

АНАЛИЗ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОТОТИПИРОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ 3D-ПРИНТЕРА

А.В. Блохин, А.С. Грицай, А.А. Сапилова, В.И. Потапов,
И.В. Червенчук (Омский государственный технический университет)

Предложены имитационные модели для оценки качества печати трехмерных объектов с использованием 3D-принтера и 3D-сканера. Проведены оценки степени соответствия напечатанной 3D-модели ее чертежу при помощи бесконтактного сканирования 3D-модели. Эксперименты проводились при изменении параметров, влияющих на качество печати. Получены численные значения оптимальных параметров печати 3D-модели, позволяющие обеспечить высокую оценку степени соответствия напечатанной 3D-модели ее чертежу, а, следовательно, и высокое качество печати на 3D-принтере.

Ключевые слова: имитационная модель, 3D-принтер, оптимальные параметры печати, анализ.

Введение

Аддитивные технологии – это процесс создания трехмерных объектов любой формы на основе цифровой компьютерной модели этих объектов, спроектированной при помощи САПР. В процессе 3D-печати изделие формируется путем наложения каждого нового слоя материала по требуемой траектории. Данный принцип отличает 3D-печать от традиционных техник механической обработки, большинство которых основано на удалении материала за счет его срезания или сверления (субтрактивные процессы). Объекты, произведенные аддитивно – путем послойного наращивания, могут быть использованы на любой стадии жизненного цикла продукции, начиная от создания предварительных образцов (например, в быстром прототипировании) до полноценного производства (например, в опытном производстве). Они могут дополняться механической обработкой и пост-производственной доработкой.

В настоящее время большинство научно-исследовательских структур и опытных предприятий используют эвристический подход к определению оптимальных параметров печати трехмерных моделей при помощи 3D-принтера, что ведет к увеличению времени выпуска опытных образцов и затрат на их производство. В связи с этим предлагается новый подход к определению данных параметров, базирующийся на использовании имитационного моделирования процесса 3D печати, алгоритма поиска оптимальных параметров, а также дополнительных инструментальных средств в виде бесконтактного сканирования. Предложенный подход позволит ускорить изготов-

ление опытных образцов, а также проведение пусконаладочных работ, в процессе которых используется 3D-печать [1].

Имитационная модель 3D-печати с корректировкой параметров

Для нахождения оптимальных параметров печати 3D-модели по критерию улучшения качества изделия разработана имитационная модель 3D печати на соответствующем аддитивном устройстве (рис. 1) [2].

Рассматриваются следующие параметры 3D печати (настройки 3D-принтера): температура экструдера, скорость печати, диаметр сопла, число микрошагов на 1 мм перемещения печатающей головки.

В предложенном подходе электронная 3D-модель изделия, которое печатается при помощи 3D-принтера, используется в качестве эталона. Полученный на выходе печатного устройства прототип сканируется на 3D-сканере. Далее производится оценка степени соответствия между полученным облаком точек прототипа и эталоном. При необходимости корректируются параметры печати прототипа. И процесс повторяется.

Для оценки степени соответствия прототипа и эталона использовалось программное обеспечение «Модуль оценки степени соответствия объектов и 3D-модели». В основе работы программного обеспечения лежит метод оценки степени сходства трехмерных объектов, а также методы формального анализа и анализа с использованием аппарата искусственных нейронных сетей. Метод оценки степени сходства трехмерных объектов опирается на воксельную форму представления трехмерных объектов – комбинацию из множества минимальных кубических элементов объема или вокселей. Такие элементы обладают определенным набором свойств, например, цвет или прозрачность, которые аналогичны пикселям, составляющим растровое двумерное изображение, а в данном случае составляющие модель трехмерного объекта. В отличие от растровых двумерных изображений работа с трехмерными основывается на методе геометрического сравнения [3].

