

## Определение оптимального значения коэффициента потока для повышения качества изделий из АБС-пластика, получаемых методом FDM-печати

### Determination of the optimal value of the flow coefficient to improve quality improvement of ABS-plastic products produced by FDM-printing method

*А.З. САИТГАЛИЕВА, Ю.А. САВИЦКАЯ, А.А. ЮРКИН, К.И. ХАРЛАМОВА*

*A.Z. SAITGALIEVA, YU.A. SAVITSKAYA, A.A. YURKIN, K.I. KHARLAMOVA*

МИРЭА – Российский технологический университет (МИТХТ), Москва, Россия

MIREA – Russian Technological University (MITHT), Moscow, Russia

yurkin.mitht@gmail.com

В настоящее время переработка полимерных композиционных материалов методом FDM-печати получила широкое распространение в различных областях науки и техники, что в первую очередь связано с возможностью индивидуализации и прототипирования изделий без затрат на формующую оснастку. В связи с этим одним из основных требований к продукции, получаемой методами аддитивных технологий, является размерная точность. Таким образом, актуальной задачей является оптимизация технологических параметров процесса FDM-печати с целью повышения размерной точности изделий.

*Ключевые слова:* FDM-печать, АБС-пластик, качество точности, коэффициент

Currently, the processing of polymer composite materials using FDM printing has become widespread in various fields of science and technology, primarily due to the possibility of customization and prototyping of products without the cost of molding tools. In this regard, one of the main requirements for products obtained using additive technologies is dimensional accuracy. Thus, an urgent task is to optimize the technological parameters of the FDM printing process in order to increase the dimensional accuracy of products.

*Keywords:* FDM printing, ABS plastic, accuracy qualification, flux ratio

DOI: 10.35164/0554-2901-2025-06-18-20

#### *Введение*

В последние годы в различных сферах науки и промышленности активно используются изделия, созданные при помощи аддитивных технологий. Аддитивные технологии, представляющие собой совокупность различных методов трехмерной печати, используются в отраслях, дополняя или полностью исключая более материально затратные операции, что позволяет повысить экономическую выгоду за счет сокращения затрат на сырье, а также минимизировать антропогенное загрязнение благодаря снижению количества отходов производства.

Одним из преимуществ данной технологии является разнообразие используемого сырья, такого как металлы, керамика, биоматериалы, а также различные полимерные материалы. В числе методов трехмерной печати, предназначенных для работы с полимерными термопластичными материалами, самым распространенным и универсальным является FDM (Fused Deposition Modeling), представляющий собой получение изделия путем послойного наплавления полимерной нити, также называемой филаментом. Стоит отметить, что очень часто в литературе встречается метод FFF (Fused Filament Fabrication), практически полностью аналогичный и созданный проектом RepRap [1], чтобы обойти патентные ограничения названия FDM от компании Stratasys (США) – создателя этой технологии. По нормам патентного права США срок действия патента на FDM истек в 2009 году, и сегодня использование аббревиатуры FFF встречается все реже [2].

На сегодняшний день по технологии FDM возможно производить изделия из огромного количества полимерных материалов, в том числе и из суперконструкционных, что позволяет не только заменить изделия из особых сплавов металлов, но и создавать новые высокоэффективные узлы оборудования, работающие в экстремальных условиях.

Однако, несмотря на все преимущества трехмерной FDM-печати, изделия, полученные данным методом, зачастую уступают продуктам классических методов переработки термопластов по

целому ряду параметров, что обусловлено в первую очередь сложной внутренней структурой, образованной большим количеством слоев. Сложный комплексный характер внутренней структуры изделий и их внешней поверхности приводит в том числе к снижению комплекса эксплуатационных свойств по сравнению с изделиями традиционных методов переработки пластмасс, несоответствию геометрии детали заданным на этапе моделирования, шероховатости поверхности и прочему. Также зачастую при охлаждении изделия во время и после процесса трехмерной печати происходит множество деформационных процессов, в первую очередь связанных с усадкой полимерного материала, что приводит не только к дефектам геометрии, которые можно классифицировать как коробление, но и к неравномерному изменению размеров различных элементов изделия, трещинам, деламинации, недостаточной адгезии слоев.

Как и в любом процессе переработки пластических масс, в FDM 3D печати рассмотрение причин возникновения дефектов и способы их устранения являются критически важными элементами и требуют тщательной разработки теоретической базы с использованием выявленных эмпирических закономерностей процесса. В настоящее время мы можем наблюдать огромное количество различных способов практической проверки эмпирических закономерностей процесса 3D печати с использованием стандартных изделий или алгоритмов. В то же время использование стандартных изделий и алгоритмов их получения не позволяет получить что-то большее, нежели эмпирически подобранные граничные значения технологических параметров трехмерной печати, позволяющие получить изделия без визуально наблюдаемых дефектов.

