

## Оценка размерных показателей элементов проводящего рисунка печатных плат, полученных с помощью 3D-печати

О. Н. Смирнова ✉, А. А. Александров, Ю. С. Боброва, К. М. Моисеев

Московский государственный технический университет  
им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

✉ [olga.smirnova.nik@gmail.com](mailto:olga.smirnova.nik@gmail.com)

### Аннотация

**Введение.** Анализ зарубежных исследовательских работ, посвященных методам 3D-печати, показывает возможность их применения для изготовления печатных плат (ПП), а также демонстрирует рост интереса в данном направлении. Одним из доступных методов является метод послойного наложения филамента, который обычно применяется для формирования подложки с каналами под проводники. На текущий момент минимальная ширина канала составляет 100 мкм, что соответствует 5-му классу точности ПП. Однако данные о способе получения подобных размеров или об уровне их отклонения от заданных номинальных значений отсутствуют.

**Цель работы.** Определить влияние таких производственно-технологических факторов, как диаметр экструзионного сопла (ЭС) и количество контуров, на размерные характеристики ПП (линейные размеры, ширина канала печатного проводника, расстояние между проводниками, диаметр сквозного отверстия).

**Материалы и методы.** Для получения линейных моделей проводится полный факторный эксперимент. Оценивается влияние материалов – полилактид (PLA), акрилонитрил бутадиен стирол (ABS) и стеклонаполненный ABS; слайсеров – Ultimaker Cura и PrusaSlicer; 3D-принтеров – Picaso 3D Designer Classic 2016 и Hercules Strong 2017; латунных ЭС диаметрами  $\varnothing 0.2$  и  $\varnothing 0.4$  мм. Рассматривается возможность применения латунных ЭС, покрытых химическим никелем, для печати стеклонаполненными филаментами. Исследование проводилось на производственной базе Научно-образовательного центра "Центр аддитивных технологий" при МГТУ им. Н. Э. Баумана.

**Результаты.** Показана возможность изготовления ПП до 2-го класса точности при использовании ЭС  $\varnothing 0.4$  мм и до 3-го класса точности для ЭС  $\varnothing 0.2$  мм. Выявлено, что гальваническое нанесение химического никеля на латунное ЭС  $\varnothing 0.2$  мм позволяет повысить его износостойкость для печати стеклонаполненными филаментами. Даны рекомендации по выбору комбинации диаметра ЭС и количества контуров.

**Заключение.** Анализ полученных адекватных математических моделей показывает значимость диаметра ЭС и количества контуров. Полученные результаты могут быть использованы для создания макетов ПП.

**Ключевые слова:** печатные платы, элементы проводящего рисунка, послойное наложение филамента, FDM-технология, 3D-печать

**Для цитирования:** Оценка размерных показателей элементов проводящего рисунка печатных плат, полученных с помощью 3D-печати / О. Н. Смирнова, А. А. Александров, Ю. С. Боброва, К. М. Моисеев // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2023. Т. 26, № 4. С. 81–94. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-4-81-94

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Благодарности.** Выражаем признательность А. В. Павлову за идею гальванического нанесения химического никеля на латунное сопло с целью повышения износостойкости.

Статья поступила в редакцию 27.03.2023; принята к публикации после рецензирования 26.07.2023; опубликована онлайн 28.09.2023

## Evaluation of Dimensional Characteristics of Conductive Pattern Elements of 3D-Printed Circuit Boards

Olga N. Smirnova<sup>✉</sup>, Alexander A. Aleksandrov, Yulia S. Bobrova, Konstantin M. Moiseev

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

<sup>✉</sup>olga.smirnova.nik@gmail.com

### Abstract

**Introduction.** A review of foreign publications on 3D printing methods shows the possibility of their application for the manufacture of printed circuit boards (PCBs), while demonstrating the growth of interest in this field. One of the available methods is fused deposition modeling, which can be used to form substrates with channels for traces. At present, the minimum channel width comprises 100  $\mu\text{m}$ , which corresponds to the 5<sup>th</sup> class of PCB accuracy. However, there is no data on how to obtain such dimensions or on the magnitude of their deviation from the given nominal values.

**Aim.** To determine the influence of such factors as nozzle diameter and the number of contours on the dimensional characteristics of PCBs (linear dimensions; trace channel width; trace spacing; via diameters).

**Materials and methods.** To obtain linear models, a full factorial experiment was carried out. The influence of the following materials was evaluated – polylactide (PLA), acrylonitrile butadiene styrene (ABS) and glass-filled ABS; slicers – Ultimaker Cura and PrusaSlicer; 3D printers – Picaso 3D Designer Classic 2016 and Hercules Strong 2017; brass nozzle with diameters  $\varnothing 0.2$  and  $\varnothing 0.4$  mm. The possibility of using brass nozzles coated with chemical nickel for printing with glass-filled filaments was considered. The study was conducted using the facilities of the "Center for Additive Technologies" of Bauman Moscow State Technical University.

**Results.** The possibility of manufacturing PCBs up to the 2<sup>nd</sup> and 3<sup>rd</sup> accuracy classes using nozzles with a diameter of  $\varnothing 0.4$  and  $\varnothing 0.2$  mm, respectively, was shown. It was found that galvanic deposition of chemical nickel on a  $\varnothing 0.2$  mm brass nozzle makes it possible to increase the PCB wearability when printing with glass-filled filaments. Recommendations are proposed for selecting an optimal combination of nozzle diameter and the number of contours.

**Conclusion.** The conducted analysis of mathematical models shows the significance of such parameters as nozzle diameter and the number of contours. The results can be used when creating new PCB layouts.

**Keywords:** printed circuit boards, conductive pattern elements, Fused Deposition Modeling, FDM, 3D printing

**For citation:** Smirnova O. N., Aleksandrov A. A., Bobrova Yu. S., Moiseev K. M. Evaluation of Dimensional Characteristics of Conductive Pattern Elements of 3D-Printed Circuit Boards. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2023, vol. 26, no. 4, pp. 81–94. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-4-81-94

**Conflict of interest.** The authors declare no conflicts of interest.

**Acknowledgments.** We express our gratitude to Pavlov A.V. for the idea of electroplating chemical nickel on a brass nozzle in order to increase wearability.

Submitted 27.03.2023; accepted 26.07.2023; published online 28.09.2023

**Введение.** Аналитические исследования, посвященные 3D-печати печатных плат (ПП), показали возможность их изготовления шестью методами: аэрозольным нанесением материала (Aerosol Jet Printing – AJP); капельным нанесением материала (Drop on Demand – DOD); многофункциональным нанесением (Multi-Functional Additive Manufacturing – MFAM); прямым нанесением материала (Direct Ink Writing – DIW); цифровым осаждением материала (Digital Material Deposi-

tion) и послойным наложением филамента (Fused Deposition Modeling – FDM) [1]. Из всех перечисленных методов последний является практически полностью импортозамещенным, в связи с чем и был выбран для рассмотрения.

Существует несколько подходов к изготовлению ПП с применением метода послойного наложения филамента (ПНФ). Данный метод используется в большинстве из них лишь для формирования подложки с каналами, которые в

дальнейшем заполняются проводящим материалом. Практически реализованные ширины каналов проводников составляют от 100 мкм [2] до 405 мкм [3], что соответствует 2–5-му классам точности (КТ) по ГОСТ Р 53429 [4]. Однако существующие зарубежные исследовательские работы по данной тематике в большинстве своем качественно оценивают работоспособность напечатанных изделий (например, горит/не горит светодиод), поэтому в данном исследовании будет отдано предпочтение описанию количественных характеристик.

**Теоретические положения.** Принципы печати ПНФ и особенности его применения для ПП описаны в [5], а некоторые основные параметры изображены на рис. 1.

