

ИССЛЕДОВАНИЕ ОТКЛОНЕНИЙ ДЕЙСТВИТЕЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИИ ДЕТАЛЕЙ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ПО ТЕХНОЛОГИИ 3D-ПЕЧАТИ, ОТ НОМИНАЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИИ ИХ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ

DOI: 10.36724/2072-8735-2025-19-1-13-20

Карелина Мария Юрьевна,

Московский автомобильно-дорожный технический университет (МАДИ), Москва, Россия;
Государственный университет управления, Москва, Россия,
karelinamu@mail.ru

Филатов Владимир Викторович,

Государственный университет управления, Москва, Россия,
2vfilatov@gmail.com

Нефёлов Илья Сергеевич,

Государственный университет управления, Москва, Россия,
iljanefelov@yandex.ru

Талдыкин Дмитрий Сергеевич,

Государственный университет управления, Москва, Россия;
Московский автомобильно-дорожный технический университет (МАДИ), Москва, Россия, dima.dima.taldykin@mail.ru

Manuscript received 10 November 2024;

Accepted 15 December 2024

Ключевые слова: 3D-печать, контроль качества, пространственная геометрия, отклонения, программное обеспечение

В последнее время аддитивные технологии активно внедряются в различные производственные процессы, включая сельское хозяйство и производство машин и оборудования. Несмотря на непрерывное совершенствование оборудования для 3D-печати, проблема точности напечатанных изделий остается актуальной. В условиях повышенных требований к надежности аддитивных изделий, пространственные отклонения, возникающие в процессе 3D-печати, оказывают значительное влияние на качество конечного продукта. Основной целью данного исследования было выявление и анализ отклонений пространственной геометрии между напечатанными изделиями и их электронной 3D-моделью. В исследовании применялись методы измерения геометрических размеров, включая использование 3D-сканирования напечатанных деталей и их повторное изготовление по технологии FDM (Fused Deposition Modeling). В качестве объекта исследования была выбрана направляющая часть турбинного насоса. Были выявлены типовые отклонения пространственной геометрии изделий, напечатанных по данной технологии, основными причинами которых являются механические неисправности оборудования и нарушения в настройках 3D-принтеров. На основе полученных данных были разработаны рекомендации по оптимизации процессов 3D-печати, направленные на улучшение качества производимых деталей. Применение этих рекомендаций, в том числе с использованием программного обеспечения для контроля и настройки печати, позволит не только повысить качество печатных изделий, но и сократить материалоемкость при производстве сложных деталей, что будет способствовать дальнейшему развитию аддитивных технологий.

Информация об авторах:

Карелина Мария Юрьевна, д.т.н., д.п.н., профессор, Московский автомобильно-дорожный технический университет (МАДИ), Москва, Россия; проректор, Государственный университет управления, Москва, Россия

Филатов Владимир Викторович, к.т.н., доцент, Ведущий научный сотрудник Лаборатории реверсивного инжиниринга, Государственный университет управления, Москва, Россия

Нефёлов Илья Сергеевич, к.т.н., доцент, научный сотрудник Лаборатории реверсивного инжиниринга, Государственный университет управления, Москва, Россия

Талдыкин Дмитрий Сергеевич, техник Лаборатории реверсивного инжиниринга, Государственный университет управления, Московский автомобильно-дорожный технический университет (МАДИ), Москва, Россия

Для цитирования:

Карелина М.Ю., Филатов В.В., Нефёлов И.С., Талдыкин Д.С. Исследование отклонений действительной геометрии деталей, изготовленных по технологии 3D-печати, от номинальной геометрии их цифровых двойников // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2025. Том 19. №1. С. 13-20.

For citation:

M. Yu. Karelina, V. V. Filatov, I. S. Nefyolov, D. S. Taldykin, "Study of deviations of the actual geometry of parts manufactured by 3D-printing technology from the nominal geometry of their digital counterparts," T-Comm, 2025, vol. 19, no.1, pp. 13-20. (in Russian)

Введение

Одними из основных задач, которые стоят перед современной промышленностью является рациональное использование ресурсов, повышение эффективности производственных процессов, а также решение ряда социальных и экономических проблем. Внедрение аддитивных технологий в современные производственные процессы позволяет достичь необходимого результата [1, 4]. 3D-печать позволяет существенно сократить затраты на транспортировку и закупку запасных частей, а также снизить простой оборудования в ожидании поставки деталей. Это особенно важно для предприятий, которые испытывают нехватку финансовых ресурсов [9, 12].