Контроль и правильный выбор технологических параметров процесса трехмерной FDM-печати строго необходимы для получения изделий не только без обнаруживаемых визуально дефектов, но и с необходимыми физико-механическими свойствами. В числе основных технологических параметров процесса: диаметр филамента, геометрия слоя (ширина и высота), скорость

печати (линейная скорость подачи филамента), объемный расход полимера (объемная скорость).

В то же время в программе-слайсере повлиять мы можем не на все приведенные технологические параметры. Так, линейная скорость подачи филамента легко регулируется в настройках, а объемный расход полимерного материала имеет только верхнюю границу, и регулировка его происходит через так называемый «коэффициент потока» (*flow*). И даже регулируя имеющиеся технологические параметры процесса, прямую численную корреляцию с физико-механическими и эксплуатационными свойствами изделия чаще всего указать невозможно. Изменение технологических параметров печати с целью улучшения выходных показателей данных приводит к повышению качества получаемой детали, т.е. внешнего вида, размерной точности, физико-механических и эксплуатационных свойств, и называется их оптимизацией.

Определение эксплуатационных (физико-механических) характеристик различных марок ABS-пластика в зависимости от изменения отдельных параметров печати и дальнейший выбор их оптимальных значений приведен в ряде работ [3–9].

В данных статьях описывались зависимости следующих характеристик готового изделия: соответствие заданным размерам, прочность при изгибе и растяжении, коэффициенты трения и износа, средняя шероховатость поверхности; при изменении параметров печати: коэффициента потока, скорости подачи материала, процента заполнения и прочих.

В данной работе приведены результаты исследования зависимостей физико-механических характеристик образцов, напечатанных при различном коэффициенте потока.

#### Объекты и методы исследования

В исследовании использовался филамент, изготовленный в экструдере Scientific (Labtech Engeneering Co. Ltd., Таиланд), с диаметром шнека 16 мм и  $L/D = 20$ , при 220°C из ABS-пластика марки ABS PA 757 (CHIMEI, Тайвань).

Для печати образцов (стандартных лопаток для испытаний) использовали 3D-принтер Anuform XL250-G3 (Total Z, Россия). Были изготовлены лопатки типа 5 при  $T_{\text{стола}} = 110^\circ\text{C}$  и  $T_{\text{сопла}} = 230^\circ\text{C}$ , скорость печати – 60 мм/с, высота слоя – 0,2 мм; ширина слоя – 0,4 мм.

Плотность образцов определяли методом гидростатического взвешивания по ГОСТ 15139-69.

Оценку эксплуатационных свойств образцов из ABS PA 757 проводили с использованием универсальной испытательной машины И11М (ООО «ТОЧПРИБОР-КБ», Россия) по ГОСТ 11262-2017 со скоростью 50 мм/мин.

#### Экспериментальная часть

Для определения оптимальных технологических параметров процесса трехмерной FDM-печати использовали тестовое изделие «температурная башня», представляющее собой несколько слоев, напечатанных последовательно с изменением температуры в заданном интервале. Модель башни включает различные сегменты, такие как углы, нависания, мосты, предоставляющие возможность визуально отследить качество печати при разных температурах. В результате использования такой модели для ABS PA 757 была выявлена оптимальная температура – 230°C при технологических параметрах: скорость печати – 60 мм/с, высота слоя – 0,2 мм, ширина слоя – 0,4 мм. Это подтверждается отсутствием визуальных дефектов у напечатанных элементов.

Для исследования влияния технологических параметров процесса FDM-печати на эксплуатационные свойства изделий были изготовлены стандартные образцы типа 5 (ГОСТ 11262–2017) с высотой и шириной слоя 0,2 и 0,4 мм соответственно, с шестью ограждающими конструкциями без заполнения. Данная структура заметно отличается от той, которая характерна для большинства изделий, изготовленных по методу FDM-печати. Обычно образцы состоят из верхней и нижней крышки, двух ограждающих конструкций и внутреннего заполнения по определенной схеме, меняющейся в зависимости от процента заполнения внутреннего пространства изделия полимером. В то же время подобные изделия позволяют увеличить прочность при растяжении из-за определенной ориентации слоев.

Одним из важнейших технологических параметров печати является эмпирический параметр «коэффициент потока» ( $k_f$ ). Он задается в программном обеспечении (слайсере), подготавливающим 3D-модель к печати. Коэффициент потока характеризует соотношение поданного и необходимого расхода филамента, что, в свою очередь, влияет на реологическое поведение полимера. Оценить изменение поведения материала при печати с разными коэффициентами потока позволяют размерно-массовые характеристики, которые показывают степень отклонения свойств изделия от заданных. Это может помочь при определении оптимальных технологических параметров и косвенного анализа реологии полимера в слое.

