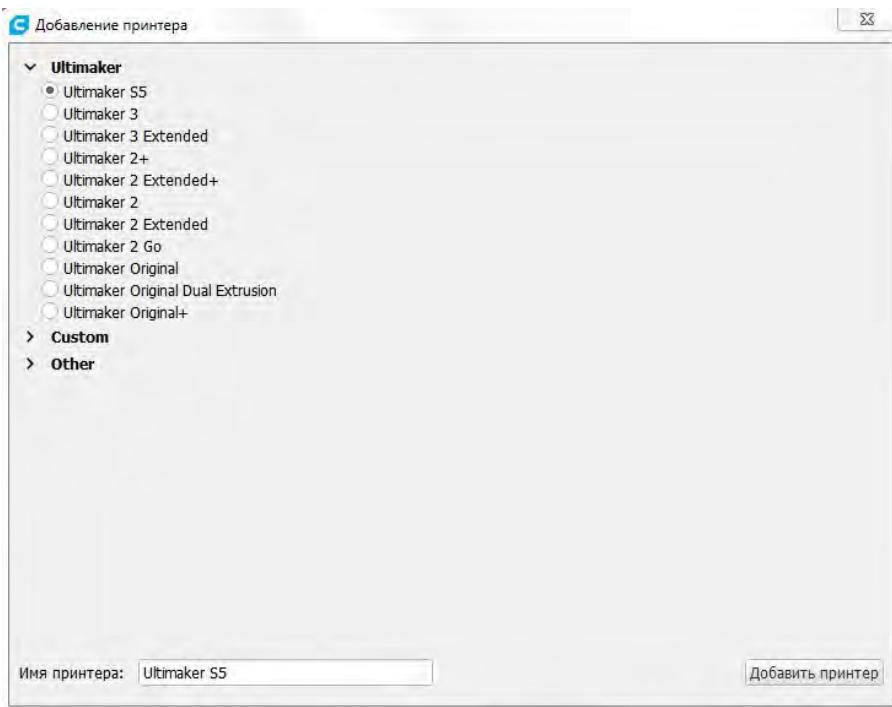


Рисунок 1.20 — Окно выбора модели принтера

#### 1.1.4 Настройки параметров принтера

При необходимости можно вручную установить (изменить) значения ряда параметров принтера. На вкладке «Принтер» параметры разбиты на две группы: параметры принтера и параметры печатающей головы принтера.

В группе параметров принтера (рисунок 1.21) флаг «Нагреваемый стол» устанавливается в случае, если принтер имеет опцию подогрева стола (актуально для большинства моделей).

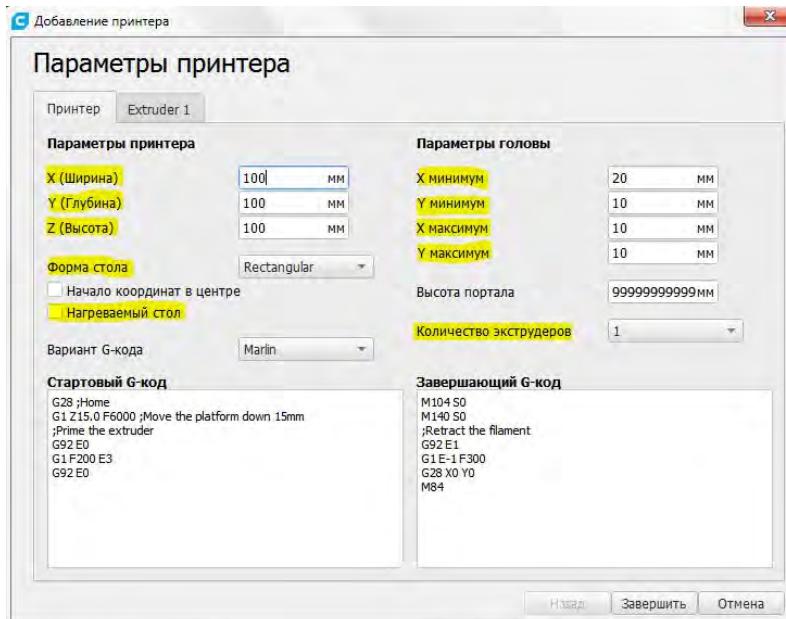


Рисунок 1.21 — Окно настройки параметров принтера в разделе «Принтер»

В группе параметров печатающей головы можно настроить «отступ» от края стола принтера с тем, чтобы экструдер не заходил дальше этих значений.

Параметр «Высота портала» обозначает высоту, ниже которой двигаться над напечатанной моделью нельзя, иначе будет столкновение. Данная опция позволяет при печати нескольких моделей на 3D-принтере задать режим последовательной 3D-печати каждой модели отдельно. Это значит, что модели будут печататься по очереди, первая, вторая, третья и т. д., а не одновременно послойно все. Если настраивать данную опцию, нужно иметь в виду, что модели необходимо размещать таким образом, чтобы экструдер или направляющие не зацепили уже распечатанную модель. По умолчанию указан параметр 99999999999, это означает — «проход закрыт».

На вкладке «Extruder 1» можно настроить/изменить ряд параметров экструдера (рисунок 1.22). Значение параметра «Диаметр сопла» должно соответствовать диаметру установленного на экструдере сопла. Значение параметра «Диаметр совместимого материала» устанавливается в соответствии с диаметром филамента, который применяется на установленной модели принтера (наиболее распространенные значения диаметра филамента 1,75 мм и 3 мм). Остальные параметры можно оставлять без изменений.

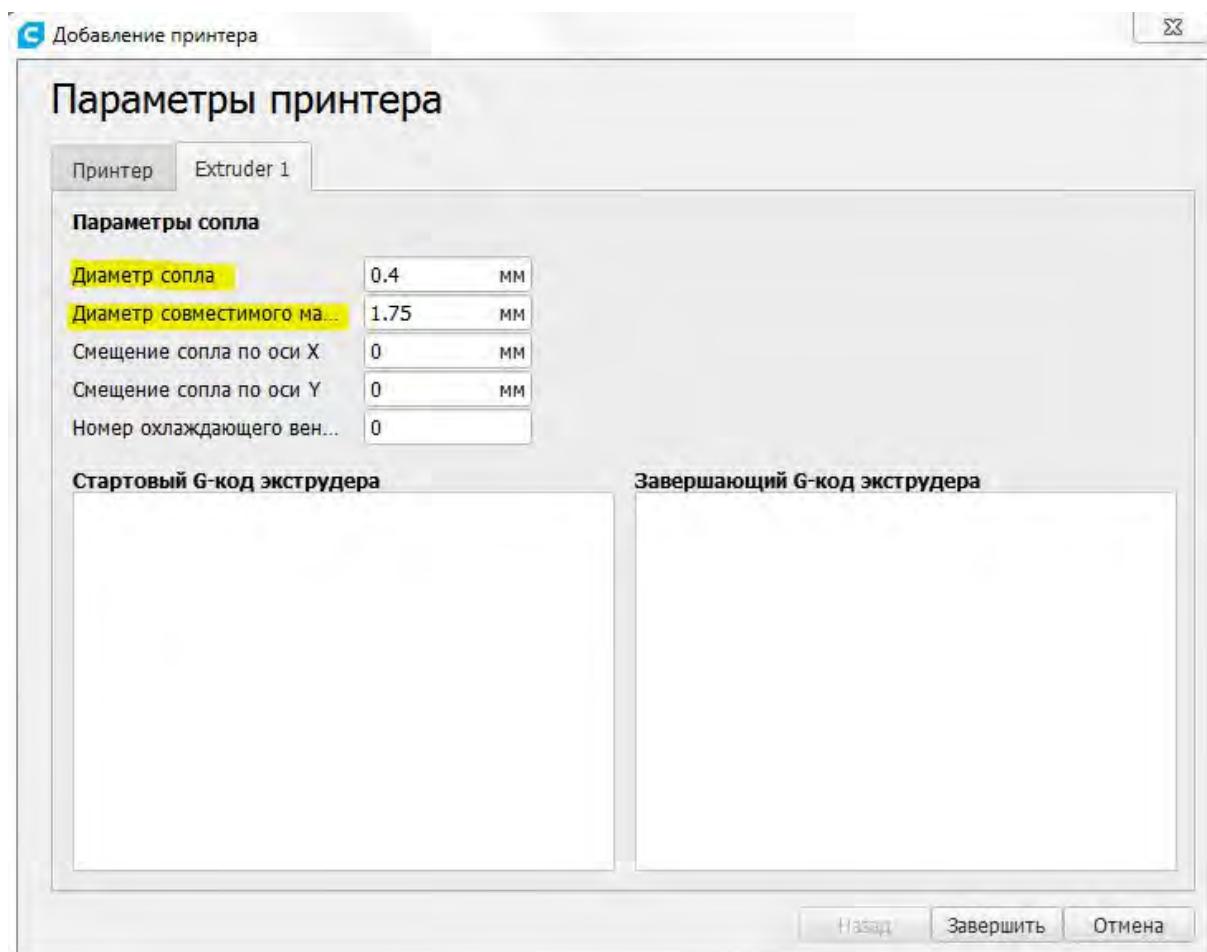


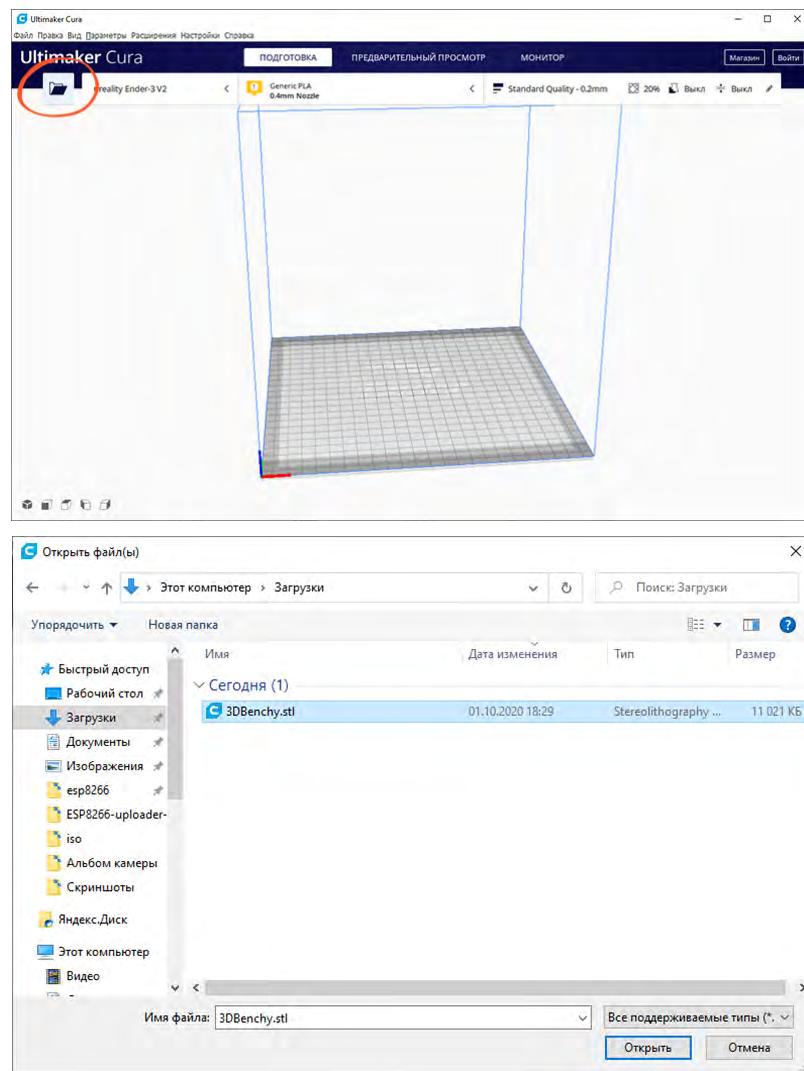
Рисунок 1.22 — Окно настройки параметров принтера в разделе «Extruder 1»

## 1.2 Изготовление модели на установке аддитивных технологий

Порядок действий по непосредственному изготовлению модели рассмотрим на примере принтера Creality Ender-3 V2 по методике [8]. Описание принтера и его технические характеристики представлены на сайте компании Creality [6].

### 1.2.1 Подготовка модели в программе-слайсере

Процесс конвертации 3D-модели из нативного формата файлов системы моделирования в формат \*.stl осуществляется с помощью операции экспорта средствами самой системы моделирования или с помощью специализированного программного обеспечения и в данных методических указаниях не рассматривается. Для загрузки 3D-модели в слайсер необходимо нажать на кнопку с иконкой папки на ленте инструментов и выбрать файл модели в формате \*.stl.



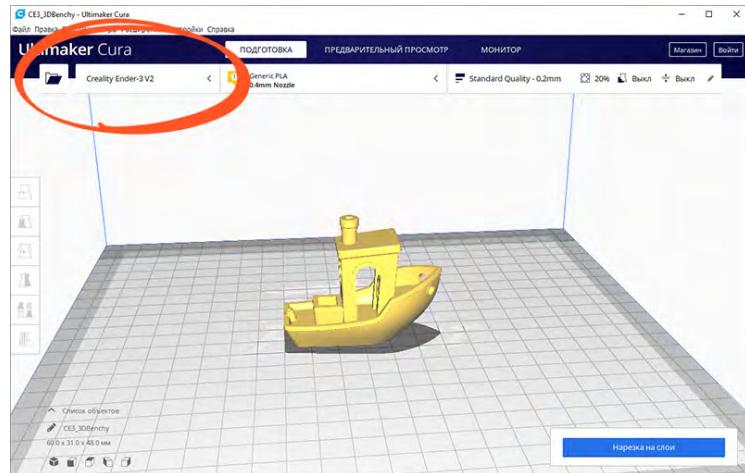
### 1.2.2 Выбор параметров печати

Для выбора параметров печати необходимо в общем случае выполнить следующие действия:

- выбор принтера,
- выбор пластика и размеров сопла экструдера принтера,
- выбор настроек слайсинга.