Общий принцип функционирования данного метода заключается в приведении эталонного объекта

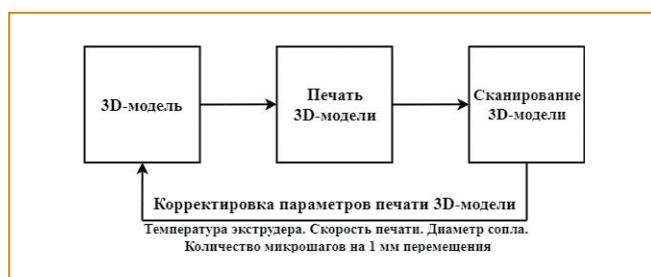


Рис. 1. Структура процесса 3D-печати с корректировкой параметров

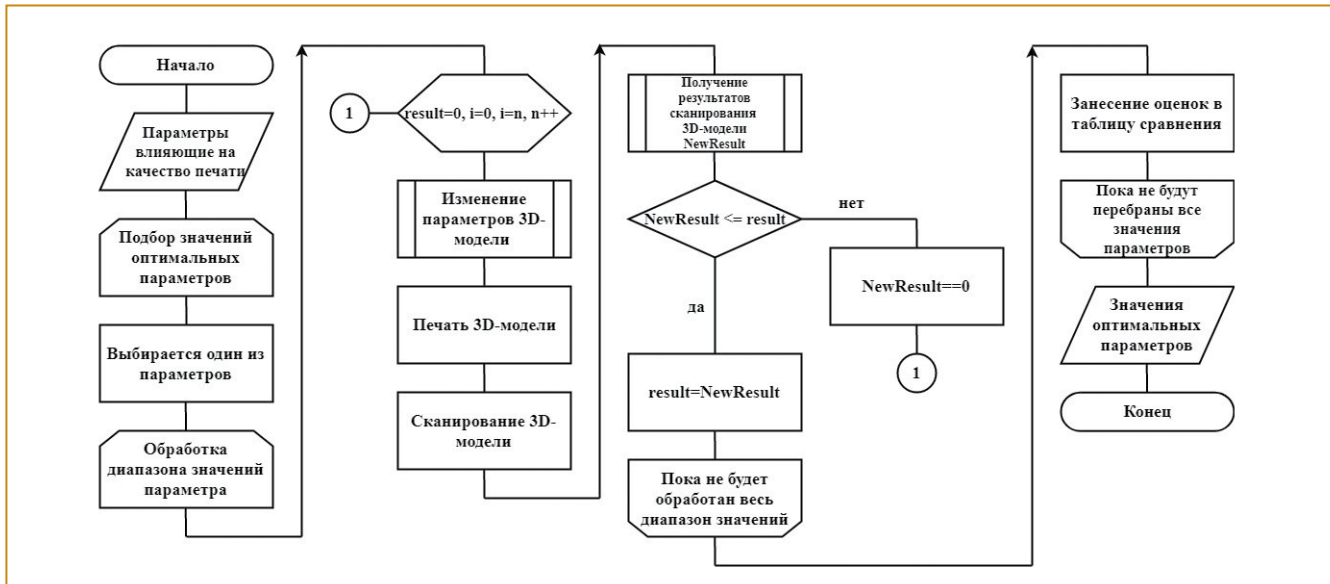


Рис. 2. Алгоритм поиска оптимальных настроек 3D-принтера

к виду воксельного массива, чтобы полученный воксельный массив включал только те воксели, в пределах которых находится какая-либо часть исходной 3D-модели. В итоге будет получен массив вокселей, скомбинированный таким образом, чтобы с некоторой точностью, определяющей размер, а, следовательно, и числом вокселей полученного массива, повторить форму исходного эталонного объекта [4].

Изначально объект для сравнения с эталонной моделью представлен в виде облака точек, в общем случае неоднозначного, содержащего дефекты и шумы, и повторяет форму сканированного фактического объекта. Далее выполняется отсеечение помех в облаке точек, удаленных от точки с координатами, равными среднему значению координат всех точек сетки, более чем на 1,5 среднеквадратичного отклонения. После масштабирования и совмещения в пространстве сравниваемых объектов значительная часть точек облака окажется в пределах вокселей массива, соответствующего эталонному объекту. Вследствие последней операции сделан вывод, что часть эталонной модели, представленная такими вокселями, присутствует в облаке точек, а, следовательно, и в фактическом объекте.

Предлагаемый метод нахождения оптимальных параметров печати 3D-модели [5] включает два этапа:

- подготовительный, на котором осуществляется формирование воксельного массива по исходной эталонной трехмерной модели, отсеечение помех в исходном облаке точек, масштабирование и наложение сравниваемых объектов;
- этап анализа, на котором осуществляется анализ присутствия точек облака в пределах вокселей массива, подсчет «существующих» вокселей и нахождение

соотношения числа «существующих» вокселей к общему числу вокселей в массиве, что и является мерой соответствия сравниваемых объектов.

