

Литература

1. Палатки: учебное пособие / П. В. Егоров, А. В. Алексеев, В. И. Бурлаков [и др.]. – Вольск: ВВИМО, 2017. – 73 с.
2. Технологические сооружения: учебное пособие. Технологические сооружения вещевой службы / В. Н. Булавин, Д. Ю. Горшенин, П. В. Егоров [и др.]. – Вольск, ВВИМО, 2014. – Ч. 1. – 96 с.
3. Киселев, А. Д. Совершенствование бытового обустройства военнослужащих Вооруженных Сил Российской Федерации в полевых условиях / А. Д. Киселев, Д. А. Киселев // Сборник военно-научных статей ВВИМО. – 2013. – № 33. – С. 33-37.
4. ТУ 858-6088-2011. Палатка каркасная М-10. Технические условия. – М.: Издательство стандартов, 2011. – 18 с.
5. ТУ 858-6087-2011. Палатка каркасная М-30. Технические условия. – М.: Издательство стандартов, 2011. – 19 с.
6. ТУ 8789-009-62963111-2010. Палатка УСТ-56 М. Технические условия. – М.: Издательство стандартов, 2011. – 17 с.
7. ТУ 8789-008-62963111-2010. Палатка УСБ-56 М. Технические условия. – М.: Издательство стандартов, 2011. – 18 с.

УДК 62-503.56

Повышение точности FDM-печати с использованием разработанного приложения

Кольжецов Дмитрий Алексеевич, студент специальности

«Проектирование технологических машин и комплексов»;

Морозова Анастасия Валерьевна, студент специальности

«Проектирование технологических машин и комплексов»;

Токарев Артём Сергеевич, старший преподаватель кафедры

«Технология машиностроения»

Трехгорный технологический институт – филиал Национального исследовательского
ядерного университета «МИФИ», г. Трехгорный

В статье представлены теоретические и экспериментальные исследования, методы, которые использовались для повышения точности процесса 3D-печати методом FDM. Метод конечных элементов был успешно использован для оценки усадки тестовой детали. Ряд проведенных исследований был использован в основе разработки приложения.

В последние годы технология 3D-печати становится всё более актуальной. Существует большое количество различных технологий печати. Одной из самых распространенных технологий является FDM-печать, она нашла широкое применение во многих сферах человеческой деятельности. Вследствие этого встает вопрос о точности напечатанных изделий.

Целью работы является изучение параметров 3D-печати, влияющих на изменение размеров напечатанных деталей и создание приложения, при помощи которого будет достигаться более точная печать.

Исследование, представленное в данной статье, было сосредоточено на повышении точности FDM-печати путем анализа и разработки программного приложения.

Требуемая точность детали на 3D-принтере зависит от точности работы 3D-принтера и параметров печати. Перед эксплуатацией принтер необходимо откалибровать и настроить, тогда работа принтера не будет влиять на точность печати.

Параметров печати большое количество, но на точность размеров влияют два параметра, это диаметр экструзии и усадка [1].

Диаметр экструзии напрямую зависит от диаметра сопла, но не равняется ему. На выходе из сопла диаметр нити увеличивается вследствие перепада давлений, так как пластик в хоттенде и сопле находится под давлением, имея высокую температуру, при выходе пластика из сопла давление становится атмосферным, и пластик начинает остывать [2]. На рис. 1 показан диаметр экструзии теоретический и фактический.

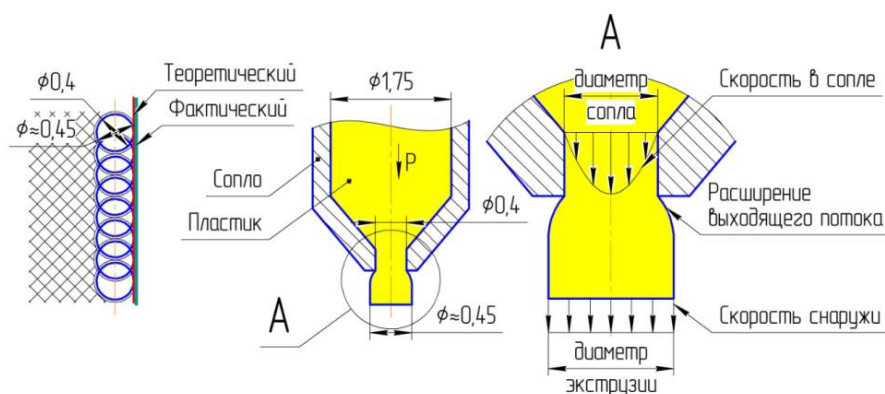


Рис. 1. Диаметр экструзии

К примеру, мы имеем стандартное сопло диаметром 0,4 мм. Диаметр экструзии будет в пределах 0,45 мм, следовательно, нельзя напечатать стенку толщиной 0,8 мм. Стенка будет равняться 0,9 мм, из-за этого произойдет увеличение наружных поверхностей и уменьшение внутренних поверхностей.