### 1.2.2.1 Выбор принтера

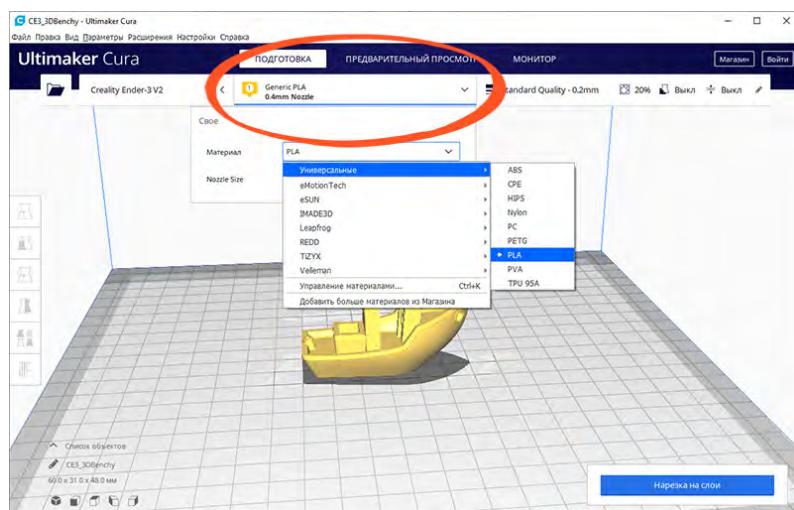
Данный пункт выполняется при необходимости. В левом верхнем углу окна слайсера отображается название принтера. Если в программе-слайсере добавлена только одна модель принтера, то в данном пункте будет отображаться именно она, и нет необходимости выбирать модель.



### 1.2.2.2 Выбор пластика и сопла на принтере

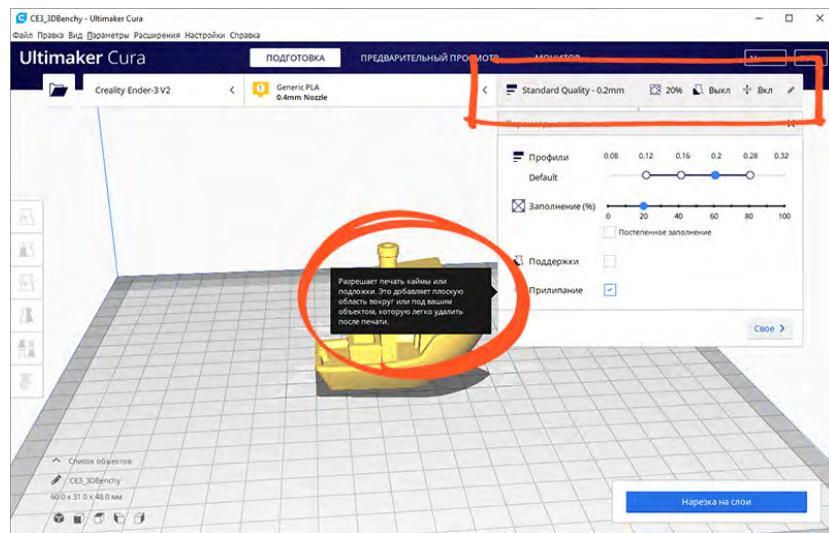
Принтер Creality Ender-3 V2 позволяет печатать различными видами пластика и использовать сопла с разным диаметром. Штатно в принтер устанавливается сопло диаметром 0,4 мм. В случае если проводилась замена сопла, необходимо удостовериться, что в слайсере указано значение, соответствующее установленному соплу.

Для выбора необходимо раскрыть список выбора пластика и сопла. В разделе «Материал» выбрать необходимый тип пластика, в случае использования PLA-пластика необходимо выбрать «PLA» в разделе «Универсальные».

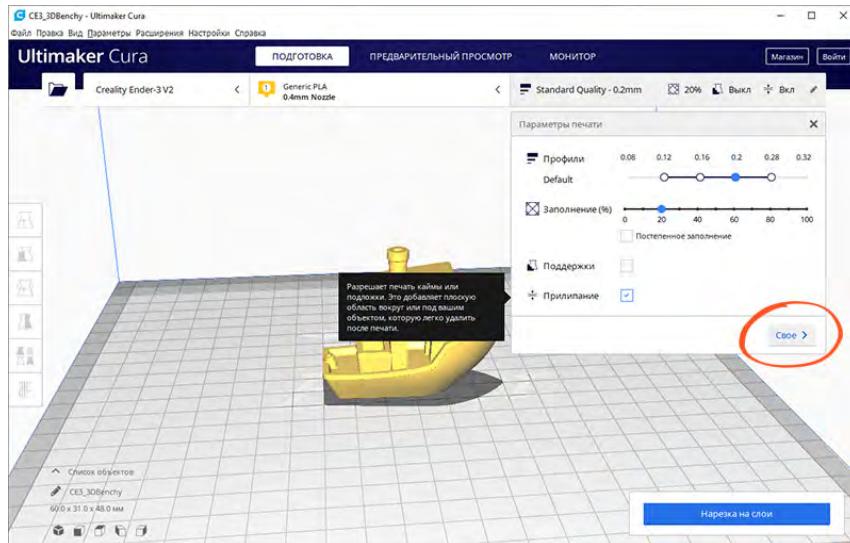


### 1.2.2.3 Выбор настроек слайсинга

По клику на кнопку в правой части окна слайсера раскрывается список с основными настройками слайсинга.

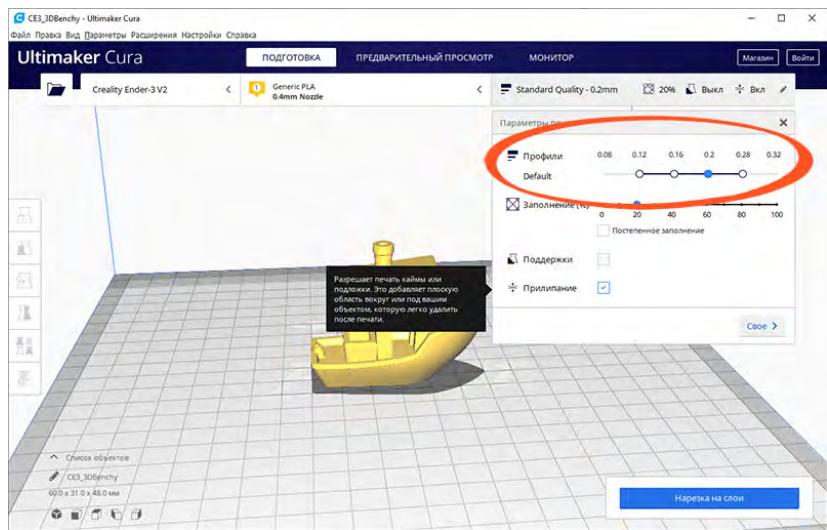


Кнопка «Своё» открывает подробные настройки со множеством параметров. Можно оставить значения этих параметров в значении по умолчанию, для текущей задачи достаточно базовых настроек.

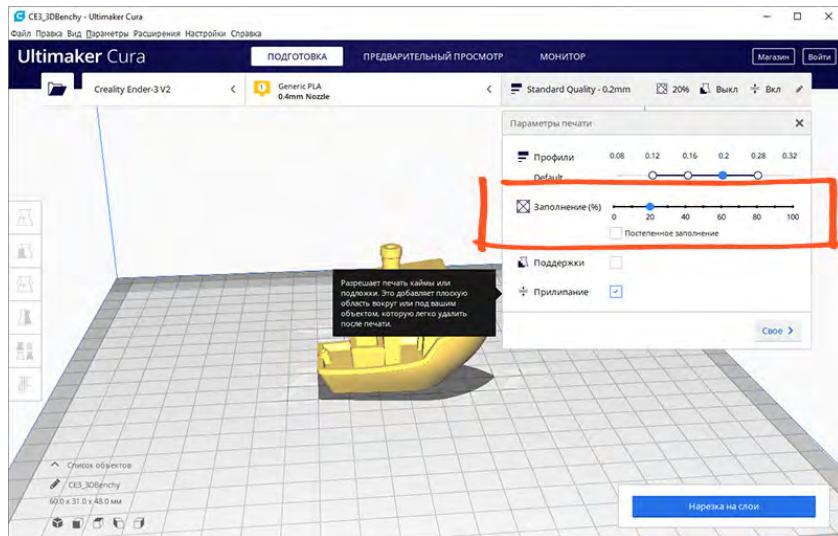


Верхний ползунок «Профили» отвечает за высоту каждого слоя. При этом следует учитывать, что чем толще каждый слой, тем быстрее печатается модель. В то же время при уменьшении толщины слоя достигается более высокое качество печати.

Толщину слоя можно выбирать в пределах 0,1–0,4 мм, для текущей задачи достаточно высоты слоя 0,2 мм. Это компромиссное значение между скоростью печати и качеством поверхности получаемой модели.



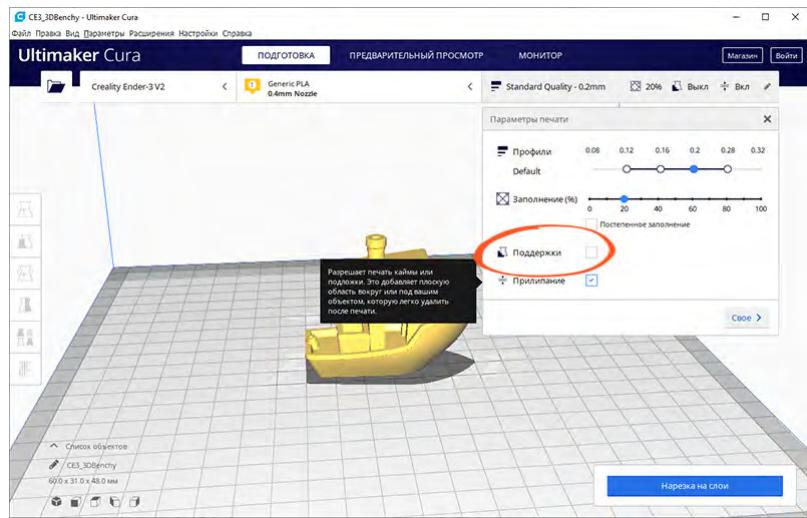
Второй ползунок «Заполнение» отвечает за заполнение материалом внутренней часть модели. Традиционно принтер может напечатать только стенки модели, а внутренний объём оставить пустым. Это существенно сокращает расход пластика, но негативно влияет на прочность получаемой модели. Для обеспечения прочности модели внутреннюю часть модели рекомендуется заполнять материалом в соответствии со стандартным паттерном в диапазоне значений 20–60%, в случае специфических требований можно выбрать и иные значения по заполнению модели материалом. В рамках решаемой задачи в целях обеспечения баланса между прочностью модели и расходом пластика можно выставить значение заполнения на 20%.



Также в меню настроек слайсинга находятся два дополнительных параметра: поддержки и прилипание.

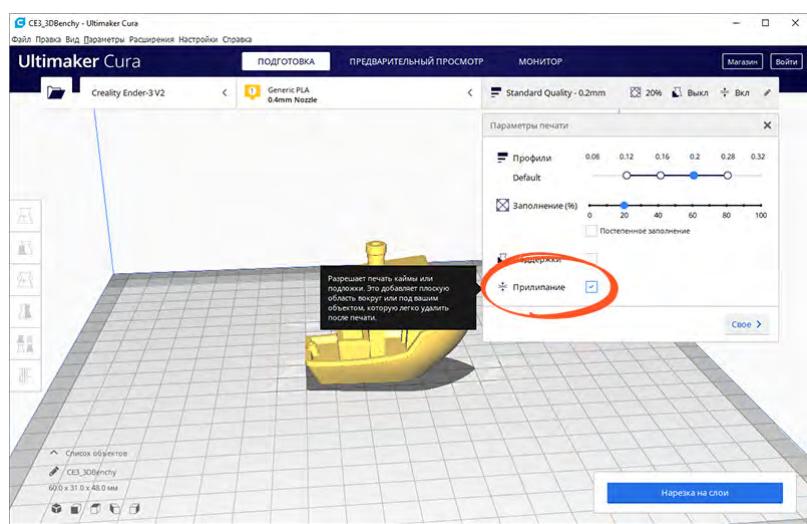
Если деталь имеет выступающие части, которые нависают над столом, то принтер не сможет их просто напечатать — они в процессе печати разрушатся. Чтобы предотвратить это, необходимо активировать параметр «Поддержки». Под нависающими частями будут, начиная с первого слоя, печататься элементы поддержки, которые устраниют возможные провисания отдельных частей изготавливаемой модели.

В выбранной тестовой модели таких частей нет, поэтому параметр «Поддержки» активировать нет необходимости. При печати других моделей или смене ориентации модели в пространстве нужно обеспечивать формирование поддерживающих структур.



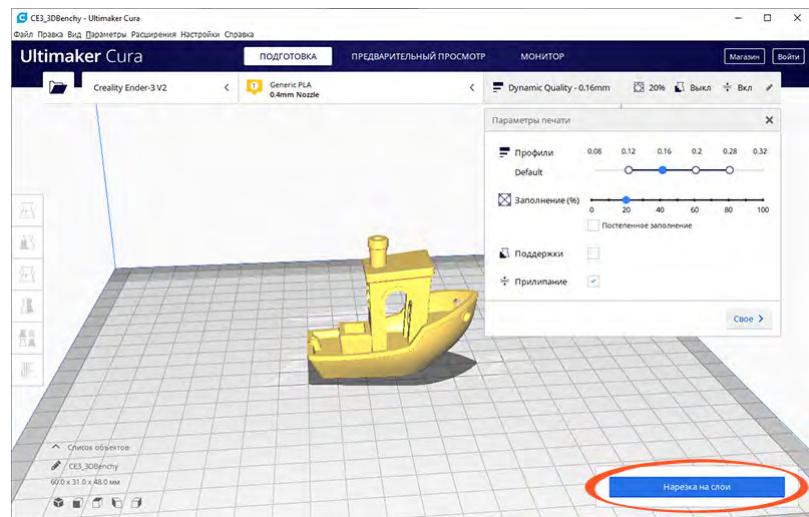
Параметр «Прилипание» улучшает адгезию изготавливаемой модели к поверхности рабочего слота. В случае если адгезия окажется недостаточной, модель может оторваться в процессе печати. Для повышения адгезии можно, например, дополнительно вокруг модели печатать юбочку, которая увеличит площадь соприкосновения со столом. После печати её можно будет срезать, но в процессе печати она не позволит модели оторваться от стола.

Для данной тестовой модели необходимо активировать этот параметр, так как дно модели довольно мелкое, и дополнительная поверхность для более прочной адгезии необходима.

