

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОГРАММНЫХ СПОСОБОВ КОРРЕКТИРОВКИ ДЕФЕКТОВ ПОСЛОЙНОГО НАПЛАВЛЕНИЯ ПРИ ПЕЧАТИ НА 3D-ПРИНТЕРЕ

Ефременкова М.В.<sup>1</sup>, Попинако Я.В.<sup>2</sup>, Кизилов С.А.<sup>3</sup>, Никитенко М.С.<sup>4</sup>

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук» (ФИЦ УУХ СО РАН), РФ, г. Кемерово E-mail: [margaritasistuk@mail.ru](mailto:margaritasistuk@mail.ru)<sup>1</sup>, [popinakoya@gmail.com](mailto:popinakoya@gmail.com)<sup>2</sup>, [sergkizilov@gmail.com](mailto:sergkizilov@gmail.com)<sup>3</sup>, [ltd.mseng@gmail.com](mailto:ltd.mseng@gmail.com)<sup>4</sup>

**Аннотация.** В статье рассмотрена проблематика снижения искажений формы и повышения качества поверхностей деталей, изготовленных методом 3D-печати по технологии послойного наплавления (Fused Deposition Modeling), а также предложены способы их решения. В статье рассмотрены искажения формы и нарушения качества поверхностей изготавливаемых деталей, с которыми возможно столкнуться в процессе изготовления моделей на 3D-принтерах, использующих технологию FDM. Изучены причины их появления и предложены программные способы их компенсации без необходимости изменения конструкции 3D-принтера на стадии подготовки детали к печати. Описаны результаты серии экспериментов по выявлению часто встречаемых дефектов и способов их программного устранения. Также даны рекомендации для предотвращения появления дефектов при послойной печати на 3D-принтерах. Все тестовые модели изготовлены на принтере Anycubic Chiron с применением пластика PETG, подготовка к печати выполнялась в программе Ultimaker Cura 3D.

**Ключевые слова:** аддитивные технологии, 3D-печать, 3D-принтер, прототипирование, послойное наплавление, PETG, филамент.

## 3-ПРИНТЕРДЕ БАСЫП ЧЫГАРУУДА КАТМАРЛАНУУ КЕМЧИЛИКТЕРИН ОНДООНУН ПРОГРАММАЛЫК ЖОЛДОРУН ИЗИЛДӨӨ

Ефременкова М.В.<sup>1</sup>, Попинако Я.В.<sup>2</sup>, Кизилов С.А.<sup>3</sup>, Никитенко М.С.<sup>4</sup>

Федералдык мамлекеттик бюджеттик илимий мекеме "Россия Илимдер академиясынын Сибирь бөлүмүнүн көмүр жана көмүр химиясы боюнча федералдык изилдөө борбору" (ФИЦ УУХ СО РАН), РФ, Кемеров III. E-mail: [margaritasistuk@mail.ru](mailto:margaritasistuk@mail.ru)<sup>1</sup>, [popinakoya@gmail.com](mailto:popinakoya@gmail.com)<sup>2</sup>, [sergkizilov@gmail.com](mailto:sergkizilov@gmail.com)<sup>3</sup>, [ltd.mseng@gmail.com](mailto:ltd.mseng@gmail.com)<sup>4</sup>

**Аннотация.** Макалада формасы бурмалоону азайтуу жана катмарлуу каптоо технологиясы (ТКЧ) боюнча 3-басма ыкмасында өндүрүлгөн тетиктердин беттеринин сапатын жогорулатуу проблемалары каралып, аларды чечүү жолдору да сунушталган. Макалада технологияны колдонгон 3 вв-принтердеги моделдерди даярдоо процессинде туш болушу мүмкүн болгон даярдалган тетиктердин беттеринин формасынын бурмаланышы жана сапатынын бузулушу каралган. Алардын пайда болушунун себептери изилденген жана басып чыгарууга даярдоо баскычында 3D-принтер дизайнын өзгөртпөстөн, алардын ордун толтуруунун программалык жолдору сунушталган. Көп кездешикен кемчиликтерди аныктоо жана аларды программалык жактан кантип чечүү боюнча бир катар эксперименттердин натыйжалары сүрөттөлгөн. Сунуштар ошондой эле 3D-принтер боюнча кабат-кабат басып чыгаруу учурунда кемчиликтерди алдын алуу үчүн берилет. Бардык сыноо моделдери Эаду

Пластмассасын колдонуу менен липо принтеринде жасалган, басып чыгарууга даярдоо вад 3 хад программасында жүргүзүлгөн.

