

Научная статья

УДК 620; 67.01; 67.02

doi 10.34216/2587-6147-2022-1-55-48-52

Леонид Сергеевич Карасёв¹

Сергей Александрович Шорохов²

Алексей Владимирович Кротов³

Сергей Алексеевич Гамаянов⁴

^{1,2,3,4}Костромской государственной университет, г. Кострома, Россия

¹leon.no81@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-8910-3019>

²s_shorohov@ksu.edu.ru. <http://orcid.org/0000-0001-9409-9432>

³alex19.99black@mail.ru. <http://orcid.org/0000-0002-3874-8087>

⁴gamayanov@rambler.ru, <http://orcid.org/0000-0002-5790-2924>

ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМАЦИИ МОДЕЛЕЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЕЙ FDM-ПЕЧАТИ ИЗ РАЗЛИЧНЫХ ПОЛИМЕРОВ

Аннотация. В статье рассматриваются особенности полимерных материалов, применяемых в 3D-печати. Производится анализ и сравнение величины линейного отклонения, уровня неровности и шероховатости поверхности полимерных прототипов из различных материалов. Приведены технические рекомендации, касающиеся возможностей применения 3D FDM печати и особенностей выбора полимерного материала для применения его в качестве строительного материала для изготовления прототипов художественных моделей.

Ключевые слова: FDM-печать, PLA-пластик, ABS-пластик, PETG-пластик, 3D-технологии, аддитивное производство, полимеры

Для цитирования: Карасёв Л. С., Шорохов С. А., Кротов А. В., Гамаянов С. А. Особенности деформации моделей, полученных технологией FDM-печати из различных полимеров // Технологии и качество. 2022. № 1(55). С. 48–52. <https://doi.org/10.34216/2587-6147-2022-1-55-48-52>.

Leonid S. Karasev¹

Sergey A. Shorohov²

Aleksey V. Krotov³

Sergey A. Gamayanov⁴

^{1,2,3,4}Kostroma State University, Kostroma, Russia

PECULIARITIES OF DEFORMATION OF MODELS OBTAINED BY FDM-PRINTING TECHNOLOGY FROM DIFFERENT POLYMERS

Abstract. This article deals with the peculiarities of polymeric materials used in 3D printing. It analyses and compares the linear deviation value, the level of roughness and surface roughness of polymer prototypes made of different materials. Technical recommendations are given concerning the possibilities of 3D FDM printing and peculiarities of polymer material selection for its use as a building material for the production of prototypes of artistic models.

Keywords: FDM printing, PLA plastic, ABS plastic, PETG plastic, 3D technology, additive manufacturing, polymers

For citation: Karasev L. S., Shorohov S. A., Krotov A. V., Gamayanov S. A. Peculiarities of deformation of models obtained by FDM-printing technology from different polymers. Technologies & Quality. 2022. No 1(55). P. 48–52. (In Russ.) <https://doi.org/10.34216/2587-6147-2022-1-55-48-52>.

Введение

Аддитивные технологии, а именно технологии 3D-печати, стали неотъемлемой частью технологической цепочки производства юве-

лирно-художественных изделий на современных предприятиях. В ювелирной промышленности 3D-печать используется для получения высокоточных прототипов, которые применяются в качестве моделей в технологическом процессе литья по выплавляемым моделям (ЛВМ) [1].

© Карасёв Л. С., Шорохов С. А., Кротов А. В.,
Гамаянов С. А., 2022

Однако подобные предприятия широко используют лишь малую часть технологических решений, например, MJM (Multi Jet Modeling / технология многоструйной печати) и DoD (Drop on Demand / технология многоструйной печати с фрезерной корректировкой каждого последующего слоя печати). Менее используемыми являются технологии SLA (Stereo Lithography Apparatus / технология лазерной стереолитографии) и DLP (Digital Light Processing / технология цифровой обработки света) [2]. Все остальные технологии 3D-печати спросом не пользуются, так как по большей части с их помощью невозможно производить прототипы из выплавляемых материалов. Однако существует одна весьма популярная технология, способная печатать 3D-модели из выплавляемых материалов, не используемая современными ювелирно-художественными производствами, – FDM (Fused Deposition Modeling / технология послойного наплавления материала) [3].

Технология FDM-печати позволяет создавать экономически выгодные, сложные полимерные прототипы деталей, механизмов и многое другое без особых усилий. Но применение FDM-печати под создание художественных прототипов с возможностью дальнейшего использования их в качестве выплавляемых моделей в процессе литья многократно усложняет процесс. Это связано с геометрическими параметрами художественных моделей, как правило, они более сложные и утонченные, требуют детальной проработки мелких деталей [1].

В представленной работе рассматриваются величины линейного отклонения, уровня неровности и шероховатости поверхности полимерных прототипов из различных материалов, применяемых в FDM-печати.