Наиболее важными физическими процессами, влияющими на размерные показатели изделия, являются [6]:

1. Экструзия и осаждение экструдированного материала (ЭМ), а именно:

1.1. Скорость потока материала. Должна быть постоянной для предотвращения экструдирования избытка или недостатка материала (т. е. обеспечения постоянства площади поперечного сечения ЭМ). На нее влияют скорость подачи филамента, скорость перемещения экструзион-

ной головки (ЭГ) и ее траектория, управление которыми осуществляется с помощью слайсера, а также перепад давления на входе и на выходе из экструзионного сопла (ЭС), диаметр отверстия ЭС, длина ЭС и вязкость ЭМ.

1.2. Разбухание ЭМ (*англ. die swelling*), т. е. радиальное расширение ЭМ после выхода из ЭС. Зависит от свойств материала и геометрии ЭС. Неэластичные наполнители, такие, как керамические частицы [7] или углеродные волокна [8], как правило, уменьшают разбухание.

1.3. Растекание раstra. Скорость процесса, окончательная форма и ширина раstra будут зависеть от вязкости и относительной поверхностной энергии расплавленного филамента и поверхности рабочей платформы (РП).

2. Отверждение раstra (в частности, усадка) с последующим диффузным соединением. Зависят от свойств филамента (вязкость, смачивание, поверхностное натяжение, теплопроводность, предел текучести, плотность, количество твердых частиц и др.) и температурного режима печати (температура разжижителя, рабочей камеры (РП)).

В дополнение к изложенному ЭС определяет размер и форму ЭМ [6]. В связи с тем, что обычно формовочное отверстие сопла имеет круглую форму, невозможно выполнять острые

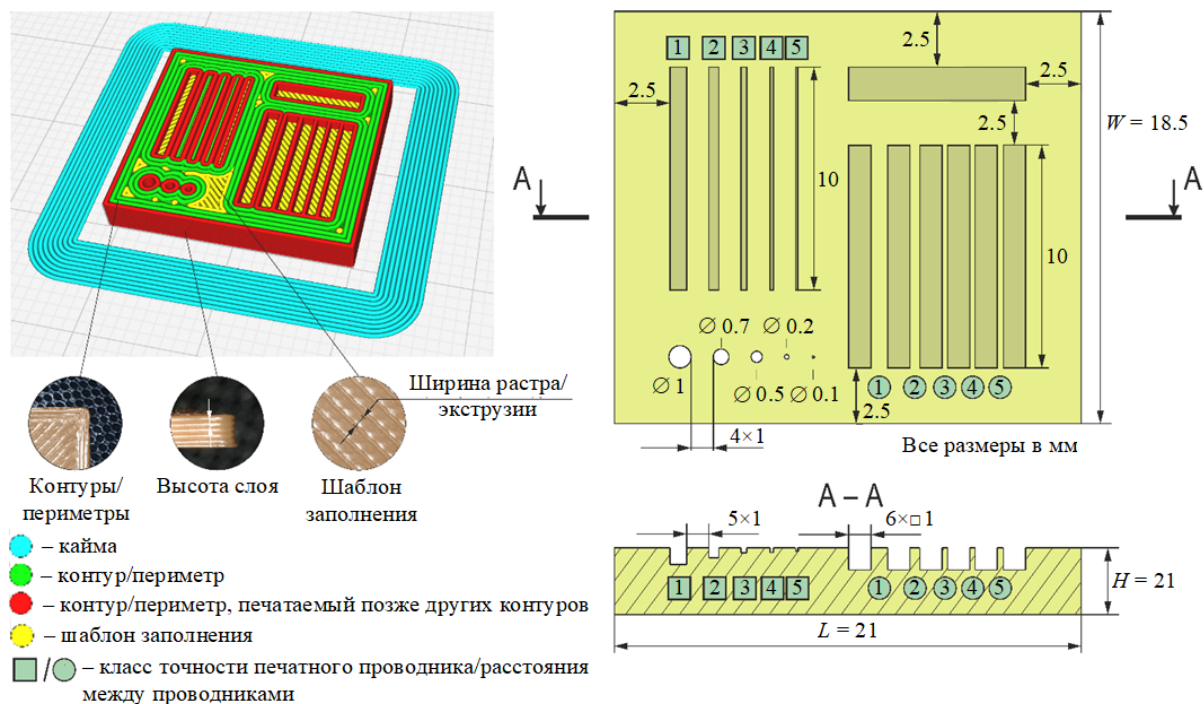


Рис. 1. Некоторые основные параметры печати (слева) и вид экспериментального образца (справа)

Fig. 1. Some FDM process parameters (left) and design of the experimental sample (right)

внешние углы, любой угол или край будет иметь закругление шириной, равной радиусу ЭС. Внутренние углы и края тоже будут закругленными. Диаметр ЭС также определяет минимальный размер элемента изделия, который может быть создан.

Кроме того, для обеспечения геометрической точности напечатанного изделия рекомендуется начинать печать с формирования контура (внешней оболочки) на более низкой скорости, чтобы сформировать границу, не позволяющую материалу, заполняющему внутреннюю часть слоя, нарушить общую точность построения изделия [6].

Таким образом, обеспечение размерных показателей достигается выбором диаметра ЭС, количества контуров, скоростей подачи филамента и перемещения ЭГ, расчетом траектории движения ЭГ, температурными режимами и свойствами филамента. При этом последние 2 параметра напрямую зависят от производителя материала и обычно указаны в технических условиях и рекомендациях к печати.

**Планирование эксперимента и материалы.** *Экспериментальный образец.* Для проверки возможности изготовления ПП до 5-го КТ была разработана топология (рис. 1), состоящая из наборов печатных проводников в виде каналов (канавок) квадратного сечения, которые могут быть заполнены проводящим материалом; расстояний между проводниками (зазоров) и сквозных отверстий. Ширины всех элементов проводящего рисунка (ЭПР) выбраны с учетом проверяемых КТ, диаметры отверстий – наиболее часто применяемые типовые значения.

*Оборудование.* Исследование проводилось на производственной базе Научно-образовательного центра "Центр аддитивных технологий" (НОЦ "ЦАТ") при МГТУ

им. Н. Э. Баумана, в состав которой входят два 3D-принтера отечественного производства: Picaso 3D Designer Classic 2016 (Picaso 3D) [9] и Hercules Strong 2017 (Imprinta) [10].

*Экструзионное сопло.* Исходя из предположения, что диаметр сопла должен быть меньше минимального размера ЭПР (т. е. 100 мкм) или равен ему, был проведен анализ доступности сопел подобного типоразмера и особенности их применения. В результате оказалось, что на отечественном рынке минимальный диаметр сопел составляет 0.2 мм, однако применяемые 3D-принтеры имеют нетиповые параметры резьбового соединения ЭС, в связи с чем выбор был ограничен следующими вариантами, поставляемыми официальным производителем: латунное сопло Ø0.2 мм и титановое сопло Ø0.5 мм. Несмотря на то, что последнее является более износостойким и, как следствие, позволяет применять материалы с температурой печати более 300 °С (например, полиэфирэфиркетон [PEEK]) и/или имеющие в своем составе угле-, стекловолокно или частицы металлов, оно имеет низкую теплопроводность и теоретически не позволяет проверить возможность изготовления ЭПР до 5-го КТ.

Особенностью применения ЭС с диаметрами отверстий менее 0.4 мм является возможность их засорения при печати.

*Расходные материалы.* В связи с тем, что полилактид (PLA) и акрилонитрил бутадиен стирол (ABS) являются основной составляющей большинства проводящих и стеклонаполненных филаментов (например, Conductive PLA (Protopasta), U3 ABS Conductive 2M (U3Print), TITAN GF-12 (Filamentarno!) и др.) и могут быть применены для печати латунными соплами диаметром до 0.4 мм, были выбраны отечественные материалы, представленные в табл. 1.

