

УДК 621.923

**А. А. Михальченко<sup>1</sup>, А. Б. Невзорова<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Белорусский государственный университет транспорта<sup>2</sup>Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого**АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА РАЗМЕРНУЮ ТОЧНОСТЬ  
УГЛОВ ИЗДЕЛИЙ ПРИ ОТРАБОТКЕ ТЕХНОЛОГИИ 3D-ПЕЧАТИ**

Аддитивные технологии 3D-печати позволяют изготавливать небольшие партии изделий с высокой степенью повторяемости. С точки зрения возможностей применения 3D-печатных объектов немаловажным аспектом является их размерная точность. Цель работы – количественная оценка погрешностей угловой точности образцов с внешними и внутренними углами в зависимости от различного типа базового слоя и технологических параметров процесса FDM-печати с использованием филаментов из PLA- и ABS-материалов. Установлено расхождение угловых размеров между CAD-моделью и напечатанным объектом в ходе изготовления внешних и внутренних углов. Полученные результаты позволили установить границы погрешностей геометрических отклонений образцов, возникающих в процессе FDM-печати. Экспериментально определено, что для одинаковых размеров изделий и филаментов имеется возможность нивелировать погрешности при создании CAD-модели с использованием полученных коэффициентов погрешностей для различных типов базовых слоев.

**Ключевые слова:** 3D-печать, моделирование с плавным напылением (FDM), угловая точность, размерная точность.

**Для цитирования:** А. А. Михальченко, А. Б. Невзорова. Анализ факторов, влияющих на размерную точность углов изделий при отработке технологии 3D-печати // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. 2024. № 1 (277). С. 82–86.

DOI: 10.52065/2520-2669-2024-277-11.

**A. A. Mikhalchenko<sup>1</sup>, A. B. Neuzorava<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Belarusian State University of Transport<sup>2</sup>Sukhoi State Technical University of Gomel**ANALYSIS OF FACTORS AFFECTING DIMENSIONAL ACCURACY  
OF PRODUCT CORNERS DURING THE DEVELOPMENT  
OF 3D-PRINTING TECHNOLOGY**

Additive 3D printing technologies allow the production of small batches of products with a high degree of repeatability. From the point of view of application possibilities of 3D-printed objects, their dimensional accuracy is an important aspect. The aim of the work is to quantify the errors of angular accuracy of samples with sharp internal and external corners depending on different base layers, as well as different parameters of the FDM-printing process using filaments from PLA- and ABS-materials. The discrepancy of angular dimensions between the CAD model and the printed object during the fabrication of internal and external catches was established. The obtained results allowed to establish the limits of errors of geometrical deviations of samples arising in the process of FDM-printing. It was experimentally determined that for the same sizes of products and filaments, there is a possibility to level the errors during CAD-model creation using the obtained error coefficients for different types of base layers.

**Keywords:** 3D-printing, fused deposition modeling (FDM), angular accuracy, dimensional accuracy.

**For citation:** A. A. Mikhalchenko, A. B. Neuzorava. Analysis of factors affecting dimensional accuracy of product corners during the development of 3d-printing technology. *Proceedings of BSTU, issue 2, Chemical Engineering, Biotechnologies, Geoecology*, 2024, no. 1 (277), pp. 82–86 (In Russian).

DOI: 10.52065/2520-2669-2024-277-11.

**Введение.** Аддитивные технологии (АТ), изначально использовавшиеся для быстрого прототипирования, на данный момент широко применяются для быстрой оснастки и серийного производства. Для некоторых технологий 3D-печати требуется дорогостоящее оборудование и сложные технологические процессы, позволяющие осуществлять аддитивное металлопроизводство, в

то время как в сфере низкокостратного производства в большинстве случаев используется полимерная печать, например моделирование с плавным осаждением (FDM) или стереолитография (SLA) [1].