На рис. 1 показана возрастающая зависимость массы от коэффициента потока, выходящая на плато при достижении значения, равного 1,1. При переходе от значения коэффициента потока 0,85 к значению, равному 1,1, масса возрастает на 12% (с 1,55 г до 1,74 г), достигая теоретического значения. При дальнейшем увеличении объемного расхода поступающего материала до значения коэффициента потока 1,45 происходит незначительный рост массы – на 4,6% (до 1,82 г), что указывает на переизбыток материала, который может привести к изменению внешних размеров образца.

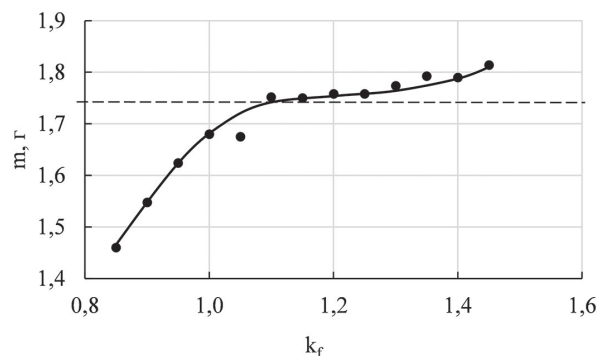


Рис. 1. Зависимость массы образца от коэффициента потока.

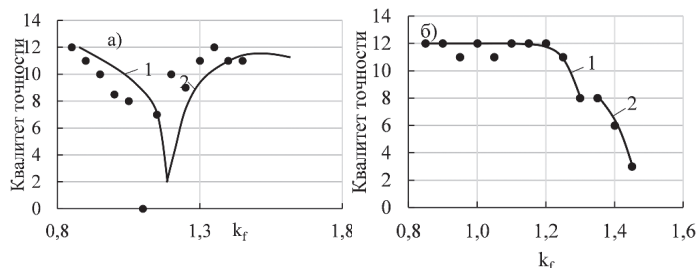


Рис. 2. Зависимость квалитетов точности образцов по ширине (а) и толщине (б) от коэффициента потока при: 1 – отрицательном допуске, 2 – положительном допуске.

Для проверки гипотезы об изменении размерной точности при увеличении коэффициента потока выше значения 1,1 были рассчитаны квалитеты точности.

Квалитеты точности характеризуют степень отклонения размеров от заданных. Для оценки влияния коэффициента потока они были рассмотрены относительно двух отдельных размерных параметров. Чем меньше квалитет точности, тем больше изделие соответствует заданным размерам. При рассмотрении ширины образцов (рис. 2а) идет снижение значения квалитета точности по отрицательному допуску на 33% (с 12 до 8) до значения коэффициента потока 1,05. В точке, где коэффициент потока равен 1,1, достигается заданный размер. При дальнейшем увеличении поступающего количества материала идет рост значения квалитета точности по положительному допуску на 36% (коэффициенты потока от 1,15 до 1,45, с 7 до 11 квалитета). В случае размерной точности по толщине (рис. 2б) наблюдается стабильная усадка на всем рассматриваемом промежутке коэффициентов потока. До достижения значения коэффициента потока 1,2 квалитет точности по отрицательному допуску остается неизменным, затем при переходе к значению 1,3 идет уменьшение отклонения на 33% (с IT12 до IT8). После дальнейшего роста объемного расхода объем материала становится больше. Из-за этого усадка происходит иным образом, и график переходит в область положительных допусков, где продолжается снижение значения квалитета точности на 62% (с IT8 до IT 3).

Так как усадка изделия проходит по-разному для ширины и толщины, причём в случае второго размерного параметра коэффициент потока 1,1 не обеспечивает наилучшего результата, можно предположить, что при изменении коэффициента потока  $k_f$  меняется также и внутренняя структура изделия, и именно совокупность изменений размеров внешней составляющей и внутренних пор даёт достижение теоретического значения по массе в точке 1,1.

Для проверки данной теории была определена плотность изделий методом гидростатического взвешивания для филамента и образцов с целью сравнения. До значения коэффициента потока 1,0 наблюдается рост плотности на 42,9% (с 0,7 г/см<sup>3</sup> до 1,0 г/см<sup>3</sup>), затем кривая выходит на плато на уровне значения плотности, близком к паспортному.

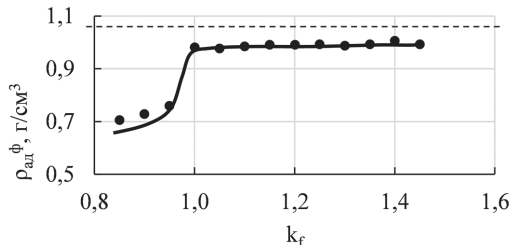


Рис. 3. Зависимость плотности образцов от величины коэффициента потока.