Табл. 1. Филаменты и некоторые параметры их печати

Tab. 1. Filaments and some parameters of their printing

Наименование	Производитель	Обозначение	Цвет	Температура разжижителя / РП, °С	
				Рекомендуемая	Заданная
PLA + Standart	Filamentarno!	PLA	Белый	220...240/40...60	205/60
ABS	FDPlast	ABS	Розовый	245...260/110...120	205/105
ABS GF-4	Filamentarno!	ABS +GF	Черный	230...250/100...105	235/105
<p><i>Примечания:</i></p> <p>1. Для предотвращения отсоединения первых слоев образца использовался 100 %-й обдув, начиная с третьего слоя.</p> <p>2. Температура выбрана ниже рекомендуемой для уменьшения скорости растекания ЭМ. Минимально возможная температура, при которой происходило осаждение ЭМ, была определена опытным путем.</p> <p>3 ABS + GF представляет собой ABS, наполненный рубленым стекловолокном в объеме 4 % от всего филамента.</p>					

Очевидно, что наличие твердых частиц в филаменте значительно влияет на его свойства (например, усадку), и зависимости, полученные для PLA и ABS, в этом случае могут не подходить, однако могут быть полезны для дальнейших исследований в качестве начальной точки.

Несмотря на то, что стеклонаполненные филаменты могут повредить формовочное отверстие латунного ЭС, оценка возможности их применения является важным направлением развития 3D-печати ПП. В связи с этим для исследования данного типа материалов на ЭС Ø0.2 мм было гальванически нанесено покрытие химическим никелем толщиной до 5 мкм для повышения износостойкости.

Проводящие филаменты не были использованы ввиду их недоступности в Российской Федерации.

*Программное обеспечение (ПО).* Размер треугольной сетки STL-файла, созданного системой автоматизированного проектирования, будет влиять на точность воспроизведения формы элементов из твердотельной 3D-модели. Чем больше размер сетки, тем значительнее будет искажение. Для создания STL-файла экспериментального образца применялась программа SolidWorks Premium 2022 SP2.0, количество треугольников составило 1214 шт.

Данные, предоставленные исследовательскими группами Ф. Бауманна (F. Baumann) с соавторами [11] и Я. Брюа (J. Bryła) с соавто-

рами [12], свидетельствуют о влиянии слайсера на геометрическую точность напечатанного изделия, однако обоснование данного факта отсутствует. Возможно, это связано с алгоритмом выделения секущих плоскостей детали и/или расчетом траектории движения инструмента, которые пользователь не может контролировать.

Апостериори были выбраны слайсеры Ultimaker Cura (версия 5.2.1) и PrusaSlicer (версия 2.5.0). Тип прошивки обоих 3D-принтеров на базе Marlin. При этом первый слайсер удалось программно совместить с обоими 3D-принтерами, в отличие от второго, в связи с чем Prusa не применялся для печати образцов на 3D-принтере Picaso.

*План эксперимента.* Ввиду того, что часть влияющих факторов относится к свойствам филамента или скрытым от пользователя алгоритмам ПО, они были отнесены к входным неконтролируемым и неуправляемым факторам, а остальные представлены в табл. 2.

Таким образом, в работе исследовалось влияние диаметра ЭС и количества контуров на следующие выходные параметры:

- линейные размеры образца;
- ширину канала печатного проводника;
- расстояние между проводниками;
- диаметр сквозного отверстия.

Для проведения исследования был выбран полный факторный эксперимент типа 2<sup>2</sup>. Полу-

Табл. 2. Входные контролируемые и управляемые факторы

Tab. 2. Controlled and managed input factors

Наименование	Значение	Ед. изм.
<i>Неварьируемые</i>		
Шаблон заполнения (в том числе для верхней и нижней поверхностей)	Прямолинейный	–
Плотность заполнения	100	%
Скорость перемещения при печати:		
– заполнение, периметры (в том числе внешние), мосты	30	мм/с
– маленькие периметры	15	мм/с
– заполнение пробелов	10	мм/с
Скорость печати первого слоя	20	мм/с
Радиус закрытия пробелов при нарезке	0.049	мм
Режим нарезки	Обычный	–
Разрешение нарезки	0	мм
Разрешение G-кода	0.0125	мм
Тип каймы	Кайма только снаружи	–
Ширина каймы	4	мм
<i>Варьируемые</i>		
Диаметр сопла ( $D$ )	0.2...0.4	мм
Высота слоя (в том числе первого)	$D/2$	мм
Количество контуров/периметров ( $P$ )	1...3	шт
Ширина экструзии (в том числе первый слой, периметры, заполнение)	$D$	мм

ченные математические модели имели вид полинома первого порядка:

$$Y(D, P) = b_0 + b_D D + b_P P + b_{DP} DP,$$

где  $Y$  – функция отклика;  $D$  – диаметр сопла, представленный в нормированных значениях ( $\varnothing 0.2$  мм принят за «–1»;  $\varnothing 0.4$  мм – «+1»);  $P$  – количество контуров, представленное в нормированных значениях (1 шт. принята за «–1»; 3 шт. – «+1»);  $b_0$  – значение функции отклика в центре плана;  $b_D$ ,  $b_P$  – коэффициенты, характеризующие степени влияния факторов  $D$  и  $P$  (соответственно) на функцию отклика;  $b_{DP}$  – коэффициент, характеризующий влияние взаимодействия факторов  $D$  и  $P$ .

Все математические модели были проверены на адекватность по критерию Фишера. Измерения линейных размеров образцов проводились с помощью штангенциркуля ШЦЦ-I-150-0,01 ГОСТ 166–89, а ЭПР – с помощью цифрового микроскопа Weller T0051383599N.

Ввиду отсутствия какой-либо нормативной документации, регламентирующей требования к ПП, изготовленным методами 3D-печати, оценка соответствия выходных факторов проводилась по ГОСТ Р 53429 [4] и ГОСТ 26246.5 [13].

**Результаты.** Полученные результаты разделены на несколько подразделов в соответствии с выбранными выходными параметрами.

**Общий вид.** Первые попытки изготовления образцов показали необходимость добавления фаски  $0.1 \times 45^\circ$  для каждого сквозного отверстия со стороны слоя Bottom, так как на первых слоях печати происходило затекание материала и отверстия получались глухими.

При выполнении прямоугольных углов канавок на всех образцах наблюдаются скругления, равные диаметру ЭС.

Образцы, напечатанные с помощью ЭС  $\varnothing 0.4$  мм, имеют шероховатую поверхность с «заусенцами» по краям, а также ярко выраженную текстуру шаблона заполнения (рис. 2).

На образцах, напечатанных с тремя контурами, в половине случаев наблюдаются зазоры между контурами и растрами (рис. 2), что может быть связано с недостаточным значением параметра слайсера «перекрывание линий заполнения с линиями периметра», которое было за-

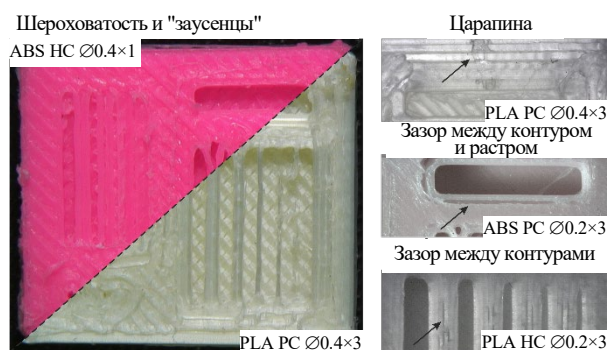


Рис. 2. Выявленные дефекты

Fig. 2. Identified defects

дано 5 %, и/или зазоры между контурами (рис. 2), что может являться причиной невозможности заполнения промежутка между контурами ЭПР, размер которого меньше диаметра ЭС [14]. Кроме того, так как большинство образцов были изготовлены на 3D-принтере Hercules с применением слайсера Cura, данный дефект, возможно, вызван несоответствием ожиданиям слайсера размера площади поперечного сечения ЭМ.

На некоторых образцах имеются царапины на верхней плоскости (рис. 2), что может являться следствием недостаточного поднятия ЭС над изделием при перемещении на новую позицию.