FDM-печать и подобные ей методы хорошо подходят для изготовления единичных объектов сложной формы, они позволяют ускорить производство

легковесных изделий [2]. При этом механические свойства, а также точность размеров таких объектов часто уступают изделиям, изготовленным методом литья под давлением [3, 4]. Поэтому некоторые исследователи изучают возможности улучшения не только механических свойств [5], но и точности размеров FDM-печатных объектов [6].

В работе [7] для материалов из полимолочной кислоты (PLA) и акрилонитрилбутадиенстирола (ABS) исследовали влияние геометрии детали на точность размеров при небольшой толщине слоя 0,1–0,2 мм, низкой температуры экструзии и ориентации деталей 0 и 90°. При последующей обработке деталей из ABS холодным паром ацетона обнаружено существенное улучшение качества поверхности при незначительных изменениях размеров [8, 9].

Один из факторов, который практически не исследован, – это базовый слой, т. е. **поле** (основа по краю 3D-модели для лучшего сцепления со столом 3D-принтера), **юбка** (круговая полоска вокруг 3D-модели, чаще всего печатается в три прохода для того, чтобы проверить визуальную правильность настроек принтера до печати основной модели) и **плот** (основа под 3D-моделью для лучшего сцепления со столом 3D-принтера).

В то время как поле или плот часто предлагаются в качестве инструмента для избежания деформации [10], их влияние на размерную точность образцов, которые могли бы быть напечатаны и с простой юбкой, обычно не описывается.

Цель работы – количественная оценка погрешностей угловой точности образцов с внешними и внутренними углами в зависимости от различного типа базового слоя и технологических параметров процесса FDM-печати с использованием филаментов из PLA- и ABS-материалов.

*Методика проведения исследования.*

Печать образцов осуществлялась на принтере Mass Portal D300 с параметрами печати, приведенными в таблице. Материалами для печати служили PLA и ABS.

**Параметры печати, используемые для принтера Mass Portal D300**

Параметр	Материал филамента	
	PLA	ABS
Высота слоя, мм	0,2	
Степень заполнения, %	40	
Температура печатного слоя, °С	60	
Скорость печати, мм/с	40	
Температура сопла, °С	215	220

Печатные образцы с размерами 120×20×10 мм (длинные) и 50×10×3 мм (короткие), с внешними и внутренними углами представлены на рис. 1.

CAD-модели образцов были подготовлены в программе Autodesk Inventor.

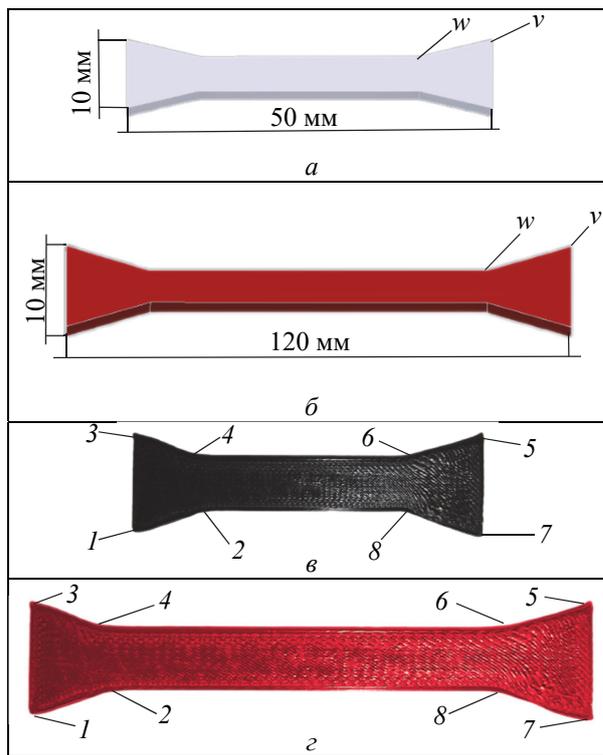


Рис. 1. Геометрия образцов:  
*a* – короткие образцы (CAD-модель); *б* – длинные образцы (CAD-модель); *в* – короткий образец, изготовленный методом FDM; *г* – длинный образец, изготовленный методом FDM; *v* – внешние углы (1, 3, 5, 7); *w* – внутренние углы (2, 4, 6, 8)

Образцы печатались с юбкой (без контакта с образцом), с полем (1 слой, ширина 3 мм, контакт с образцом) или с плотом (3 слоя под образцом, которые печатаются на расстоянии 0,2 мм, т. е. отделяются от образца). Все образцы печатались в пяти экземплярах.

