

УДК 004.3  
DOI 10.53403/9785951505071\_2022\_417

## ЭТАПЫ ПОДГОТОВКИ ДЕТАЛИ К ПЕЧАТИ В ПРОГРАММЕ «ВИРТУАЛЬНЫЙ 3D-ПРИНТЕР»

*Е. А. Синицин, О. И. Бритова, В. В. Попов, А. Н. Бахаев, Л. В. Гамов*

Российский федеральный ядерный центр –  
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, Саров

В рамках проекта «Разработка комплекса программного обеспечения для моделирования физических процессов, протекающих при селективном лазерном сплавлении с целью прогнозирования структуры, свойств материалов, а также получения изделий с заданными свойствами, и проведения топологической оптимизации изделий» в ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» с 2019 года разрабатывается программный комплекс «Виртуальный 3D-принтер». Один из модулей данного программного комплекса – модуль подготовки деталей к печати на аддитивном оборудовании.

В данном докладе рассказывается о программной реализации этапов подготовки деталей к 3D-печати, осуществляемой по технологии селективного лазерного сплавления (SLS, SLM). Основные этапы [1], о реализации которых пойдет речь в докладе, являются:

- компоновка (расположение) деталей на платформе и задание настроек;
- генерация поддержек;
- нарезание деталей на слои «слайсинг»;
- заполнение слоев штриховкой «хэтчинг»;
- генерация управляющего кода.

*Ключевые слова:* аддитивные технологии, селективное лазерное спекание, селективное лазерное плавление, «виртуальный 3D-принтер», компоновка деталей на платформе, генерация поддержек, нарезание деталей на слои «слайсинг», заполнение слоев штриховкой «хэтчинг», генерация управляющего кода.

### Введение

В настоящее время в мире промышленно-развитые страны активно развивают аддитивные технологии [1]. Большой интерес представляет использование лазерных аддитивных технологий (в частности технология селективного лазерного сплавления) с целью получения объемных металлических деталей из порошков различных металлов и сплавов. Особенностью и основной трудностью данных технологий является выбор оптимальных режимов работы оборудования и обеспечение заданного качества изготавливаемых деталей (прежде всего речь об уровне механических свойств, остаточных напряжений и деформаций).

Во ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ с 2019 года разрабатывается комплекс программного обеспечения для моделирования физических процессов, протекающих при селективном лазерном сплавлении с целью прогнозирования структуры, свойств материалов, а также получения изделий с заданными свойствами, и для проведения топологической оптимизации изделий – «Виртуальный 3D-принтер». Предполагается, что базовая версия создаваемой программы будет обеспечивать:

- создание и редактирование деталей;
- оптимизацию формы деталей на основе методов топологической оптимизации (бионический дизайн), в том числе с использованием решетчатых структур;

- подготовку деталей к печати;
- выбор оптимальных параметров работы оборудования;
- прогнозирование свойств деталей (микроструктура и механические свойства) на базе много-масштабного математического моделирования (на макро- и мезоуровнях).

Использование программного комплекса должно способствовать более широкому использованию аддитивных технологий в промышленности, сокращению времени внедрения технологии для выпуска новых деталей и получению высококачественных изделий.

Важной частью данного программного комплекса «Виртуальный 3D-принтер» является модуль подготовки деталей к печати, который также используется для подготовки начальных данных для моделирования физических процессов на макроуровне. Данный модуль тесно интегрирован с другими модулями в единую программу с пользовательским графическим интерфейсом. Процесс подготовки деталей к печати состоит из нескольких стандартных этапов [1], которые могут быть заданы последовательностью операций. Выполнение каждой операции (этапа) в программе задается в своем пользовательском диалоге. Подробное описание функциональности каждого этапа приведено ниже.