На образцах, изготовленных с помощью слайсера Prusa и ЭС  $\varnothing 0.4$  мм, отсутствуют зазоры 5-го КТ, что, вероятно, обусловлено регулировкой потока материала и алгоритмами выделения секущих плоскостей детали, управляемыми слайсером.

**Линейные размеры.** Практически все полученные средние значения показывают отклонения линейных размеров в пределах установленного допуска (рис. 3):

- для ширины и длины  $\pm 0.5$  мм [13];
- для толщины  $\pm 0.2$  мм [4].

Исключения составляют лишь длина образца из ABS, напечатанного на 3D-принтере Picaso со слайсером Cura с ЭС  $\varnothing 0.2$  мм и одним контуром ( $L = 20.48$  мм), и толщина образца из PLA, напечатанного на 3D-принтере Hercules со слайсером Cura с ЭС  $\varnothing 0.2$  мм и тремя контурами ( $H = 2.77$ ).

Также было выявлено, что для ЭС  $\varnothing 0.4$  мм преобладает отклонение значений линейных размеров в сторону увеличения, а для ЭС  $\varnothing 0.2$  мм – в сторону уменьшения.



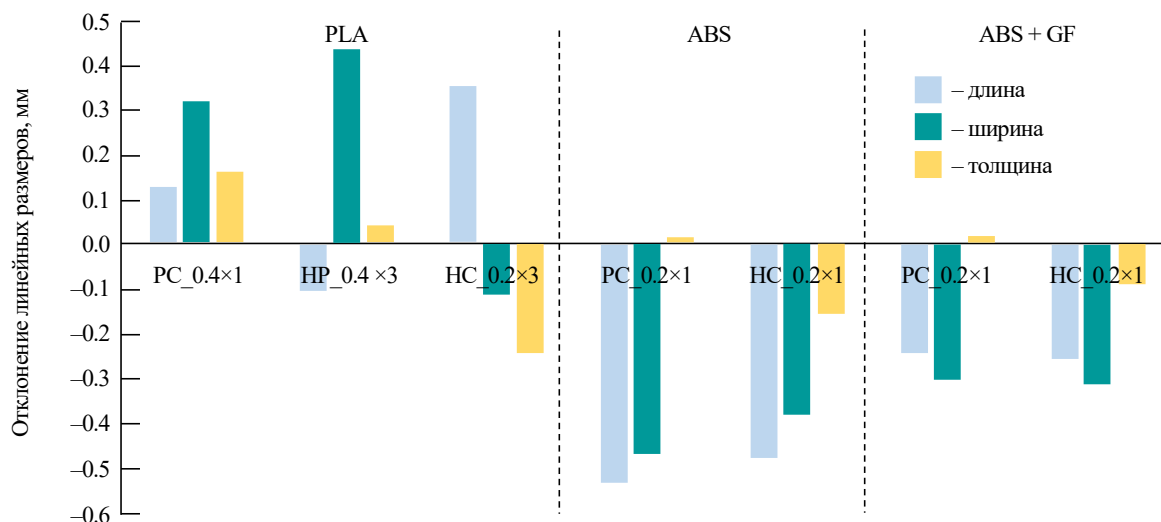


Рис. 3. Отклонения линейных размеров образцов, в наименьшей степени соответствующих требованиям

Fig. 3. Deviations of the linear dimensions of the samples that meet the requirements in the least degree

**Сквозные отверстия.** В большинстве случаев наблюдалось:

1. Для ЭС  $\varnothing 0.4$  мм в сочетании:

а) с тремя контурами (за исключением образцов из PLA, изготовленных на 3D-принтере Hercules) – отсутствие отверстий;

б) с одним контуром и с учетом исключенных выше образцов – наличие только отверстия с заданным диаметром 1 мм со значительным отклонением формы.

2. Для слайсера Prusa – наличие только отверстия с заданным диаметром 1 мм со значительным отклонением формы.

3. Для ЭС  $\varnothing 0.2$  мм – значительное отклонение диаметра сквозного отверстия от номинального значения (более 0.12 мм), превышающее допуск  $\pm 0.1$  мм, выбранный для отверстий без металлизации для 3–5-го КТ [4, п. 5.3.4] (рис. 4).

4. Чем больше количество контуров, тем

больше искажение формы и/или отклонение от заданного размера (рис. 4).

Несмотря на то, что показанные на рис. 4 для PLA отверстия имеют самое низкое отклонение размеров диаметров в отличие от других образцов PLA, они являются глухими, а не сквозными ввиду затекания материала в отверстия, вызванного меньшей скоростью печати первого слоя. В пределах допуска были получены сквозные отверстия только на образце ABS + GF (рис. 4).

Отклонение значений от номинального диаметра, вероятнее всего, является следствием усадки материала при отверждении.

**Каналы печатных проводников и расстояние между ними.** Для 1-го и 2-го КТ полученные средние значения в большинстве случаев находятся в пределах допуска (табл. 3 и 4). При этом для значений расстояния между проводниками характерно достижение более высокого

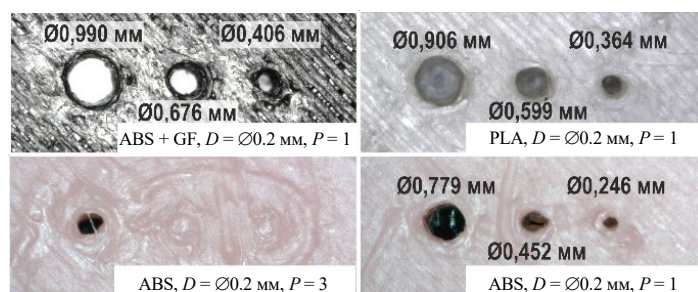


Рис. 4. Вид отверстий, полученных на образцах, изготовленных на 3D-принтере Hercules с помощью слайсера Cura (указаны средние значения)

Fig. 4. Sample vias (average values are indicated). 3D-printer – Hercules, slicer – Cura

Табл. 3. Соответствие размеров ширины канала проводника требованиям

Tab. 3. Compliance of the trace channel width with the requirements

Обозначение образца	D, мм	P, мм	Класс точности (норма по [4, п. 5.3.14], мм)				
			1 (0.75 ± 0.15)	2 (0.45 ± 0.10)	3 (0.25 ± 0.05)	4 (0.15 ± 0.03)	5 (0.10–0.03)
PLA PC	0.2	1	0.788	0.523	0.332	0.218	0.180
PLA HC	0.4	3	0.727	0.451	–	–	–
	0.2	3	0.780	0.497	0.319	0.256	0.207
PLA HP	0.2	1	0.756	0.442	0.268	0.189	0.163
ABS PC	0.2	3	0.683	0.491	0.277	0.335	0.232
ABS HC	0.4	1	0.666	0.506	0.308	–	–
	0.2	3	0.795	0.540	0.326	0.223	0.174
Количество образцов с размерами ЭПР в пределах допуска, % от общего числа			70	65	20 (40 – для ЭС Ø0.2 мм)	5 (10 – для ЭС Ø0.2 мм)	0
Примечания: 1. Обозначение образца имеет структуру "MMM ПС", где MMM – материал, П – 3D-принтер (H – Hercules, P – Picaso), С – слайсер (C – Cura, P – Prusa). 2. Красным выделены значения размеров, выходящие за пределы допуска.							

Табл. 4. Соответствие расстояния между проводниками требованиям

Tab. 4. Compliance of the space with the requirements

Обозначение образца	D, мм	P, мм	Класс точности (норма по [4, п. 5.3.14], мм)				
			1 (0.75 ± 0.15)	2 (0.45 ± 0.10)	3 (0.25 ± 0.05)	4 (0.15 ± 0.03)	5 (0.10–0.03)
PLA PC	0.2	1	0.680	0.410	0.282	0.204	0.157
PLA HC	0.4	3	0.861	0.614	0.288	–	–
	0.2	3	0.637	0.335	0.294	0.166	0.114
PLA HP	0.2	1	0.759	0.462	0.183	0.210	0.198
ABS PC	0.2	3	0.674	0.451	0.273	0.259	0.246
ABS HC	0.4	1	0.768	0.611	0.291	–	–
	0.2	3	0.550	0.480	0.323	0.157	0.149
Количество образцов с размерами расстояний между проводниками в пределах допуска, % от общего числа			75	60	40 (50 – для ЭС Ø0.2 мм)	15 (30 – для ЭС Ø0.2 мм)	0
Примечания: 1. Обозначение образца имеет структуру "MMM ПС", где MMM – материал, П – 3D-принтер (H – Hercules, P – Picaso), С – слайсер (C – Cura, P – Prusa). 2. Красным выделены значения размеров, выходящие за пределы допуска.							