Остывание пластика может привести к большому количеству внутренних напряжений и усадке. Одним из способов определения усадки является метод конечных элементов [3].

Метод конечных элементов для оценки усадки калибрующей детали

Для проведения исследования была спроектирована тестовая деталь, имеющая различные диаметры цилиндров и отверстий, размеры которых варьируются в пределах 2-21 мм.

Для оценки усадки спроектированной модели был проведен конечно-элементный анализ в программе Inventor Nastran In-CAD. Для корректного анализа 3D-модели необходимо задать все свойства материала детали. Был внесен PLA пластик с характеристиками, соответствующими пластику, используемому при печати тестовой детали.

Для проведения анализа были наложены кинематические и технологические ограничения. В качестве внешней нагрузки использовалась разница температур между температурой пластика в сопле и температурой окружающей среды. В статическом исследовании была применена разница температур в 40 градусов [4].

По результатам анализа были сделаны следующие выводы: максимальная усадка на детали составляет 0,006 мм, а, следовательно, коэффициент термической усадки данного пластика PLA можно считать равным единице.

Печать и измерение тестовой детали

Так как целью работы является разработка универсальной программы, то все исследования необходимо проводить на разных моделях принтеров. Для этого были выбраны следующие модели принтеров:

- NEO;
- Picaso Designer PRO 250;
- Creality Ender 3.

Разные модели принтеров необходимы для анализа и сравнения результатов измерений. На рис. 4 представлены 3D-принтеры, используемые при исследовании.

В качестве материала использовался PLA пластик диаметром 1,75 мм. Температура печати 210 градусов, температура стола 60 градусов. Использовалось сопло диаметром 0,4 мм. Внутренняя структура имела сетку 45 градусов с плотностью заполнения 30 % [5].

Для измерений использовался штангенциркуль с ценой деления 0,01 мм и микрометр, также с ценой деления 0,01 мм. В табл. 1 и 2 представлены результаты

измерения цилиндрических поверхностей и отверстий тестовой детали, напечатанной на принтере Creality Ender 3.

Таблица 1

Результаты измерений цилиндрических поверхностей, мм.

Теоретический размер	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Действительный размер	2,45	3,43	4,51	5,44	6,34	7,30	8,30	9,25	10,34	11,24
Абсолютное отклонение	0,45	0,43	0,51	0,44	0,34	0,30	0,30	0,25	0,34	0,24
Теоретический размер	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Действительный размер	12,26	13,20	14,18	15,22	16,18	17,13	18,18	19,22	20,14	21,15
Абсолютное отклонение	0,26	0,20	0,18	0,22	0,18	0,13	0,18	0,22	0,14	0,15

Таблица 2

Результаты измерений отверстий, мм.

Теоретический размер	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Действительный размер	1,21	2,21	3,28	4,33	5,46	6,5	7,54	8,55	9,59	10,61
Абсолютное отклонение	0,79	0,79	0,72	0,67	0,54	0,5	0,46	0,45	0,41	0,39
Теоретический размер	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Действительный размер	11,67	12,69	13,65	14,72	15,76	16,75	17,72	18,79	19,8	20,78
Абсолютное отклонение	0,33	0,31	0,35	0,28	0,24	0,25	0,28	0,21	0,2	0,22

Результаты измерения тестовой детали, напечатанной на принтере NEO и Picaso Designer PRO 250, схожи с результатами, приведенными в таблицах выше, и также имеют прямо пропорциональную зависимость отклонений.

На основе этих данных была построена функция регрессии и посчитан коэффициент детерминации (R-квадрат), который является статистической мерой, представляющей насколько близки полученные данные к установленной линии регрессии. Чем ближе к единице коэффициент детерминации, тем лучше модель соответствует данным. Как можно увидеть на рис. 2, в обоих случаях (цилиндрические размеры и размеры отверстия) представлена линейная регрессия, также введена функция и значения R-квадрата. Все эти данные легли в основу для разработки приложения, необходимого для компенсации отклонений.