### Компоновка (размещение) деталей на платформе

Качество напечатанного изделия напрямую зависит от правильности расположения детали на платформе 3D-принтера, что задается при подготовке детали к трехмерной печати. Расположение детали наряду с другими факторами влияет: на прочность получаемого изделия, на качество получаемой поверхности, на время изготовления и количество используемого материала (изготовление поддержек). Из статьи [2] известно, что прочностные характеристики изделий при нагружении вдоль направления выращивания детали (укладки слоев) намного выше, чем при нагружении в перпендикулярных направлениях. Поэтому расположить деталь надо таким образом, чтобы в ответственных местах (особенно в местах сечений с малой площадью) нагрузка шла именно вдоль укладки слоев.

Реализованная в программном комплексе «Виртуальный 3D-принтер» операция «Компоновка деталей на платформе» позволяет выбирать аддитивное оборудование, на котором будет производиться печать, задавать настройки (областей печати, лазеров, материалов, режимов предпечатной подготовки и печати), регулировать положение и ориентацию деталей на платформе, размещать несколько экземпляров деталей (если это необходимо).

На рис. 1 продемонстрирована работа данной операции. Красным цветом показаны выбранные в диалоге детали для размещения на платформе, а зеленым – детали, уже размещенные на платформе.

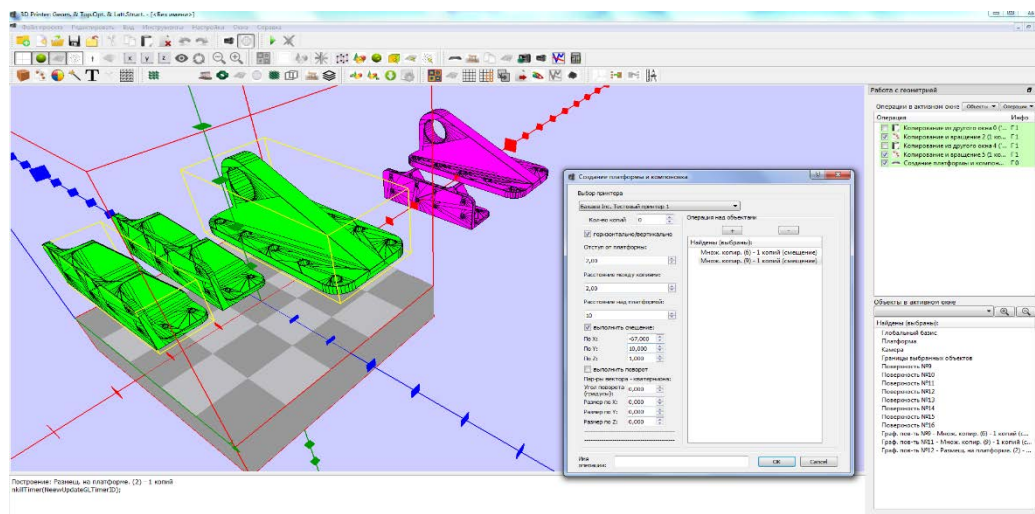


Рис. 1. Вид платформы с размещенными на ней деталями

Операция «Компоновка деталей на платформе» позволяет размещать детали, как в ручном режиме, так и в автоматическом. В случае автоматической компоновки операция размещает детали с учетом заданных в диалоге параметров: расстояние от края платформы, расстояние между копиями детали, высота над платформой. Примеры ориентации деталей на платформе в автоматическом режиме с заданием числа размещаемых копий оси X и по оси Y показаны на рис. 2. Так же возможно расположение детали на платформе в ручном режиме путем задания смещения по трем координатным осям X, Y, Z, с указанием углов поворотов изделия вокруг этих осей. Пример размещения нескольких деталей на платформе в ручном режиме показан на рис. 3.