Применение аддитивных технологий оправдано при создании уникальных прототипов и функциональных изделий, когда детали, изготовленные традиционными технологиями, не могут соответствовать всем предъявляемым эксплуатационным требованиям [3, 6, 7]. 3D-печать дает возможность изготавливать прототипы в короткие сроки и оперативно учитывать необходимые изменения в конструкции [17]. Несмотря на распространенное заблуждение о том, что напечатанные детали не требуют механической обработки, методы 3D-печати позволяют изготавливать изделия с минимальными допусками, таким образом способствуя более эффективному управлению ресурсами [19].

Технология 3D-печати FDM является одной из самых распространенных аддитивных технологий. Это стало возможно благодаря простоте эксплуатации и доступности оборудования. Однако, как и в любой технологии, в FDM есть свои технологические особенности, которые приводят к возникновению различных отклонений от исходной 3D-модели изделия [2]. Поэтому, несмотря на ее преимущества, необходимо внимательно относиться к вопросу точности печати изготавливаемых изделий [8, 10, 18].

Функциональные характеристики напрямую зависят от точности геометрии напечатанных деталей [11]. Недостаточная точность 3D-печати приводит к несоответствию действительных размеров детали с номинальными размерами 3D-модели, что в свою очередь вызывает проблемы на этапе сборки, а также увеличивает припуски на механическую обработку или наоборот, снижает прочность и долговечность готовых изделий в том случае, если величины припусков меньше необходимых значений для устранения дефектных слоев материала [15, 16]. Даже незначительные отклонения могут привести к значительным затратам на их устранение, а в некоторых случаях могут являться причинами возникновения критических отказов в работе узлов, в которых установлены напечатанные детали [13, 14].

Анализ отклонений пространственной геометрии является одним из ключевых моментов в оптимизации производственных процессов. Он позволяет выявить систематические ошибки и определить факторы, влияющие на точность изготовления. На основе полученных результатов могут быть разработаны рекомендации по выбору режимов печати, наладке оборудования. В итоге все эти действия приводят к повышению качества конечной продукции и снижению затрат на устранение дефектов. Как следствие, эти мероприятия способствуют ускорению интеграции в промышленные процессы, а также происходит коррекция направления будущих исследований в области 3D-печати [5].

Таким образом, внедрение аддитивных технологий, в т.ч. в сельскохозяйственный сектор, требует комплексного подхода по решению проблем с точностью для обеспечения наибольшего экономического и социального эффектов.

Однако, несмотря на огромную значимость проведение подобного рода исследований для изделий со сложной и уникальной пространственной геометрией весьма затруднено в силу необходимости использования специализированного оборудования и программного обеспечения. Поэтому данная работа направлена на определение общих рекомендаций по выбору режимов 3D-печати и настройке оборудования с целью снижения отклонений пространственной геометрии печатаемых изделий.

Материалы и методы

Исследование отклонений пространственной геометрии напечатанных изделий от исходной 3D-модели включает в себя несколько основных этапов.

На первом этапе выполняется выбор объекта исследования среди многообразия вариантов 3D-моделей. На втором этапе выполняется подбор оборудования и материалов для 3D-печати. Следующим этапом является назначение параметров 3D-печати для изготовления выбранной детали с наиболее оптимальным соотношением цена/качество. Для выполнения анализа отклонений будет применяться высокоточный 3D-сканер RangeVision Pro и специализированное программное обеспечение 3D Systems Control X.

Для проведения комплексного анализа отклонений программное обеспечение 3D Systems Control X предоставляет инструменты, предназначенные для метрологического анализа, обеспечивая точное выравнивание и сравнение между отсканированной в 3D-формате моделью и исходным файлом САПР. Данное программное обеспечение, использующее передовые алгоритмы и методики анализа, позволяет проводить оценку геометрических отклонений в печатных деталях с высоким разрешением.