Предлагаемые метод сравнения трехмерных объектов и мера их сходства обладают рядом преимуществ:

- легкость интерпретации результатов;
- мера присутствия эталона в результатах сканирования фактического объекта;
- легкость визуализации результатов применения и в некоторой степени устойчивость к помехам в облаке точек, так как при условиях относительно правильного наложения сравниваемых объектов друг на друга возможные шумовые точки, оказавшись за пределами вокселей массива, не будут учитываться;
- возможность учета не шумовой точки облака, в условиях некоторого возможного случайного отклонения значений ее координат (в пределах размера вокселя) [6, 7].

Описание экспериментов и обсуждение результатов

Целью исследования в данной работе является нахождение оптимальных параметров печати (настроек 3D-принтера) трехмерных объектов при помощи имитационной модели и алгоритма, структура которого представлена на рис. 2.

Проводимые эксперименты включали процесс печати пластиком типа ABS трехмерной модели – «калибровочный куб» с размерами сторон 20x20x20 мм при различных настройках принтера и параметрах печати трехмерной модели. Параметры печати модели задавались в программе-слайсере¹. Далее осуществлялось бесконтактное сканирование напечатанных трехмерных моделей сканером Cicolp [1] для получения

¹ Программы слайсеры нарезают объект на слои, из которых 3D-принтер создает физическую модель. Результат работы слайсера — G-код, в котором отражены все параметры печати.

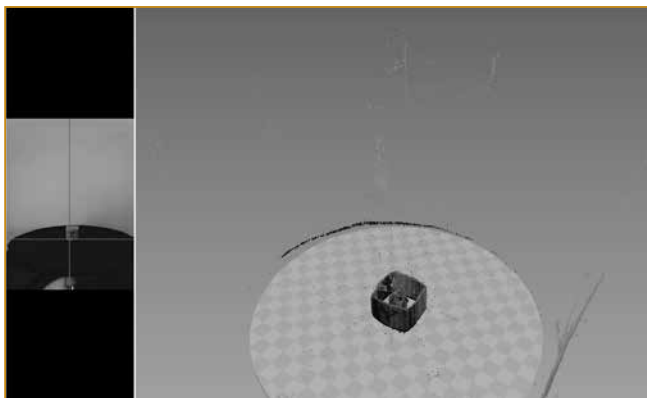


Рис. 3. Фрагмент процесса сканирования модели

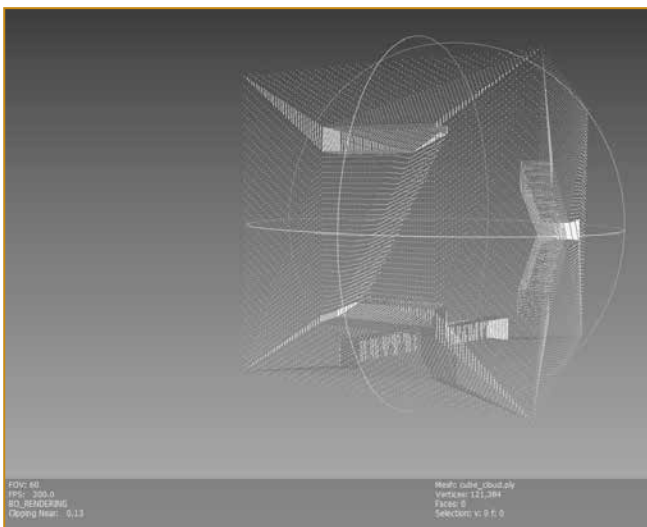


Рис. 4. Воксельная модель куба после фильтрации «шумов»

оценки степени соответствия с эталоном. В результате было получено облако точек – воксельная модель куба (рис. 3). Характеристики используемого в эксперименте пластика представлены [8, 9].

