

Рис. 1. Диаграмма распределения основных причин при обрывах проволоки: расслои – 43,00 %; поверхностные дефекты – 31,28 %; трещины – 9,62 %; сужение – 9,62 %; сварка – 4,86 %; кручение – 1,30 %; неметаллические включения – 0,28 %

Основными причинами обрывности металлокорда являются расслои и поверхностные дефекты. Эти явления являются следствием неверных параметров технологии волочения проволоки, термообработки проволоки, прокатки и выплавки стали.

Для производства мегапрочного металлокорда необходимо обеспечить высокий контроль за технологическим процессом выплавки стали, режимом легирования и разлива стали, за технологическим процессом термоупрочнения стали в процессе прокатки. Кроме контроля параметров необходимо модернизировать текущие технологии патентирования (термообработки) проволоки, технологии тонкого волочения для получения требуемых высоких сбалансированных механических свойств проволоки. Сбалансированный комплекс механических свойств проволоки позволит избежать снижения производительности при свивке металлокорда.

#### Литература

1. Метизное производство // Белорус. металлург. завод. – Режим доступа: <https://belsteel.com/about/metiznoe-proizvodstvo.php>. – Дата доступа: 15.09.2023.

УДК 678.8

## ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ 3D-ПЕЧАТИ МЕТОДОМ FDM ПУТЕМ ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ 3D-ПРИНТЕРА

А. А. Михальченко

*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

А. Б. Невзорова

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

*Показано, что различные материалы, из которых изготовлены филаменты, различные размеры печатных изделий, а также параметры печати влияют на размерную погрешность образцов одинаковой формы с технологией печати FDM (моделирование методом наплавленного осаждения).*

**Ключевые слова:** трехмерный объект, 3d-печать, технологии FDM, филаменты.

## IMPROVING THE ACCURACY OF FDM 3D PRINTING BY CHANGING 3D PRINTER PARAMETERS

A. Mikhalchenko

*Belarusian State University of Transport, Gomel*

A. B. Nevzorova

*Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus*

*The work shows that different materials from which filaments are made, different sizes of printed products, as well as printing parameters affect the dimensional error of samples of the same shape with FDM printing technology (fused deposition modeling).*

**Keywords:** three-dimensional object, 3d printing, FDM technologies, filaments.

Технология 3d-печати – это производственная технология создания трехмерного объекта путем нанесения на поверхность материала непрерывным слоем по цифровым проектным данным [1]. Данная технология производства официально называется аддитивным производством, или технологией быстрого прототипирования. Среди этих технологий наиболее распространенной является технология FDM [2]. Достоинствами FDM-процесса являются низкая стоимость оборудования, возможность использования различных материалов, высокая износостойкость изделий и оптимальное время печати [3]. Однако этот процесс имеет недостатки, связанные с недостаточной точностью размеров и качеством поверхности [4]. Так как слои экструдируются, на моделях, изготовленных с помощью технологии FDM, часто заметны линии слоев, а вокруг сложных элементов могут быть неточности. Поэтому FDM-процесс имеет некоторые ограничения при изготовлении деталей, требующих высокой точности.

В данной работе мы провели экспериментальное исследование влияния каждого параметра печати на размерную точность, регулируя температуру экструзии и степень заполнения в качестве параметров печати для различных материалов и размеров объектов. Для того чтобы выявить необходимые значения параметров печати для каждого материала, в качестве температурных параметров для экструзии были выбраны самые высокие, средние и низкие температуры, а степень заполнения принималась 10, 30 и 50 %.

На основе полученных экспериментальных результатов можно предложить оптимальные значения параметров печати, позволяющие повысить точность размеров в зависимости от материала и размера объекта печати в процессе FDM-печати. Используя результаты данного исследования, можно повысить точность размеров печатаемых объектов.

Образцы, применяемые в данном эксперименте, были смоделированы с помощью Autodesk Inventor. Печать образцов осуществлялась на принтере Mass Portal D300. Диаметр филаментов всех материалов составлял 1,75 мм. В данном исследовании сравнивались погрешности размеров по осям  $x$ ,  $y$  и  $z$ , поэтому был смоделирован образец с поперечным сечением, равным 3 мм по оси  $z$ , как показано на рис. 1.

В качестве материалов объекта печати в данном эксперименте использовались PLA и ABS. Материалы были выбраны с учетом растворимости, эластичности и вязкости, а также для анализа влияния свойств каждого материала на точность размеров. В качестве параметра печати была выбрана степень заполнения, которая существенно влияет на прочность и снижение массы печатных объектов.