Измерения образцов осуществляли с помощью микрометрического штангенциркуля Neiko 01407A с точностью и разрешением 0,02 и 0,01 мм соответственно. Для измерения углов микроскопические изображения получали с помощью цифрового микроскопа Olympus DSX1000.

**Основная часть.** При использовании технологии FDM трудно получить углы с необходимой точностью, поскольку диаметр сопла определяет минимальный размер детали, которую можно напечатать. На рис. 2 показаны короткие образцы с внешними и внутренними углами, напечатанные из ABS. Хорошо видно нежелательное скругление внешних и внутренних краев. Этот эффект не меняется, если в качестве базового слоя применяется поле или плот.

На рис. 3 наглядно продемонстрировано отличие между типами базового слоя.



Рис. 2. Короткие образцы из ABS:  
а – с юбкой; б – полем; в – плотом

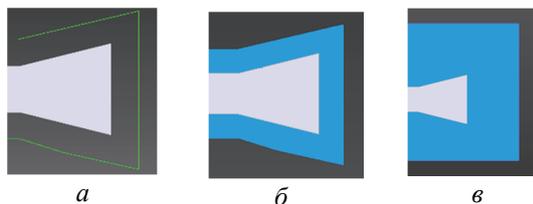


Рис. 3. Образцы CAD-модели:  
а – с юбкой; б – полем; в – плотом

Далее было проведено измерение углов для вышеупомянутых образцов. На рис. 4 представлены значения для коротких образцов PLA, при этом углы определены как для внешних углов – 1 (левый нижний угол), 3 (левый верхний угол), 5 (правый верхний угол) и 7 (правый нижний угол) и для внутренних – 2 (левый нижний угол), 4 (левый верхний угол), 6 (правый верхний угол) и 8 (правый нижний угол), соответственно. В большинстве случаев стандартные отклонения достаточно велики и включают в себя отклонение, равное нулю, так что явных изменений не видно. Соответственно, не наблюдаются и отличия между различными базовыми слоями.

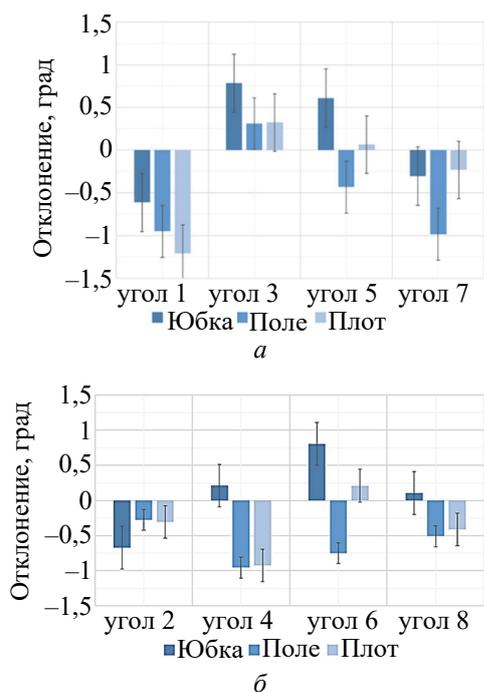


Рис. 4. Угловые отклонения коротких образцов PLA:  
а – внешние углы; б – внутренние углы

Для образцов, напечатанных из ABS, результаты аналогичны показанным на рис. 5. В этом случае большинство отклонений стремится к нулю. Те немногие значения, для которых отклонения отличны от нуля, в соответствии со стандартными отклонениями также не демонстрируют реальных отклонений между измеренными и смоделированными углами.