КТ, чем для каналов проводников. Анализ результатов измерений в отношении обеспечения 3-го КТ показал следующее:

– 20 % изготовленных образцов соответствует КТ по ширине канала проводника, причем все эти образцы были изготовлены с применением ЭС Ø0.2 мм (т. е. в пределах допуска получены значения на 40 % образцах, изготовленных с применением ЭС Ø0.2 мм);

– 40 % изготовленных образцов соответствует КТ по расстоянию между проводниками, причем 60 % из них были изготовлены с применением ЭС Ø0.2 мм, т. е. среди всех образцов, изготовленных с использованием ЭС Ø0.2 мм, соответствовала КТ половина, а среди образцов, изготовленных с использованием ЭС Ø0.4 мм, – 30 %.

В связи с тем, что процент образцов, изготовленных с применением ЭС Ø0.4 мм и соответствующих 3-му КТ, мал (а именно 0 % для ширин каналов проводников и 30 % для расстояния между проводниками) и в соответствии с [4] КТ определяется наличием хотя бы одного элемента конструкции, соответствующего значениям класса, ЭС Ø0.4 мм позволяет изготовить ЭПР до 2-го КТ, а Ø0.2 мм – до 3 КТ, что согласуется с предположением о том, что диаметр отверстия определяет минимальный размер элемента.

При изготовлении ЭПР 4-го КТ в допуске были лишь ЭПР на четырех образцах, что, вероятно, является случайностью, тем не менее это показывает, что при верном управляющем решении (например, создании компенсацион-



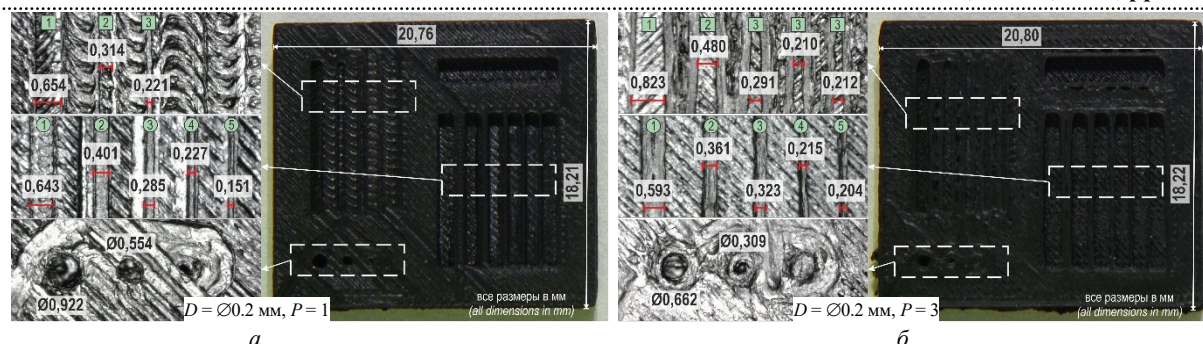


Рис. 5. Вид напечатанных образцов, в наибольшей степени соответствующих требованиям. Материал – ABS + GF, слайсер – Cura, ЭС – диаметром  $\varnothing 0.2$  мм и покрытое химическим никелем, 3D-принтер: а – Picaso; б – Hercules

Fig. 5. Samples most corresponding to the requirements (average values are indicated).

Material – ABS + GF, slicer – Cura, nozzle –  $\varnothing 0.2$  mm coated with chemical nickel, 3D-printer: а – Picaso; б – Hercules

ной модели) возможно увеличение процента ПП 3-го КТ, соответствующих требованиям.

При изготовлении ЭПР 5-го КТ все значения существенно отклонялись от номинального, что является неприемлемым.

**Печать стеклонаполненным филаментом.** Торцы образцов ABS + GF, напечатанные на 3D-принтере Hercules, имеют большую шероховатость, чем у напечатанных на 3D-принтере Picaso, что, скорее всего, связано с прочисткой ЭС после засорения перед их печатью.

Все полученные линейные размеры соответствовали требованиям.

За исключением образца, представленного на рис. 4, на всех остальных образцах произошло частичное зарастание отверстий на промежуточных слоях печати.

Наилучшее соответствие требованиям в отношении ЭПР имеют образцы, представленные на рис. 5. Полученные размеры ЭПР имеют меньшее

отклонение от номинальных значений по сравнению с ABS без рубленого стекловолокна.

**Обсуждение.** Для образцов, изготовленных из ABS на 3D-принтере Picaso с помощью слайсера Cura, построены графики зависимости отклонений размеров от диаметра ЭС (рис. 6). В связи с тем, что на данных образцах с ЭС  $\varnothing 0.4$  мм удалось получить лишь ширину канала 1-го КТ, а для ЭС  $\varnothing 0.2$  мм, как показано ранее, в пределах допуска возможно получить расстояние между проводниками до 3-го КТ, графики ограничены этими КТ. Из рисунка видно, что независимо от количества контуров с увеличением диаметра ЭС отклонение от номинальных значений линейных размеров уменьшается, а для размеров ЭПР и толщины – возрастает.

На основании измеренных значений выходных параметров были определены коэффициенты математических моделей (ММ) и предло-

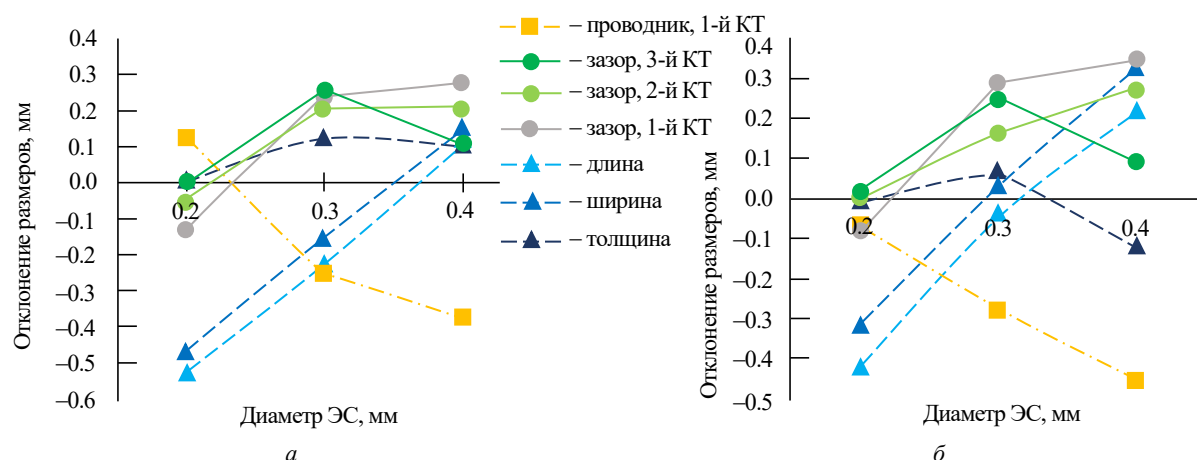


Рис. 6. Зависимость отклонения полученных размеров от диаметра ЭС для образцов, изготовленных из ABS на 3D-принтере Picaso с помощью слайсера Cura: а – 1 контур; б – 3 контура

Fig. 6. Influence of the nozzle diameter on deviations in the dimensions of the conductive pattern elements for the experimental samples made of ABS on a 3D printer Picaso using a slicer Cura: а – 1 contour; б – 3 contours