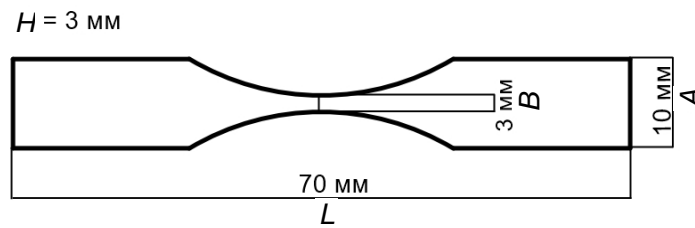


Рис. 1. Геометрические параметры образца для исследований

Размерная погрешность была получена из средних значений, определенных в трех произвольных точках для каждого размера измерения. Колебания размерной погрешности, отражающие шероховатость поверхности изделий 3d-печати, составляют примерно 0,02 мм. Влияние оказалось незначительным при выборе соответствующей температуры экструзии и параметров заполнения для повышения точности размеров в зависимости от материала и размера объекта печати. Сопоставив и проанализировав эти размерные погрешности, выбираем соответствующую температуру экструзии и коэффициент заполнения для повышения размерной точности объекта печати в зависимости от его материала и размера (табл. 1, 2).

Таблица 1

**Параметры печати и размерная погрешность в зависимости от размеров для материала PLA**

Параметр	Размеры объекта		
	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>L</i>
Температура экструзии, °C	195	220	220
Степень заполнения, %	10	10	10
Размерная погрешность	0,00	0,03	0,05

Таблица 2

**Параметры печати и размерная погрешность в зависимости от размеров для материала ABS**

Параметр	Размеры объекта		
	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>L</i>
Температура экструзии, °C	235	235	240
Степень заполнения, %	30	50	10
Размерная погрешность	0,03	0,02	0,00

Из результатов эксперимента следует, что при выборе соответствующих параметров печати размерная погрешность  $F_H$  по оси  $z$  примерно на 50 % меньше или равна размерной погрешности  $F_A$  по осям  $x$  и  $y$ . Поэтому размер объекта печати рассматривается только по осям  $x$  и  $y$ . Третий тип данных (размерная погрешность) используется при изготовлении простых объектов, состоящих из двух и более различных размеров. Если размерная погрешность конкретной детали объекта печати критична, то ее следует изготавливать с соответствующими параметрами печати, выбранными исходя из размеров детали.

На основании результатов предложена методика поиска параметров печати, позволяющая повысить размерную точность объекта печати при заданных характеристиках материала и размера. Данная методика может быть применена для повышения точности размеров объекта в процессах 3d-печати с технологией FDM.

В процессе 3d-печати с технологией FDM, когда известны материал и размеры объекта, параметры печати, такие как температура экструзии и степень заполнения, могут быть подобраны для повышения точности размеров изготавливаемых объектов 3d-печати на основе экспериментальных данных. Для этого были напечатаны образцы различных размеров при варьировании параметров печати – температуры экструзии и степени заполнения. Затем измерялась и анализировалась размерная погрешность объекта. Из результатов эксперимента следует, что при выборе соответствующих параметров печати размерная погрешность по оси  $z$  меньше или равна погрешности по осям  $x$  и  $y$ . Поэтому было установлено, что для обеспечения размерной точности на основе размеров объекта печати необходимо учитывать только размеры по осям  $x$  и  $y$ .

Экспериментально установлено, что различные материалы, из которых изготовлены филаменты, различные размеры печатных изделий, а также параметры печати влияют на размерную погрешность. Исследование проводилось путем измерения размерных погрешностей при печати образцов одинаковой формы, но разных размеров на 3d-принтере с технологией печати FDM с различными условиями печати. Учитывая геометрию изделий, получаемых в ходе 3d-печати, подбирается материал филамента для изготовления изделий с учетом свойств материала и размерной погрешности, которая была получена в ходе эксперимента. На основании экспериментальных данных можно сделать вывод о том, что печать с заданными параметрами позволяет повысить размерную точность процесса 3d-печати с технологией FDM.

#### Л и т е р а т у р а

1. Зленко, М. А. Аддитивные технологии в машиностроении : пособие для инженеров / М. А. Зленко, М. В. Нагайцев, В. М. Довбыш. – 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. Михальченко, А. А. Исследование качества деталей из различных видов пластика, изготовленных методом FDM-печати / А. А. Михальченко // 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 / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого ; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2022. – С. 99–101.
4. Güler, T., Demirci, E., Yıldız, A. R., & Yavuz, U. (2018). Lightweight design of an automobile hinge component using glass fiber polyamide composites. *Materials Testing*, 60(3), 306–310.

УДК 629.423

## ЦИФРОВОЕ РАЗВИТИЕ СЕРВИСНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ЛОКОМОТИВОВ

**В. В. Невзоров**

*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

*Представлен анализ цифрового развития интеллектуальной системы управления локомотива для оценки в автоматическом режиме параметров с дальнейшим прогнозированием технического состояния локомотива.*

**Ключевые слова:** цифровизация, локомотивное хозяйство, эффективность, предиктивная аналитика.