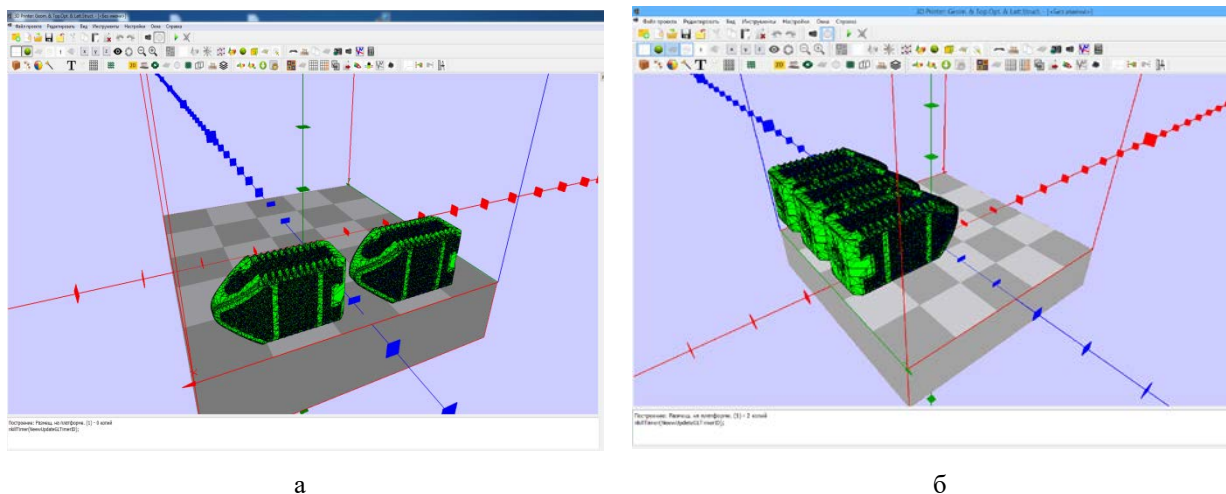


Рис. 2. Расположение изделий на платформе в автоматическом режиме (а – по оси X, б – по оси Y)

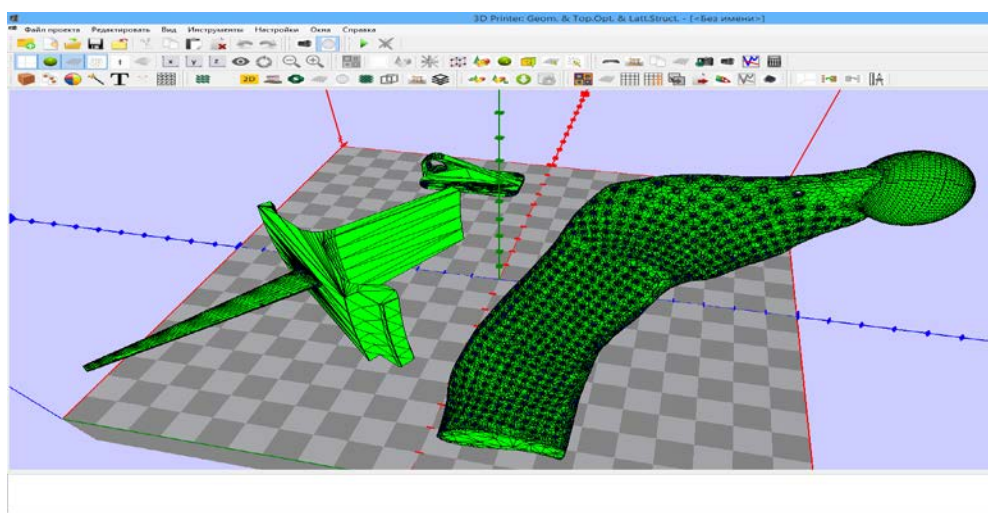


Рис. 3. Расположение изделий на платформе в ручном режиме

### Задание области(ей) действия лазера(ов)

Печать деталей осуществляется с использованием одного или нескольких лазеров. Использование нескольких лазеров в аддитивных машинах необходимо, для ускорения построения деталей в рабочей камере за счет разделения области рабочей камеры между лазерами. Для включения использования лазера и задания области действия лазера используется операция задания области(ей) действия лазера(ов). Реализованная операция позволяет выбрать способ работы лазера: все лазеры работают по всей рабочей камере или каждый в своей области. Для разделения рабочей камеры

на области используются габаритные коробки, которые определяют область действия выбранного лазера. Габаритная коробка формируется посредством задания минимальной и максимальной точки коробки, в случае необходимости поворота вокруг оси Z задается угол поворота  $\beta$ . Пример работы данной операции представлен на рис. 4.