Полученная модель в виде воксельных точек не позволяет использовать ее в чистом виде для оценки сходства, так как она имеет множество шумовых

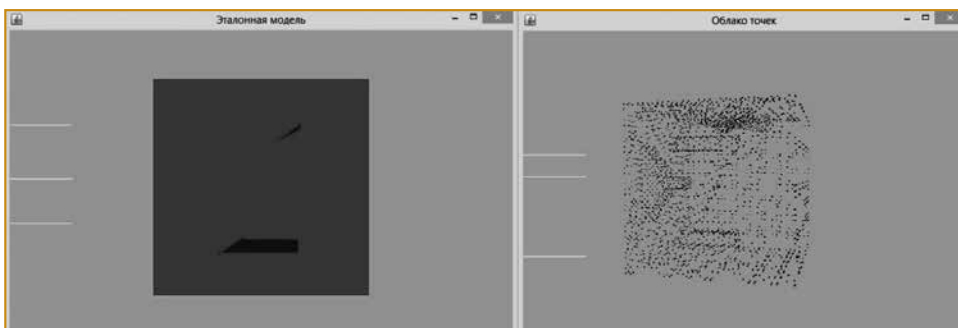


Рис. 5. Работа ПО «Модуль оценки соответствия объектов и 3D-модели»

Мысленно человек может только воспроизвести сложную информацию. Движение или течение, или изменение перспективы важнее, чем статическое изображение, каким бы красивым оно не было.

Алан Перлис

компонентов. Эти «шумы» появляются в результате влияния различных физических факторов на процесс сканирования, таких как частицы пыли, помехи, возникающие при освещении объекта и др. Для работы с полученной моделью лишние точки необходимо удалить из воксельного облака данных, а также произвести фильтрацию и сглаживание точек облака методом заполнения пустого пространства между слишком удаленными точками для последующего преобразования данного облака точек в mesh-файл² [6] и работы с ним.

После обработки первоначального облака точек – его фильтрации и заполнения пустого пространства между точками с использованием программного обеспечения MeshLab – было получено облако точек (рис. 4), которое позволяет произвести оценку соответствия с эталоном.

Далее производился анализ степени соответствия искомой модели и полученного после сканирования облака точек. Работа программного обеспечения «Модуль оценки соответствия объектов и 3D-модели» представлена на рис. 5.

Результаты экспериментов, представленные в табл. 1-4, отражают оптимальные параметры печати модели как для 3D-принтера, так и для подготовки к печати в программе-слайсере.

В первом эксперименте (табл. 1) изменяется температура экструдера при следующих фиксированных параметрах:

- скорость печати – 60 мм/с;
- число микрошагов на 1 мм передвижения печатающей головки – 80 микрошагов;
- диаметр сопла – 0,3 мм.

На рис. 6 видно, что максимальное соответствие трехмерной модели эталону наблюдается при температуре печати 245 °С.

² Mesh-файл – это полигональный файл (файл-сетка). При полигональном проектировании границы деталей определяются вручную: вводятся координаты точек, которыми ограничивается геометрия детали, точки соединяются ребрами, ребра образуют грани, а грани – поверхности. Файлы достаточно примитивны, но до сих пор активно используются как результат сканирования или расчетов и читаются всеми распространенными САПР.

Таблица 1. Сравнение степени соответствия 3D-модели эталону при изменении температуры

№	Температура t, °C						
	220	225	230	235	240	245	250
1	91%	91%	90%	93%	97%	99%	96%
2	91%	92%	91%	95%	95%	96%	98%
3	90%	90%	90%	91%	99%	98%	95%
4	93%	91%	93%	92%	99%	99%	95%

Таблица 2. Сравнение степени соответствия 3D-модели эталону при изменении диаметра сопла

№	Диаметр сопла D, мм			
	0,3	0,4	0,5	0,6
1	99%	98%	98%	97%
2	99%	99%	98%	98%
3	98%	98%	98%	96%
4	99%	97%	97%	97%

Таблица 3. Сравнение степени соответствия 3D-модели эталону при изменении скорости печати

№	Скорость печати V, мм/с				
	40	50	60	70	80
1	99%	99%	99%	97%	96%
2	98%	99%	98%	99%	98%
3	99%	99%	99%	98%	95%
4	99%	98%	99%	98%	95%

Таблица 4. Сравнение степени соответствия 3D-модели эталону при изменении числа микрошагов

№	Число микрошагов, ед.				
	60	70	80	90	100
1	98%	98%	99%	97%	96%
2	95%	97%	99%	99%	95%
3	96%	99%	98%	98%	97%
4	98%	99%	99%	98%	97%

