

Секция «Математическое моделирование и информационные технологии»

**Сбор и обработка данных для устранения эффектов некорректной экструзии 3D-печати с применением технологий машинного зрения**

Лямин И.С.<sup>1</sup>, Голубков А.В.<sup>2</sup>

1 - Ульяновский государственный педагогический университет имени И.Н. Ульянова, Факультет физико-математического и технологического образования, Ульяновская область, Россия, E-mail: [ulsk3d@yandex.ru](mailto:ulsk3d@yandex.ru); 2 - Ульяновский государственный педагогический университет имени И.Н. Ульянова, Факультет физико-математического и технологического образования, Ульяновская область, Россия, E-mail: [kr8589@gmail.com](mailto:kr8589@gmail.com)

3D-печать методом наплавления термопластичного полимера (FFF) является одной из наиболее популярных технологий в различных сферах, благодаря низкой стоимости и быстроте производства. Однако, несмотря на свои преимущества, данная технология не лишена недостатков, таких как низкая точность и дефекты, включая избыточную и недостаточную экструзию, возникающие при резких изменениях скорости движения печатной головки. Алгоритм Pressure Advance (PA), используемый в прошивке Klipper [3], частично решает эту проблему, позволяя настраивать коэффициент  $K_{PA}$  для компенсации избыточного и недостаточного давления в сопле при изменении скорости движения.

На текущий момент все методики определения  $K_{PA}$  сводятся к печати тестовых образцов при различных значениях данного коэффициента и визуальном определении образца с наименее выраженными дефектами. Это приводит к тому, что на точность определения данного коэффициента большое внимание оказывает человеческий фактор. Кроме того, не учитываются различия в поведении экструзии при переходе с высокой скорости на низкую и в обратном направлении [2].

Основными характеристиками, отражающими некорректность экструзии на том или ином участке траектории является отклонение ширины экструдируемой линии от заданной ширины в ту или иную сторону, а так же протяженность участка, на котором ширина линии имеет отклонения. В данной работе предлагается методика определения данных характеристик, необходимых для определения коэффициента PA, с помощью средств объективного контроля и технологий машинного зрения.

Для автоматизации процесса сбора данных был разработан аппаратно-программный комплекс, включающий 3D-принтер Creality K1 с прошивкой Klipper, планшетный сканер с возможностью цветного сканирования разрешением 600 dpi, а также набор программ на языке Python, предназначенных для генерации G-code для печати тестовых моделей с заданными параметрами и для пакетной обработки сканов этих моделей средствами библиотеки OpenCV [1].

Образец для печати представляет собой набор из 40 параллельных линий, каждая из которых состоит из трех участков длиной 50 мм: участок с быстрой скоростью ( $v_{fast}$ ), участок с медленной скоростью ( $v_{slow}$ ), и вновь участок с быстрой скоростью. При резком изменении скорости печати в связи с инерцией давления в сопле принтера в точке смены скорости на линии возникают дефекты в виде расширения и сужения.

После завершения печати образца осуществляется сканирование печатной платформы с использованием планшетного сканера. Далее полученные изображения подвергаются обработке в разработанном ПО с применением функций машинного зрения (сегментация, определение контуров, размытие, морфологические операции) с целью удаления артефактов, полученных при сканировании. В верхней части рисунка показан результат обработки изображения на данном этапе. После этого средствами библиотеки OpenCV производится получения данных о ширине каждой линии в поперечных сечениях. В нижней части

рисунка изображен график отклонения ширины для данной линии, полученный в результате обработки изображения. На данном графике можно видеть участки с некорректной экструзией, описанные выше. Так, для образца, напечатанного с  $v_{\text{fast}} = 150$  мм/с и  $v_{\text{slow}} = 5$  мм/с, на участке 48–60 мм наблюдается значительное увеличение ширины линии в связи с резким уменьшением скорости печати, а на участке 100–130 мм уменьшение ширины вплоть до образования разрыва из-за резкого увеличения скорости.

В результате реализации предложенной методики и применения разработанного аппаратно-программного комплекса был сформирован датасет, содержащий дискретные данные о ширине каждой линии в сечениях с шагом  $\approx 0,05$  мм. Помимо этого, данный датасет включает в себя набор статистических показателей, таких как средняя ширина линии, максимальное и минимальное значения ширины, медиана ширины, стандартное отклонение, коэффициент вариации, а также площадь полосы пластика и другие параметры.

Полученные данные позволяют выявить участки, в которых величина давления в сопле не соответствует оптимальным значениям для заданных условий печати. Эти данные могут быть применены для разработки математической модели процесса, идентификации ее параметров, а также для динамического вычисления коэффициента Pressure Advance.

### Источники и литература

- 1) Howse J., Minichino J. Learning OpenCV 4 computer vision with Python 3: get to grips with tools, techniques, and algorithms for computer vision and machine learning / UK: Packt Publishing, 2020.
- 2) Tronvoll S., Popp S., Elverum C., Welo T. Investigating pressure advance algorithms for filament-based melt extrusion additive manufacturing: theory, practice and simulations // Rapid Prototyping Journal, 2019. DOI: 10.1108/RPJ-10-2018-0275.
- 3) Kinematics – Klipper documentation: <https://www.klipper3d.org/Kinematics.html?h=pressure#pressure-advance>

### Иллюстрации

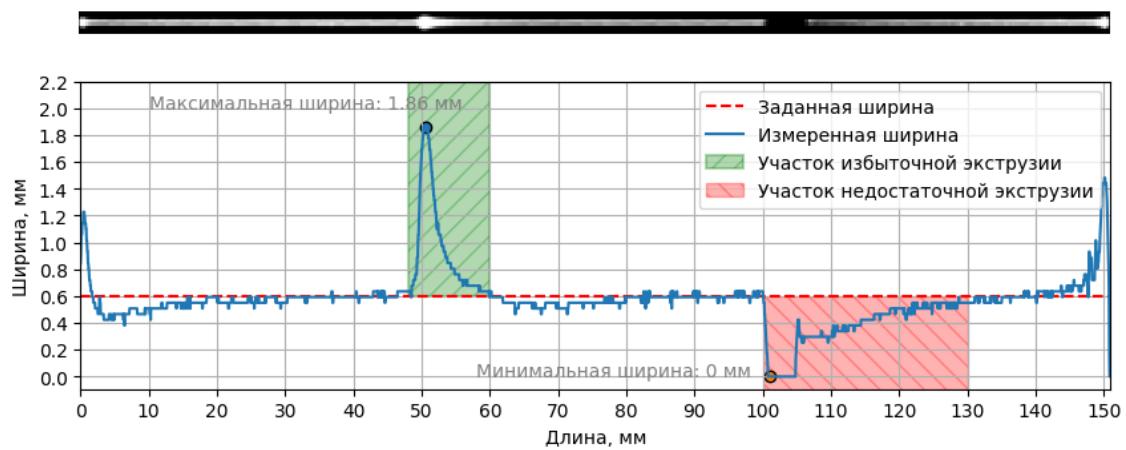


Рис. : Обработанное изображение и график отклонения ширины линии при  $v_{\text{slow}} = 5$  мм/с,  $v_{\text{fast}} = 150$  мм/с.