Поскольку ориентация заполнения при печати составляет  $\pm 45^\circ$ , эти образцы являются симметричными по отношению друг к другу, поэтому угол 1 и угол 3 должны быть одинаковыми, также как и угол 3 и угол 7, как и угол 2 и угол 6 должны быть одинаковыми, также как и угол 4 и угол 8. Сравнение этих парных условно одинаковых углов наглядно показывает значительные расхождения. Это свидетельствует о том, что систематического отклонения измеренных углов от смоделированных здесь не происходит, а наблюдаемые расхождения обусловлены произвольными отклонениями.

Образцы из PLA и ABS с внешними и внутренними углами были напечатаны методом FDM и исследованы на предмет угловой точности. В результате не было выявлено однозначного влияния базового слоя на размерную точность 3D-печатных PLA- и ABS-объектов.

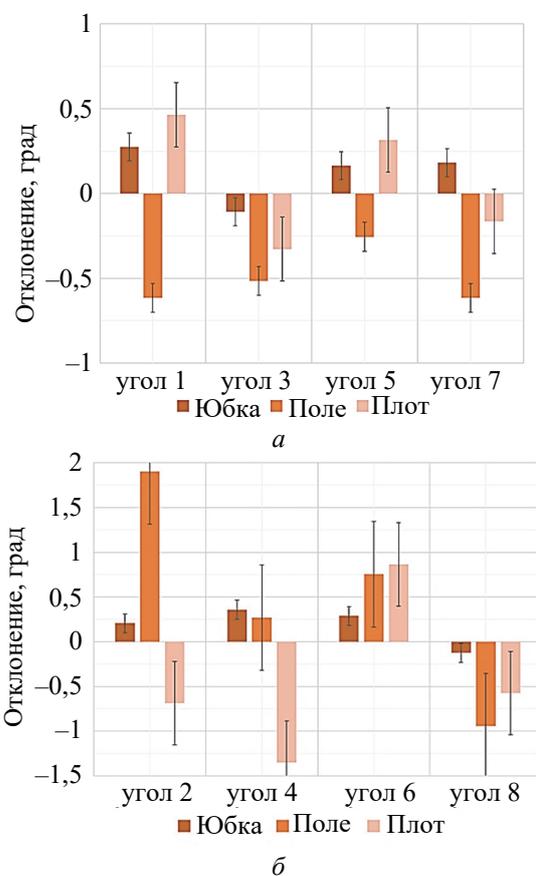


Рис. 5. Угловые отклонения коротких образцов ABS:  
а – внешние углы; б – внутренние углы

Полученные результаты позволяют установить границы погрешностей геометрических отклонений образцов, возникающих в процессе FDM-печати с базовым слоем.

Зная коэффициент погрешности наплавленного осаждения  $L_n^B$ , полученный на основании экспериментальных данных, можно скорректировать размеры CAD-модели в соответствии с ним для нивелирования отклонений, достигая при этом требуемой точности размеров. Так, для образцов из PLA-филаментов при печати внешних углов с юбкой  $L_n^B = 0,119$ , с полем  $L_n^B = -0,514$ , с плотом  $L_n^B = -0,263$ , при печати внутренних углов – с юбкой  $L_n^B = 0,113$ , с полем  $L_n^B = -0,623$ , с плотом  $L_n^B = -0,358$ . Для образцов из ABS-филаментов при печати внешних углов с юбкой  $L_n^B = 0,129$ , с полем  $L_n^B = -0,5$ , с плотом  $L_n^B = 0,073$ , при печати внутренних углов – с юбкой  $L_n^B = 0,182$ , с полем  $L_n^B = 0,498$ , с плотом  $L_n^B = -0,436$ . Данные коэффициенты применимы для изделий, отпечатанных с параметрами, приведенными в таблице, и ориентацией заполнения  $\pm 45^\circ$ . Для определения коэффициентов погрешности наплавленного осаждения для иных параметров печати и различных форм заполнения необходимо провести дополнительные исследования.