Табл. 5. Рекомендуемые управляющие действия

Tab. 5. Recommended management actions

Тип	Параметр	PLA			ABS	
		Cura		Prusa	Cura	
		Picasso	Hercules		Picasso	Hercules
Линейные размеры	Ширина ( $W$ )	$\downarrow D$ ; $\uparrow P$	$\uparrow D$ ; $\uparrow P$	$\downarrow D$	$\uparrow D$ ; $\downarrow P$	$\uparrow D$ ; $\uparrow P$
	Длина ( $L$ )	$\uparrow D$ ; $\uparrow P$	$\downarrow D$ ; $\downarrow P$	$\uparrow \downarrow D$ ; $\uparrow \downarrow P$	$\uparrow D$ ; $\downarrow P$	$\uparrow D$
	Толщина ( $H$ )	$\downarrow D$ ; $\uparrow P$	$\uparrow D$	$\uparrow D$	$\uparrow P$ ; $\downarrow D$	$\uparrow D$
	Рекомендация	$\downarrow D$ ; $\uparrow P$	$\uparrow D$ ; $\downarrow P$	$\downarrow D$ ; $\uparrow P$	$\uparrow D$ ; $\downarrow P$	$\uparrow D$
Размеры ЭПР	Ширина канала печатного проводника	1-й КТ: $\downarrow D$ ; $\downarrow P$ 2-й КТ: $\uparrow D$ ; $\downarrow P$	1-й КТ: $\uparrow D$ ; $\uparrow P$ 2-й КТ: $\uparrow D$ ; $\uparrow P$	1-й КТ: $\downarrow D$ ; $\downarrow P$ 2-й КТ: $\downarrow D$	1-й КТ: $\downarrow D$ ; $\uparrow P$ $\downarrow D$ ; $\uparrow P$	1-й КТ: $\downarrow D$ ; $\uparrow P$ 2-й КТ: $\uparrow D$ ; $\uparrow P$
	Расстояние между проводниками	1, 2-й КТ: $\downarrow D$ ; $\uparrow P$ 3-й КТ: $\downarrow D$ ; $\downarrow P$	1-й КТ: $\uparrow D$ ; $\downarrow P$ 2-й КТ: $\downarrow D$ 3-й КТ: –	1-й КТ: $\downarrow D$ ; $\uparrow P$ 2-й КТ: $\downarrow D$ 3-й КТ: $\downarrow D$ ; $\downarrow P$	1, 2-й КТ: $\downarrow D$ ; $\uparrow P$ 2-й КТ: $\downarrow D$ ; $\uparrow P$ 3-й КТ: $\downarrow D$	1-й КТ: $\uparrow D$ 2-й КТ: $\downarrow D$ 3-й КТ: –
	Рекомендация	$\downarrow D$ ; $\downarrow P$	$\downarrow D$ ; $\uparrow P$	$\downarrow D$ ; $\downarrow P$	$\downarrow D$ ; $\uparrow P$	$\downarrow D$ ; $\uparrow P$
	Диаметр сквозного отверстия	Построение ММ невозможно. Тем не менее рекомендуется $\downarrow D$ ; $\downarrow P$				
<i>Примечание.</i> Применены следующие графические обозначения: полужирное начертание – фактор или взаимодействие факторов, оказывающий(ее) наибольшее влияние; зачеркивание – влияние оказывает лишь взаимодействие данного фактора; отсутствие – влияние фактора и его взаимодействия незначительно; " $\uparrow$ ", " $\downarrow$ " – рекомендуется увеличить или уменьшить значение параметра соответственно. Значимость коэффициентов определялась по критерию Стьюдента ( $t_{кр}(0.05; 12) = 2.18$ )						

жены рекомендации по выбору оптимальных параметров (табл. 5).

Анализ данной таблицы показывает, что в 74 % случаев выбор диаметра ЭС оказывает наибольшее влияние, однако количество контуров является не менее важным фактором, что согласуется с зависимостями, показанными на графиках ранее.

Отсутствие влияния количества контуров на толщину изделия, вероятно, обусловлено задаваемым в слайсере параметром "высота слоя", который был выражен через зависимость от диаметра ЭС.

Согласно ММ для 3D-принтера Hercules и слайсера Cura оптимальным сочетанием факторов является ЭС  $\varnothing 0.4$  мм с тремя контурами для PLA и с одним – для ABS, что противоречит рекомендациям (табл. 5). Данное изменение обусловлено значительной шероховатостью и наличием заусенцев на торцах данных образцов, что является неприемлемым. Таким образом, было подобрано другое сочетание факторов, удовлетворяющее не только наименьшему отклонению размеров от номинальных значений, но и качеству поверхности.

Относительно линейных размеров предполагается, что комбинация уменьшения диаметра ЭС и увеличения количества контуров (в том числе и наоборот) связана с перепадом давления на входе и на выходе из ЭС. Н. А. Сикинदारом (N. A. Sukindar) с соавторами [15] при проведе-

нии исследований было установлено, что перепад давления при использовании ЭС  $\varnothing 0.2$  мм возрастает в 3 раза по сравнению с ЭС  $\varnothing 0.4$  мм. В свою очередь, это может привести к непостоянству потока материала, т. е. изменению площади поперечного сечения ЭМ, и, как следствие, к неравномерной ширине раstra. Таким образом, ввиду большей равномерности ширины раstra для ЭС  $\varnothing 0.4$  мм не требуется большого количества контуров для компенсации отклонений от номинальных значений линейных размеров в отличие от ЭС  $\varnothing 0.2$  мм.

Что касается размеров ЭПР, уменьшение диаметра ЭС обусловлено стремлением получить минимальный размер канала проводника.

Применение большого количества контуров или диаметра ЭС для 3D-принтера Hercules в сочетании со слайсером Cura, вероятно, является следствием недостаточной совместимости ПО с оборудованием, из-за которой слайсер некорректно рассчитывает скорость потока материала, т. е. его ожидания о ширине раstra не совпадают с реальным значением.

Подобное изменение в рекомендациях при переходе от PLA к ABS может быть связано с реологическими свойствами материалов, усадкой при отверждении или наличием разбухания ЭМ. Полученные зависимости для ABS + GF совпадают с рекомендациями для PLA, что может свидетельствовать о схожести некоторых свойств материалов. Однако проверить данные умозаключения пока невозможно ввиду отсутствия

Табл. 6. Значимость факторов для математических моделей, построенных для полных факторных экспериментов типа  $2^3$  и  $2^4$

Tab. 6. Significance of factors for mathematical models constructed for full factorial experiments  $2^3$  and  $2^4$

Параметр	КТ	Степень значимости факторов (наиболее → наименее)	
		ПФЭ типа $2^3$ : $D, P, S$	ПФЭ типа $2^4$ : $D, P, E, M$
Ширина ( $W$ )	–	$S \rightarrow D \rightarrow P$	$D \rightarrow E \rightarrow M \rightarrow P$
Длина ( $L$ )	–	$S \rightarrow P, D$	$D \rightarrow M \rightarrow P \rightarrow E$
Толщина ( $H$ )	–	$D \rightarrow S$	$D \rightarrow P, E, M$
Ширина канала печатного проводника	1	$P \rightarrow S, D$	$D \rightarrow E \rightarrow P \rightarrow M$
	2	$P \rightarrow D, S$	Недостаток данных
Расстояние между проводниками	1	$D \rightarrow S, P$	$D \rightarrow E \rightarrow P, M$
	2	$D \rightarrow S$	$D \rightarrow M \rightarrow P, E$
	3	$D \rightarrow P, S$	$D \rightarrow P, E, M$

**Примечания:**  
1. Применены следующие обозначения и сокращения: ПФЭ – полный факторный эксперимент;  $D$  – диаметр;  $P$  – количество периметров;  $S$  – слайсер;  $E$  – 3D-принтер;  $M$  – материал.  
2. Применены следующие графические обозначения: зачеркивание – влияние оказывает лишь взаимодействие данного фактора; отсутствие – влияние фактора и его взаимодействия незначительно; " $\rightarrow$ " – уменьшение степени влияния фактора в сторону, в которую указывает стрелка; если факторы перечислены через запятую, то разница в степенях их влияния незначительна.

