

УДК 630.173.2

Афошин А. А.

(ЛНУ им. В. Даля, г. Луганск, ЛНР, 80508862369@mail.ru)

## ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ НА ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ РАЗМЕРЫ ИЗДЕЛИЙ ПРИ 3D-ПЕЧАТИ ПО FDM-ТЕХНОЛОГИИ

Приведены результаты экспериментальных исследований параметров при 3D-печати по FDM-технологии. Проанализировано влияние скорости на качество изделия. Установлены зависимости изменений геометрических размеров изделия от скорости печати.

**Ключевые слова:** аддитивные технологии, 3D-печать, FDM-технология, параметры режима печати, качество послойной модели.

**Проблема и её связь с научными и практическими задачами.** На современном этапе развития аддитивных технологий (АТ) применяют разнообразные принтеры для 3D-печати. В зависимости от себестоимости и требуемого качества поверхности, а также размерной точности получаемого изделия применяют различные АТ, такие как: SLA, SLS, LOM, DMD, DLP, Ink-Jet, Poly-Jet, FDM и т. д. Данные технологии находят применение в различных сферах промышленности: медицине, строительстве, авиастроении, электронике, машиностроении и т. д. [1].

С точки зрения простоты использования оборудования и доступности материалов FDM-технологии являются наиболее массовыми, при этом их основное применение ограничивается сферой образования, «домашнего» моделирования и развлечения [2].

Исходя из этого, преимущества FDM-технологии целесообразно использовать в отраслях машиностроения, связанных с заготовительным производством [3], где отсутствуют повышенные требования к качеству поверхности, прочности, чистоте поверхности и будут обеспечены необходимые требования к изделию при низкой себестоимости.

**Постановка задачи.** На данный момент в научной и технической литературе нет достаточно обоснованных рекомендаций по технологическим параметрам для режимов печати по FDM-технологии. В связи с этим возникает актуальная потребность в опре-

делении оптимальных технологических параметров для получения изделий по FDM-технологии с характеристиками, обеспечивающими требуемое качество.

**Изложение материала и его результаты.** Под требуемым качеством изделия понимаем соблюдение размеров, чистоту поверхности и отсутствие на ней дефектов в тех пределах, которые заданы на чертеже, в технических условиях [4].

В зависимости от объективно существующих условий на производстве и конструктивно-технологических особенностей самого изделия цена достижения требований по его размерной точности может существенно различаться. В любом случае чем требования выше, т. е. допуск меньше, тем реализованная себестоимость изделия выше, и эта зависимость имеет гиперболический характер. Считается (в среднем), что «рациональная стоимость» технологического допуска достигается при условии, что он составляет порядка  $0,3 \div 0,4$  % от величины номинального размера [5].

На качество печатаемого изделия оказывает влияние множество факторов, среди которых выделим наиболее критичные и сведём результаты в таблицу 1. Среди этих факторов наибольшее воздействие пользователь может оказывать на точность работы механизмов 3D-принтера и точность настроек для 3D-печати.

Наряду с критичными факторами существует совокупность «условно» контролируемых факторов, таких как: механическая

## МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

исправность всех механизмов и элементов принтера, устойчивость стола, на котором располагается модель, выставленная величина зазора между соплом и столом, достаточный обдув модели и т. д. При проведении испытаний данные факторы условно пропускаем.

*Таблица 1*

Критичные факторы для качества печати по FDM-технологии

№	Фактор	Регламентирующий параметр
1	Качество используемого сырья	Свойства сырья регламентируются по ТУ от поставщика (критичный — усадка: при изготовлении изделий 0,4–0,7 %).
2	Точность работы механизмов 3D-принтера	Задаёт производитель, достигается доработкой, а также регулярной ревизией оборудования
3	Точность настроек для 3D-печати	Задаёт пользователь вручную

Современные 3D-принтеры для общего использования могут изменять скорость печати в широком диапазоне, общеизвестными считаются три условных диапазона настроек скорости: от 30 до 50 мм/с, от 80 до 100 мм/с, от 150 мм/с и более.

3D-печать производилась на 3D-принтере TEVO Tarantula i3 с использованием мононити из пластика ABS+ производителя «Стримпласт», поставляемой по ТУ 2291–001–24687042–2016.

Обработка модели для подготовки к печати проводилась в программе Simplify 3D. Для увеличения адгезии материала со столом перед печатью он покрывался связующим клеем на PVP основе. Согласно [6] было напечатано по пять образцов модели «втулка» (см. рис. 1, б) для каждого значения скорости. Печать осуществлялась по следующему режиму: толщину укладываемого слоя нити принимали  $h_{сл} = 100$  мкм, скорость движения сопла экструдера ( $V_c$ ) изменяли от 10 до 150 мм/с, температура окружающей среды комнатная. Параметры режима печати представлены в таблице 2.