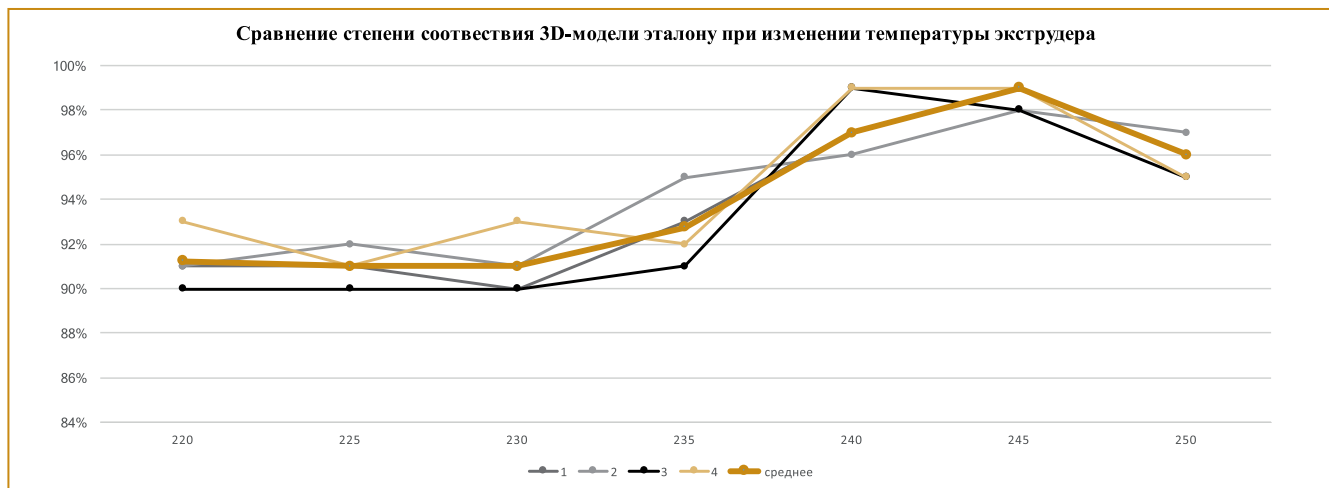


Рис. 6. Сравнение степени соответствия прототипа эталону при изменении температуры экструдера

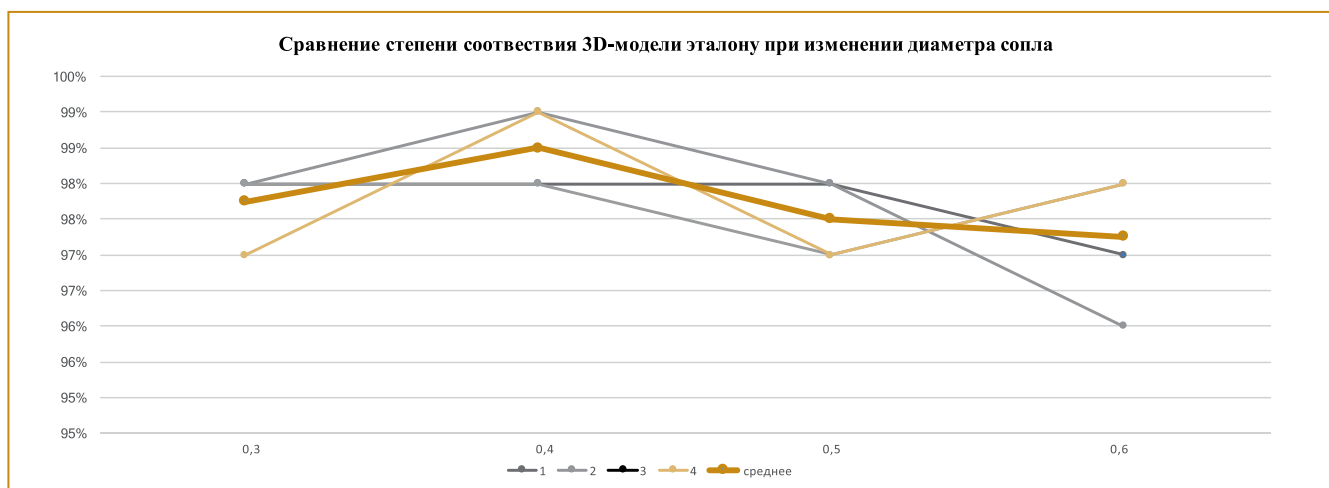


Рис. 7. Сравнение степени соответствия прототипа эталону при изменении диаметра сопла