**Заключение.** Для оценки точности 3D-принтера с технологией печати FDM использо-

вались образцы, изготовленные из PLA- и ABS-филаментов. Получены угловые отклонения для внешних и внутренних углов отпечатанных образцов. Определено, что образцы, изготовленные из PLA-филамента, имеют большее угловое отклонение в сравнении с образцами из ABS. Геометрические отклонения отпечатанных образцов в сравнении с CAD-моделью объясняются влиянием типа базового слоя. Усредненные отклонения размеров внешних углов для образцов из PLA-филамента составляют  $\pm 0,219^\circ$ , для внутренних углов –  $\pm 0,289^\circ$ . Для образцов из ABS-филамента усредненные отклонения размеров внешних углов составляют  $\pm 0,099^\circ$ , для внутренних –  $\pm 0,081^\circ$ .

Проведенные исследования демонстрируют, что качество точности отпечатанных образцов для принтера Mass Portal D300 находится в диапазоне от 11 до 14, и средний качество точности составляет 12,6.

Таким образом, образцы, изготовленные из ABS-филамента, имеют более высокую точность. Для повышения угловой точности необходимо учитывать коэффициент погрешности наплавленного осаждения на этапе проектирования CAD-модели.

*Исследования проводились в рамках диссертационной работы при поддержке ГГТУ имени П. О. Сухого.*

### Список литературы

1. Зленко М. А., Нагайцев М. В., Довбыш В. М. Аддитивные технологии в машиностроении: пособие для инженеров. М.: ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015. 220 с.
2. Ahmad B., van der Veen S. O., Fitzpatrick M. E., Guo H. Residual stress evaluation in selective-laser-melting additively manufactured titanium (Ti-6Al-4V) and inconel 718 using the contour method and numerical simulation. *Addit. Manuf.* 2018, 22, 571–582.
3. Yaghi A., Ayvar-Soberanis S., Moturu S., Bilkhu R., Afazov S. Design against distortion for additive manufacturing. *Addit. Manuf.* 2019, 27, 224–235.
4. Кудашов Н. С., Соболева И. В. Исследование работы и области применения 3D-принтера // Юный ученый. 2017. № 2-2 (11). С. 58–61. URL: <http://yun.moluch.ru/archive/11/829/> (дата обращения: 25.10.2023).
5. Невлюдов И. Ш. Разработка комплексного метода оценки качества пластмассовых деталей // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2017. № 1. С. 29–38.
6. Корбанов В. Д., Вальтер А. И. Изготовление модельной оснастки в литейном производстве с применением аддитивных технологий // Известия ТулГУ. Технические науки. 2018. № 10. С. 334–338.
7. Михальченко А. А. Исследование качества деталей из различных видов пластика, изготовленных методом FDM-печати // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления: материалы XXII Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 28–29 апр. 2022 г. В 2 ч. Ч. 1. Гомель: ГГТУ имени П. О. Сухого, 2022. С. 99–101.
8. Михальченко А. А., Невзорова А. Б., Одарченко И. Б. Влияние режимов 3D-печати термопластами на прочностные свойства изделий // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. 2023. № 1. С. 31–40.
9. Ekinci B., Ehrmann A. Influence of Printing Parameters on the Dimensional Accuracy of Concave and Convex Objects in FDM Printing. *Engineering Proceedings.* 2022. Vol. 31, no. 1. P. 40–46.
10. Дьякова Г. Н., Смяян В. Е., Кординова Е. И. 3D-сканирование и последующее изготовление анатомических моделей методами аддитивных технологий // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. 2023. № 1 (265). С. 15–20. DOI: <https://doi.org/10.52065/2520-2669-2023-265-1-2>.