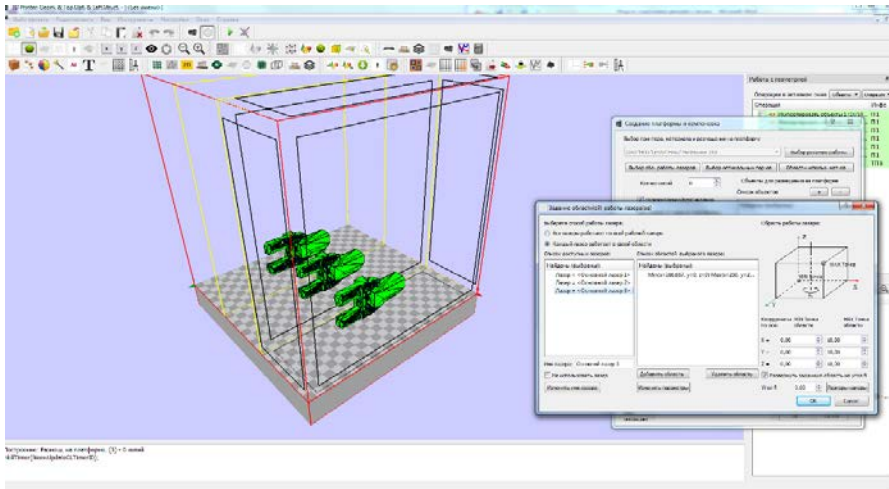


Рис. 4. Платформа с размещенными на ней деталями и выделенной областью действия лазера 3

### Распределение порошкового материала по рабочей камере

Современные 3D-принтеры позволяют выпекать изделия, используя несколько материалов для печати. Для распределения порошкового материала по рабочей камере используется операция задания области распределения материала. Данная операция позволяет включать использование выбранного материала из списка доступных материалов и указывать область распределения материала. Список с доступными материалами зависит от модели принтера. Реализованная операция позволяет задавать распределение порошкового материала послойно или произвольно. Послойное задание порошкового материала подразумевает, что на одном слое не может быть больше одного материала.

Для распределения порошка по рабочей камере принтера используются габаритные коробки, которые определяют область нахождения материала в рабочей камере. Габаритная коробка формируется посредством задания минимальной и максимальной точки коробки. Пример работы данной операции представлен на рис. 5.

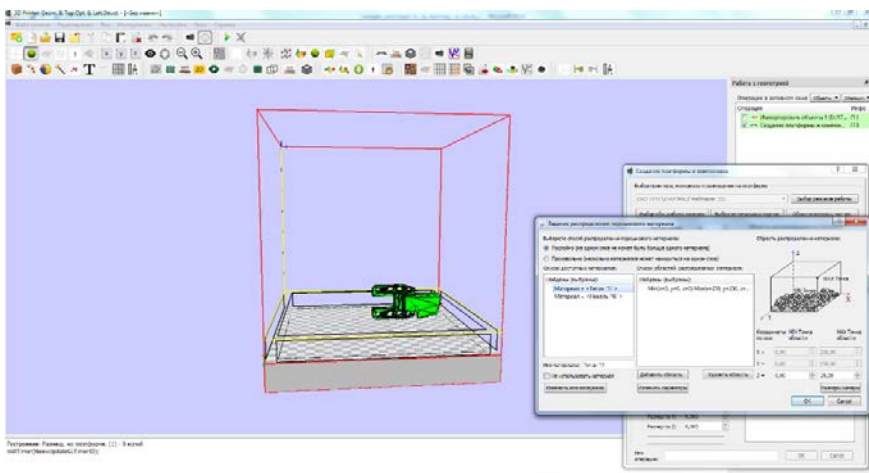


Рис. 5. Платформа с размещенной на ней деталью и выделенной областью материала 1

На рис. 5 черной рамкой выделена область материала 1. В качестве материала 1 используется «Ti», в качестве материала 2 – никель «Ni».