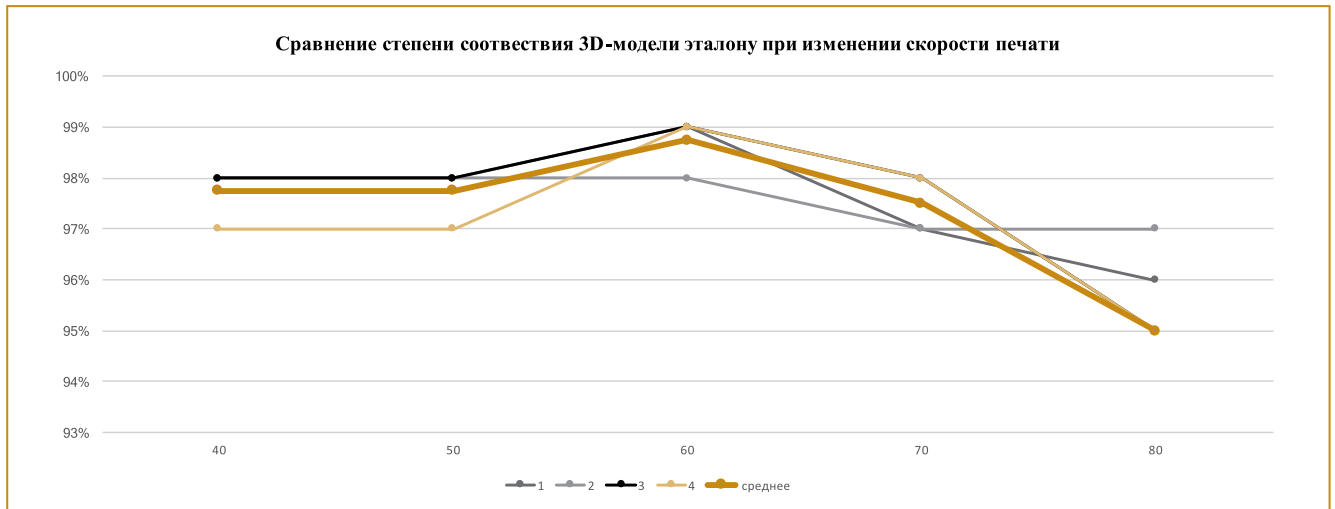


Рис. 8. Сравнение степени соответствия прототипа эталону при изменении скорости печати