справочных данных и/или результатов исследований на подобную тематику.

На основе полученных экспериментальных данных также построены ММ для полных факторных экспериментов (ПФЭ) типа  $2^3$  и  $2^4$ . В связи с тем, что такие факторы, как слайсер, материал и 3D-принтер, были представлены как совокупность характеризующих их свойств, а не в виде количественных значений определенных параметров, по полученным коэффициентам моделей оценена лишь степень влияния факторов на каждый из рассматриваемых выходных параметров (табл. 6). Анализ данной таблицы показывает значимость каждого рассмотренного фактора, причем доминирующее влияние в большинстве случаев оказывает диаметр ЭС. Предполагается, что в общем случае степень влияния возрастает следующим образом: диаметр ЭС → слайсер → 3D-принтер → количество контуров → материал.

**Заключение и выводы.** Анализируя полученные результаты, можно сделать следующие выводы:

– возможно изготовление ПП до 2-го КТ при использовании ЭС  $\varnothing 0.4$  мм и до 3-го КТ для ЭС  $\varnothing 0.2$  мм, что согласуется с предположением о том, что диаметр отверстия определяет минимальный размер элемента. Таким образом, для изготовления ПП 5-го КТ необходима разработка ЭС  $\varnothing 0.1$  мм и менее. В таком случае для сопел подобного размера большую актуальность приобретут вопросы, связанные с их засорением при печати стеклонаполненными филаментами и с

изменением ширины раstra, вызванным перепадом давлений на входе и на выходе из ЭС;

– гальваническое нанесение химического никеля на латунное ЭС  $\varnothing 0.2$  мм позволяет повысить его износостойкость для печати стеклонаполненными филаментами, однако проблема засорения ЭС остается актуальной. Тем не менее, вероятно, сокращению случаев засорения ЭС будет способствовать уменьшение размера рубленого стекловолокна в филаменте до тех пор, пока не будет достигнут предельный минимально возможный размер, предположительно равный половине диаметра сопла;

– перед изготовлением ПП рекомендуется проводить тестовую печать с последующим измерением интересующих параметров напечатанных образцов для возможного внесения корректирующего действия в процесс или создания компенсационной модели на основе полученных результатов;

– в связи с тем, что диаметр ЭС определяет минимальный размер печатаемого элемента, для более точного воспроизведения ЭПР рекомендуется отдавать предпочтения ЭС, диаметр которого меньше требуемого КТ или равен ему, и в случае неудовлетворительных отклонений размеров от номинальных значений корректировать полученные размеры увеличивая количество контуров, так как предполагается, что большее количество контуров компенсирует неравномерность ширины раstra, вызванную перепадом давления на входе и на выходе из ЭС (наиболее актуально для ЭС  $\varnothing 0.3$  мм и менее).

Кроме того, экспериментально подтверждена значимость влияния диаметра ЭС, количества контуров, слайсера, материала и 3D-принтера на размерные показатели ПП (ли-

нейные размеры; ширина канала печатного проводника; расстояние между проводниками; диаметр сквозного отверстия).

### Авторский вклад

**Смирнова Ольга Николаевна** – анализ литературы по теме исследования; разработка методик проведения экспериментов; обработка полученных результатов; обсуждение результатов; подготовка статьи.

**Александров Александр Александрович** – изготовление экспериментальных образцов; обсуждение результатов; подготовка статьи.

**Боброва Юлия Сергеевна** – обсуждение результатов; подготовка статьи.

**Моисеев Константин Михайлович** – постановка задачи; обсуждение результатов; руководство научными исследованиями; подготовка статьи.

### Author's contribution

**Olga N. Smirnova**, literature review; development of research methods; analysis of the experimental results; discussion of the results; preparation of the paper text.

**Alexander A. Aleksandrov**, manufacturing of experimental samples; discussion of the results; preparation of the paper text.

**Yulia S. Bobrova**, discussion of the results; preparation of the paper text.

**Konstantin M. Moiseev**, definition of research scopes; discussion of the results; management of the work; preparation of the paper text.

### Список литературы

1. Смирнова О. Н., Боброва Ю. С., Моисеев К. М. Методы 3D-печати для изготовления печатных плат // Электроника: наука, технология, бизнес. 2022. № 8. С. 128–134. doi: 10.22184/1992-4178.2022.219.8.128.136

2. Nelson M. D., Ramkumar N., Gale B. K. Flexible, transparent, sub-100 µm microfluidic channels with fused deposition modeling 3D-printed thermoplastic polyurethane // J. of Micromechanics and Microengineering. 2019. Vol. 29, № 9. P. 1–8. doi: 10.1088/1361-6439/ab2f26

3. Fabrication of conductive paths on a fused deposition modeling substrate using inkjet deposition / W. Zhou, F. A. List, C. E. Duty, S. S. Babu // Rapid Prototyping J. 2016. Vol. 22, № 1. P. 77–86. doi: 10.1108/RPJ-05-2014-0070

4. ГОСТ Р 53429–2009. Платы печатные. Основные параметры конструкции. М.: Стандартинформ, 2018. 11 с.

5. Смирнова О. Н., Боброва Ю. С., Моисеев К. М. Анализ методов 3D-печати для изготовления ПП: метод послойного наложения филамента. Ч. 5 // Технологии в электронной промышленности. 2021. № 6. С. 48–55.

6. Гибсон Я., Розен Д., Стакер Б. Технологии аддитивного производства. Трёхмерная печать, быстрое прототипирование и прямое цифровое производство / пер. с англ.; под ред. И. В. Шишковского. М.: Техносфера, 2020. 648 с.

7. Turner B. N., Strong R., Gold S. A. A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling // Rapid Prototyping J. 2014. Vol. 20. P.192–204. doi: 10.1108/RPJ-01-2013-0012

8. Nanofiber-reinforced polymers prepared by fused deposition modeling / M. L. Shofner, K. Lozano, F. J. Rodriguez-Macias, E. V. Barrera // J. of Applied Polymer Science. 2003. Vol. 89, № 11. P. 3081–3090. doi: 10.1002/app.12496

9. Picaso 3D Designer Classic. URL: <https://picaso-3d.ru/ru/products/printers/classic/> (дата обращения 14.09.2023)

10. 3D принтер. Hercules Strong. 2017. URL: <https://drive.google.com/file/d/1k0Nj2tBegzr6Bj4vqHCTMxF8wrlmCenJ/view?usp=sharing> (дата обращения 28.12.2022)

11. Influence of slicing tools on quality of 3D printed parts / F. Baumann, H. Bugdayci, J. Grunert, F. Keller, D. Roller // Computer-Aided Design & Applications. 2015. Vol. 13, № 1. P. 14–31. doi: 10.1080/16864360.2015.1059184

12. Bryła J., Martowicz A. Study on the Importance of a Slicer Selection for the 3D Printing Process Parameters via the Investigation of G-Code Readings // Machines. 2021. Vol. 9. P. 163. doi: 10.3390/machines9080163

13. ГОСТ 26246.5–89 (МЭК 249-2-5-87). Материал электроизоляционный фольгированный нормированной горючести для печатных плат на основе стеклоткани, пропитанной эпоксидным связующим. Технические условия. М.: ИПК Изд-во стандартов, 2002. 7 с.

14. Проблемы качества 3D-печати. URL: <https://3dpt.ru/page/faq> (дата обращения 21.03.2023)

15. Analyzing the effect of nozzle diameter in fused deposition modeling for extruding polylactic acid

using open-source 3D printing / N. A. Sukindara, J. Teknologi. 2016. Vol. 78, № 10. P. 7–15. doi: 10.11113/jt.v78.6265  
M. Ariffinb, B. Baharudinb, C. Jaafarb, M. Ismail //

### Информация об авторах

**Смирнова Ольга Николаевна** – аспирантка кафедры электронных технологий в машиностроении Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Автор 17 научных публикаций. Сфера научных интересов – печатные платы и печатные узлы в части технологий их изготовления; методы испытаний и контроля.