Методика проведения эксперимента

Для исследований были выбраны чаще всего используемые в FDM-печати пластики: ABS (акрилонитрилбутадиенстирол АБС, по международному обозначению ABS), PLA (полилактид ПЛА, по международному обозначению PLA) и PETG (полиэтилентерефталатгликоль ПЭТГ, по международному обозначению PETG) [4]. Из каждого материала были напечатаны следующие экспериментальные образцы:

- куб и цилиндр (10×10×10 мм);
- пустотелые куб и цилиндр (12×12×12 мм, толщина стенки 1 мм);
- параллелепипеды с барельефом и контррельефом (10×10×2 мм, высота рельефа 1 мм).

У полимеров существует рекомендуемая температура нагрева для экструзии при печати, они также обладают различными коэффициен-

тами температурного расширения [4]. Поэтому образцы, напечатанные из разного пластика, будут отличаться геометрическими размерами в результате температурной усадки при остывании в процессе печати.

На изменение геометрических размеров при печати влияют физические и технические факторы [3]. К физическим факторам относится количество абсорбированной влаги из окружающей среды. Технические – кинематика принтера, качество расходных материалов самого устройства, программные настройки печати. Для снижения влияния указанных факторов на погрешность измерений все образцы печатались на одной экспериментальной установке открытого типа (без закрытого корпуса) с диаметром сопла 0,3 мм и высотой слоя 0,1 мм. Температуры нагрева печатного сопла и стола для печати:

- ABS – сопло 240 °С, стол 100 °С, скорость обдува 45 % ≈ 1650 об./мин;
- PLA – сопло 215 °С, стол 50 °С, скорость обдува 80 % ≈ 2600 об./мин;
- PETG – сопло 235 °С, стол 70 °С, скорость обдува 80 % ≈ 2600 об./мин.

После печати замерялись геометрические параметры образцов в пяти положениях электронным штангенциркулем ШЦЦ-1-125-0.01 и усреднялись. Полученные данные сравнивались с параметрами эталонной трехмерной модели, по которой был получен G-код для печати.

Для детального изучения поверхности полимерных прототипов после печати использовался металлографический микроскоп МЕТАМ 32-ЛВ с увеличением ×75, ×150 и ×300.

Для анализа неровности поверхности пластиковых образцов использовался двойной микроскоп МИС-11. Точность измерения до ±0,001 мм. На приборе производилось измерение верхнего и нижнего уровня неровности (рис. 1). Параметр неровности поверхности R_z определялся по десяти точкам при отсчете от базовой линии по формуле [5]

$$R_z = \frac{1}{5} \left(\sum_{i=1}^5 h_{\max i} - \sum_{i=1}^5 h_{\min i} \right) E. \quad (1)$$

В упрощенном виде:

$$R_z = H E, \quad (2)$$

где R_z – высота неровности профиля по 10 точкам, мкм;

H – разность отсчета по вершинам и впадинам;

$$H = |H_{\max} - H_{\min}|, \quad (3)$$

где H_{\max} – среднее арифметическое из 5 отсчетов по вершинам;

H_{\min} – среднее арифметическое из 5 отсчетов по впадинам;

E – цена деления, мкм.

Фокусное расстояние используемого объектива $F = 8,16$.

При данном фокусном расстоянии цена деления $E = 0,0275$ мкм.

Измерения производились в 10 точках на каждом образце, все полученные данные формировались в таблицы Excel и усреднялись.

Результаты эксперимента и их обсуждение

Большинство геометрических параметров в сравнении с эталонной 3D-моделью уменьшилось под влиянием температурной усадки. Зафиксированы также и значения, превышающие эталонные размеры, что обусловлено издержками

технологии FDM-печати. При печати полойно наплавляется пластиковая нить, материал укладывается на наращиваемую поверхность, а сверху поджимается печатным соплом. Часть материала при этом неизбежно выдавливается в стороны, что и приводит к изменению геометрии напечатанных прототипов.

Усредненные экспериментальные показатели максимальных значений усадки пластиков при печати составили, мм: ABS – 0,037; PLA – 0,034; PETG – 0,038 (рис. 2). Эти показатели отличаются незначительно, поэтому при печати из этих материалов можно увеличивать линейные размеры модели на $\Delta = 0,04$ мм. Полученное значение Δ не следует конвертировать в процентное соотношение, отклонение в процентах изменяется в зависимости от габаритных размеров прототипа, а Δ постоянно и не зависит от размеров.