### Выбор взаимосвязанных параметров предпечатной подготовки деталей

Ряд параметров предпечатной подготовки деталей, режимов работы лазеров и качественных характеристик получаемых деталей взаимосвязаны между собой. Для точного определения их значений и последующего задания при предпечатной подготовке в общем случае необходимо проводить многочисленные серии расчетов физических процессов на макроуровне. Такие расчеты занимают много времени и во многом повторяют друг друга при изготовлении геометрически разных деталей. В рамках проекта специалистами Удмуртского Государственного Университета (Кривилев М. Д., Гордеев Г. А. и др.) разрабатывается модуль «Геометрия зоны сплавления», выходной информацией которого служат расчетные зависимости параметров друг от друга, которые получены в результате обработки экспериментальных данных и данных математического моделирования формирования ванны расплава. Эти зависимости позволяют априори выбрать важные взаимосвязанные параметры, на этапе предпечатной подготовки деталей, так чтобы качество деталей после изготовления оказалось допустимым. Важными выбираемыми параметрами на этом этапе являются: толщина порошкового слоя; расстояние между треками (дорожками сплавления), удельная мощность лазерного излучения.

### Генерация поддержек

Печать деталей по технологии селективного лазерного сплавления требует наличие вспомогательных структур («поддержек») для:

- поддержания выступающих элементов геометрии;
- упрощения отделения готовых деталей от платформы;

Изготовление выступающих элементов геометрии, не опирающихся на другие элементы конструкции, требует использования поддержек для уменьшения или устранения возникающих деформаций в этих элементах геометрии. Примерами таких элементов можно считать горизонтальные и наклонные поверхности, арки.

Правильная расстановка поддержек позволяет сократить количество используемого материала и уменьшить время изготовления деталей.

Реализованная операция «Генерация поддержек» позволяет создавать поддержки балочного типа (призмы) для деталей, размещенных на платформе. Пользователь программы имеет возможность задать следующие настройки: предельный угол отклонения от вертикали граней деталей, под которые строятся поддержки, диаметр поддержек, расстояние между поддержками. Пример создания поддержек для нескольких разных деталей показан на рис. 6.

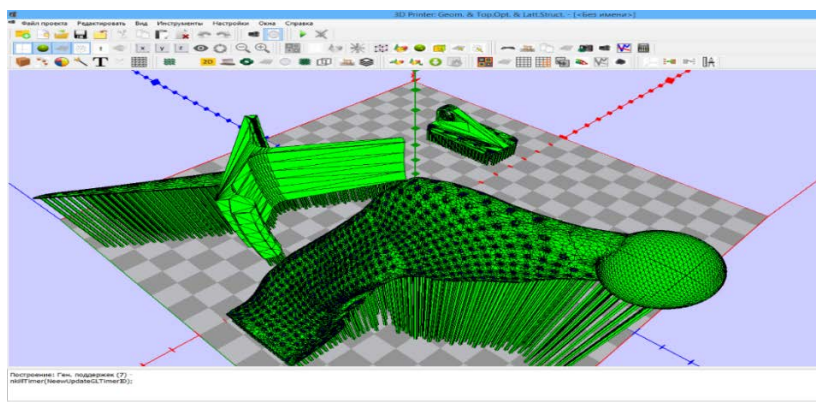


Рис.6. Пример создания поддержек для нескольких деталей

## Нарезание деталей на слои «слайсинг»

Так как 3D-принтеры создают изделие по слоям, то программное обеспечение для подготовки работы принтера должно формировать слои изделия для печати на основе исходной объемной модели изделия, обычно представленной в формате STL. STL файл представляет собой список координат вершин треугольных граней (фасетов), образующих поверхность [3].

Существует множество алгоритмов для нарезания модели изделия на слои, но все они построены по принципу поиска пересечений элементов поверхности (фасетов) моделей деталей с секущими плоскостями. Основными шагами их работы являются: создание секущих плоскостей, определение векторов, образуемых пересечением секущей плоскости с поверхностью деталей (состоящей из фасетов), и генерация замкнутых контуров [3].

