

УДК 621.01

## О принципах функционирования аддитивного производства

Д.Н. Козлова<sup>1</sup>, В.В. Шунулина<sup>1</sup>, А.П. Преображенский<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Колледж Воронежского института высоких технологий, Воронеж, Россия

<sup>2</sup>Воронежский институт высоких технологий, Воронеж, Россия

*В статье рассматриваются некоторые принципы, на основе которых функционирует аддитивное производство. Показано, как готовятся модели, какие есть форматы представления данных, какие используются настройки, как проводится процесс построения объекта, каким образом влияют поддержки. Обсуждаются особенности влияния ориентации деталей на процесс производства.*

*Ключевые слова: аддитивное производство, обработка данных, моделирование, проектирование, прототипирование.*

## About the principles of functioning of additive manufacturing

D.N. Kozlova<sup>1</sup>, V.V. Shunulina<sup>1</sup>, A.P. Preobrazhenskiy<sup>2</sup>

<sup>1</sup>College of Voronezh Institute of High Technologies, Voronezh, Russia

<sup>2</sup>Voronezh Institute of High Technologies, Voronezh, Russia

*The article discusses some of the principles on which additive manufacturing operates. It is shown how models are prepared, what data presentation formats are available, what settings are used, how the process of constructing an object is carried out, and how support is influenced. The features of the influence of part orientation on the production process are discussed.*

*Keywords: additive manufacturing, data processing, modeling, design, prototyping.*

Во многих случаях процессы прототипирования используются в ходе разработок различных видов изделий. При этом важно обеспечить создание необходимых геометрических форм, объединение соответствующих компонентов конструкций. Еще относительно недавно изготовление прототипов приходилось осуществлять ручным образом, для этого могло потребоваться довольно много времени. При этом можно было сделать весьма небольшое изменение в конструкции изделия. Это не позволяло реализовывать оптимизационные подходы, изделия не всегда требуемым образом функционировали [1, 2].

Технологии быстрого прототипирования позволили обеспечить высокое качество создаваемых изделий, требования, которые предъявлялись к производительности производства. В рамках аддитивных производственных технологий [3, 4] формируются физические модели, используются различные прототипы, применяется инструментальная оснастка.

В ходе аддитивного производства можно выделить несколько основных этапов.

1. Разработчикам приходится опираться на трехмерные компьютерные CAD-модели. На их основе для изделия полным образом описывается его внешняя геометрия. Для созданной модели важно обеспечить твердотельную или поверхностную геометрию. Чтобы вести процесс обратного проектирования, применяется соответствующее оборудование.

2. Проводится конвертирование модели в формат STL. За счет этого возникают возможности для того, чтобы осуществить вычисление срезов, а также по моделям дать описание внешних замкнутых поверхностей.

3. Передача оборудованию STL-файла, в котором содержится информация по анализируемому объекту. При его обработке модель может быть настроена соответствующим образом.

4. Для аддитивного оборудования обеспечиваются необходимые настройки. Настраиваются временные параметры, энергетические параметры, параметры материалов и т. д.

5. Реализуется процесс построения объекта. При этом будет происходить лишь поверхностное наблюдение процесса построения.

6. Удаление объектов из аддитивного оборудования.

7. Для удаленных объектов будет реализован постпроцессинг. Может потребоваться привлечение ручной обработки.

8. Использование созданных объектов на практике. Если объекты формируют определенную систему, то они должны быть определенным образом собраны.

Рассмотрим особенности подготовки CAD-модели [5, 6]. Производственные технологии являются полным образом автоматизированными, они входят в состав аддитивного производства. На основе компьютерного описания возникают возможности для того, чтобы обеспечить получение прототипирующих моделей, имеющих произвольную геометрическую форму. В файле с форматом STL содержится подобное описание, при этом, чтобы его сформировать, необходимо иметь геометрическую CAD-модель объекта.

Пространство в объекте, как наружное, так и внутреннее, должно быть правильным образом разделено. Для этого наилучшим образом подходят твердотельные геометрические модели. Геометрическая информация относительно объекта поддерживается на основе поверхностных CAD-моделей.

Может потребоваться проведение дополнительной обработки для объектов в тех случаях, когда используются техники обратного проектирования для получения CAD-поверхностей. В ходе дополнительной обработки могут формироваться замкнутые объемы, строиться фаски и скругления, определяться пересечения между поверхностями, увеличиваться размеры поверхностей [7].