Адрес: Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1, Москва, 105005, Россия

E-mail: olga.smirnova.nik@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0004-3625-3250>

**Александров Александр Александрович** – аспирант кафедры технологий обработки материалов Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Автор 5 научных публикаций. Сфера научных интересов – аддитивные технологии; лазерные аддитивные технологии; коаксиальное лазерное плавление; исследование технологической прочности жаропрочных сплавов.

Адрес: Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1, Москва, 105005, Россия

E-mail: alexandrov@bmstu.ru

<https://orcid.org/0009-0009-8980-7866>

**Боброва Юлия Сергеевна** – инженер (2006), инженер-технолог кафедры электронных технологий в машиностроении Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Автор более 40 научных публикаций. Сфера научных интересов – технологии изготовления и контроля печатных плат.

Адрес: Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1, Москва, 105005, Россия

E-mail: ju.s.bobrova@gmail.com

<http://orcid.org/0009-0009-7231-7422>

**Моисеев Константин Михайлович** – кандидат технических наук (2012), доцент кафедры электронных технологий в машиностроении Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана (2006). Автор более 50 научных публикаций. Сфера научных интересов – микро- и нанoeлектроника; вакуумная и плазменная электроника; вакуумные технологические процессы и оборудование.

Адрес: Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1, Москва, 105005, Россия

E-mail: k.moiseev@bmstu.ru

<http://orcid.org/0000-0002-8753-7737>

### References

1. Smirnova O. N., Bobrova Yu. S., Moiseev K. M. 3D Printing Methods for PCB Manufacture. Electronics: Science, Technology, Business. 2022, no. 8, pp. 128–134. doi: 10.22184/1992-4178.2022.219.8.128.136 (In Russ.)

2. Nelson M. D., Ramkumar N., Gale B. K. Flexible, Transparent, Sub-100  $\mu\text{m}$  Microfluidic Channels with Fused Deposition Modeling 3D-Printed Thermoplastic Polyurethane. J. of Micromechanics and Microengineering. 2019, vol. 29, no. 9, pp. 1–8. doi: 10.1088/1361-6439/ab2f26

3. Zhou W., List F. A., Duty C. E., Babu S. S. Fabrication of Conductive Paths on a Fused Deposition Modeling Substrate Using Inkjet Deposition. Rapid Prototyping J. 2016, vol. 22, no. 1, pp. 77–86. doi: 10.1108/RPJ-05-2014-0070

4. GOST R 53429–2009. Printed Circuit Boards. Basic Parameters of Structure. Moscow, *Standartin-form*, 2018, 11 p. (In Russ.)

5. Smirnova O. N., Bobrova Yu. S., Moiseev K. M. Analysis of 3D Printing Methods for the Manufacture

of PCD: Fused Deposition Modeling. Part 5. Technologies in the Electronic Industry. 2021, no. 6, pp. 48–55. (In Russ.)

6. Gibson I., Rosen D., Stucker B. *Tekhnologii additivnogo proizvodstva. Trekhmernaya pechat', bystroye prototipirovanie i pryamoe tsifrovoye proizvodstvo* [Additive Manufacturing Technologies. 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing]. Transl., ed. by I. V. Shishkovskii. Moscow, *Tekhnosfera*, 2020, 648 p. (In Russ.)

7. Turner B. N., Strong R., Gold S. A. A Review of Melt Extrusion Additive Manufacturing Processes: I. Process Design and Modeling // Rapid Prototyping J. 2014, vol. 20, pp. 192–204. doi: 10.1108/RPJ-01-2013-0012

8. Shofner M. L., Lozano K., Rodríguez-Macías F. J., Barrera E. V. Nanofiber-Reinforced Polymers Prepared by Fused Deposition Modeling. J. of Applied Polymer Science. 2003, vol. 89, no. 11, pp. 3081–3090. doi: 10.1002/app.12496

9. Picaso 3D Designer Classic. Available at:



<https://picaso-3d.ru/ru/products/printers/classic/> (accessed 14.09.2023)

10. 3D Printer. Hercules Strong. 2017. Available at: <https://drive.google.com/file/d/1k0Nj2tBegzr6Bj4vqHCTMxF8wr1mCenJ/view?usp=sharing> (accessed 28.12.2022) (In Russ.)

11. Baumann F., Bugdayci H., Grunert J., Keller F., Roller D. Influence of Slicing Tools on Quality of 3D Printed Parts. *Computer-Aided Design & Applications*. 2015, vol. 13, no. 1. pp. 14–31. doi: 10.1080/16864360.2015.1059183

12. Bryła J., Martowicz A. Study on the Importance of a Slicer Selection for the 3D Printing Process Parameters via the Investigation of G-Code Readings. *Machines*. 2021, vol. 9, p. 163. doi: 10.3390/machines9080163

13. GOST 26246.5–89 (МЭК 249-2-5-87). Epoxide-impregnated glass fabric foil-clad electrical insulating material of rated combustibility for printed plates. Specifications. Moscow, *IPK Izdatelstvo Standartov*, 2002, 7 p. (In Russ.)

14. 3D Printing Quality Problems. Available at: <https://3dpt.ru/page/faq> (accessed 21.03.2023) (In Russ.)

15. Sukindara N. A., Ariffin M., Baharudin B., Jaafar C., Ismail M. Analyzing the Effect of Nozzle Diameter in Fused Deposition Modeling for Extruding Polylactic Acid Using Open-Source 3D Printing. *J. Teknologi*. 2016, vol. 78, no. 10, pp. 7–15. doi: 10.11113/jt.v78.6265

### Information about the authors

**Olga N. Smirnova**, postgraduate student of the Department of Electronic Engineering Technologies of the Bauman Moscow State Technical University. The author of 17 scientific publications. Area of expertise: printed circuit boards and their assembly; manufacturing technologies; test and control methods.

Address: Bauman Moscow State Technical University, 5/1, 2-ya Baumanskaya St., Moscow 105005, Russia

E-mail: [olga.smirnova.nik@gmail.com](mailto:olga.smirnova.nik@gmail.com)

<https://orcid.org/0009-0004-3625-3250>

**Alexander A. Aleksandrov**, postgraduate student of the Department of Materials processing technologies of the Bauman Moscow State Technical University. The author of 5 scientific publications. Area of expertise: additive technologies; laser additive technologies; coaxial laser melting; study of technological strength of heat-resistant alloys.

Address: Bauman Moscow State Technical University, 5/1, 2-ya Baumanskaya St., Moscow 105005, Russia

E-mail: [alexandrov@bmstu.ru](mailto:alexandrov@bmstu.ru)

<https://orcid.org/0009-0009-8980-7866>

**Yulia S. Bobrova**, Engineer (2006), Process Engineer, of the Department of Electronic Engineering Technologies of the Bauman Moscow State Technical University. The author of more than 40 scientific publications. Area of expertise: technologies of manufacturing and control of printed circuit boards.

Address: Bauman Moscow State Technical University, 5/1, 2-ya Baumanskaya St., Moscow 105005, Russia

E-mail: [ju.s.bobrova@gmail.com](mailto:ju.s.bobrova@gmail.com)

<http://orcid.org/0009-0009-7231-7422>

**Konstantin M. Moiseev**, Cand. Sci. (Eng.) (2012), Senior Lecturer of Department of Electronic Engineering Technologies of the Bauman Moscow State Technical University. The author of more than 50 scientific publications. Area of expertise: micro- and nanoelectronics; vacuum and plasma electronics; vacuum technological processes and equipment.

Address: Bauman Moscow State Technical University, 5/1, 2-ya Baumanskaya St., Moscow 105005, Russia

E-mail: [k.moiseev@bmstu.ru](mailto:k.moiseev@bmstu.ru)

<http://orcid.org/0000-0002-8753-7737>