*Таблица 2*

Основные контролируемые параметры режима печати по FDM-технологии

№	Объект контроля	Наименование параметра	Применяемое значение параметра	Ед. изм.
	2	3	4	5
1	Материал	Сырьё	полиамид белый	-
2		Диаметр нити	1,75	мм
3	Принтер	Диаметр сопла	0,2	мм
4	Слайсер	Время печати	от 117 до 1410	мин
5		Скорость заполнения модели	от 10 до 150	мм /с
6		Плотность заполнения модели	100	%
7		Толщина стенок	0,1	мм
8		Количество слоёв	от 183224 до 183716	шт.
9		Температура печати: – сопла – стола	240 80	°С
10		Общий вес	3,77	г
11		Расход нити	1252,6	мм

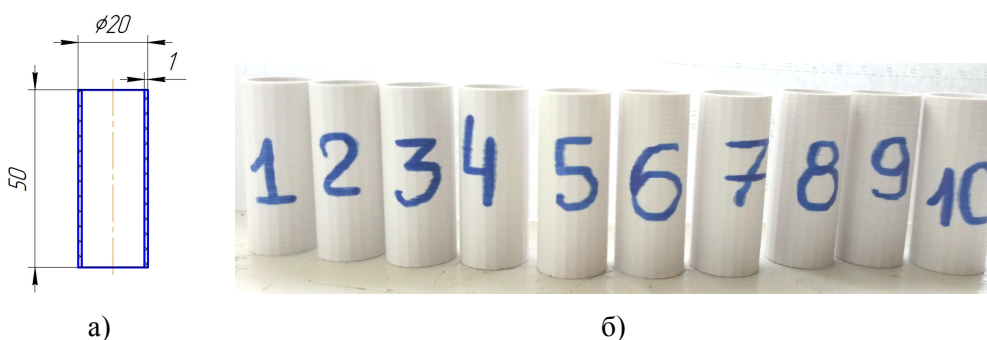


Рисунок 1 Модель «втулка»: а) эскиз модели; б) фото испытуемых образцов

Исследуемая модель представляет собой тонкостенный цилиндр (см. рис. 1, а) со следующими размерами: наружный диаметр ( $D_n$ ) 20 мм, внутренний ( $D_{вн}$ ) — 18 мм, толщина стенки ( $\delta_{ср}$ ) 1 мм, длина изделия ( $l$ ) 50 мм. Заданные линейные и радиальные размеры полученных образцов подвергались замерам и контролю качества, которое оценивалось визуально на гладкость полученной внешней поверхности.

Линейные размеры замерялись штангенциркулем ШЦЦ-I-125-0,01 ГОСТ 166-89, а радиальные — микрометром МК25-I ГОСТ 6507-90.

Замеры проводили согласно [7]. На основании замеров всех образцов были выбраны средние значения размеров, результаты приведены в таблице 3.

Для обработки результатов эксперимента использовали статистический метод средних величин, таким образом были определены

зависимости изменений скорости печати от размеров изделия: длины, наружного и внутреннего диаметров, толщины стенки.

На рисунке 2 представлен график зависимости изменений размеров длины цилиндра от скорости печати.

Таблица 3  
Результаты замеров образцов

Скорость печати	$l$	$D_n$	$D_{вн}$	$\delta_{ср}$
мм/с	мм			
1	2	3	4	5
10	49,82	19,85	17,41	1,40
30	49,75	19,94	17,35	1,43
50	49,79	19,86	17,35	1,43
70	49,79	19,79	17,42	1,40
90	49,84	19,85	17,41	1,42
110	49,74	19,80	17,42	1,42
130	49,78	19,84	17,36	1,41
150	49,75	19,82	17,41	1,40

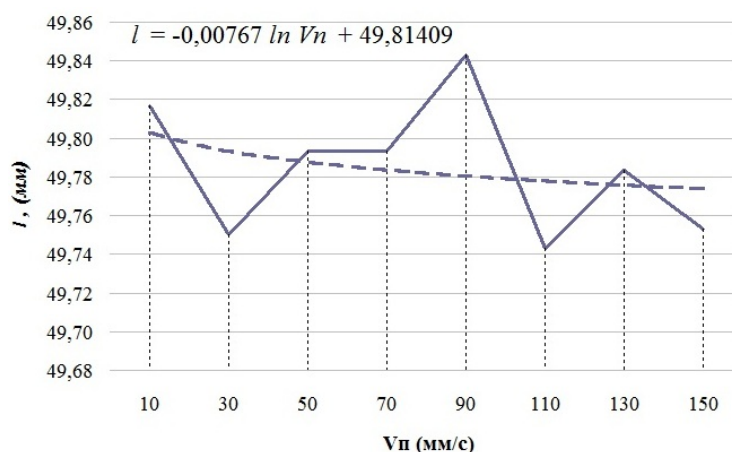


Рисунок 2 График зависимости изменений размеров длины цилиндра от скорости печати

В диапазоне скоростей 10–70 мм/с наблюдаются наибольшие значения погрешности длин цилиндра. В интервале скоростей 70–100 мм/с значения погрешности длин практически подчинены линейному закону. В интервале скоростей 100–150 мм/с получены наименьшие погрешности длины цилиндра.