**Негизги сөздөр:** кошулмча технологиялар, 3СП басып чыгаруу, 3СП принтер, прототиптөө, уч, уч, филамент.

## INVESTIGATION OF SOFTWARE METHODS FOR CORRECTING LAYER-BY-LAYER SURFACING DEFECTS WHEN PRINTING ON A 3D PRINTER

Efremenkova M.V.<sup>1</sup>, Popinako Y.V.<sup>2</sup>, Kizilov S.A.<sup>3</sup>, Nikitenko M.S.<sup>4</sup>

Federal State Budget Scientific Centre «The Federal Research Center of Coal and Coal-Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences» (FRC CCC SB RAS) Russian Federation, Kemerovo, E-mail: [margaritasistuk@mail.ru](mailto:margaritasistuk@mail.ru)<sup>1</sup>, [popinakoya@gmail.com](mailto:popinakoya@gmail.com)<sup>2</sup>, [sergkizilov@gmail.com](mailto:sergkizilov@gmail.com)<sup>3</sup>, [ltd.mseng@gmail.com](mailto:ltd.mseng@gmail.com)<sup>4</sup>

**Abstract:** The article discusses the issues of the parts surfaces and shapes quality made by 3D printing using the technology of layer-by-layer deposition (Fused Deposition Modeling) and also suggests ways to solve them. The article considers shape distortions and violations of the producing parts surfaces quality that may be encountered in the process of manufacturing models on a FDM technology based 3D printer. The reasons for their appearance have been studied and software methods have been proposed to prevent them without changing the design of the 3D printer at the stage of preparing the part for printing. The results of an experiments series to identify common defects and ways to eliminate them programmatically are described. Recommendations are also given to prevent the appearance of defects during layer-by-layer printing on 3D printers. All test models were made on an Anycubic Chiron printer using PETG plastic, slicing was performed with the Ultimaker Cura 3D program.

**Keywords:** additive technologies, 3D printing, prototyping, FDM, PETG, filament.

### Введение

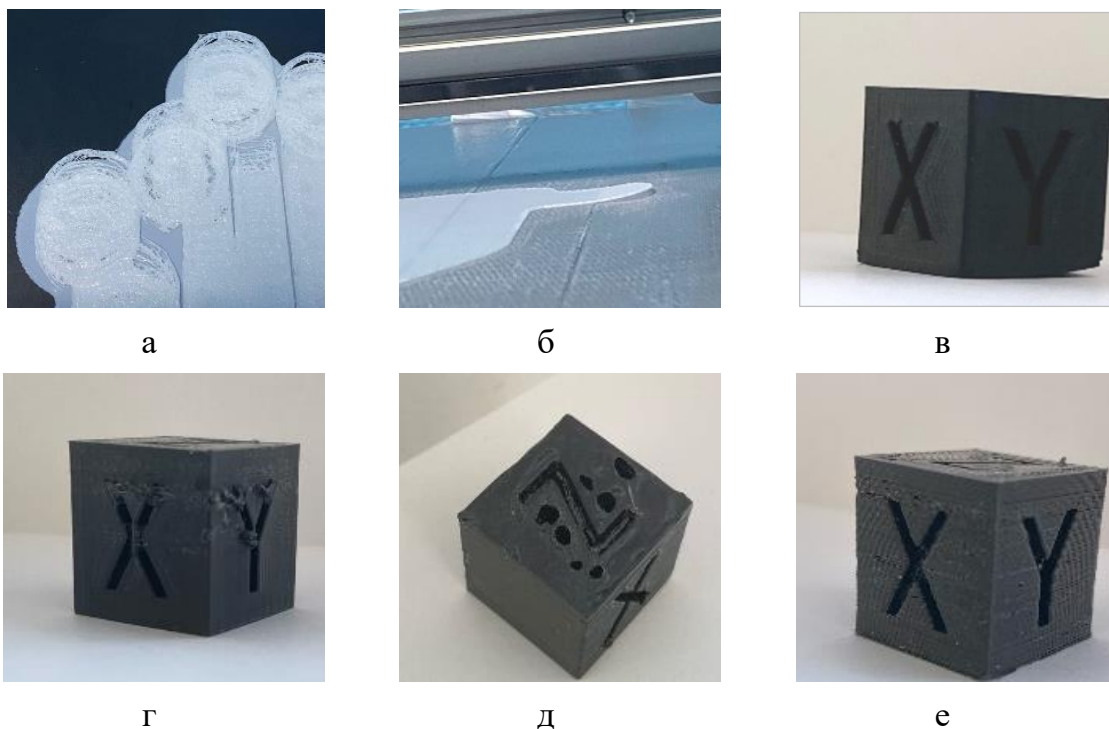
Аддитивные технологии с каждым годом становятся более востребованными, особенно при изготовлении масштабных материальных макетов, в том числе в исследовательских целях на стадии НИР и ОКР. Благодаря относительно невысокой себестоимости конечного образца и простоте его изготовления, такие технологии часто применяют для быстрого прототипирования. Трёхмерная печать нашла широкое применение в различных отраслях науки и промышленности, в том числе в медицине [1], машиностроении [2], строительстве [3] и др. По международным стандартам существует семь групп аддитивных технологий [4-5], при этом наиболее массовое распространение получила технология послойного нанесения расплавленных и вытянутых в нить заданного диаметра полимеров – филаментов, пластиков (или их сочетаний) [6] – Fused Deposition Modeling (далее FDM), в виду низкой стоимости и простоты применения.