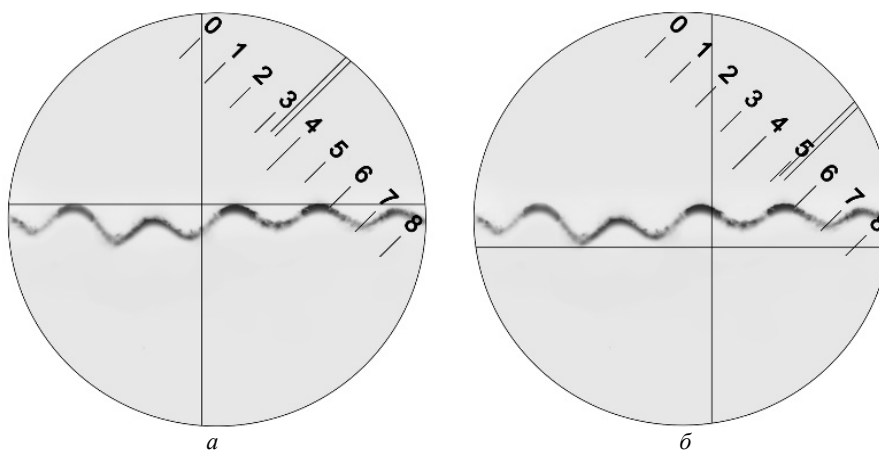


Рис. 1. Фотографии неровности поверхности образца.

Уровни неровностей: а – верхний; б – нижний

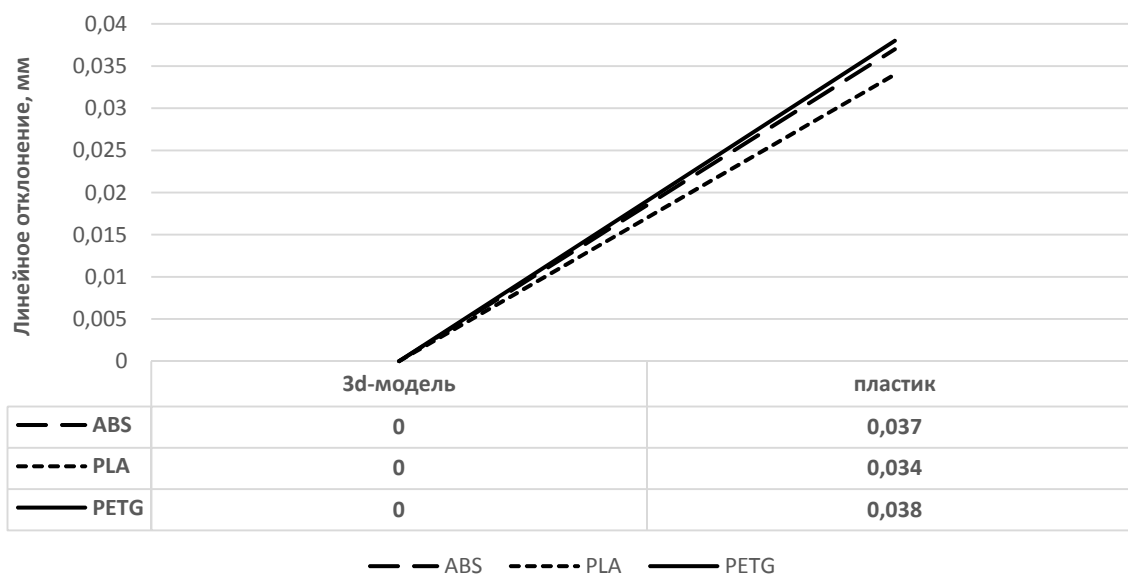


Рис. 2. Экспериментальная зависимость линейного отклонения размеров 3D-моделей из различных пластиков от заданных

При микроскопических исследованиях на поверхности полимерных прототипов после печати обнаружены микропоры следующих размеров, мкм:

ABS = 1...15;

PLA = 1...30;

PETG = 1...25.

Количество микропор на 1 мм²:

ABS = 10...15;

PLA = 10...30;

PETG = 5...10.

Большинство микропор незначительных размеров, крупные микропоры встречаются крайне редко. Некоторые из дефектов являются воздушными пузырьками, которые просматриваются на поверхности, но не являются порами, так как закрыты тонкой поверхностной пленкой. Они были включены в расчеты как микропоры, так как в процессе вакуумирования при формовке данных образцов тонкая пленка может не удержать воздушный пузырь, вследствие чего образуется микропора.

Фотографии поверхности, полученные с металлографического микроскопа МЕТАМ 32-ЛВ при увеличении $\times 150$, приведены на рис. 3, размер каждого снимка соответствует 10 мм².

Экспериментально определена неровность поверхности пластиковых образцов, мкм: ABS – 46,1; PLA – 46,8; PETG – 51. Все значения различны, но достаточно высоки, что связано с послойной печатью, в результате которой формируется определенный рельеф, не вписы-

вающийся в рамки показателей шероховатости, поэтому применяется термин «неровность».

ВЫВОДЫ

1. Из проведенных исследований следует, что различные по своему химическому составу, а следовательно, и по физико-механическим свойствам полимеры не позволяют получать одинаковый результат геометрических параметров, уровня неровности, шероховатости в образце.