Реализованная операция позволяет нарезать детали, размещенные на платформе, на слои. Пользователь программы имеет возможность задавать следующие настройки: толщину слоя, количество слоев, высоту первого слоя. Пример нарезания деталей на слои представлен на рис. 8. Исходные детали, размещенные на платформе, показаны на рис. 7.

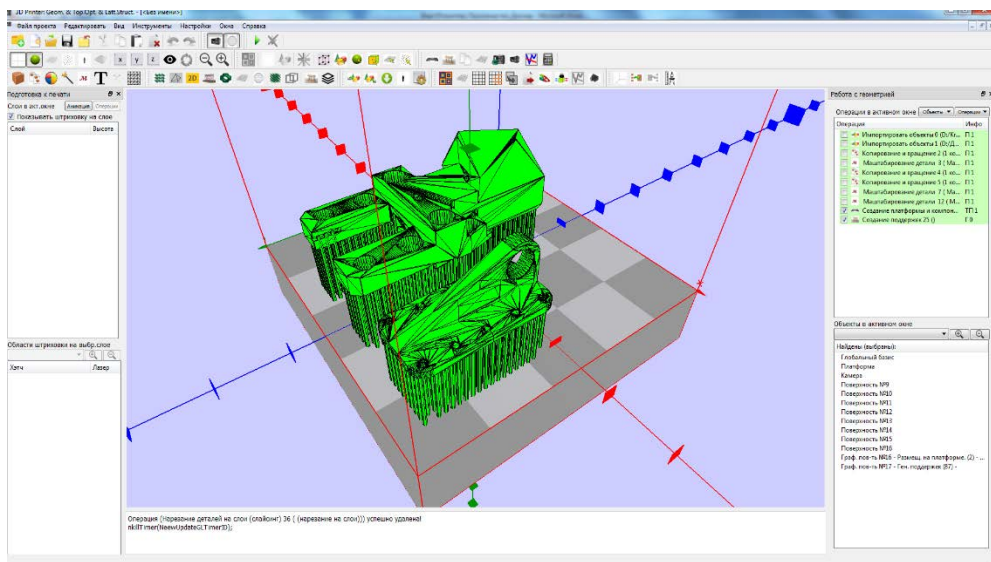


Рис. 7. Вид платформы с размещенными на ней деталями и построенными поддержками

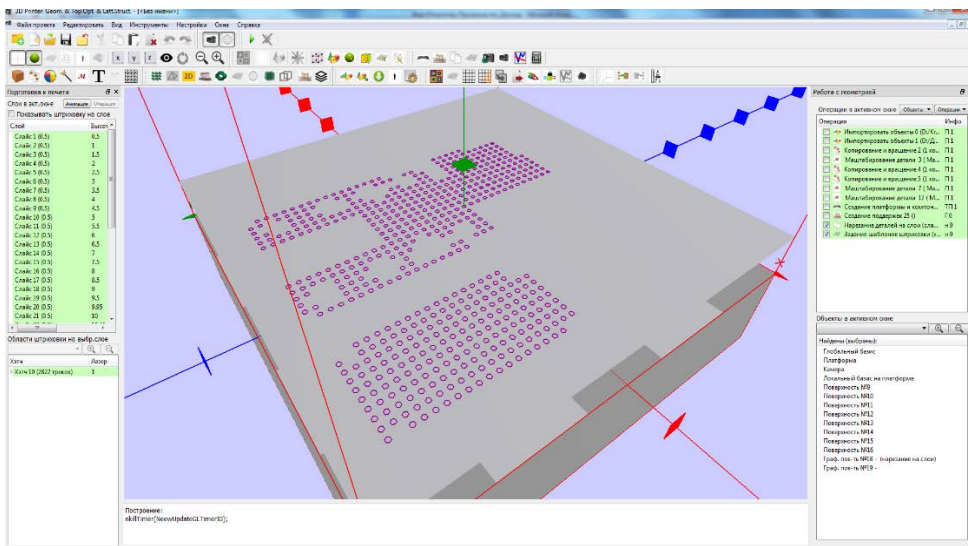


Рис. 8. Результат выполнения операции нарезания деталей на слои («слайсинг»)