1. Выравнивание данных и первоначальное сравнение: 3D Systems Control X начинает с импорта отсканированных данных и CAD-модели, применяя жесткое или наиболее подходящее выравнивание. Этот процесс выравнивания имеет ключевое значение, поскольку сводит к минимуму вероятность ошибок и обеспечивает точную привязку сравнительных показателей к исходной модели. Сложные варианты выравнивания, такие как выравнивание по базовым параметрам, по объектам и по поверхности, обеспечивают гибкость при адаптации к конкретной геометрии или особенностям, повышая точность анализа.

2. Инструменты для измерения отклонений: программное обеспечение включает специализированные функции для расчета отклонений в пространственной геометрии, включая проверку допусков профиля, анализ допусков формы и измерение расстояния между кромками. Используя методы цветового отображения, отклонения отображаются на поверхности, что позволяет быстро определить области, в которых изготовленная модель отличается от проектных спецификаций. Установив определенные пороговые значения допусков, программное обеспечение может автоматически предупреждать о несоответствующих характеристиках, что облегчает оценку

в режиме реального времени и корректировку управления процессом.

3. Расширенные функции анализа: Control X поддерживает ряд функций детального контроля, включая анализ GD&T (определение геометрических размеров и допусков) и сравнение поперечных сечений. Эти функции позволяют тщательно исследовать сложную геометрию деталей, гарантируя точное измерение и выявление даже незначительных отклонений. Кроме того, функции автоматизированной отчетности программного обеспечения позволяют создавать подробные отчеты с числовыми данными и наглядными пособиями, что делает его подходящим для приложений, требующих тщательного документирования и прослеживаемости, таких как обеспечение качества при прецизионном производстве.

4. Интеграция и оптимизация данных: результаты работы Control X могут быть экспортированы в различные форматы, что позволяет интегрировать их в более крупные конвейеры обработки данных. Эта функциональность особенно полезна для итеративных процессов проектирования и производства, где непрерывная обратная связь между этапами проектирования, печати и анализа может значительно улучшить общее качество продукции и снизить затраты, связанные с геометрическими неточностями.

В сочетании с 3D-сканером RangeVision Pro программное обеспечение Control X обеспечивает высокоточное решение для проверки соответствия объектов, напечатанных на 3D-принтере. Такое сочетание гарантирует, что любые отклонения в конечном продукте могут быть быстро выявлены, задокументированы и устранены, что обеспечивает строгий контроль качества и соблюдение заранее установленных допусков.

Результаты и обсуждение

Для проведения анализа отклонений пространственной геометрии напечатанных изделий от 3D-модели необходимо выбрать изделие, которое в совокупности обладает набором различных геометрических форм разной сложности. Например, цилиндрическими внутренними и внешними поверхностями, коническими поверхностями, плоскими и криволинейными поверхностями.

В качестве объекта исследования была выбрана направляющая часть турбинного насоса (рис. 1), которая соответствует вышеуказанным критериям отбора.

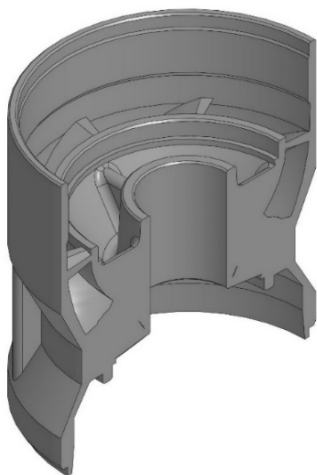


Рис. 1. Направляющая часть турбинного насоса в сечении

Направляющая часть служит для направления потока жидкости и обеспечивает оптимальные условия для уменьшения скорости потока и увеличения давления жидкости. К её основным конструктивным элементам относят: ступичную часть, направляющие лопатки и наружную часть корпуса. 3D-модель детали была получена путем проведения реверс-инжиниринга.

Для подготовки задания на 3D-печать необходимо файл твердотельной модели из формата CAD-программы экспортировать в формат полигональной модели STL. Процесс экспорта сопровождается выбором линейных и угловых отклонений полигональной модели. На этом этапе впервые происходит снижение точности будущей детали по сравнению с твердотельной моделью, формы которой описываются математически. Для экспорта были выбраны значения допустимых отклонений в 0,01 мм.

На первом этапе исследования осуществлялась 3D-печать полученной модели по технологии FDM с режимами, приведенными в таблице 1. На рисунке 2 приведен внешний вид напечатанной детали.