Для того, чтобы твердотельные схемы реализовать на практике, можно опираться на реализацию разных схем. Достаточно часто используют подходы, связанные с конструктивной твердотельной геометрией (Constructive Solid Geometry (CSG)). В ней используются такие основные компоненты: булевы операции, преобразующие операции, твердотельные геометрические примитивы. Первые из них связаны с вычитанием, пересечением и объединением. Вторые связаны с масштабированием, сдвигом, вращением, вытягиванием. Третьи характеризуются простейшей формой.

CSG рассматриваются пользователями в виде интуитивным образом понятной и дружественной схемы, дающей возможности для процессов моделирования. Если твердотельные примитивы будут доступны ограниченным образом, то в качестве перспективного можно рассматривать контурное представление (Boundary representation – B-rep). В ходе его применения можно обеспечить полную совместимость с конструктивной геометрией, когда осуществляются процессы моделирования [8].

Практически любые физические объекты могут быть сформированы на основе контурного представления. В нем используются ограничивающие поверхности, имеющие как плоские, так и произвольные формы. При этом контур в граничных поверхностях может содержать как прямые, так и кривые линии.

С учетом того, что твердотельное моделирование может рассматриваться в виде некоторого достаточно универсального подхода, в ряде случаев пользователи сталкиваются с трудностями, когда необходимо создать типовые простейшие элементы на основе описания поверхностей. Чтобы для пользователей был обеспечен

дружественный и понятный интерфейс, необходимо учитывать возможности использования гибридных схем моделирования, в которых существует контурное представление, а также конструктивная геометрия. Пользователь рассматривает булевы операции и твердотельные примитивы. При этом структура контурного представления применяется для того, чтобы осуществлять внутреннее представление данных [9]. То есть пользователь может применять в ходе использования конструктивной твердотельной геометрии различные виды моделирующих операций. Помимо этого, в рамках техники поверхностного моделирования есть возможности для того, чтобы пользователями были определены различные элементы свободной формы.

Как уже было сказано выше, в технологическом процессе используется формат STL. Он необходим для того, чтобы оборудование, позволяющее вести быстрое прототипирование осуществляло взаимодействие с CAD-моделью. Полиэдрическое представление использовалось в ходе разработок формата STL. Оно активным образом развивается при твердотельном моделировании [10] и при построении графических ядер. Такая технология дает возможности для того, чтобы осуществлять аппроксимацию на основе плоских линейных геометрических элементов для точных CAD-поверхностей. Элементы при этом имеют простейшую треугольную форму. В ходе моделирования с учетом мозаичных граней получается поверхностная модель. На рисунке 1 приведен пример STL-описания объекта.

```
Solid irregular tetrahedron
  facet normal -1.0 0.0 0.0
    outer loop
      vertex 0.0 0.0 0.0
      vertex 0.0 0.0 3.0
      vertex 0.0 2.0 0.0
    endloop
  endfacet
  facet normal 0.0 -1.0 0.0
    outer loop
      vertex 0.0 0.0 0.0
      vertex 1.0 0.0 0.0
      vertex 0.0 0.0 3.0
    endloop
  endfacet
  facet normal 0.0 0.0 -1.0
    outer loop
      vertex 0.0 0.0 0.0
      vertex 0.0 2.0 0.0
      vertex 1.0 0.0 0.0
    endloop
  endfacet
  facet normal 0.85714286 0.42857143 0.28571429
    outer loop
      vertex 1.0 0.0 0.0
      vertex 0.0 2.0 0.0
      vertex 0.0 0.0 3.0
    endloop
  endfacet
endsolid irregular tetrahedron
```

Рисунок 1. Пример STL-описания объекта

Необходимо учитывать число фасетов в мозаичной модели, когда она формируется из плоской, чтобы обеспечить требуемую точность. С точки зрения практического использования бинарный формат, а также формат ASCII доступны для разработчиков. На основе таких форматов создаются треугольные фасеты. С использованием чисел с плавающей точкой происходит задание координат вершин фасетов, которые записываются внутрь файла с кодировкой ASCII. Для того, чтобы задать правильное размещение для вершин, необходимо опираться на правило правой руки. Два фасета в модели должны иметь общую кромку, общий объем формируется на основе сетки используемых фасетов.