Исходя из полученных экспериментальных данных, можно предположить, что между слоями напечатанных образцов существуют пустоты, постепенно уменьшающиеся с ростом коэффициента потока. Это должно влиять на комплекс эксплуатационных свойств. Экспериментально полученная зависимость приведена на рис. 4. По данным рис. 4, прочность при растяжении увеличивается на 100% (с 24 МПа до 48 МПа) по мере достижения коэффициента потока значения 1,0, а затем выходит на плато с двумя пиками (коэффициент потока 1,0 и 1,35). Подобный разброс значений может быть связан с тем, что площадь сечения при расчете прочности берется как у монолитного изделия, не учитывая пустот между слоями.

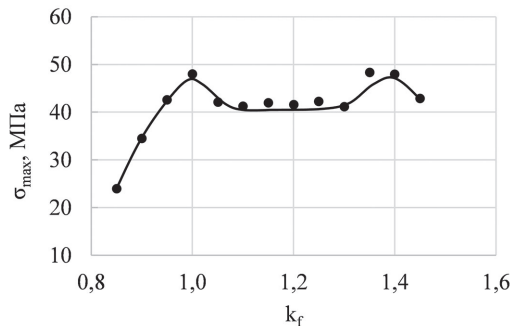


Рис. 4. Зависимость прочности при растяжении напечатанных образцов от величины коэффициента потока.

#### Выводы

Определено, что при увеличении коэффициента потока  $k_f$  с 0,9 до 1,1 масса образца возрастает на 12% и достигает своего теоретического значения. Дальнейшее возрастание массы при увеличении  $k_f$  до 1,45 незначительно и составляет 4,6%.

Показано, что переход из области отрицательных допусков в область положительных для ширины происходит при коэффициенте потока  $k_f$ , равном 1,1, а для толщины – при равном приблизительно 1,3.

Определено, что плотность образцов возрастает на 42,9% при достижении коэффициентом потока значения 1,0, и наблюдается её выход на плато.

Установлено, что прочность при растяжении образцов возрастает до значения коэффициента потока 1,1 и далее выходит на плато, наблюдаемые пики могут быть результатом погрешности измерения.

Определено, что для повышения качества изготовления изделий методом трехмерной FDM-печати из ABS PA 757 на этапе моделирования необходимо использовать значения  $k_f$  в диапазоне от 1,1 до 1,2.

#### Литература

1. Боуэр А. Проект RepRap [сайт]. URL: <https://reprap.org> (дата обращения: 12.05.2025).
2. Крамп С.С. Method and apparatus for producing parts by selective deposition of a fused thermoplastic material: пат. 4,575,330 США: МПК В29С 67/00; заявл. 1984; опубл. 1986.
3. Portoacă A., Ripeanu R., Diniță A., Tănase M. Optimization of 3D Printing Parameters for Enhanced Surface Quality and Wear Resistance // *Polymers*. 2023. Vol. 15, N16. P. 3419–3441. DOI: 10.3390/polym15163419.
4. Pivar M., Gregor-Svetec D., Muck D. Effect of Printing Process Parameters on the Shape Transformation Capability of 3D Printed Structures // *Polymers*. 2021. Vol. 14, N1. P. 117–139. DOI: 10.3390/polym14010117.
5. Mushtaq R., Iqbal A., Wang Y., Rehman M., Petra M. Investigation and Optimization of Effects of 3D Printer Process Parameters on Performance Parameters // *Materials*. 2023. Vol. 16, N9. P. 3392–3414. DOI: 10.3390/ma16093392.
6. Кондрашов С.В., Пыхтин А.А., Ларионов С.А., Сорокин А.Е. Влияние технологических режимов FDM-печати и состава используемых материалов на физико-механические характеристики FDM-моделей (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2019. №10. С. 34–49.
7. Samykano M., Selvamani S., Kadirgama K., Ngui W., Kanagaraj G., Sudhakar K. Mechanical property of FDM printed ABS: influence of printing parameters // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019. Vol. 102, N9–12. P. 2779–2796. DOI: 10.1007/s00170-019-03313-0.
8. He F., Khan M. Effects of Printing Parameters on the Fatigue Behaviour of 3D-Printed ABS under Dynamic Thermo-Mechanical Loads // *Polymers*. 2021. Vol. 13, N 14. P. 2362–2384. DOI: 10.3390/polym13142362.
9. Al-Ghamdi K. Sustainable FDM additive manufacturing of ABS components with emphasis on energy minimized and time efficient lightweight construction // *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*. 2019. Vol. 2, N 4. P. 338–345. DOI: 10.1016/j.ijlmm.2019.07.001.