На рисунке 3 представлен график зависимости размеров наружного диаметра цилиндра от скорости печати.

Полученные эмпирические значения внешних диаметров в диапазоне скоростей от 75 мм/с до 150 мм/с незначительно отличаются относительно измерений значений. Об этом свидетельствуют значения относи-

тельных погрешностей, полученных при сравнении измеренных и эмпирических значений. Наиболее оптимальным значением наружного диаметра является  $D_H = 19,83$  мм.

На рисунке 4, продемонстрирован график зависимости размеров внутреннего диаметра цилиндра от скорости печати.

Эмпирическая функциональная зависимость внутреннего диаметра цилиндра от скорости печати является возрастающей. Наиболее удовлетворительные результаты получены на интервале 70–90 мм/с, оптимальное значение  $D_{вн.} = 17,395$  мм.

На рисунке 5 продемонстрирован график зависимости изменений размеров толщины стенки цилиндра от скорости печати.

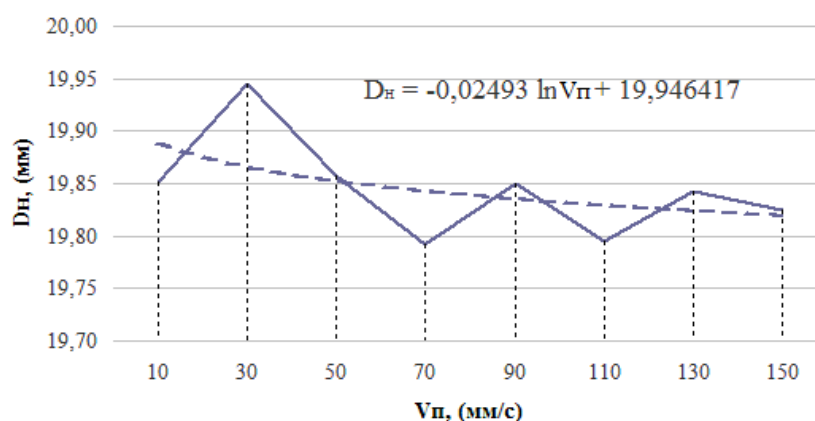


Рисунок 3 График зависимости изменений размеров наружного диаметра цилиндра от скорости печати

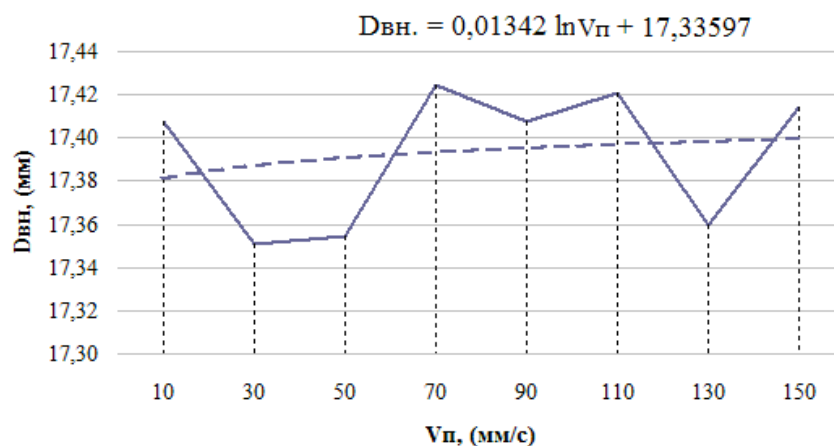


Рисунок 4 График зависимости изменений размеров внутреннего диаметра цилиндра от скорости печати