Если провести сравнение форматов, то можно убедиться, что файл для бинарного формата в разы меньше, чем для ASCII формата. Этим пользуются на практике разработчики. На рисунке 2 приведен пример содержимого файла с бинарным описанием объекта.

```
(Top of file)
84 bytes - header record
      80 bytes - unformatted general information
                such as file name, part name and comments.
      4 bytes - number of facet records
                each facet record defines one triangle.
50 bytes - first facet record
      12 bytes - facet normal vector
                4 bytes - i coordinate
                4 bytes - j
                4 bytes - k
      12 bytes - first vertex
                4 bytes - x coordinate
                4 bytes - y
                4 bytes - z
      12 bytes - second vertex
                4 bytes - x coordinate
                4 bytes - y
                4 bytes - z
      12 bytes - third vertex
                4 bytes - x coordinate
                4 bytes - y
                4 bytes - z
      2 bytes - optional facet attributes
50 bytes - second facet record
50 bytes - third facet record
      :
      :
50 bytes - the last facet record
(End of File)
```

Рисунок 2. Иллюстрация бинарной спецификации STL-файла

STL-данные должны быть сгенерированы. Этот процесс реализуется внутри CAD-систем в ходе процесса экспорта твердотельных моделей к формату STL. Требуется задавать величину допуска, с учетом которого модели преобразуются в технологическом процессе.

В ходе реализации обработки STL-данных разработчики могут столкнуться с некоторыми проблемами. Первая из них связана с тем, что существует избыточность данных. Выражается это в том, что файлы, в которых хранятся данные, будут иметь достаточно большие размеры. Если вершина будет принадлежать нескольким фасетам, то по их числу будет повторение ее координат. Также существуют топологические проблемы. Они проявляются в требованиях удовлетворения условиям многообразий, направленности граней, принадлежности кромок треугольникам. Указанные проблемы решаются за счет реализации повторной триангуляции, обращения граней, пересоединения кромок.

Помимо этого, существуют геометрические проблемы. Они могут быть связаны с тем, что построенные треугольники могут быть вырожденными. Проблемы решаются на основе изменения положения вершин. Когда детали изготавливаются послойным образом, то используются операции, связанные с генерацией поддержки и ориентацией изделия.

Общие затраты, относящиеся к прототипированию могут быть минимизированы, а также уменьшено время построения за счет того, что в прототипирующих моделях осуществляется выбор оптимальной ориентации деталей.

В ходе ориентации деталей можно указать такие ключевые характеристики:

– необходимо учитывать для трехмерного пространства особенности главного обвода детали. В качестве примера, требуется проводить оптимизацию времени, требующегося для того, чтобы реализовать процесс переключения среди слоев, когда

проводится стереолитография. Время, требующееся для построения детали, не будет зависеть от ориентации, если используется подход, базирующийся на том, что происходит наплавление.

– необходимо использовать минимальные поддержки с учетом оптимизации в ориентации деталей. При этом при контакте материала поддержки и детали важно минимизировать площадь их соприкосновения. Тогда возникают возможности минимизации влияния поддержек на характеристики качества поверхности прототипов. Затраты, связанные с постобработкой, также будут снижены. Поддержек можно избежать за счет того, что для элементов деталей угол нависания будет правильным образом задан в ходе проектирования. В ходе разработок необходимо обеспечивать минимизацию общих объемов поддержки с целью экономии материала поддержки и уменьшения времени разработки.

– требуется обеспечивать большую гладкость для воспроизводимых поверхностей. Можно столкнуться с тем, что на поверхности наблюдается эффект ступенек, который возникает вследствие того, что используется послойный способ для построения модели. Необходимо стремиться к минимизации этого эффекта. Задачу можно решить за счет уменьшения числа граней, которые наклонены.

– необходимо избегать наличия замкнутых полостей, когда применяется метод стереолитографии в ходе прототипирования деталей.

В ходе реализации некоторых аддитивных процессов для детали может потребоваться дополнительная поддержка. При этом выделяются такие ключевые функции:

– детали должны быть отделены от платформы. Этот процесс может быть реализован более упрощенным и безопасным образом за счет применения поддержек. Помимо этого, по нижним слоям будет более простым образом контролироваться качество поверхности, а также толщин слоев.