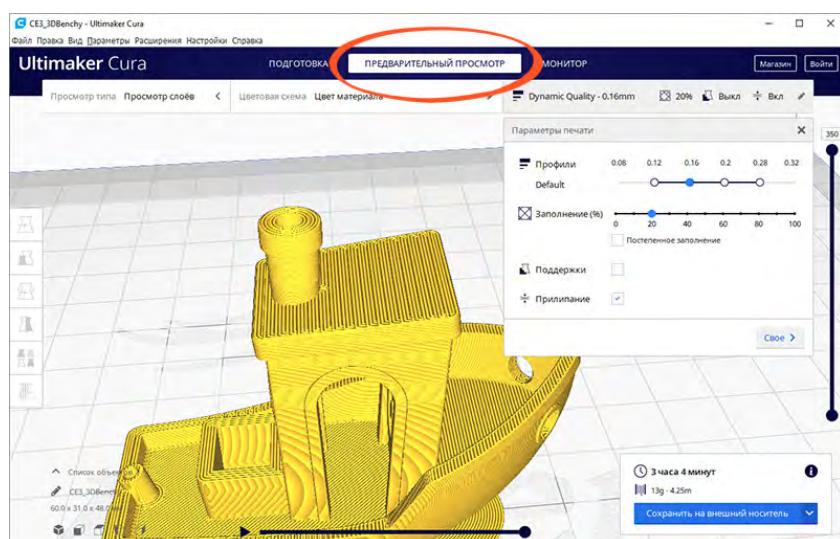
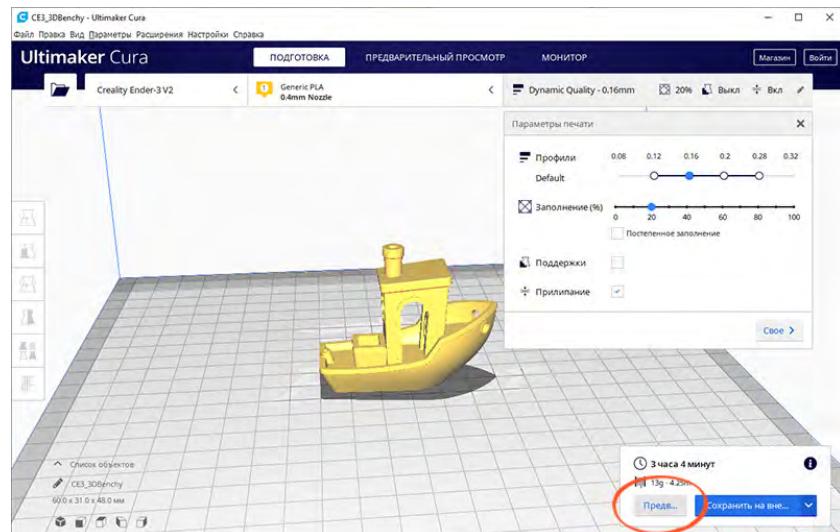


### 1.2.3 Предварительный просмотр

Для осуществления автоматического формирования слоев модели необходимо нажать на кнопку «Нарезка на слои» в правой нижней части окна слайсера. После этого слайсер просчитает траекторию печатающей головки и сгенерирует соответствующий G-код для принтера.

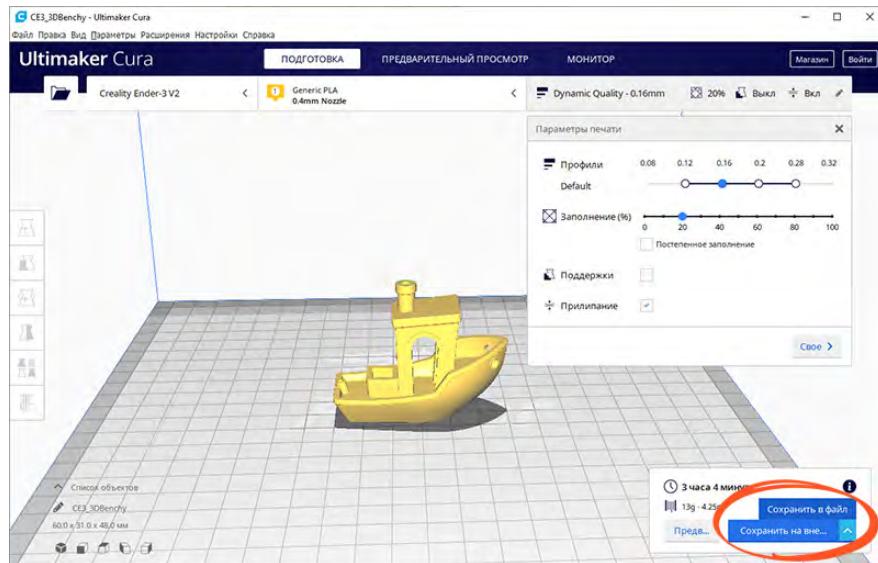


Для просмотра результатов слайсинга необходимо перейти на вкладку «Предварительный просмотр», где будут отображаться построенные слои модели. Предварительный просмотр помогает проверить выбранные настройки печати и понять, как будет печататься модель.



## 1.2.4 Экспорт G-кода

Полученный G-код для принтера необходимо перенести собственно на принтер. Для этого можно подключить к компьютеру карту памяти microSD через переходник из комплекта принтера. Слайсер обнаружит съёмное устройство и предложит сохранить файл на него. Далее необходимо сохранить G-код на карту памяти или с помощью раскрывающегося списка сохранить в файл, а затем вручную скопировать на карту.



## 1.2.5 Калибровка стола

При необходимости перед печатью можно провести калибровку стола. Регулировка стола осуществляется с помощью 4 винтов, расположенных снизу от стола.



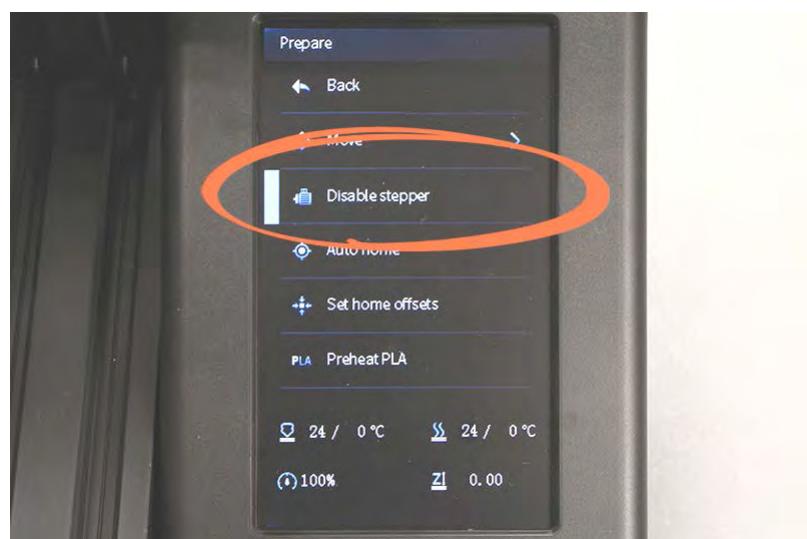
С помощью энкодера панели управления принтером на экране войдите в пункт «*Prepare*».



Далее необходимо выбрать пункт «*Auto home*», это заставит принтер вывести печатающую головку в нулевое положение.



После этого необходимо отключить двигатели координатного механизма командой «*Disable stepper*».



Далее с помощью листа бумаги, размещенного между нижним срезом сопла и рабочим столом, можно осуществить калибровку положения стола. Для этого необходимо вращать регулировочные винты под столом, добиваясь легкого сопротивления перемещению листа бумаги между соплом и столом. Следует соблюдать правило — сопло должно царапать, но не рвать лист.



Далее необходимо вручную сдвинуть печатающую головку и стол и повторить процедуру калибровки в каждом углу стола.

### 1.2.6 Заправка филамента

Для заправки филамента (и извлечения филамента ранее использовавшегося в принтере) необходимо прогреть сопло до температуры плавления пластика.

Что бы выполнить прогрев сопла необходимо зайти в пункт «*Prepare*» в меню панели управления принтером.



Далее выбрать пункт «*Preheat PLA*», вследствие чего сопло начнёт разогреваться.



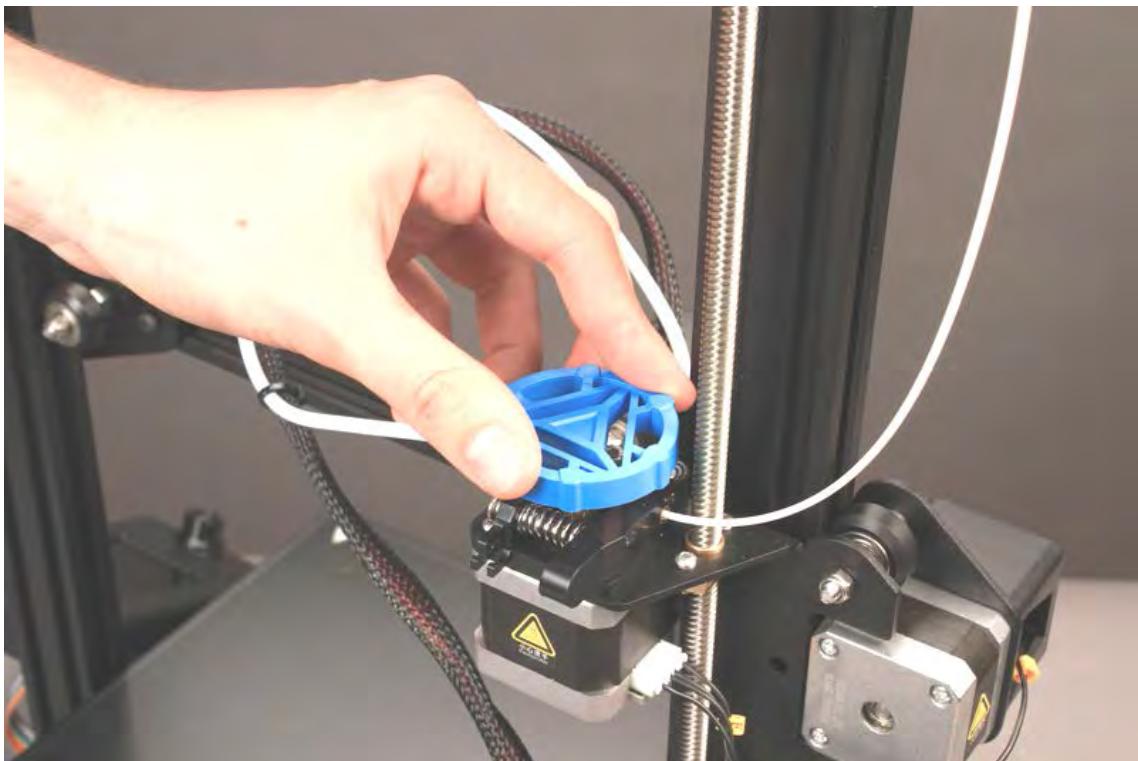
Возврат в основное меню осуществляется с помощью пункта «Back».



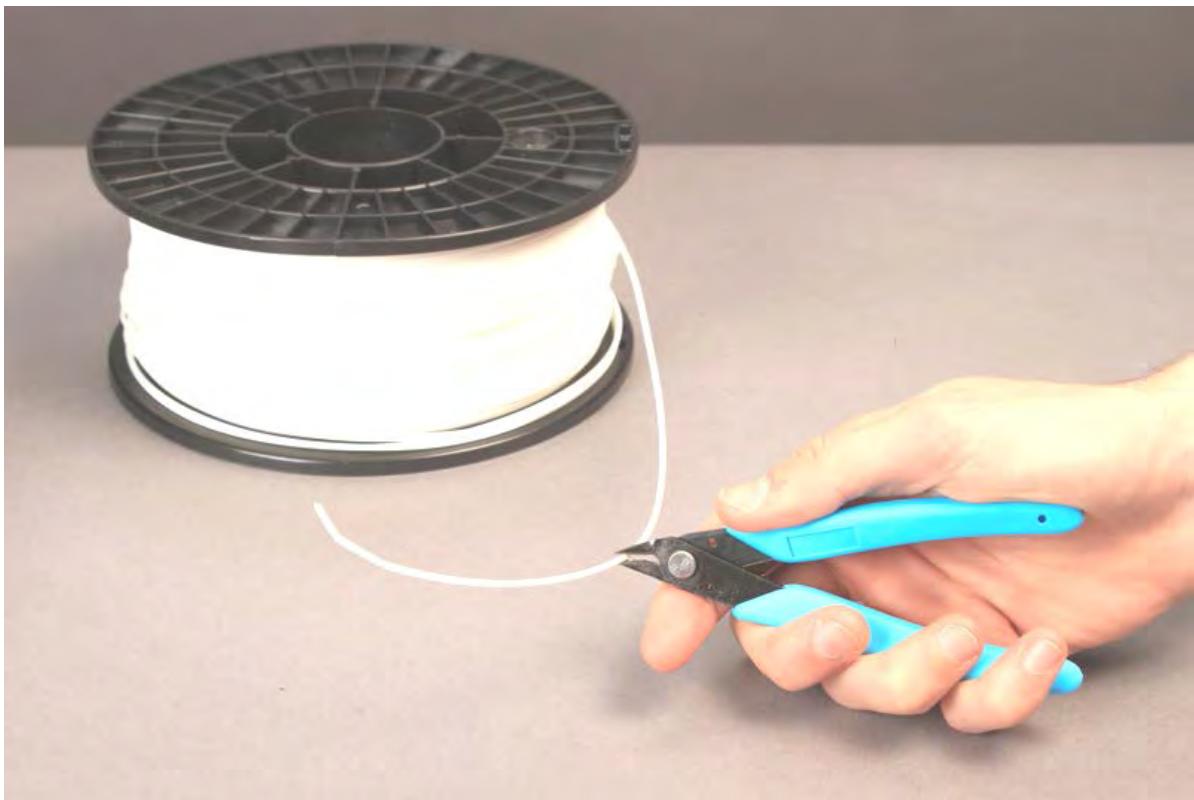
Перед дальнейшими действиями обязательно нужно убедиться, что сопло разогрелось до заданной температуры.