### Формулировка проблемы

Качество поверхностей и форм деталей, изготовленных методом 3D-печати по технологии FDM, обуславливается рядом непосредственно влияющих факторов:

- конструкция принтера, в частности недостаточная жёсткость рамы, выражающаяся в ее деформации или вибрациях во время печати, что приводит к смещению положения печатающей головки. Применение экструдера типа Bowden, где подача пластика осуществляется по тефлоновой трубке, соединяющей механизм продавливания и рабочую головку, снижает точность дозирования филамента;
- отсутствие обратной связи по положению печатающей головки во время печати в системе управления принтера, что не позволяет выявлять ошибки, возникающие в исполнительных механизмах 3D-принтера;
- тип используемого филамента, так как каждый его тип имеет свои физические свойства, такие как: модуль упругости, прочность, температура плавления, величина тепловой усадки, ударная вязкость, изотропия [7-8];
- выбранные параметры печати на стадии подготовки.

Наиболее распространённые при 3D-печати дефекты показаны на рисунке 1.



*Рисунок 1 – Распространённые дефекты моделей при 3D-печати, где: а – смещение слоёв; б – отлипание подложки от стола; в – скручивание фрагментов; г – нити из переэкструдированного филамента; д – образование отверстий на верхней крышке; е – недоэкструзия*

Для подготовки модели к 3D-печати используется специальное программное обеспечение – программа-слайсер (далее по тексту – слайсер), «разрезающий» виртуальную 3D-модель на 2D-слои и генерирующий G-код, который содержит управляющие параметры для исполнительных механизмов 3D-принтера (координаты точек, в которых должна оказаться печатающая головка, их последовательность, скорость при перемещении и еще десятки других параметров).

Существует достаточно большое количество слайсеров: Ultimaker Cura, PrusaSlicer, 3DPrinterOS, Astroprint, IceSL, ideaMaker, и другие [2]. К наиболее используемым относятся Ultimaker Cura и PrusaSlicer.

Параметры для каждой модели подбираются индивидуально, пользователь опирается на литературные источники и эмпирические знания. При этом, большую часть описанных недостатков FDM 3D-принтеров можно скомпенсировать за счет правильно подобранного сочетания параметров печати в слайсере.

### **Практическое исследование и выводы**

В ходе проведённого исследования по выявлению проблем в процессе печати, была выполнена серия экспериментов на 3D-принтере Anycubic Chiron с подготовкой модели в слайсере Ultimaker Cura, используемый филамент – PETG.

Одной из проблем, проявляющихся во время печати деталей большого размера, является смещение слоёв вследствие перегрева драйвера шагового мотора (рисунок 1 а). Появление подобного рода дефектов является продолжением конструкции системы управления 3D-принтера – отсутствие обратной связи по положению печатающей головки. На практике данный дефект может проявляться при наличии иных причин, связанных с техническим состоянием принтера в виде завышения скорости перемещения головки, ослабления ремней натяжения или шкивов, загрязнения вала [9-11].