– обеспечивается опора по нависающим слоям. Тогда нависающие слои не будут сваливаться, и будет усиление в тех областях деталей, которые будут нависать. Слои идущие последовательно друг за другом в ходе стереолитографии не будут утягивать друг друга вследствие усадки.

– улучшение характеристик течения жидкости вокруг деталей в ходе процесса стереолитографии.

Вывод. Рассмотрены основные этапы аддитивного производства. Отмечена необходимость правильного представления твердотельной или поверхностной геометрии. Продемонстрированы особенности конвертирования данных. Обсуждаются характеристики конструктивной твердотельной геометрии. Показаны особенности STL-данных. Продемонстрировано влияние на технологический процесс ориентации деталей. Отмечены особенности поддержек.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Сулоева Е.С. Математическое и программное обеспечение для определения погрешности при моделировании средства измерения / Е.С. Сулоева, Н.В. Романцова // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2021. – Т. 9. – № 4. – URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1068> (дата обращения: 01.04.2024).

2. Казанцев А.М. Некоторые подходы к оценке процесса функционирования структурно-динамических систем мониторинга в условиях внешних воздействий / А.М. Казанцев, Р.А. Кочкаров, А.В. Тимошенко, А.А. Сычугов // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2021. – Т. 9. – № 4. – URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1047> (дата обращения: 01.04.2024).

3. Львович Я.Е. Оптимизация проектирования многоаспектной цифровой среды системы однородных объектов на основе процедур декомпозиции и агрегации / Я.Е. Львович, А.В. Питолин, С.О. Сорокин // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2019. – Т. 7. – № 2. – URL: [https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2019/05/LvovichSoavtori\\_2\\_19\\_2.pdf](https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2019/05/LvovichSoavtori_2_19_2.pdf) (дата обращения: 01.04.2024).
4. Неустроев Д.В. Аддитивные технологии и их применение в промышленном и транспортном строительстве / Д.В. Неустроев, И.Г. Овчинников // Вестник Евразийской науки. – 2021. – Т. 13. – № 2. – URL: <https://esj.today/PDF/26SAVN221.pdf> (дата обращения: 01.04.2024).
5. Панков Д.Э. Лазерная стереолитография (SLA): технология 3D-печати / Д.Э. Панков, И.А. Соломонов, А.М. Терин, А.К. Тутушкин // Молодой ученый. – 2020. – № 48 (338). – С. 48-49.
6. Чемодуров А.Н. Применение аддитивных технологий в производстве изделий машиностроения / А.Н. Чемодуров // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2016. – № 8-2. – С. 210-217.
7. Агаповичев А.В. Математическое моделирование процесса селективного лазерного сплавления порошка титанового сплава ВТ6 / А.В. Агаповичев, А.В. Сотов, В.Г. Смелов // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2020. – Т. 19. – № 2. – С. 53-62.
8. Платонов М.М. Оптимизация состава полимерной композиции с пониженной пожарной опасностью на основе поликарбоната для технологии 3D-печати расплавленной полимерной нитью / М.М. Платонов, Г.Н. Петрова, С.А. Ларионов, С.Л. Барботько // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. – 2017. – Т. 60. – № 1. – С. 87-94.
9. Гибсон Я. Технологии аддитивного производства / Я. Гибсон, Д. Розен, Б. Стакер. – Москва: Техносфера, 2016. – 646 с.
10. Армашова-Тельник Г.С. Аддитивные технологии: новационный эффект в промышленности / Г.С. Армашова-Тельник, П.Н. Соколова, Д.В. Дегтерев // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2020. – Т. 82. – № 4 (86). – С. 347-353.

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Козлова Дарья Николаевна**, студент, Колледж Воронежского института высоких технологий, Воронеж, Россия.

*e-mail:* [kozl\\_darrya89@mail.ru](mailto:kozl_darrya89@mail.ru)

**Шунулина Виктория Владимировна**, студент, Колледж Воронежского института высоких технологий, Воронеж, Россия.

*e-mail:* [shunul\\_vikt908@mail.ru](mailto:shunul_vikt908@mail.ru)

**Преображенский Андрей Петрович**, доктор технических наук, профессор, Воронежский институт высоких технологий, Воронеж, Россия.

*e-mail:* [app@vivt.ru](mailto:app@vivt.ru)