### References

1. Zlenko M. A., Nagaytsev M. V., Dovbysh V. M. *Additivnyye tekhnologii v mashinostroyenii* [Additive technologies in mechanical engineering]. Moscow, GNS RF FGUP “NAMI” Publ., 2015. 220 p. (In Russian).
2. Ahmad B., van der Veen S. O., Fitzpatrick M. E., Guo H. Residual stress evaluation in selective-laser-melting additively manufactured titanium (Ti-6Al-4V) and inconel 718 using the contour method and numerical simulation. *Addit. Manuf.*, 2018, no. 22, pp. 571–582.
3. Yaghi A., Ayvar-Soberanis S., Moturu S., Bilkhu R., Afazov S. Design against distortion for additive manufacturing. *Addit. Manuf.*, 2019, no. 27, pp. 224–235.
4. Kudashov N. S., Soboleva I. V. Exploring the operation and applications of the 3D printer. *Yunyy uchenyy* [Young scientist], 2017, no. 2-2 (11), pp. 58–61. Available at: <http://yun.moluch.ru/archive/11/829/> (accessed 25.10.2023) (In Russian).
5. Nevlyudov I. Sh., Sotnik S. V., Frolov A. V., Demskaya N. P.. Development of an integrated method for assessing the quality of plastic parts. *Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy* [East European Journal of Advanced Technologies], 2017, no. 1, pp. 29–38 (In Russian).
6. V. D. Korbanov, A. I. Val'ter. Manufacturing of model tooling in foundry production with the use of additive technologies. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskiye nauki* [Izvestiya TulsU. Technical Sciences], 2018, no. 10, pp. 334–338 (In Russian).
7. Mikhalchenko A. A. Study of the quality of parts from different types of plastic made by FDM-printing method. *Issledovaniya i razrabotki v oblasti mashinostroyeniya, energetiki i upravleniya: materialy XXII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* [Research and development in the field of machine-building, power engineering and management: materials of the XXII International scientific-technical conference of students, graduate students and young scientists]. Gomel, 2022, pp. 99–101 (In Russian).
8. Mikhalchenko A. A., Nevzorova A. B., Odarchenko I. B. Influence of modes of 3D-printing by thermoplastics on strength properties of products. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Sukhogo* [Bulletin of P. O. Sukhoi Gomel State Technical University], 2023, no. 1, pp. 31–40 (In Russian).
9. Ekinci B., Ehrmann A. Influence of Printing Parameters on the Dimensional Accuracy of Concave and Convex Objects in FDM Printing. *Engineering Proceedings*, 2022, vol. 31, no. 1, pp. 40–46.
10. Dyakova H. N., Smeyan V. E., Kordikova E. I. 3D scan and subsequent manufacturing anatomical models by methods of additive technologies. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 2, Chemical Engineering, Biotechnologies, Geoecology, 2023, no. 1 (265), pp. 15–20. DOI: 10.52065/2520-2669-2023-265-1-2 (In Russian).

### Информация об авторах

**Михальченко Александрина Александровна** – магистр, аспирант кафедры «Водоснабжение, химия и экология». Белорусский государственный университет транспорта (246653, г. Гомель, ул. Кирова, д. 34, Республика Беларусь). E-mail: [aleks.mikhalchenko@mail.ru](mailto:aleks.mikhalchenko@mail.ru)

**Невзорова Алла Брониславовна** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Нефтегазоразработка и гидропневмоавтоматика». Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого (246029, г. Гомель, пр-т Октября, 48, Республика Беларусь). E-mail: [anevzorova@gstu.by](mailto:anevzorova@gstu.by)

### Information about the authors

**Mikhalchenko Alexandrina Aleksandrovna** – Master, PhD student, the Department of “Water Supply, Chemistry and Ecology”. Belarusian State University of Transport (34, Kirova str., 246653, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: [aleks.mikhalchenko@mail.ru](mailto:aleks.mikhalchenko@mail.ru)

**Neuzorova Alla Bronislavovna** – DSc (Engineering), Professor, Head of the Department of “Oil and Gas Development and Hydropneumatic Automation”. Sukhoi State Technical University of Gomel (48, Oktyabrya Ave., 246029, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: [anevzorova@gstu.by](mailto:anevzorova@gstu.by)

Поступила 09.11.2023