Частым дефектом также является нарушение внешней геометрии модели в результате плохой адгезии пластика к рабочей поверхности стола 3D-принтера. Это приводит к отлипанию подложки, либо самой детали (рисунок 1 б) и, в частности, искривлению её углов или краев (рисунок 1 в). В ходе проведённых экспериментов выявлены следующие причины возникновения данного дефекта печати:

- механические – неверно выставлена высота печатного сопла относительно рабочей поверхности стола 3D-принтера;
- внешнее воздействие – в процессе печати произошёл толчок 3D-принтера или резкий перепад температуры воздуха в зоне печати (попал сквозной поток воздуха);
- некорректно выставленные параметры печати в слайсере: скорость печати первого и последующего слоев; тип адгезии, к рабочей поверхности стола 3D-принтера, неверно подобрана температура плавления филамента или поверхности стола.

Все описанные проблемы поддаются исправлению при технической возможности 3D-принтера работать с применяемым типом филамента.

К наиболее частой причине отлипания детали от рабочей поверхности стола 3D-принтера относятся некорректно выставленные параметры процесса печати в слайсере. В общем виде – несоответствие применяемого теплового и скоростного режима печати

профилю филамента. Например, первый слой нанесён с низкой скоростью на разогретую рабочую поверхность стола 3D-принтера, при этом он медленно остывает, так как перепад температуры между поверхностью стола и соплом составляет в среднем 150 °С. За счёт невысокой скорости нанесения первого слоя (в среднем 25 мм/с или меньше), расплавленный филамент укладывается равномерным слоем с малым внутренним напряжением. Последующий слой укладывается с более высокой скоростью (в среднем 50 и более мм/с) при большем перепаде температур между расплавленным филаментом и температурой первого слоя филамента, уже находящегося на рабочей поверхности стола. За счёт большей скорости нанесения и более быстрого остывания, второй слой даёт большую тепловую усадку. Сила, возникающая при усадке филамента, переходящего из жидкой фазы в твёрдую, зачастую достаточна для преодоления адгезии первого слоя к поверхности рабочего стола и деформации геометрии детали.

Для устранения данного рода дефектов необходимо:

- настроить скорость печати нескольких последующих слоев, равную скорости печати первого слоя (может достигать до 15–20 слоев);
- подобрать температуры печатающей головки и поверхности рабочего стола, они могут значительно отличаться от заявленных производителем. Часто данная проблема связана с неточным измерением температуры датчиками 3D-принтера;
- увеличить площадь адгезии первого слоя к рабочей поверхности стола 3D-принтера путём изменения соответствующего параметра в слайсере.

Следующий выявленный дефект – «паутина» или нити (рисунок 1 г) возникает чаще всего у принтеров с Bowden экструдером при перемещении на новое положение без печати, когда под остаточным давлением в экструдере выдавливаются нежелательные нити пластика. Для устранения необходимо правильно подобрать величину втягивания и отката филамента. Реже причиной может стать неоткалиброванное перемещение экструдера или неверно подобранная температура.

Дефекты в виде провалов или впадин на верхнем слое поверхности детали (рисунок 1 д) происходят в результате недостатка экструдированного материала, что обычно вызвано неверным сочетанием высоты слоя и толщины крышки, в результате чего филамента не хватает и образуются впадины. Также подобный дефект встречается при недостаточном объёме заполнения детали – решается увеличением процента заполнения или увеличением количества закрывающих слоев.

Дефекты в виде щелей на боковых гранях появляются в результате пропуска слоёв или недоэкструзии (рисунок 1 е). Первая причина – механическая неполадка принтера: износ подшипников или погнутый вал, создающие вибрацию, в результате чего печатающая головка смещается. Вторая причина – заниженный коэффициент



экструдирования филамента, настраивается в соответствующем разделе слайсера. После калибровки 3D-принтера и подбора параметров печати, не меняя материал, удалось получить качественную деталь без вышеописанных дефектов (рисунок 2) методом FDM печати с повторяющимся результатом.