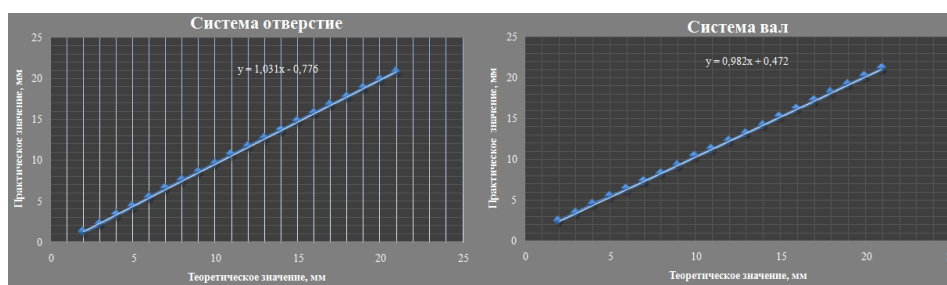


Рис. 2. Графики линейной регрессии для полученных измерений

Разработка приложения

Гипотеза, которая была рассмотрена для приложения, заключалась в том, что отклонения являются приблизительно линейными. Если, к примеру, имеется отклонение 1 мм по одной оси, то это можно исправить, но если отклонение возникает в двух направлениях, как в случае отверстия, то требуется вмешательство какого-либо приложения, которое должно корректировать САПР-модель.

Используя данные, полученные в табл. 1 и 2, была введена функция линейной регрессии, аналогичная той, которая отображена на графике, представленном на рис. 3. Математически линейное уравнение определяется следующим уравнением:

$$y = b \cdot x + a + \varepsilon \quad (1)$$

где x – независимая переменная и представляет собой значение, которое должно быть получено, мм; y – зависимая переменная, представляющая собой значение, которое должно быть введено в САПР-программу, мм; a – свободный член уравнения регрессии; b – коэффициент регрессии, представляющий собой скорость изменения y при изменении x ; ε – член случайной ошибки, представляющий собой разницу между фактическим значением зависимой переменной и ее прогнозируемым значением.

В анализируемом случае это прогнозируемое значение определяется масштабным коэффициентом термической усадки плюс глобальный масштабный коэффициент. Член случайной ошибки можно рассчитать по формуле 2:

$$\varepsilon = k + \frac{D_d - D_n}{D_n} \quad (2)$$

где k – коэффициент термической усадки, $k = 1$; D_d – действительный диаметр, мм; D_n – номинальный диаметр, мм.

На основе полученных уравнений были рассчитаны размеры, которые необходимо откорректировать в САПР-модели для того, чтобы после печати размеры детали были максимально приближены к номинальным. По итогам печати и измерения контрольных деталей появились значительные улучшения в плане отклонений размеров.

Все формулы были сформированы в приложении, рассчитывающем размеры элементов деталей, которые необходимо ввести в САПР-модель. На рис. 3 представлено приложение.

При первом использовании приложения необходимо распечатать тестовую деталь и измерить все диаметры, после чего внести полученные размеры в настройки приложения. На основе полученных данных приложение составит функцию регрессии и рассчитает член случайной ошибки для данного принтера.

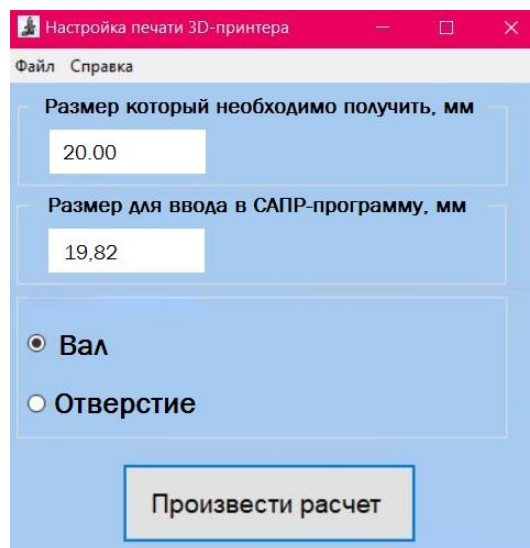


Рис. 3. Приложение

Вывод.

Для улучшения процесса 3D-печати была разработана тестовая деталь. Для оценки термической усадки, возникающей в процессе 3D-печати, был проведен конечно-элементный анализ. Результаты были в дальнейшем использованы для создания программного приложения, позволяющего производить калибровку 3D-модели. Одной из главных особенностей данного приложения является его универсальность.

Измерения, которые были произведены после использования приложения и калибровки детали, доказали, что появились значительные улучшения в точности печати.

Литература

1. Валетов, В. А. Аддитивные технологии (состояние и перспективы): учебное пособие / В. А. Валетов. – СПб: Университет ИТМО, 2015. – 63 с.
2. Нарисава, И. В. Прочность полимерных материалов / И. В. Нарисава. – М.: Химия, 1987. – 400 с.
3. Зленко, М. А. Аддитивные технологии в машиностроении / М. А. Зленко, А. А. Попович. – СПб: Издательство политехнического университета, 2013. – 222 с.
4. Шкуро, А. Е. Технологии и материалы 3D-печати / А. Е. Шкуро, П. С. Кривоногов. – Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2017. – 98 с.
5. Процент заполнения в 3D-печати: сайт / Центр аддитивного производства. – URL: <https://www.st3d.ru/5-zapolnenie/> (дата обращения: 20.02.2021). – Текст: электронный.