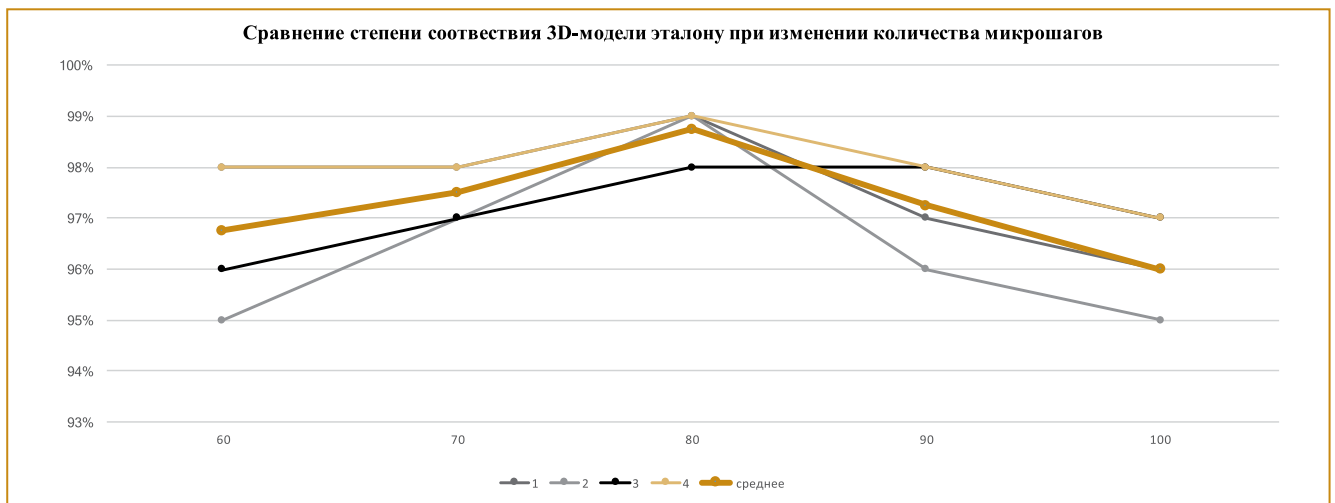


Рис. 9. График изменения степени соответствия 3D-модели эталону при изменении числа микрошагов на 1 мм перемещения печатающей головки

Во втором эксперименте (табл. 2) изменяется диаметр сопла при фиксированных параметрах:

- скорость печати – 60 мм/с.;
- число микрошагов на 1 мм передвижения печатающей головки – 80 микрошагов;
- температура экструдера – 245 °С.

Результаты эксперимента (рис. 7) показали, что наиболее подходит для печати сопло с диаметром 0,4 мм.

Отметим, что рассматриваемые диаметры сопел используются при печати пластиковым прутом диаметром 1,75 мм. При использовании пластикового прутка для печати диаметром 3 мм значение оптимального диаметра сопла может отличаться [1].

Данное замечание справедливо для всех экспериментов, представленных в данной работе. Проведение экспериментов с использованием пластикового прутка диаметром 1,75 мм обусловлено наиболее широким использованием этого диаметра прутка в 3D-печати.

В третьем эксперименте была исследована скорость печати, обеспечивающая наилучшее качество печати прототипируемого объекта (табл. 3, рис. 8). Фиксированные параметры: температура сопла, диаметр сопла и число микрошагов. Эксперимент показал, что при снижении скорости печати увеличивается ее точность, а как следствие и качество.

В следующем эксперименте исследовалось влияние числа микрошагов на 1 мм передвижения экструдера. Неизменными параметрами оставались – температура, скорость печати, диаметр сопла. Из результатов эксперимента (табл. 7, рис. 9) видно, что большое увеличение или уменьшение числа микрошагов приводит к ухудшению качества печати модели. При большом числе микрошагов слои плохо спаиваются, а при их уменьшении, наоборот, предыдущий слой не успевает остывать и происходит «перелив» пластика.

Заключение

Представленные эксперименты показали, что при используемом прутке толщиной 1,75 мм, толщине слоя наплавки 0,2 мм производителя FDplast наилучшими параметрами печати 3D-модели будут являться следующие:

- скорость печати – 60 мм/с.;
- число микрошагов на 1 мм перемещения печатающей головки экструдера – 80 микрошагов;
- температура экструдера – 245 °С;
- диаметр сопла – 0,4 мм.

Основным недостатком описанного метода является наличие большого «шума» в облаке точек, сканируемой модели, что усложняет последующую работу с ним. Появляется необходимость дополнительной фильтрации «шумов» и удалении не нужных точек фонового пространства, на котором происходило сканирование. Для решения данной проблемы в дальнейшем предполагается разработка математического метода, который позволит более эффективно работать с массивами точек объектов, полученными путем бесконтактного сканирования.

Список литературы

1. *Блохин А. В.* Метод настройки 3D-принтера и выбор оптимальных параметров для улучшения качества 3D печати [Текст] / А. В. Блохин, А. А. Сапилова, А. А. Приемко, Н. Р. Стороженко, А. Р. Фахрутдинов // Информационные технологии в науке и производстве: Тр. IV Всероссийской

молодежной науч.-техн. конф. / ОмГТУ. – Омск, 2019. – С. 9-16.