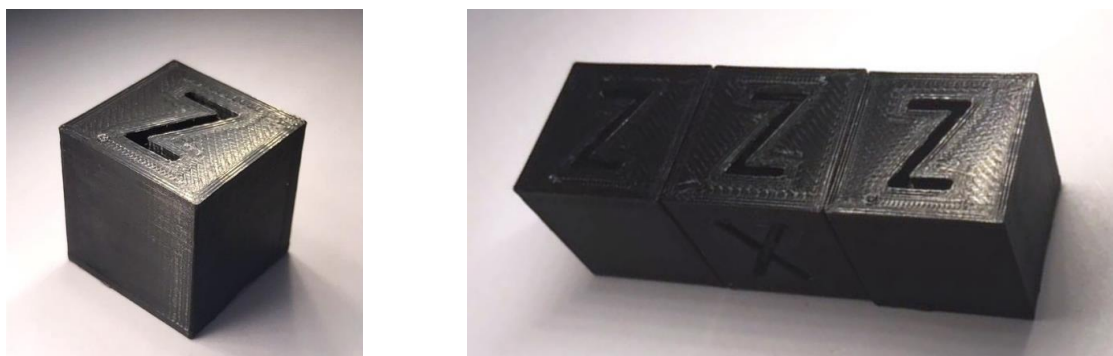


Рисунок 2 –Тестовый куб после настройки 3D-принтера и слайсера

### Заключение

Основными причинами появления дефектов на деталях при 3D-печати являются: некорректно настроенный или неисправный 3D-принтер и неверно подобранные параметры печати в слайсере. Таким образом, большую часть дефектов в деталях, изготовленных по технологии FDM 3D-печати, можно устранить путём комплексного подбора параметров на стадии подготовки модели к печати в программе. При этом, часто за счёт увеличения времени печати можно нивелировать даже серьёзные недостатки как в конструкции 3D-принтера, так и в качестве применяемого филамента, получая детали приемлемого качества.

*Исследование выполнено в рамках КНТП, утвержденной Распоряжением Правительства Российской Федерации от 11.05.2022 г. № 1144-р по Соглашению от 28.09.2022 № 075-15-2022-1199.*

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. **Кужаева, М. Р.** 3D-моделирование как неотъемлемая часть современной медицины / М. Р. Кужаева, А. О. Курняева, Н. И. Лиманова // Вопросы устойчивого развития общества. – 2022. – № 6. – С. 1236-1241.
2. **Попок, Н. Н.** Система поддержки принятия решений по базированию моделей деталей машин в рабочей зоне 3D-принтеров / Н. Н. Попок, Н. В. Беляков, Д. А. Яснев // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – 2022. – № 3. – С. 9-20.
3. **Стрельникова, К. А.** Тенденции развития цифровых технологий в организации строительного производства / К. А. Стрельникова, Д. К. Тимохин // Инженерный вестник Дона. – 2022. – № 5(89). – С. 1-10.
4. **Финогеев, Д. Ю.** Аддитивные технологии в современном производстве деталей точного машиностроения / Д. Ю. Финогеев, О. П. Решетникова // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2020. – № 86. – С 63-71.
5. *Additive manufacturing — General principles — Fundamentals and vocabulary // CELEBRATING 125 YEARS URL: <https://www.astm.org/> (дата обращения: 15.03.2023).*

6. **Жуков А. В.** Пластмассы для аддитивных технологий (обзор) / А. В. Жуков, А. А. Никифоров, А. С. Яковишин // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2021. – № 4(91). – С. 57-70.

7. **Темеров, Т. В.** Обзор пластиков для 3D-печати / Т. В Темеров // NOVAUM.RU. – 2019. – № 19. – С. 22-24.

8. **Исследование реологического поведения марок АБС-пластика для производства филаментов для 3D-печати методом послойного наплавления / О. И Абрамушкина, М. И. Узорина, П. В. Суриков, О. Б. Ушакова** // Пластические массы. – 2021. – № 5-6. – С. 29-35.

9. **Проблемы качества 3D-печати** // Техно 3D URL: <https://3dpt.ru/> (дата обращения: 20.03.2023).

10. **Руководство по устранению распространённых проблем 3D-печати** // 3DiY URL: <https://3d-diy.ru/> (дата обращения: 20.03.2023).

11. **Проблемы 3D-печати и варианты их решения. Устранение причин дефектов и ошибок во время печати** // «Цветной Мир» - интернет-магазин 3d-принтеров и оборудования URL: <https://cvetmir3d.ru/> (дата обращения: 20.03.2023).

**Рецензент: Пимонов Максим Владимирович. Доцент, кандидат технических наук, исполняющий обязанности зав. кафедрой «Технологии машиностроения» ФГБОУ ВО «Кузбасского государственного технического университета имени Т.Ф. Горбачева».**

**Е-mail: [makc130685@yandex.ru](mailto:makc130685@yandex.ru)**