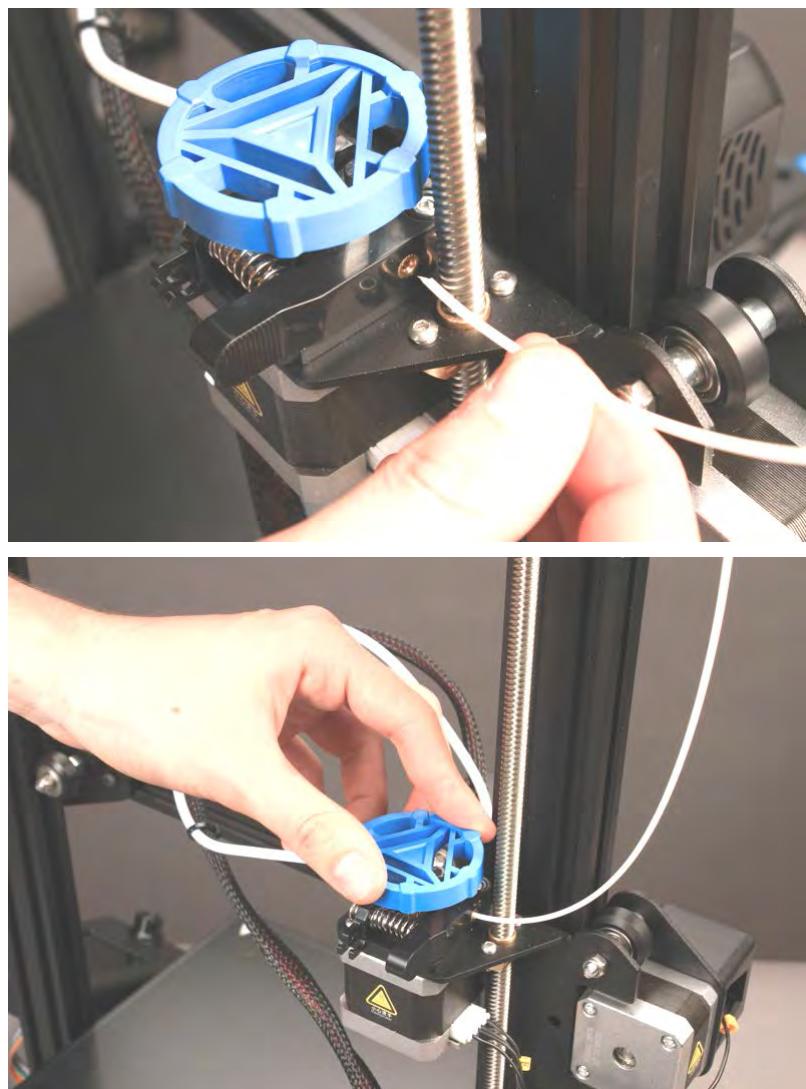
Далее с помощью колеса извлеките филамент из тefлоновой трубы механизма подачи и экструдера.



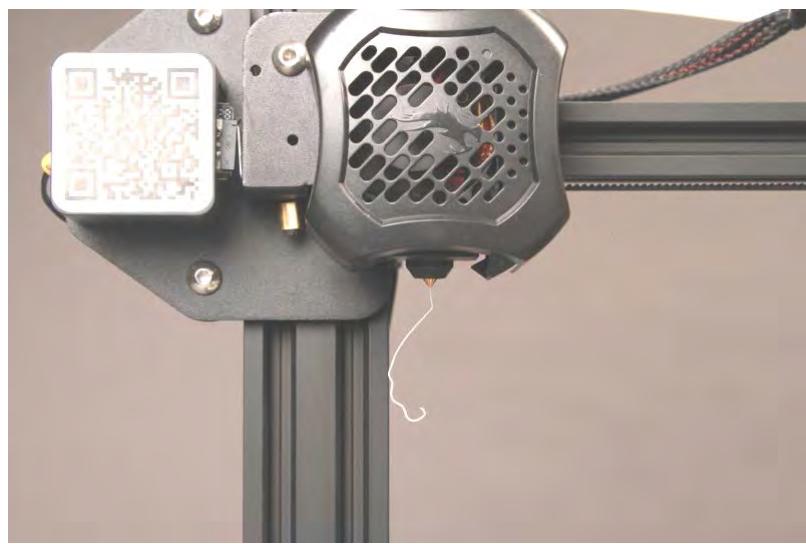
Перед заправкой материала желательно обрезать конец у нового филамента. Чтобы облегчить попадание филамента в фитинг, предупредить возможное застревание филамента в экструдере, лучше срезать конец пластика под углом.



Далее необходимо заправить подготовленный конец филамента в экструдер и с помощью колеса протолкнуть его до сопла.



Филамент должен немного потечь из сопла.



### 1.2.7 Печать модели с карты памяти

Перед печатью надо задуматься об адгезии. На стекле есть специальное покрытие, которое улучшает сцепление между первым слоем пластика и

столом, однако у больших моделей могут загибаться края. Для улучшения адгезии можно тонко помазать стол kleem-карандашом или побрызгать лаком для волос.

1) вставьте карту памяти в нижнюю панель принтера



2) зайдите в меню «Print»



3) выберите файл с моделью, который подготовили в слайсере.



При запуске печати модели сама печать начнётся не сразу, т. к. принтеру сначала необходимо нагреть стол и сопло до рабочей температуры.



Во время печати можно изменить значение температуры сопла, скорости печати и несколько других параметров. При условии выполнения настройки значений параметров в слайсере необходимости что-то изменять в меню принтера нет.

## **2 ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПОЛИМЕРНОЙ ФОРМЫ НА ОСНОВЕ АДДИТИВНОЙ МОДЕЛИ**

### **2.1 Этапы изготовления полимерной формы**

#### **2.1.1 Общие сведения о технологии литья в полимерные формы**

Технология литья в полимерные (силиконовые, полиуретановые и пр.) формы является достаточно известной технологией производства изделий из пластических масс, которая сама по себе не относится к аддитивным технологиям, но позволяет эффективно использовать мастер-модели, изготавливаемые с помощью различных аддитивных технологий.

Вакуумное литье в силиконовые формы позволяет получать готовые изделия с различным качеством поверхности (матовой, глянцевой), а также может производиться с использованием дополнительных закладных элементов. Технология также применима для получения отливок с глянцевой поверхностью, которые затем могут быть использованы для производства оптически прозрачных изделий и линз. Преимущества технологии вакуумного литья в силиконовые формы особенно значимы в мелкосерийном производстве деталей. Форма для литья может быть изготовлена по изделию-прототипу либо снята с предварительно отпечатанной на принтере 3D-модели. Технология позволяет резко сократить по времени цикл подготовки производства и существенно снизить материальные затраты при выпуске малых партий изделий из пластика, поскольку не требует изготовления дорогостоящей инструментальной оснастки.

Для литья пластиковых деталей по технологии вакуумного литья в силикон принято использовать двухкомпонентные жидкие полиуретаны. Путем добавки в жидкий полиуретан различных компонентов, можно получить разные физико-механические свойства готового изделия. Это могут быть как основные конструкционные пластики, такие как АБС, полиамид, полиэтилен и т. д., так и полиуретанов, которые способны имитировать по виду и качеству резину твердостью от 45 до 97 единиц по ШОР А, или прозрачные полиуретаны, используемые при изготовлении оптических деталей, а также термостойкие материалы, способные выдержать температуру до 120 °C.

Весь процесс изготовления отливок можно разделить на несколько этапов, для каждого из которых требуется свое оборудование.

#### **2.1.2 Изготовление мастер-модели**

Мастер-модель представляет собой прототип будущей отливки, обработанный до необходимого качества, на базе которого путем заливки силиконом изготавливается форма для литья. Будущие отливки деталей будут соответствовать мастер-модели, поэтому требуется уделить особое внимание качеству изготовления мастер-модели.

Модель для последующего использования в качестве мастер-модели можно получить несколькими способами:

- с использованием различных установок на основе аддитивных технологий (3D-печати);
- с использованием классических методов, например, можно изготовить на станке с ЧПУ или выполнить из художественной глины;
- использовать имеющуюся деталь для изготовления ее серии.

Для изготовления модели с помощью 3D-печати могут использоваться различные технологии: FDM, SLA, SLS и т. д. Оптимальной для данной задачи считается технология SLA. Она выигрывает по совокупности параметров: большие габариты выращиваемых моделей, высокая скорость выращивания, высокая точность, высокое качество поверхностей, легкая обработка, низкая стоимость. Именно благодаря этим положительным качествам технология SLA прочно закрепилась в качестве основного метода изготовления мастер-моделей.

### **2.1.3 Изготовление силиконовой формы**

Полученная мастер-модель перед заливкой в силикон должна быть предварительно подготовлена. Сначала необходимо на модели создать линию разъема формы, т. е. линию, по которой после разрезания силиконового блока будет происходить размыкание частей формы. Создается она обычно цветным скотчем, заклеиваются отверстия и формируется внешняя обводка детали. По данному внешнему краю скотча после застывания силикона будет проводиться разрез, чтобы не повредить мастер-модель, и чтобы после литья был обеспечен минимальный облой вокруг детали.

Далее на мастер-модель крепят литники, выпоры (отверстия, через которые при заливке будут выходить газы), необходимые крепления для закладных элементов (например, для резьбовых втулок).

Для заливки силикона по форме мастер-модели с некоторым отступом делается опока.

Мастер-модель покрывается разделительным составом (обычно силиконовый аэрозоль), чтобы после отверждения силикона модель можно было легче извлечь, и вывешивается в опоке. В итоге мастер-модель находится на расстоянии от стенок опоки, закрепленная на литниках и выпорах.

Далее можно подготавливать силикон к заливке. В качестве примера рассматривается силикон на платиновой основе, он обладает наименьшей усадкой.

Силикон в необходимом количестве перемешивается с отвердителем. Полученную смесь необходимо первично дегазировать, т. е. удалить воздушные пузыри, которые попали при смешивании в силикон. Процедура первичной дегазации силикона может выполняться в вакуумной литьевой машине.

Далее дегазированным силиконом заливается опока с подвешенной мастер-моделью. Опока с залитым силиконом помещается в вакуумную машину для вторичной дегазации, цель которой удалить остатки воздуха из силикона и поднутрений в модели. После вторичной дегазации форма ставится на стеллаж для затвердевания. В зависимости от окружающей температуры и размера формы затвердевание силикона происходит до 24 часов.

По прошествии необходимого времени опока разбирается, и силиконовая форма разрезается. Для разрезания используют скальпель и разжим, при этом линию разреза делают волнистой, чтобы форма хорошо собиралась. Из разрезанной формы удаляется мастер-модель, остатки скотча, при необходимости прокалываются дополнительные выпоры. Форма покрывается разделительным составом, скрепляется и помещается в печь для нагрева. Большинство полиуретанов заливаются в разогретую до 70 °C форму. Это необходимо для лучшей проливаемости формы и правильной полимеризации материала, используемого для изготовления изделий.

#### **2.1.4 Изготовление отливок**

Данные работы проводятся с использованием вакуумной литьевой машины MK-MINI.

#### **2.1.5 Постобработка отливок**

На этапе постобработки на полученных отливках срезаются литники, выпоры, удаляется облой, сверлятся отверстия, выполняется подгонка собираемости. По итогу получается финишная отливка, которую можно использовать для последующих задач. Технология мелкосерийного литья в силиконовые формы по большей части основана на ручном труде и требует достаточной квалификации работников.

Основными преимуществами метода являются следующие факторы.

- Прочность.

Полиуретановая отливка может быть получена как из жесткого, так и из гибкого пластика для конечного использования. Уретановые детали, как правило, такие же прочные или твердые, как детали, отлитые под давлением, и значительно прочнее, чем детали для изготовления которых использовалась 3D-печать.

- Масштабируемость.

Процесс вакуумной разливки оптимален для небольших объемов производства, от одной единицы до нескольких сотен штук. В среднем каждая силиконовая форма может быть отлита с гарантией около 20 штук. Максимальное количество будет варьироваться в зависимости от конструкции детали.

- Материалы.

Существует достаточно широкий ассортимент полиуретанов, как мягких, так и гибких, типа силикона, TPU, NBR и др., а также жестких и устойчивых типов ABS или PC. Кроме того, доступны как непрозрачные, так и оптически прозрачные материалы.

- Цвета.

Вакуумное литье позволяет получать пигментированные детали на основе специального кода RAL или Pantone. Для этой цели полиуретан окрашивается перед заливкой, таким образом, получая окраску.

- Быстрота производства.

Изделия, полученные вакуумным литьем в полимерные формы, отправляются в среднем в течение 10 рабочих дней, в зависимости от требований к деталям и их количества. С другой стороны, литье под давлением может занять до нескольких недель.

## 2.2 Порядок использования установки вакуумного литья МК-MINI

### 2.2.1 Описание установки

Установка MK-MINI была разработана компанией MK Technology® для маленьких компаний, учебных заведений и обучающих центров. Создавая эту машину, намеренно отказались от электронного управления и удобных приспособлений. В результате вышла надежная и очень компактная модель. Управление производится вручную, что позволяет очень точно отливать даже небольшие объемы материала. Система поставляется с двумя разогреваемыми камерами и набором приспособлений. Технология предполагает наличие двух камер для вакуумного литья. Согласно правилам, первая камера, которая обычно эксплуатируется постоянно, необходима для хранения смол, особенно открытых элементов при температуре 35 °C. Подобная температура позволяет предотвратить кристаллизацию смолы. Во второй печи поддерживается постоянная температура 70 °C, что также необходимо, так как для получения наилучших результатов такая температура требуется для силиконовых форм перед литьем. После процедуры литья силиконовую форму необходимо поместить обратно в печь, чтобы держать пластиковую деталь для достижения оптимальной конечной прочности. Стандартной печи вполне достаточно для закаливания смол. Но для закалки пресс-форм нужно, чтобы печи были оборудованы вентиляцией. Это позволит самым оптимальным образом распределить тепло.