## Заполнение слоев штриховкой «хэтчинг»

После этапа нарезания объемной модели на слои, необходимо выделить зоны для отдельной обработки, задать режимы построения в этих зонах и заполнить полученные слои штриховкой. Реализованная операция заполнения слоев штриховкой «хэтчинг» позволяет выделить зоны, задать режимы и заполнить полученные слои штриховкой. Для выделения доступно 4 зоны: Down-Skin (Низ детали), Up-Skin (Вверх детали), Support (поддержки), NearPlatform (Около-платформенные слои). Пользователь программы имеет возможность задать следующие настройки: режим работы в активированной зоне (мощность и скорость лазера), тип штриховки, шаблон штриховки, шаг штриховки.

Основными шагами этапа заполнения слоя штриховкой являются: создание семейства прямых в соответствие с входными данными (шаг штриховки, тип штриховки); вычисление отрезков (треков движения лазера), полученных пересечением найденных контуров с семейством прямых; упорядочивание отрезков (треков) расположенных внутри детали по заданным критериям и сохранение их в специальных структурах, данных для последующего использования. Результат выполнения операции «хэтчинг» в программном комплексе «Виртуальный 3D-принтер» представлен на рис. 9.

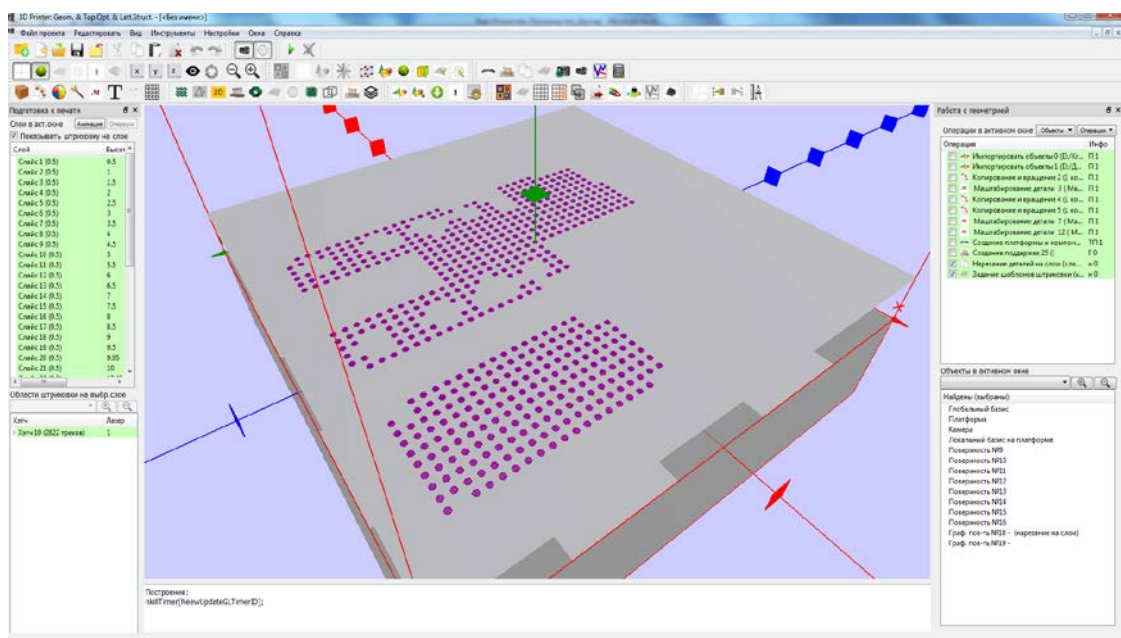


Рис. 9. Результат выполнения операции заполнения слоев штриховкой («хэтчинг»)

## Генерация управляющего кода

Генерация управляющего кода реализована отдельной операцией, которая по результатам предыдущих операций формирует управляющий код в соответствии с заданными характеристиками конкретного 3D-принтера. Модели 3D-принтеров разных производителей используют различные реализации управляющего кода.