2. *Строгалева В. П.* Имитационное моделирование / В.П. Строгалева, И.О. Толкачева. МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2018. 296 с.
3. *Fakhrudinov A., Tyunkov D., Gritsay A., Ventsel V., Chervenichuk Ig., Blokhin A.* Application of the formal order analysis method in assessing the degree of compliance of models of three-dimensional objects // Oil and Gas engineering: Aip conference proceedings. – 2019. – V. 2141, P. 050003-1–050003-9.
4. Трехмерная фотограмметрия, или От фотографии к 3D-модели [Электронный ресурс]: САПР и графика. – Электрон. журн. – КомпьютерПресс, 2016. – Режим доступа: <https://sapr.ru/article/25136>
5. *Vanek J., Galicia J. A. G., Benes B., Mech R., Carr N., Stava O. and Miller G S* 2014 Packmerger: a 3D print volume optimizer (Great Britain: John Wiley & Sons, Incorporated). pp. 322-332.
6. *Дышкант Н. Ф.* Эффективные алгоритмы сравнения поверхностей, заданных облаками точек [Текст] / Н. Ф. Дышкант. – Москва: Московский гос. университет им. М. В. Ломоносова, 2011. – 139 с.
7. *Golovanov N. N.* 2002 Geometric modeling (Moscow: Publishing House of Physics and Mathematics) p 472.
8. Пластик для 3D-принтера // Московский завод FDplast [Электронный ресурс] <https://www.foplast.ru/plastik-dlya-3d-printera/> (дата обращения: 01.02.2021).
9. *Bukhtoyarov L. D. and Zemlyakov A. A.* 2017 Slic3r slicer layer and strip parameters and their influence on printing 3D models from ABS plastic using Repetier-Host (Voronezh: Voronezh State Forestry University Press) pp 27-31.

Блохин Александр Владимирович – ассистент, Грицай Александр Сергеевич – канд. техн. наук, доцент, Сапилова Алина Анатольевна – инженер, Потапов Виктор Ильич – д-р техн. наук, проф., Червенчук Игорь Владимирович – канд. техн. наук, доцент, Омского государственного технического университета.
E-mail: sasha_bloh@mail.ru alexandr.gritsay@gmail.com alinka.s97@mail.ru cherven-igor@yandex.ru

3D-печать продолжает трансформироваться в производственную технологию

Компания Porsche использовала аддитивную систему печати металлами нового поколения NXG XII 600, ориентированную на серийное производство, от SLM Solutions для создания корпуса силового агрегата E-Drive для передней оси спорткара. В результате топологической оптимизации удалось уменьшить вес детали за счет решетчатых структур, реализовать функционально интегрированные каналы охлаждения, повысить коэффициент жесткости, уменьшить время сборки из-за сокращения числа элементов.

Технологии 3D-печати вновь и вновь подтверждают, что их не стоит воспринимать только как способы прототипирования. Они могут использоваться для крупносерийного производства и производства конечных деталей. В последнем отчете Sculpteo «Состояние рынка 3D-печати» 50% опрошенных подтвердили, что применяли эту технологию для производства конечных изделий; кроме того, впервые за 5 лет снизилась доля применения быстрого прототипирования.

Для крупносерийного производства ключевыми факторами являются масштабируемость и повторяемость. За последние несколько лет аддитивное производство полного цикла было индустриализовано, чтобы обеспечить подходящие условия для решения этих задач. Огромный прогресс был достигнут в области оборудования, но наблюдаются изменения и в области ПО и систем для постобработки. Многие производители таких систем,

например, PostProcess Technologies, DyeMansion и AM-Flow привлекли миллионные средства в разработку своих решений. Но этап постобработки – это лишь часть уравнения, и большая часть работы в 2020 г. была сосредоточена вокруг программного обеспечения.

Программное обеспечение необходимо для нескольких этапов 3D-печати: размещения на платформе, подготовки платформы, исправления файлов, а также для планирования производства. В 2020 г. такие компании, как AMFG, MakerOS или YOURMIND стали важными поставщиками MES (программных решений для управления производством).

Помимо растущего числа решений для рабочих процессов, развиваются и интегрированные инструменты САПР. Например, Netfabb – ПО для автоматизированного управления производством, которое поддерживает оптимизацию производственных процессов, сокращает время изготовления и сводит к минимуму производственные затраты на 3D-печать.

И наконец, продолжает развиваться сегмент проектирования для аддитивного производства (Design for Additive Manufacturing – DfAM). Все большее число программных продуктов использует генеративный дизайн или топологическую оптимизацию с целью оптимизировать функциональные характеристики, стоимость и надежность деталей, изготовленных аддитивным способом.

<https://Blog.Iqb.Ru/Results-2020>