Рисунок 2.1 — Внешний вид установки вакуумного литья МК-MINI

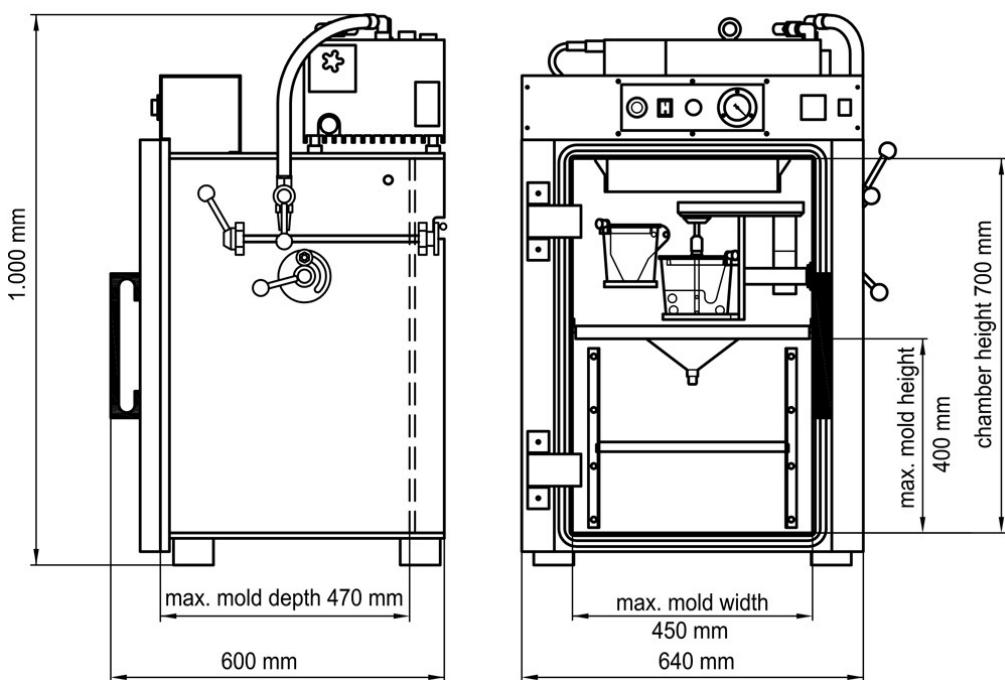


Рисунок 2.2 — Основные размеры установки вакуумного литья МК-MINI

Таблица 2.1 — Основные технические характеристики установки вакуумного литья МК-MINI

Технические характеристики	Значение
Максимальный вес отливки, г	1400
Максимальный размер формы, мм	450×470×400
Внутренний размер камеры, мм	450×470×700
Габариты установки, мм	640×600×1000
Производительность вакуум-насоса	25 м <sup>3</sup> /ч ≤ 0,5 мбар
Время набора вакуума (1,013→0 hPa), мин	3
Время сброса вакуума, сек	25
Питающая сеть	230 В / 50 Гц
Потребляемая мощность, кВт	0,9
Масса установки, кг	250

## 2.2.2 Руководство по использованию установки МК-MINI

### 2.2.2.1 Старт процесса

Для того, чтобы запустить машину, требуется вытянуть на себя аварийный выключатель. После этого нужно включить насос и прогреть его 20 минут при открытом вентиле газового балласта. Затем необходимо закрыть вентиль газового балласта и обработать камеру разделительным аэрозолем.

#### *2.2.2.2 Подготовка к выливанию формы*

Подогретый материал нужно взвесить и добавить жидкие компоненты в чашу А. После этого сосуд и мешатель вставить в приниматели, закрыть дверь и произвести эвакуацию, то есть повернуть кран в верхнюю позицию. При возможности следует уменьшить скорость миксера, чтобы ускорить дегазацию.

После полной дегазации (5–20 мин) вентилировать камеру, то есть повернуть кран в нижнюю позицию. Подогретую силиконовую форму нужно положить под воронкой, вставить поднос формы на соответствующую высоту.

#### *2.2.2.3 Процесс выливания формы*

Нужно снова произвести эвакуацию камеры. Затем через 3 минуты или под давлением –1,0 добавить компоненты из чаши А в компоненты чаши В. После этого необходимо включить миксер и повернуть чашу А назад, перемешивать материал 30–60 секунд, затем остановить миксер.

В зависимости от образования пузырей дать пневматический удар, повернув коротко кран в нижнюю позицию, при этом давление должно быть около –0,90 до –0,95. Повернуть кран в горизонтальную позицию.

Чашу Б повернуть и вылить смесь материала через воронку в силиконовую форму, затем повернуть чашу В назад.

Как только смола выйдет из штейгеров, нужно вентилировать камеру, то есть повернуть кран в нижнюю позицию. Форму изъять и держать определенное время в печи при 70 °С.

#### *2.2.2.4 Обслуживание и уход*

Следует ежедневно чистить устройство и сразу удалять перелившийся материал. Ежегодно или каждые 1000 часов менять масло, согласно производственному руководству Leybold.

#### *2.2.2.5 Транспортировка*

Когда вакуумная камера полностью откачана, стенки и дверца камеры подвергаются воздействию давления около 3,4 т. Поэтому такая камера должна быть очень прочной и стабильной. Благодаря стенкам, изготовленным из 10 мм стали и 39 мм стекла, вес камеры очень велик, т. е. 250 кг. Поэтому транспортировка должна осуществляться осторожно и только с использованием соответствующего оборудования.

Иногда может возникнуть необходимость в том, чтобы после установки камеры на рабочий стол ее задвинули в исходное положение. В этом случае несколько листов бумаги следует положить под резиновые ножки для уменьшения трения. Если камеру необходимо поднять на рабочий стол вручную, рекомендуется делать это примерно с 4–5 людьми, чтобы равномерно распределить вес.

#### *2.2.2.6 Требования к окружающей среде*

Место, где будет установлена система, должно соответствовать следующим требованиям:

- 1) температура от 19 до 22 °C;
- 2) влажность ниже 60%;
- 3) достаточная вентиляция;
- 4) возможность подключения выхлопной трубы;
- 5) яркое освещение;
- 6) доступ на уровне земли или с помощью вилочного погрузчика и/или подъемника для поддонов.

#### *2.2.2.7 Кондиционирование воздуха*

Для получения оптимальных результатов процесса литья требуются постоянная температура и низкая влажность.

Несмотря на длительное время вакуумирования, особенно высокопрозрачные смолы имеют тенденцию к образованию пузырьков и вспениванию в вакууме, если влажность превышает 60%.

Влияние вышеперечисленных параметров часто недооценивается, и плохие результаты литья объясняются другими причинами. Когда температура слишком высока, время варки сокращается, тогда как слишком низкие температуры приводят к медленному или недостаточному отверждению смолы.

Хорошая аэрация помещения является необходимым условием для безопасной обработки полиуретановых смол. Необходимо установить либо достаточно большое окно, либо вытяжную систему.

#### *2.2.2.8 Отработанный воздух*

Пары и газы отсасываются насосом и выдеваются наружу. Поэтому рекомендуется, чтобы выхлопная труба, выход которой находится в задней части камеры, была соединена с трубой, ведущей наружу на открытый воздух. Таким образом, 80% выхлопных газов вообще не попадают в помещение. При планировании и установке этого воздуховода необходимо соблюдать следующие требования:

- 1) он должна быть как можно короче и вести прямо наружу, на открытый воздух;
- 2) диаметр не должен быть слишком узким, а воздуховод не должен вести вверх;
- 3) нужно удостовериться, что дождевая или конденсационная вода не может попасть в воздуховод и, следовательно, в насос;
- 4) рекомендуемая трубка: прозрачная ПВХ, внутренний диаметр 22 мм.

#### *2.2.2.9 Освещение*

Внутренняя часть самой камеры ярко освещена. Кроме того, очень важен рассеянный свет, поскольку он обеспечивает более точную работу. Наилучшее

освещение — это естественный дневной свет, который должен оптимально падать на переднюю часть рабочего места. Если дневной свет отсутствует или работа производится в любое время суток, необходимо установить светоотражающее и не пропускающее блики окно в крыше. Общее правило: 500 люкс на  $\text{м}^2$ , цвет: от белого до теплого белого.

#### *2.2.2.10 Эргономика*

Уже при планировании расположения вакуумной системы нужно позаботиться о том, чтобы была гарантирована гармоничная последовательность операций. Печь для смолы, рабочий стол, вакуумная камера и печь для формования должны располагаться на одной линии или, по крайней мере, под углом, если места недостаточно. Очень важно, чтобы инструменты, смолы и станки находились в пределах легкой досягаемости и чтобы имелся достаточно большой рабочий стол для подготовки и отделки пресс-форм.

#### *2.2.2.11 Требуемое пространство*

Перед установкой системы нужно удостовериться, что вакуумная камера легкодоступна. Блоки управления должны быть расположены в 50 см справа и 20 см слева. Выхлопная труба в 30 см от задней стенки.

#### *2.2.2.12 Установка и сборка системы*

Рабочий стол должен быть прочным и устойчивым, так как камера весит 250 кг. Например, желательно чтобы он состоял из стальной рамы и 50-миллиметровой мультиплексной пластины.

Необходимо вывести выхлопную трубу из ПВХ диаметром 19 мм прямо наружу на открытый воздух или соединить ее с выхлопной системой.

Также следует следить за тем, чтобы дождевая вода или конденсат не попадали в воздуховод и вакуумный насос. Далее провести трубу по нисходящему пути и/или соединить водоотделитель.

В конце подключить вилку источника питания к сети переменного тока 230 В / 50 Гц.

#### *2.2.2.13 Запуск системы*

Для запуска системы следует потянуть за красную кнопку аварийного отключения на панели управления на передней панели машины и запустить насос, нажав соответствующую клавишу.

Затем поворачивать резиновый колпачок газового балластного клапана, который расположен на вакуумном насосе рядом с разъемом вакуумной трубы, до тех пор, пока шум насоса не изменится (шипение и не станет громче).

После этого снова закрыть газовый балластный клапан после 20-минутного прогрева, поскольку оптимальный вакуум может быть достигнут только при закрытом газовом балластном клапане.

Теперь камера готова к работе. Процесс запускается поворотом рычага 3-ходового шарового крана в верхнее положение. Рекомендуется нажимать на ручку стеклянной двери в течение короткого времени, пока дверь не закроется под действием вакуума.

#### *2.2.2.14 Выключение системы*

Для выключения системы необходимо произвести следующие действия:

- 1) полностью герметизировать камеру;
- 2) выключить насос;
- 3) нажать на красную кнопку аварийного отключения.

### **2.2.3 Работа с установкой MK-MINI**

#### *2.2.3.1 Подготовка слепка*

После того как два компонента в чашке А и чашке В будут взвешены, поместить чашки в устройство для смешивания и разлива в камере и закрепить их. Рекомендуется действовать следующим образом.

Прежде всего, поместить чашку В в розетку, отрегулировать и закрепить ее. После этого вставить лопатку для перемешивания и закрепить ее, надев на рубашку. Затем вставить чашку А в розетку и тоже закрепить ее.

При установке чашек необходимо следить за тем, чтобы фиксирующий язычок правильно входил в канавку и чтобы обод чашки точно сидел на фиксирующем кольце. Рекомендуется проводить эвакуацию в два этапа. Основная эвакуация займет 15–30 минут, в зависимости от типа смолы, и должна выполняться без силиконовой формы.

Если форма вставлена уже в этот момент, она остынет во время вакуумирования. После основной откачки снова эвакуировать камеру, вынуть силиконовую форму из печи и установить ее с помощью подъемника. Для этого нужно закрепить лоток для пресс-форм в правильном положении. При необходимости поставить между ними дистанционную пластину.

Для небольших компонентов для литникования можно использовать небольшую круглую бытовую воронку, ее просто помещают в силиконовую форму. Форма и воронка должны быть расположены точно под чашей В.

Для более крупных компонентов использовать встроенную прямоугольную воронку. В зависимости от размера пресс-формы и количества вентиляй отрезать воронку на одном из этапов, чтобы через выпускное отверстие воронки можно было протолкнуть гибкую трубку соответствующего диаметра. Другая сторона трубы помещается в форму. В некоторых случаях воронку можно поместить непосредственно в форму. При наличии двух или более ворот рекомендуется использовать Y-образные детали.

Снова эвакуировать камеру и еще раз дегазировать смолу в течение 3–5 минут при абсолютном вакууме (т. е. дисплей –1,0 бар). Смола с температурой 35 °C облегчает и ускоряет эвакуацию.

### *2.2.3.2 Процесс литья*

Наклоняя чашку А, ее содержимое переливается в чашку В. Этот процесс должен быть завершен в течение срока годности смолы. Это время варьируется от 2 до 15 минут, в зависимости от вида и количества смолы. Примерно через 15–20 секунд чашка А станет пуста и ее можно наклонить назад. Следует подождать, чтобы последняя капля, которая образуется автоматически, упала в чашку В. Как только компоненты А и В будут налиты вместе, миксер необходимо запустить, повернув потенциометр.

Важно, чтобы компоненты тщательно перемешивались, т. е. в течение не менее 45–60 секунд на средней скорости. Однако скорость и время смешивания в значительной степени зависят от качества и количества используемой смолы. После остановки смесителя нужно дать смоле отдохнуть в течение 10–20 секунд, чтобы пузырьки газа, образовавшиеся из-за механической энергии процесса смешивания, могли лопнуть. Если возможно, в форму следует заливать смесь без пузырьков. Поскольку этого времени обычно недостаточно, для завершения этого процесса требуется еще одна внезапная утечка.

Таким образом остается оптимальный вакуум (дисплей: -1,0) и утечка на 30–100 мбар (дисплей: -0,97 + -0,9). Эта внезапная утечка зависит от количества пузырьков газа, которые необходимо устранить. С помощью наклонной чашки В можно хорошо наблюдать за этим процессом. Чтобы закончить, смесь выливается в воронку так, чтобы форма заполнилась.

Как только форма полностью заполнится смолой и/или смола выйдет из стояков, необходимо обеспечить утечку в камеру, повернув рычаг 3-ходового шарового крана. Благодаря этой дополнительной утечке смола выталкивается в самый маленький угол формы, и все оставшиеся пузырьки газа выдавливаются. После полной утечки из камеры форму можно вынимать для закалки в духовке.

Важно: после установки формы в духовку лопатку для смешивания следует вынуть из гнезда и немедленно очистить неабразивной салфеткой. Очистка становится намного сложнее после того, как смола вступила в реакцию и затвердела.

Существуют разные способы решения данной ситуации:

- 1) выбросить старую лопасть вместе с валом и использовать новую;
- 2) открыть два болта с пазами и заменить пластиковую лопасть;
- 3) нагреть смесительную лопатку до 120 ° С и удалить мягкую смолу.

### *2.2.3.3 Нагревательная чашка для восковых сердцевин*

Процедура восковой чашки подходит для всех, кто хочет отливать не только пластиковые, но и металлические детали. Воск заливается в предварительно нагретую силиконовую форму под вакуумом с помощью нагревательного стакана. После затвердевания восковую сердцевину погружают в жидкую керамику, затем ее нагревают. Восковая сердцевина плавится, и остается керамическая форма, в которую теперь можно отливать жидкий металл. После того, как металл затвердеет, керамическая форма

разбивается, и металлическая деталь готова. Недостатком этой процедуры является тот факт, что работать приходится с утерянной мастер-моделью и утерянной пресс-формой, т.е. эта процедура полезна только для очень редких случаев. Преимущество в том, что есть возможность получить первую часть всего за пару часов.

Дополнительная нагревательная чашка, которая должна быть вставлена в смесительное устройство вместо чашки В, доступна для систем MK-Mini и System I. Поворотный замок одинаков для обеих чашек. Нужно подключить соединительный кабель к разъему в верхней части внутренней задней стенки камеры.

Чтобы нагреть воск, необходимо включить переключатель тумблера на правой стороне регулятора на передней панели камеры. Выбрать номинальную температуру 90 °C с помощью регулятора. Коротко нажав на С, с помощью V-клавиш выбирается десятичный знак. Нажимая V-образные клавиши А в течение более длительного времени, можно установить нужные значения.