В программном комплексе «Виртуальный 3D-принтер» на данный момент реализована возможность генерации управляющего кода для принтеров линейки «MeltMaster», в частности «MeltMaster – 250». Сгенерированные командные файлы для аддитивной машины имеют текстовый формат и состоят из команд собственного языка управления для этого устройства. Основные команды: выбор режимов работы лазеров; управление перемещением луча лазера; опускание платформы и насыпка слоя порошка (начало и конец слоя). Пример управляющего кода представлен ниже.

```

-- Слой 1
F_In
Laser.Power = 76
Laser.MarkSpeed = 650
Laser.Active = 1
Image.Line(-119.5,-93.5,-118.5,-93.5)
Image.Line(-119.5,-93.5,-119.5,-92.5)
Image.Line(-119.5,-92.5,-118.5,-93.5)
Image.Line(-119.5,-92.5,-118.5,-92.5)
Image.Polyline3D(false,-106.8,-33.91,0,-106.8,-33.93, ..... , 33.65,0,-106.74,-33.76,0,-106.8,-33.91,0)
...
Image.Line(-119.5,-93.5,-118.5,-93.5)
Image.Line(-119.5,-93.5,-119.5,-92.51)
F_Out
-- Слой 2
F_In
...

```

Здесь: F\_In – тег указывающий начало слоя; F\_Out – тег указывающий конец слоя; Laser.Power – мощность лазера; Laser.MarkSpeed – скорость лазера; Laser.Active – номер лазера; Image.Line – трек, по которому бежит лазер; Image.Polyline3D–последовательность треков, по которым бежит лазер.

### Заключение

В рамках проекта «Разработка комплекса программного обеспечения для моделирования физических процессов, протекающих при селективном лазерном сплавлении с целью прогнозирования структуры, свойств материалов, а также получения изделий с заданными свойствами, и проведения топологической оптимизации изделий» в ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» с 2019 ведется разработка модуля подготовки детали к печати, который является частью программного комплекса «Виртуальный 3D-принтер». В докладе приведено описание программной реализации этапов подготовки деталей к печати. Этапы подготовки к печати тестовых деталей продемонстрированы на рисунках.

### Литература

1. Гибсон Я., Розен Д., Стакер Б. Технологии аддитивного производства – М.: Техносфера, 2016. С. 656.
2. Камоничкин Д. Как правильно расположить деталь на платформе 3D - принтера? // Режим доступа: <https://st3d.com/blog/positioning/>
3. Гущин И. А., Авдеев А. Р., Швец А. А., Дроботов А. В. Алгоритм деления объемной модели на слои для 3D-печати. // Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/algoritm-deleniya-obemnoy-modeli-na-sloi-dlya-3b-pechati>



## STAGES OF PREPARING A COMPONENT FOR PRINTING IN SOFTWARE PACKAGE “VIRTUAL 3D PRINTER”

*E. A. Sinitsyn, O. I. Britova, V. V. Popov, A. N. Bakhaev, L. V. Gamov*

Russian Federal Nuclear Center –  
All-Russian Scientific Research Institute of Experimental Physics, Sarov

The “Virtual 3D printer” software package has been being developed at FSUE “RFNC-VNIIEF” since 2019 under the project “The development of software to simulate physical processes in selective laser melting in order to predict the structure and properties of materials, manufacture products with the desired properties and perform topological optimization for products”. One of the program modules in this software is a module used to prepare components for printing on additive equipment.

The report describes the software implementation of stages of preparing components for 3D printing using the selective laser melting (SLM), or selective laser sintering (SLS) technology. The main stages described in the report are, as follows:

- arrangement of components on a platform;
- generation of supports;
- slicing;
- hatching;
- generation of control code.

*Key words:* additive technologies, selective laser sintering, selective laser melting, “virtual 3D printer”, arrangement of components on a platform, generation of supports, slicing, hatching, generation of control code.