2. Каждый из исследованных полимеров может быть применен в качестве строительного материала для моделей, но на этапе проектирования (построения 3D-модели) следует вносить конкретные для каждого используемого материала корректировки с учетом его физико-механических свойств. Необходимо печатать тестовый образец, производить замеры геометрических данных тестового прототипа и сравнивать полученные данные с исходными данными 3D-модели, разность данных следует вносить в качестве корректировок в трехмерную модель.

3. Использование материалов одной классификации (например, ABS), но разных производителей, различного цвета и т. д. неизбежно повлечет за собой необходимость проведения аналогичных исследований для выявления конкретных физико-механических свойств материалов, которые необходимо учитывать на этапе 3D-проектирования.

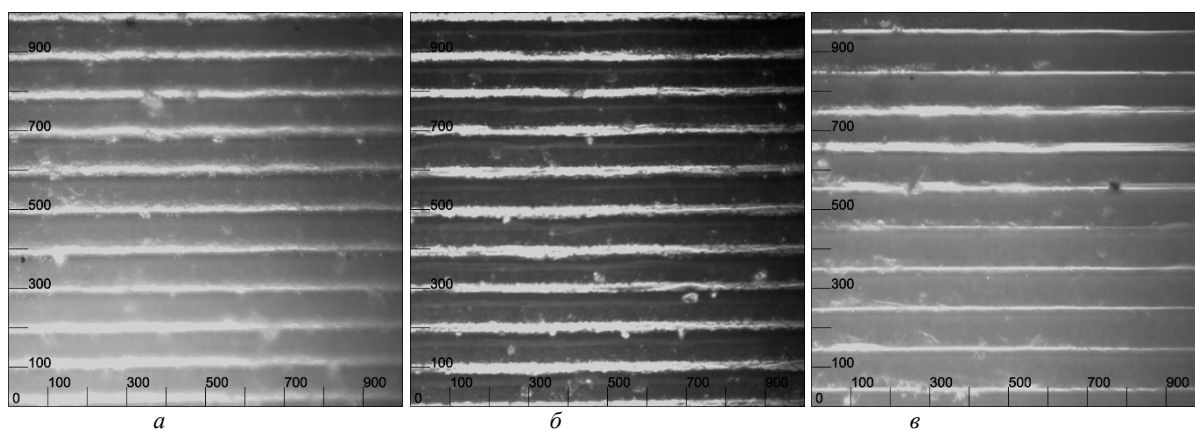


Рис. 3. Фотографии поверхности образцов из различных пластиков, $\times 150$:
а – ABS; б – PLA; в – PETG

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Галанин С. И., Арнольди Н. М., Зезин Р. Б. Технология ювелирного производства : учеб. издание / под общ. ред. Ю. А. Василенко. М. : СПМ-Индустрия, 2017. 511 с.
2. Антонова В. С., Осовская И. И. Аддитивные технологии : учеб. пособие. СПб., 2017. 30 с.
3. Руководство по проектированию художественных прототипов под FDM-печать / Л. С. Карасёв, С. А. Гамаянов, А. В. Кротов, А. Н. Шемякин // Научные исследования и разработки в области

дизайна и технологий : материалы Всероссийской научно-практической конференции : в 2 ч. Кострома, 2021. Ч. 1. С. 118–121.

4. Ануриев В. И. Справочник конструктора-машиностроителя. В 3 т. Т. 1. М. : Машиностроение, 1979. 728 с.
5. Шкуро А. Е., Кривоногов П. С. Технологии и материалы 3D-печати : учеб. пособие. Екатеринбург : Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2017. 101 с.

REFERENSES

1. Galanin S. I., Arnoldi N. M., Zezin R. B., Vasilenko Yu. A. (ed.). Technology of jewelry production. Moscow, SPM-Industry, 2017. 511 p. (In Russ.)
2. Antonova V. S., Osovskaya I. I. Additive technologies. Sankt-Peterburg, 2017. 30 p. (In Russ.)
3. Karasyov L. S., Gamayanov S. A., Krotov A. V., Shemyakin A. N. Guide to designing art prototypes for FDM printing. *Nauchnye issledovaniya i razrabotki v oblasti dizajna i tekhnologij*: Materialy Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii [Scientific research and development in the field of design and technology: Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference]. Kostroma, Kostrom. State University, 2021, pp. 118–121. (In Russ.)
4. Anuryev V. I. Handbook of a mechanical engineer. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1979. 728 p. (In Russ.)
5. Shkuro A. E., Krivonogov P. S. Technologies and materials for 3D-printing. Ekaterinburg: Ural. St. Forest Engineering Univ. Publ., 2017. 101 p. (In Russ.)

Статья поступила в редакцию 18.01.2022
Принята к публикации 22.02.2022