Рекомендуется температура 90 °C. Однако это зависит от вида воска и от количества, которое используется.

Чтобы ускорить процесс разжижения, полужидкий воск необходимо перемешать с металлом лопаткой для перемешивания. Не рекомендуется включать миксер до того, как воск станет полужидким, так как в противном случае он может заблокировать и повредить двигатель. Если миксер не вращается при потенциометре в среднем положении, необходимо выключить его и подождать несколько минут, прежде чем запускать снова. Состояние плавления воска можно легко наблюдать, наклоняя чашку. Общее правило: чем темнее цвет, тем более жидкий воск. Достигнув самого низкого значения вакуума, нужно подождать, пока больше не останется пузырьков, и снова дать течь. Далее следует достать форму, нагретую до 70 °C, из духовки, положить ее в камеру и соединить ее с воронкой.

Рекомендуется дополнительно запечатать выходное отверстие воронки пластилиновым ободком.

Снова опорожните камеру и, когда пузырьков больше не останется, снова дать течь до 30–50 мбар с помощью 3-ходового шарового крана. Сразу же после этого жидкий воск заливается в форму. После полной герметизации камеры оставить форму внутри до тех пор, пока воск не затвердеет. Затем можно отсоединить форму от воронки и вынуть ее.

Внимание: существует опасность обжечься или ошпариться при использовании горячей чашки и жидкого воска. Рекомендуется использовать защитные перчатки.

#### *2.2.3.4 Техническое обслуживание системы*

Прежде чем приступить к работе, необходимо защитить внутреннюю часть камеры от дыма распылителем разделительного агента.

После работы очистить внутреннюю часть камеры и удалить вытекшую смолу.

## *Замена масла*

Замена масла требуется через 1000 часов эксплуатации, или когда масло становится темно-коричневым или черным, или когда значение вакуума больше не опускается ниже 10 мбар.

Использовать масла типа GS 32 и GS 68 / класс вязкости ISO VG 32-68. Только с этим маслом будет достигнуто значение вакуума 0,7 ГПа и оптимальные условия работы насоса. Если этот тип масла недоступен, также можно использовать стандартное моторное масло класса SAE 30. Однако в этом случае не будет достигнуто оптимального значения вакуума. Замена масла производится в соответствии с инструкциями, приведенными в руководстве Leybold.

## *Замена петель*

В зависимости от величины вакуума и размера камеры дверь прижимается к уплотнительной раме весом до 3,5 тонн. Следовательно, уплотнение двери будет сжиматься вместе до 3 мм. По этой причине камеры оснащены так называемыми плавающими шарнирами.

Чтобы гарантировать правильную герметизацию двери при запуске процесса и защитить окно от напряжения при изгибе, необходима правильная регулировка петель.

Внимание: если винты петель не отрегулированы правильно, в худшем случае окно может разбиться. На каждую дверь приходится по две петли и по два установочных винта на петлю, один спереди и один сзади петли. Как правило, петли правильно настраиваются перед поставкой. Когда дверные уплотнения немного деформировались после нескольких сотен часов работы, может возникнуть необходимость в повторной регулировке шарниров. Для этого все 4 установочных винта двери должны быть ослаблены на 4–5 оборотов с помощью шестигранного гаечного ключа № 3. Процесс начинается с закрытого газового балластного клапана, и камера вакуумируется. Сразу после запуска может потребоваться полностью закрыть дверь вручную, чтобы достичь начальной плотности. После того, как дверь прижимается к раме, она надежно закрывается за счет увеличивающегося вакуума. После достижения максимального вакуума, то есть не позднее чем через 5 минут, расположить два установочных винта на передней части петли таким образом, чтобы они просто касались болта петли.

После этого снова опорожнить камеру и открыть дверцу, чтобы была возможность дотянуться до двух внутренних установочных винтов с помощью шестигранного гаечного ключа № 3. Они должны быть плотно закреплены на болте петли, чтобы петля не имела большего допуска. Затем установочные винты снова ослабляются на 1/4 оборота. Петли отрегулированы правильно, когда уплотнитель сначала прижимается к петле и при закрытии двери с некоторым давлением на последние несколько сантиметров. Если уплотнения затянуты слишком рано и дверь может быть закрыта только с усилием или

вообще не закрываться, два внутренних установочных винта необходимо ослабить еще на 4 поворота.

Внимание: если установочные винты поворачиваются слишком легко, то следует полностью снять их перед регулировкой и надеть на резьбу какой-нибудь винтовой фиксатор, например Loctite 243.

### *Замена и техническое обслуживание уплотнения двери*

Уплотнение двери состоит из петли из пербунана диаметром 12 мм и встроено в паз двери с ласточкиным хвостом. После более длительного срока службы камеры, особенно при переполнении полиуретановой смолы, в нижней части дверцы очень часто образуются частицы грязи и корки, что может привести к утечке.

Чтобы очистить уплотнение двери, нужно снять резиновую петлю, вставив маленькую отвертку в отверстие паза и приподняв уплотнение. Это отверстие в канавке находится либо в середине нижнего края, либо в боковом крае двери. Уплотнение теперь можно легко снять и очистить с помощью тряпка и бензина. Дверная секция также должна быть очищена. Если загрязнение действительно стойкое, то можно удалить его металлическим или пластиковым скребком.

Для защиты и облегчения фиксации уплотнения оно должно быть полностью смазано вазелином. Чтобы закрепить уплотнение, нужно вдавить уплотнение обратно в паз с помощью тряпки, которая также была смазана небольшим количеством вазелина.

Если уплотнение было повреждено смолой или при попытке его очистки, то можно положить поврежденную сторону уплотнения на внутренней стороне канавки. Таким образом, вы получите идеальную поверхность. Как правило, это срабатывает только один раз. В следующий раз пломбу следует заменить.

## **2.2.4 Порядок изготовления формы**

### *2.2.4.1 Подготовка*

Для мастер-модели подходит практически любой материал, независимо от формы и размера, однако все же с некоторыми ограничениями.

Для вакуумной камеры системы I эталонная модель не должна быть больше  $440 \times 440 \times 370$  мм и для камеры системы II размером не более  $790 \times 790 \times 840$  (ширина  $\times$  глубина  $\times$  высота).

Идеальными базовыми материалами являются: термопласти, термореактивные пластмассы, эластомер; металлы, такие как алюминий, высококачественная сталь и т. д; дерево, при условии, что поверхность запечатана и покрыта лаком.

Поверхность должна быть как можно более гладкой и герметичной. Следует иметь в виду, что мастер-модель будет отлита полностью и со всеми деталями. Поэтому стоит потратить достаточно времени на подготовку прототипа.

#### *2.2.4.2 Разделительные линии*

Каждый компонент, включая подрезы, может быть отлит в форму, независимо от того, насколько это сложно. Это всего лишь вопрос правильного и точного расположения разделительных линий. Существуют различные процедуры для определения этой разделительной линии.

Для простых геометрических форм и асимметричных компонентов обычно достаточно подвесить прототип в формовочной раме за один стояк и заполнить его силиконом одним куском. После того как силикон затвердеет, сначала следует удалить стояк. Выпуск пресс-формы будет проще, если сжатый воздух 6–10 бар будет впрыскиваться в подъем силиконовой формы с помощью пневматического пистолета.

После нескольких скачков давления можно увидеть, что основные части пресс-формы уже отделены от основной модели или компонента. Простые геометрические формы, например цилиндры или конусы, могут полностью высвобождаться сжатым воздухом. Для этого форму открывают с лицевой стороны скальпелем, отрезая своеобразный колпачок. Если перед литьем в силиконовую форму была вставлена небольшая трубка диаметром 3–6 мм, то сжатый воздух может подаваться через эту трубку в нижней части компонента. Как правило, компонент выскакивает из формы — это самый простой способ освобождения формы.

Наиболее распространенным методом является определение одной или нескольких разделительных линий с помощью красной полупрозрачной скотч-ленты. Лента используется для заделки всех зазоров в корпусе и для прокладки шва вокруг него. После того, как силикон затвердеет, форму открывают, разделяя две половинки в линии шва с волнообразным вырезом. Благодаря тому, что красный скотч легко обнаруживается в прозрачном силиконе, открыть его просто. Чтобы открыть форму полностью, две половинки раздвигаются с помощью специальных плоскогубцев. Перед открытием пресс-формы следует впрыснуть сжатый воздух, например, через вентильный канал.

Из-за подрезов некоторые прототипы требуют очень точной линии пробора, однако нет обода, который подходил бы для прикрепления скотча. В соответствии с линией пробора одна половина модели заделана в пластилин для лепки. Поскольку пластилин будет набухать в вакууме и также имеет тенденцию к дегазации, необходимо провести дальнейшую дегазацию силикона. После того, как первая половина формы отлита и затвердела, формовочная рама открывается и пластилин осторожно удаляется.

#### *2.2.4.3 Ворота и подъемники*

Количество и диаметр вентиляй зависят от размера детали. Для небольших компонентов размером с большой палец диаметра 8 мм достаточно. Компоненты размером с мобильный телефон должны иметь затвор 10 мм. Для компонентов весом более 200 г следует использовать затворы диаметром 12 мм. В зависимости от геометрии компонента и времени выдержки силикона

потребуется два, а иногда три или четыре затвора. Они соединены с трубкой через Y-образную деталь, которая вставляется в воронку затвора. Затворы должны быть расположены таким образом, чтобы силикон проходил примерно на одинаковом расстоянии во все диски. Таким образом, форма будет регулярно заполняться.

Подставка для ворот должна быть изготовлена из очень гладких круглых прутьев, например, из стального стержня. Старые пластиковые ворота, которые были сняты с компонентов, также подходят в качестве дублеров для новых ворот. При использовании небольшой круглой воронки для небольших компонентов, вместо большой прямоугольной встроенной воронки, в результате получается слепок полной воронки, в зависимости от остатка силикона.

Если нужно подготовить небольшой компонент, может быть полезно использовать всю литую воронку в качестве дублера для ворот. Таким образом, получится силиконовая форма с широким коническим отверстием сверху, которую можно использовать как саму воронку. Форма закрывается, помещается в вакуумную камеру прямо под большой чашкой и взвешивается точное количество силикона. Соединители, трубки и, прежде всего, сама воронка становятся излишними при этом методе. Однако это работает только с небольшими компонентами.

Если компонент плоский, то можно использовать затвор пленочного типа. Тонкий алюминиевый лист, например, разрезается соответствующим образом и приклеивается с лицевой стороны. На стороне, обращенной к компоненту, алюминиевая пластина заканчивается трубкой или круглым стержнем, образующим круглое отверстие, в которое можно вставить воронку.

Преимущество этого метода состоит в том, что форма заполняется однородно и затвор легко снимается. Рекомендуется прикрепить стояки позже, если это возможно. Преимущества заключаются в следующем: в зависимости от геометрии компонента, первый слепок показывает, требуются ли и где стояки. Поскольку стояки должны быть параллельны, а также параллельны воротам, поскольку это облегчает высвобождение пресс-формы, ворота следует сверлить с помощью дрели колонкового типа на максимальной скорости сверлом 1,5–2 мм. Стояк должен быть вставлен везде, где на отлитом тестовом компоненте видны следы пузырьков. Сверление особенно требуется на тонких, высоких и столбообразных участках детали.

#### 2.2.4.4 Формовочная рама

Существуют различные пути, ведущие к конечной цели: в принципе, формовочная рама должна иметь гладкую поверхность и быть изготовленным таким образом, чтобы «плоть» вокруг мастер-модели была 20-30 мм для небольших компонентов и до 100 мм для более крупных компонентов. Геометрия и форма рамы в основном зависят от геометрии компонента и положения затвора. Существует два вида формовочных рам.

### *Формовочная рама из меламиновых пластин*

Для кубических формовочных рам следует использовать древесностружечные плиты с меламиновым покрытием. Основа образована достаточно толстой пластиной.

Четыре стены также сделаны из древесностружечных плит, а ширина должна быть точно законченной для измерения. Они расположены таким образом, что каждая стена образует границу спереди и сбоку. Преимущество этой процедуры состоит в том, что длину стен не нужно точно обрезать, их можно просто измерить на глаз. Доски крепятся горячим kleem.

Таким образом, формовочная рама может быть собрана очень быстро и после затвердевания силикона её можно так же легко разобрать.

### *Сборные формовочные рамы*

В зависимости от размера и геометрии компонентов также могут использоваться сборные каркасы. Например, чаша В, которая используется для откачки и смешивания силикона, подходит для всех симметричных компонентов размером до груши. Для небольших компонентов можно использовать чашу А. Но все остальные пластиковые контейнеры, включая банки Tupperware, подходят в качестве формовочной рамы при условии, что они достаточно гибкие. Это облегчит выпуск пресс-формы в дальнейшем.

#### *2.2.4.5 Закрепление мастер-модели в формовочной раме*

Из-за того, что силикон имеет очень низкую вязкость, а форма обычно заполняется с одной стороны, высокое давление в основном воздействует на одну сторону компонента до тех пор, пока весь компонент не будет закрыт. Такие силы также способны разрушать подвески. Поэтому очень важно обеспечить стабильное крепление мастер-модели в формовочной раме. Если основная модель имеет резьбовые вентили или если такие вентили легко крепятся, следует предпочесть резьбовое соединение. Во многих случаях такое резьбовое соединение из резьбовых стержней может быть встроено или даже «замаскировано» в стояки.

Если резьбовое соединение невозможно, например, деталь тонкостенная, клеить нужно очень осторожно. В дополнение к воротам крепление должно состоять из двух или трех стальных проводов, которые впоследствии можно использовать в качестве стояков. Для крепления рекомендуется использовать цианитовый клей (суперклей), горячий клей, а также ленту или резиновые кольца. Если есть формы большего размера, вокруг мастер-модели можно отлит так называемые выкидные формы. Эти стальные болты грибовидного типа точно отшлифованы и доступны с шагом в одну десятую диаметра и длиной от 5 до 100 мм.

Перед открытием пресс-формы они извлекаются из силиконового блока и обеспечивает точное позиционирование двух половин пресс-формы для последующего процесса литья. Их также можно использовать в качестве

дублеров для глухих отверстий в мастер-модели, они увеличивают срок службы пресс-формы и значительно облегчают выпуск пресс-формы.

#### *2.2.4.6 Расчет необходимого количества силикона*

Необходимо определить объем формовочной рамы в литрах, а затем вычесть предполагаемый объем компонента. Самый простой способ, если это возможно, заполнить формовочную рамку, включая мастер-модель, водой. Затем вода наливается в мерный стакан. Конечно, эта процедура работает только с водонепроницаемыми материалами, и до тех пор, пока не будет зафиксирована разделительная линия скотча. Определенный объем в литрах умножается на 1,2, чтобы получить необходимый вес силикона.