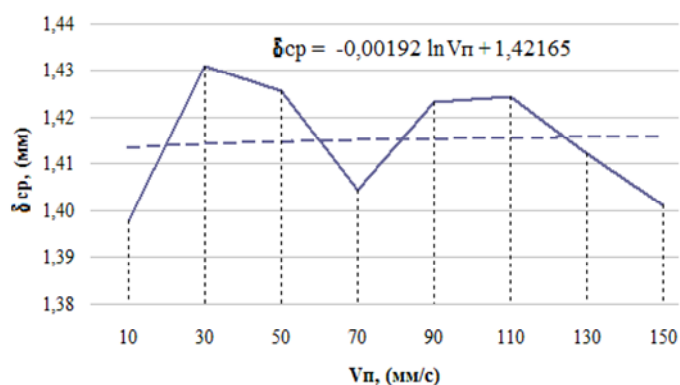


Рисунок 5 График зависимости изменений размеров толщины стенки цилиндра от скорости печати

По полученному графику видно, что наиболее удовлетворительные значения толщины стенки получены в интервале 75–150 мм/с, кривая практически вырождается в прямую, оптимальное значение  $\delta_{ср} = 1,412$  мм.

**Выводы и направление дальнейших исследований.** Определены критичные факторы для качества печати изделия по FDM-технологии, а также ключевые параметры, при управлении которыми можно изменять производительность процесса.

Установлено, что скорость заполнения модели является одним из важных параметров режима печати. В зависимости от требований к получаемой детали необхо-

димо регулировать скорость заполнения модели и тем самым влиять на время технологического процесса.

Определена оптимальная скорость печати, которая составляет 70 мм/с.

Проведены замеры габаритных размеров изделия, напечатанного по FDM-технологии, на основании которых эмпирически определен предел между достаточной скоростью и геометрической точностью размеров.

Установлено, что наиболее существенной зависимостью при замерах являются размеры наружного диаметра изделия.

### Библиографический список

1. ГОСТ Р 57558-2-017. Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы [Текст]. — Введ. 2017-12-01. — М. : Стандартинформ, 2018. — 10 с.
2. Зленко, М. А. Аддитивные технологии в машиностроении [Текст] : пособие для инженеров / М. А. Зленко, М. В. Нагайцев, В. М. Довбыш. — М. : ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015. — 220 с.
3. Корбанов, В. Д. Изготовление модельной оснастки в литейном производстве с применением аддитивных технологий [Текст] / В. Д. Корбанов, А. И. Вальтер // Известия ТулГУ. Технические науки. — 2018. — Вып. 10. — С. 334–338.
4. Невлюдов, И. Ш. Разработка комплексного метода оценки качества пластмассовых деталей [Текст] / И. Ш. Невлюдов, С. В. Сотник, А. В. Фролов, Н. П. Демская // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2017. — Вып. 1. — С. 29–38.
5. Брагинский, В. А. Назначение и выбор технологических допусков изделий из пластмасс [Текст] / В. А. Брагинский // Полимерные материалы. — 2004. — Вып. 9. — С. 12–14.
6. ГОСТ 4651-2014 (ISO 604:2002) Пластмассы. Метод испытания на сжатие [Текст]. — Введ. 2015-03-01. — М. : Стандартинформ, 2014. — 18 с.
7. ГОСТ 33694-2015 Пластмассы. Определение линейных размеров образцов для испытания [Текст]. — Введ. 2017-01-01. — М. : Стандартинформ, 2016. — 5 с.

*Рекомендована к печати д.т.н., проф., зав. каф. ТМиИК ЛНУ им. В. Даля Витренко В. А.,  
к.т.н., доц. каф. АЭС им. Зеленова А.Б. ДонГТУ Карпук И. А.*

*Статья поступила в редакцию 25.08.19.*

**Афошин А. О.** (ЛНУ ім. В. Даля, м. Луганськ, ЛНР, 80508862369@mail.ru)

### **ВПЛИВ ШВИДКОСТІ НА ГЕОМЕТРИЧНІ РОЗМІРИ ВИРОБІВ ПРИ 3D-ДРУЦІ ЗА FDM-ТЕХНОЛОГІЄЮ**

*Наведено результати експериментальних досліджень параметрів при 3D-друці за FDM-технологією. Проаналізовано вплив швидкості на якість виробу. Встановлено залежності змін геометричних розмірів виробу від швидкості друку.*

**Ключові слова:** адитивні технології, 3D-друк, FDM-технологія, параметри режиму друку, якість пошарової моделі.

**Afoshin A. A.** (LNU named after V. Dahl, Lugansk, LPR, 80508862369@mail.ru)

### **RATE INFLUENCE ON GEOMETRIC DIMENSIONS OF PRODUCT AT 3D-PRINTING ON FDM-TECHNOLOGY**

*The results of experimental research of parameters at 3D-printing on FDM-technology are presented. The influence of speed on the product quality is analyzed. The dependencies of changes in the geometric parameters of product on the print speed are determined.*

**Key words:** additive technologies, 3D-printing, FDM-technology, print mode parameters, quality of layered model.