#### *2.2.4.7 Подготовка силикона*

После взвешивания силикона и отвердителя компоненты тщательно перемешиваются в ведре с помощью сверлильного станка. Рекомендуется отметить время, когда начинается смешивание, чтобы избежать превышения 2-часового времени приготовления. То контейнер или ведро должны быть достаточно большими, так как объем силикона может стать в 5-8 раз выше после смешивания. При объеме 1,5 литра дегазация в камере не создает никаких проблем, потому что ведро просто помещается в камеру и система запускается.

Дегазация осуществляется при максимальном вакууме. Опасности переполнения нет. Большие количества газа удаляются путем предварительного выбора, запуска и поддержания нескольких промежуточных давлений с помощью кнопки перехода. Полезно позволить давлению увеличиться в несколько раз на нажатие клавиши быстрой утечки, чтобы пузырьки лопнули.

К максимальному вакууму приближаются шаг за шагом, как при пилообразной кривой. Дегазация должна длиться около получаса, прежде чем камера снова протечет и силикон можно будет извлечь. Функция пилообразного зуба также может быть выбрана в автоматический режим, и поэтому дегазация будет производиться автоматически. Сбоку дегазированный силикон аккуратно заполняется в формовочную рамку, избегая ненужных полостей.

Полезно держать формовочную раму в наклонном положении, пока заполнение начинается с одной стены. Как только формовочная рама будет заполнена и силикон выровнялся, его помещают обратно в вакуумную камеру и снова дегазируют. Несмотря на первичную дегазацию, будут пузырьки и пена. Весь процесс должен тщательно соблюдаться, и хорошо направленные потоки воздуха должны избегать переполнения. Вторичная дегазация не должна длиться дольше получаса.

В зависимости от срочности силиконовую форму можно оставить затвердевать в течение 24 часов при комнатной температуре или в течение 3 часов при температуре до 80 °C после того, как она будет извлечена из вакуумной камеры. Следует предпочесть более медленное отверждение, чтобы

избежать деформации и усадки из-за различных температурных коэффициентов расширения.

#### *2.2.4.8 Открытие силиконовой формы*

После затвердевания силикона форму можно открывать. Если нет недостатка во времени, следует подождать еще немного, пока процесс отверждения не будет полностью завершен. Если форма будет открыта слишком рано, то участки силикона, которые не полностью затвердели, будут искажены. По возможности, перед открытием пресс-формы следует впрыснуть сжатый воздух. Для этой цели можно использовать ворота. Сжатый воздух может привести к полному разделению пресс-формы и мастер-модели (1–2 мм), что облегчает последующее высвобождение пресс-формы. Как уже упоминалось в подпункте «Разделительные линии», форма будет открыта после ее затвердевания с помощью волнообразного разреза по всей форме с помощью Байха-скальпеля.

Благодаря прозрачности силикона лезвие скальпеля можно точно наблюдать и контролировать. Волнообразный разрез поможет закрыть форму позже без какого-либо трудоемкого выравнивания. При разрезании пресс-формы необходимо следить за тем, чтобы лезвие всегда было направлено к линии разделения скотча, чтобы избежать больших отклонений от этой линии. После выполнения волнообразной резки следует использовать расширяющие плоскогубцы. Форму выкладывают, материал между первым разрезом и скотчем аккуратно перерезают, пока форма не развалится на две половины. Мастер-модель снимается, а силиконовая форма очищается от возможных следов скотча или силиконовых пленок. Теперь форма готова для первого литья.

### **2.3 Производство изделий**

#### **2.3.1 Подготовка силиконовой формы**

Перед закрытием силиконовой формы ее следует тщательно опрыскать силиконовым разделительным составом (чем тоньше, тем лучше). Это значительно облегчает последующее высвобождение пресс-формы. Есть две возможности запечатать форму.

Элегантным и простым решением является использование степлера. Нет риска повредить пресс-форму, так как скрепки устанавливаются вручную и они всегда находятся в другом положении. Таким образом, эта процедура позволяет выпускать многие десятки пресс-форм.

Большие формы весом более 5 кг следует запечатывать только высокоскоростной лентой. Необходимо следить за тем, чтобы форма не деформировалась и чтобы определенные секции формы оставались открытыми, чтобы можно было наблюдать за процессом литья.

В случае больших плоских пресс-форм было бы полезно поместить их между двумя пластинами и закрепить форму с помощью винтовых зажимов.

После того как форма запечатана, ее помещают в духовку и предварительно нагревают до 50–70 °C, в зависимости от вида смолы.

### **2.3.2 Расчет необходимого количества смолы**

В зависимости от размера чашки и вида смолы необходимо использовать минимальное количество. В чашке А будет определенный остаток, который влияет на соотношение смеси. Чем меньше величина, тем выше абсолютная погрешность. Для системы I минимальное количество (A+B) составляет около 50 г, для системы II — около 100 г.

Чтобы свести погрешность к минимуму, рекомендуется использовать чашку А несколько раз, когда компоненты изготавливаются с использованием одной и той же полимерной системы. Чашка А, включающая остаток последнего броска, ставится на весы, и дисплей устанавливается на ноль с помощью клавиши Tara. Таким образом, после второго броска будет достигнуто идеальное соотношение смеси. Вес самой чашки, однако, также должен быть устранен нажатием клавиши Tara.

Если мастер-модель изготовлена из пластмассы, необходимое количество смолы может быть определено с достаточной точностью путем взвешивания компонента (плюс около 20–30% излишка для литников и стояков).

В противном случае необходимо оценить количество смолы для первого компонента. Для первой попытки лучше взять немного больше, чем иметь недостаточное количество.

### **2.3.3 Подготовка**

После взвешивания двух компонентов в чашке А и чашке В, чашки помещаются в устройство для смешивания и наклона в камере, и запираются.

Прежде всего, чашку В вставляют в емкость, регулируют и запирают. Затем вводится лопасть для перемешивания и фиксируется путем надевания на рубашку. Затем чашка А помещается в сосуд и также фиксируется. При установке чашек необходимо следить за тем, чтобы крепежная планка находилась внутри паза, а обод вокруг нее точно прилегал к половине кольца. Если возможно, эвакуацию следует проводить в два этапа. Основная эвакуация займет 15–30 минут, в зависимости от типа смолы, это следует делать без силиконовой формы. Если бы форма была вставлена уже в этот момент, она остыла бы во время вакуумирования, что нежелательно. После основной откачки камера снова протекает, силиконовая форма вынимается из печи и устанавливается с помощью подъемника. Для небольших компонентов следует использовать небольшую круглую бытовую воронку для стробирования.

Форма и воронка должны быть расположены точно под чашей В. Для более крупных компонентов нужно использовать встроенную прямоугольную воронку. В зависимости от размера пресс-формы и количества вентилей воронка разрезается на одном из этапов, чтобы можно было надеть правильную гибкую трубку. Если имеется два или более затвора, следует использовать прилагаемые Y-образные детали.

Камера вакуумируется, и смола снова дегазируется при абсолютном вакууме, т. е. отображается "0", в течение 3–5 минут. Таким образом, смола с температурой 35 °C облегчает и ускоряет эвакуацию.

После нажатия кнопки "Пуск", т. е. после запуска вакуумного насоса и откачки, автоматически запускается секундомер, чтобы засечь точное время этой фазы. Примерно через 8 минут, т. е. после 3 минут вакуумирования камеры и 5 минут вакуумирования смолы, может начаться фактическое литья.

### 2.3.4 Процесс литья

На дисплее слева от функции секундомера отображаются все необходимые шаги. После запуска на нем написано "Чашка А". Нажатие клавиши <Cup A> приводит к следующему результату: секундомер устанавливается на "0" и снова начинается отсчет секунд. С этого самого момента компонент А и компонент В смешиваются. Этот процесс должен быть завершен в течение срока годности смолы. Это время варьируется от 1–2 минуты до 20 минут, в зависимости от вида раствора.

Нажатием кнопки чашки А секундомер снова запускается, содержимое чашки А переливается в чашку В, и двигатель миксера начинает работать. В зависимости от вязкости и количества смолы можно выбрать три различные скорости смешивания. Через 15–30 секунд после начала процесса смешивания его можно завершить с помощью клавиши Mixing stop, как указано на дисплее. Вакуумирование и смешивание многих полимерных систем производится при значении вакуума "0". После процесса смешивания в большинстве случаев требуется функция перехода, чтобы вызвать взрыв газов, образовавшихся при смешивании, при значении вакуума 50–100 ГПа. Предварительный выбор давления Delta P используется для выбора требуемого перепада давления. Все значения от 0 до 510 ГПа могут быть выбраны с шагом десять. При нажатии клавиши перехода фактическое значение изменяется на желаемое значение в течение нескольких секунд и поддерживается в окне +/- 5 hPa. При необходимости с помощью этого селектора можно предварительно выбрать новое значение Delta P и запустить его, снова нажав клавишу перехода. Пока активирована функция перехода, горит синий светодиод. Если функция Delta P больше не требуется, т. е. если снова требуется минимальное значение вакуума, необходимо зажать клавишу перехода в течение 2 секунд. Функция Delta P выключается, и синий светодиод гаснет. Камера полностью откачана.

После того, как смола подверглась воздействию нового давления в течение 15–30 секунд, нажимается клавиша <Cup B>, в соответствии с дисплеем, чтобы залить всю смолу в форму. Процесс литья должен соблюдаться очень тщательно. Как только форма будет полностью заполнена смолой и/или смола выйдет из стояков, необходимо устраниć утечку в камере, нажав клавишу быстрой утечки или остановки. Из-за этой внезапной утечки смола выталкивается в самый маленький угол формы, и пузырьки газа, если таковые имеются, выдавливаются наружу.

После полной утечки из камеры форму можно вынимать для закалки в духовке. Функция остановки отключает насос и в камере происходит утечка, если только это еще не было сделано. В то же время секундомер сбрасывается на ноль и начинает отсчет в третий раз.

### 2.3.5 Восстановление

Важно: после того, как форма была помещена в духовку, лопатку для смешивания следует вынуть из гнезда и немедленно очистить неабразивной салфеткой. Очистка намного сложнее, когда смола вступила в реакцию и затвердела. Существуют разные решения данной ситуации:

- 1) использовать новую;
- 2) открыть два винта с плоской головкой и заменить пластиковую лопасть;
- 3) нагреть смесительную лопатку до 120 °C и удалить мягкую смолу. В зависимости от вида смолы силиконовую форму можно вынуть из духовки после 5–30 минут, чтобы вынуть компонент.

Поскольку секундомер вакуумной камеры сбрасывается, как только нажимается кнопка остановки после окончания производственного процесса и начинает отсчет в третий раз, время, в течение которого форма находится в печи, можно легко измерить. Это работает только в том случае, если камера за это время не была перезапущена или выключена.

Перед открытием пресс-формы в любом случае следует впрыснуть сжатый воздух, чтобы облегчить высвобождение пресс-формы. Многие смолы становятся довольно липкими или вязкими при более высоких температурах. Поэтому рекомендуется дать пресс-форме остывть в течение нескольких минут, чтобы избежать деформации. Тем не менее, если компонент деформирован, его следует снова нагреть до 70 °C. Этот процесс требует, чтобы компонент лежал ровно на дне. Эффект памяти заставляет материал возвращаться в исходную форму. Для высокотемпературных смол требуется более высокая температура примерно до 95%.

После того, как компонент был извлечен и отрегулирован, ворота, стояки и остатки скотча снимаются и деталь готова. Следующий производственный цикл может начаться, как только форма будет очищена и покрыта силиконовым разделительным составом. Сам компонент должен быть дополнительно закален (шаг за шагом) для достижения его полной окончательной прочности.

Срок службы силиконовой формы, т. е. количество возможных отливок зависит от ряда факторов. Наиболее важными и влиятельными факторами являются:

- 1) количество и характер вырезов;
- 2) используемые смолы и добавленные красители (если есть);
- 3) использование смазочного средства / силиконового спрея;
- 4) количество циклов в день.

Форма, которая используется один раз в день для изготовления детали и остается открытой в остальное время, прослужит значительно дольше, чем

форма, из которой детали изготавливаются в часовом ритме. Ограничивающим фактором при этом является химическая реакция с полиуретановыми компонентами смолы, полиолом и изоцианатом. Они приводят к тому, что силикон в долгосрочной перспективе становится хрупким, что видно по молочному цвету, который приобретает форма на своих контактных поверхностях.

## **2.4 Производство изделий с применением пистолета с картриджами**

В отличие от многих других смол, доступных для ручного вакуумного литья, для пистолета с двумя патронами имеется только две смолы. Обе смолы представляют собой полиуретаны, окрашенные в черный цвет. Одна становится жесткой, другая остается гибкой, как резина. Цена за килограмм картриджной системы обычно намного выше, чем цена на стандартные литейные смолы. Однако есть некоторые преимущества, говорящие в пользу использования этой системы:

- 1) система может использоваться как с вакуумной камерой, так и без нее, поскольку простые геометрические формы также могут быть сформованы при атмосферном давлении;
- 2) время цикла довольно короткое, поскольку нет необходимости в индивидуальном взвешивании смол, а полиуретан очень быстро затвердевает;
- 3) компоненты, изготовленные из каучукового материала, обладают высокой стойкостью к ударам и изгибу;
- 4) система очень хорошо подходит для презентаций на выставке или для потенциальных клиентов.

### **2.4.1 Подготовка**

При наличии вакуумная камера МК, ее следует использовать в любом случае, чтобы избежать полости в системе. Подъемник в камере устанавливается в самое высокое положение, и крышка фланца на левой стороне корпуса снимается, открывая защелкивающуюся крышку. Прозрачная трубка из ПВХ имеет такие размеры, что она образует дугу от силиконовой формы через фланец корпуса и выступает примерно на 3 см. В зависимости от размера и высоты пресс-формы требуемая длина трубы составляет до 30 см. Отрезок силиконовой трубы длиной 10 см разрезается под прямым углом с помощью трубореза и натягивается на 3 см на трубку из ПВХ, которая торчит из формы. Черный пластиковый зажим надевается на силиконовую трубку, чтобы герметично запечатать ее.

Силиконовую форму предварительно нагревают в духовке при температуре 50 °C, прежде чем поместить в вакуумную камеру и соединить с ПВХ-трубкой. Поскольку работа идет не с гравитационным давлением, а с избыточным давлением от пистолета, камера с большей вероятностью загрязнится из-за вытекания смолы.

Есть три пути решения:

1) все разделительные линии пресс-формы запечатаны высокоскоростной лентой;

2) форма помещается в большую коробку или чашку, чтобы остановить вытекание смолы;

3) внутренняя часть камеры слегка опрыскивается силиконовым разделительным составом.

После запуска вакуумного насоса и откачки воздуха из камеры силиконовую трубку необходимо снова прижать к фланцу, чтобы она идеально засосалась с лицевой стороны для герметизации. В процессе эвакуации пистолет готовится. Завинчивающаяся крышка отвинчивается, и зеленый стопорный болт снимается. Картридж удерживается отверстием вверх. Статический смеситель крепится и фиксируется завинчивающейся крышкой. Затем двойной патрон вводится в пистолет сверху до тех пор, пока он не защелкнется.

При работе с пистолетом давление должно быть ограничено 6 бар, и, поскольку это пневматический инструмент, следует подключить вспомогательный лубрикатор.

#### **2.4.2 Впрыск**

Сам впрыск производится следующим образом: пистолет удерживается таким образом, чтобы смесительный инжектор был наклонен вверх, чтобы все пузырьки могли исчезнуть. Ни в коем случае пистолет не следует сразу соединять с силиконовой трубкой, так как первые несколько кубических сантиметров смолы могут не использоваться. Поэтому следует активировать пистолет и выстрелить в ведро, расположеннное выше, так, чтобы статический смеситель был показан почти вертикально.

После этого пробного выстрела инжектор вставляется в силиконовую трубку, пистолет активируется, а затем камера открывается. Инъекция производится одним выстрелом, т. е. спусковой крючок пистолета остается нажатым до тех пор, пока процесс не будет завершен. Можно наблюдать за процессом литья через прозрачную трубку из ПВХ.

Как только смола выйдет из стояков или стыков пресс-формы, необходимо устранить утечку в камере, нажав кнопку быстрой утечки. Сразу после нажатия кнопки быстрой утечки спусковой крючок пистолета может быть отпущен. Зажим снова устанавливается на силиконовую трубку и пистолет можно снять.

#### **2.4.3 Восстановление**

После полной герметизации камеры дверцу можно открыть. Трубку из ПВХ осторожно вытаскивают из формы, а саму форму помещают в духовку, предварительно разогревшую до 50–70 °C. В зависимости от температуры деталь может быть извлечена из формы после 5–10 минут (твердая смола) или через 15–20 минут (гибкая смола). Если высвобождение пресс-формы затруднено или имеются какие-либо подрезы, может быть полезен впрыск сжатого воздуха.

Заключительный отпуск при температуре 70 °C улучшает механические качества детали.

С помощью красной спусковой кнопки двойной поршень пистолета возвращается в исходное положение и патроны могут быть извлечены после нажатия на выбрасыватель снизу.

## 2.5 Управление программой

Если несколько компонентов должны быть изготовлены из одной формы и одной и той же смолы, полезно использовать программное управление. Все вакуумные камеры MK имеют программируемое управление с 20 свободными запоминающими устройствами, предустановленную пилообразную программу для дегазации силикона и еще 10 предустановленных программ для MK-смол.

Эти предустановленные программы особенно полезны для неопытных пользователей, позволяя им автоматически запускать весь процесс для каждой из MK-смол, используя указанные количества.

### 2.5.1 Хранение программы

Программируемое управление SPS позволяет автоматически выполнять все команды, такие как наклон чашек A и B, предварительный выбор давления и утечка в установленные сроки. После подготовки формы, смолы и запуска программы камера работает автоматически до окончательной утечки. Как только будет получен удовлетворительный результат процесса с ручным управлением, вся последовательность будет запрограммирована.

Для этого следует ввести функцию для вызова памяти программы, после этого выбрать пустую память с помощью клавиш +/– и ввести функцию для хранения.

### 2.5.2 Вызов программы

Чтобы вызвать сохраненную программу, после подготовки смолы и формы необходимо включить камеру, перейти в автоматический режим.

Затем выбрать нужную память программы с помощью клавиш +/–. После этого запустить процесс с помощью клавиши «Пуск».

Программное управление выполняет процесс шаг за шагом в соответствии с инструкциями, выполняемыми вручную. Если по какой-либо причине процесс необходимо прервать, то достаточно нажать любую клавишу ручного режима. Управление программой отключено, хотя переключатель по-прежнему показывает автоматический режим.

Теперь процесс можно продолжить и завершить вручную. Также возможно вносить изменения в сохраненную память.

Для этого нужно включить камеру и переключиться в автоматический режим.

После этого выбрать память, которую нужно изменить. Затем выбрать изменение программы с помощью клавиш <Scroll> и подтвердить с помощью клавиши <Enter>.

После этого вызвать отдельные шаги памяти с помощью клавиш прокрутки соответствующим образом, изменить время и скорость процесса. Далее ввести функцию ввода для окончательного подтверждения.

На практике изменение числовой программы производится не очень часто. Обычно процесс выполняется в ручном режиме для оптимизации и после внесения исправлений снова сохраняется.

### **2.5.3 Функция пилообразного зуба**

Чтобы освободить форму от пузырьков, силикон необходимо дегазировать после его смешивания. Поскольку, в частности, в процессе смешивания выделяется много газа, силикон увеличивается в 5–8 раз по сравнению с его первоначальным объемом.

В зависимости от требуемого количества силикона может случиться так, что используемый контейнер недостаточно велик для достижения максимального объема вакуума за одну операцию: силикон будет перетекать. Поэтому эвакуацию необходимо выполнять поэтапно в виде пилообразного профиля, нажимая клавишу быстрой утечки и/или клавишу перехода. Если этот процесс контролируется вручную, то уйдет не менее получаса. Эта проблема решается программным управлением с запрограммированной функцией пилообразного зуба. Операция запускается в автоматическом режиме и силикон легко откачивается. Пользователь наблюдает за расширяющимся силиконом и нажимает клавишу Ввода непосредственно перед тем, как силикон может перетечь. Как правило, это происходит при значениях ниже 450 ГПа.

Если нажать клавишу Ввода, например, при 430 ГПа, автоматическое управление нагнетает давление в камере до базового значения 500 ГПа, а затем снова запускает откачку. На этот раз выбирается значение, которое на 5 ГПа ниже, т. е. 425 ГПа. Как только это значение будет достигнуто, произойдет автоматическая утечка до 500 ГПа и т. д.

В пределах этого пилообразного профиля с уменьшением на 5 ГПа вакуумирование постепенно и автоматически приближается к самому низкому значению вакуума "0". Это значение сохраняется до тех пор, пока процесс не прерывается нажатием кнопки "Стоп". После нажатия клавиши <Enter> и после того, как приращение и значение плато были скорректированы, присутствие пользователя больше не требуется. При необходимости в процессе дегазации можно изменить три характерных параметра: базовое значение, приращение и плато.

### **2.5.4 Запуск пилообразной программы**

Чтобы запустить функцию пилообразного зуба, после того как силикон был смешан и помещен в камеру, нужно включить камеру и переключиться в автоматический режим.

Затем выбрать «Saw-tooth» с помощью клавиши прокрутки и подтвердить начальное значение.

После этого запустить программу и как только силикон переполнится, запустить ее снова.

Через 30 минут или как только будет достигнуто самое низкое значение давления в камере от (0 до 15 Гпа), остановить процесс с помощью стопорного ключа и дать течь в камере.

### **2.5.5 Изменение пилообразной программы**

Первоначально автоматическое управление для оптимизации времени эвакуации было запрограммировано на базовое значение 500 ГПа, значение приращения 5 ГПа и значение плато 10 секунд. Это хорошо зарекомендовало себя на практике. Если потребуется внести изменения, они могут быть установлены во время работы программы. Как только изменение произведено, оно мгновенно сохраняется.

В целях экономии времени иногда может оказаться полезным уменьшить базовое значение дегазации. Значение вакуума в этом случае колеблется не около 500 ГПа, а только до значения 400 ГПа. Именно по этой причине приращение может быть увеличено и/или значение плато может быть уменьшено.

## **2.6 Смолы и аксессуары**

### **2.6.1 Смолы**

Все предлагаемые смолы были специально разработаны для обработки в вакуумной камере, поэтому их не следует отливать вручную. Как правило, это двухкомпонентные смолы, состоящие из полиола и изоцианата. Соотношение смешивания составляет от 100:100 до 100:75 и должно быть точно определено с помощью цифровой шкалы с максимальным отклонением  $+/-2$  г. Перед взвешиванием оба компонента необходимо тщательно перемешать.

Поскольку полиуретановые смолы гигроскопичны, т. е. они поглощают влажность воздуха, упаковки следует хранить в сухом помещении при температуре около 18 °C и вскрывать непосредственно перед обработкой. Компонент А, отвердитель, будет кристаллизоваться в зависимости от времени хранения и температуры.

При обнаружении кристаллов полиол, компонент А необходимо подвергать воздействию температуры 70 °C в течение 2–3 часов, пока кристаллы не исчезнут. Не следует начинать обработку до того, как смола остынет до 35 °C, так как в противном случае время выдержки будет слишком коротким.

### **2.6.2 Цвета**

Для окрашивания смол доступны пастовые краски всех стандартных цветов RAL. Окрашивание не работает с черными смолами. Полупрозрачные смолы MK-Standard и MK-Strong очень легко окрашиваются. Чистые цвета RAL

оптимально сочетаются со смолой MK-Clear. Поскольку данные краски очень интенсивные, небольшого количества достаточно для глубокого, яркого цвета.

Как и сами смолы, краски основаны на полиоле, и поэтому их легко смешивать. Самопроизвольного размешивания или осаждения не происходит. Механические характеристики компонентов и время обработки остаются более или менее неизменными.

Из-за лучшей дозировки и прозрачности цветные полупрозрачные детали, такие как сигнальные мигалки или стоп-сигналы для транспортных средств, должны быть окрашены специальными чернillasами, которые доступны в различных спектральных цветах. Дозировка производится по капле. На механические качества компонента это не оказывает существенного влияния, время обработки немного больше.

Все краски должны быть добавлены к компоненту А (полиол) и тщательно перемешаны. Если нужно сделать несколько деталей одного цвета, рекомендуется заранее покрасить достаточное количество полиола А-компонента.

### **2.6.3 Армирующие волокна**

Для улучшения механических свойств, таких как прочность на растяжение и изгиб, а также деформация компонентов при разрыве, в смолы MK-Strong и MK-Hot могут быть добавлены волокна MK-Short.

Поскольку короткие волокна, а также смолы накапливают влажность воздуха, их необходимо высушить в духовке при температуре 70–90 °C в течение нескольких часов, прежде чем их можно будет обработать. В противном случае пузырьки воздуха в компонентах были бы неизбежны.

Короткие волокна всегда добавляются к В-компоненту. Их нужно очень тщательно перемешивать, чтобы они распределялись однородно. Обработка должна начинаться сразу после смешивания, чтобы избежать осаждения.

Использование коротких волокон увеличивает вес отливаемой смолы, в то время как текучесть уменьшается.

Пользователи, которые считают эту процедуру слишком сложной, могут воспользоваться проверенной смолой MK-Carbon.

## **2.7 Меры предосторожности**

При работе с силиконом, смолами и сопутствующими материалами необходимо строго соблюдать гигиенические и другие меры безопасности. Например, следует вентилировать помещения и убедиться в том, что в вакуумной камере присутствует выход для воздуха. Также следует носить защитные перчатки, очки и одежду.

## СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Гибсон, Я. Технологии аддитивного производства. Трехмерная печать, быстрое прототипирование и прямое цифровое производство / Я. Гибсон, Д. Розен, Б. Стакер. — Москва : ТЕХНОСФЕРА, 2018. — 648 с.
2. Почти все настройки, необходимые для нормальной печати Cura 3.6. Часть 1. Вкладки Качество и ограждение / LikeNi; 3dtoday.ru [Электронный ресурс]. — Режим доступа : <https://3dtoday.ru/blogs/likeni/almost-all-settings-required-for-normal-printing-cura-36-part-1-qualit>. — Дата доступа : 02.02.2022.
3. Почти все настройки, необходимые для нормальной печати Cura 3.6. Часть 2. Заполнение и материал / LikeNi; 3dtoday.ru [Электронный ресурс]. — Режим доступа : <https://3dtoday.ru/blogs/likeni/almost-all-settings-required-for-normal-printing-cura-36-part-2-fillin>. — Дата доступа : 02.02.2022.
4. Почти все настройки, необходимые для нормальной печати Cura 3.6. Часть 3 / LikeNi; 3dtoday.ru [Электронный ресурс]. — Режим доступа : <https://3dtoday.ru/blogs/likeni/almost-all-settings-required-for-normal-printing-cura-36-part-3>. — Дата доступа : 02.02.2022.
5. 3D Принтер Ender-3 [Электронный ресурс]. — Режим доступа : <https://www.creality.com/ru/goods-detail/ender-3-3d-printer>. — Дата доступа : 02.02.2022.
6. 3D Принтер Ender-3 V2 [Электронный ресурс]. — Режим доступа : <https://www.creality.com/ru/goods-detail/ender-3-v2-3d-printer>. — Дата доступа : 02.02.2022.
7. Печатаем на 3D принтере Creality Ender 3 – Часть 1 / Сборка принтера / mysku.ru [Электронный ресурс]. — Режим доступа : <https://mysku.ru/blog/china-stores/68801.html>. — Дата доступа : 02.02.2022.
8. Твоя первая 3D-печать на Creality Ender-3 V2 / amperka.ru [Электронный ресурс]. — Режим доступа : <https://amperka.ru/page/creality-ender-3-v2-first-print>. — Дата доступа : 02.02.2022.
9. User Manual for Vacuumcasting / MK Technology GmbH. — mk-technology GmbH 11.03.

Учебное издание

## АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПРОИЗВОДСТВЕ

Методические указания по выполнению практических работ

Составители:

Климентьев Андрей Леонидович  
Гришаев Александр Николаевич

Редактор *Т.А. Осипова*

Корректор *Т.А. Осипова*

Компьютерная верстка *А.Л. Климентьев*

---

Подписано к печати 15.03.2022. Формат 60x90<sup>1</sup>/16. Усл. печ. листов 3,9.  
Уч.-изд. листов 5,0. Тираж 9 экз. Заказ № 89.

Учреждение образования «Витебский государственный технологический университет»  
210038, г. Витебск, Московский пр., 72.

Отпечатано на ризографе учреждения образования

«Витебский государственный технологический университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий № 1/172 от 12 февраля 2014 г.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий № 3/1497 от 30 мая 2017 г.