Таблица 1

Режимы 3D-печати направляющей части турбинного насоса

Параметр	Значение
Материал	PETg+12%GF
Температура экструзии, °C	250
Диаметр сопла экструдера, мм	0,5
Коэффициент подачи	1,03
Процент заполнения, %	100
Высота слоя, мм	0,15
Скорость печати, мм/с	30

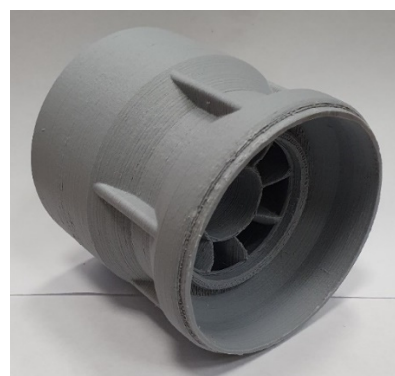


Рис. 2. Направляющая часть турбинного насоса, изготовленная по технологии FDM

Выбор в качестве материала детали модифицированного полиэтилена терефталат гликоля (PETg) с добавлением 12% рубленного стекловолокна, обуславливается высокой химической стойкостью материала к воздействию различных агрессивных сред, а также великолепной межслоевой адгезией. Рубленое стекловолокно в составе материала повышает его прочностные характеристики, а также теплостойкость изделия, что наиболее важно при работе в условиях повышенных температур.

Температура экструзии назначена с учетом рекомендаций производителя филамента. Выбранное значение позволяет предотвратить возникновение засора сопла и в то же время обеспечивает достаточную текучесть материала, что позволяет получать прочные межслоевые связи.

Размер поперечного сечения твердосплавного сопла, а также выбранная высота слоя обеспечивают требуемый баланс между производительностью и детализацией. Наилучшую детализацию возможно получать на наименьших значениях этих параметров (порядка 0,1 мм), но это значительно повысит длительность 3D-печати. Наличие в составе материала для печати армирующего материала (рубленного стекловолокна) может приводить к засору сопла на меньших его диаметрах.

Выбранное значение скорости печати позволяет обеспечить непрерывность потока экструзии материала, а также хорошую межслоевую адгезию. Незначительная корректировка подачи материала осуществляется введение коэффициента подачи. Это позволяет достичь более однородного заполнения, что важно при 100% заполнении и будет влиять на прочностные и эксплуатационные характеристики изделия.

На втором этапе осуществлялось 3D-сканирование напечатанной детали. В результате этого процесса было сформировано облако точек, затем объединенное в единую полигональную модель. Следует обратить внимание, что сканирование полностью всех поверхностей на детали невозможно в силу технологических особенностей процесса. Таким образом, скрытые поверхности не отображаются на скане. К таким поверхностям относятся частичные зоны направляющих лопаток.

На следующем этапе анализа отклонений пространственной геометрии изделия выполнялась обработка данных в программном обеспечении (ПО) 3D Systems Control X. Для начала в ПО загружается файл твердотельной модели направляющей части турбинного насоса, который служит эталонными данными при выполнении дальнейших расчетов. После этого в программу загружаются измеренные данные в виде полигональной модели, полученной в ходе 3D-сканирования напечатанной детали.

Для корректного анализа необходимо совместить измеренные данные с эталонными, так как глобальная система координат твердотельной модели не совпадает с локальной системой координат полигональной модели скана (рис. 3).

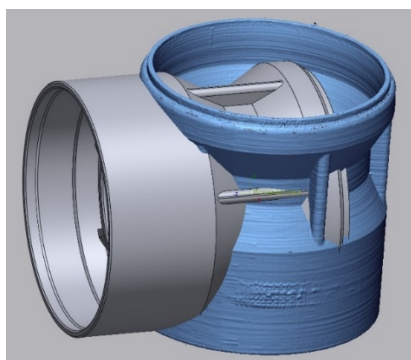


Рис. 3. Тривдотельная и полигональная модели до совмещения геометрии

При наличии уникальной геометрии совмещение можно выполнить в автоматическом режиме. В этом режиме программное обеспечение анализирует конструктивные элементы на моделях и совмещает их по принципу наилучшего совпадения. По результатам совмещения выдается статистический отчет в табличной форме (табл. 2) и в виде гистограммы (рис. 4).

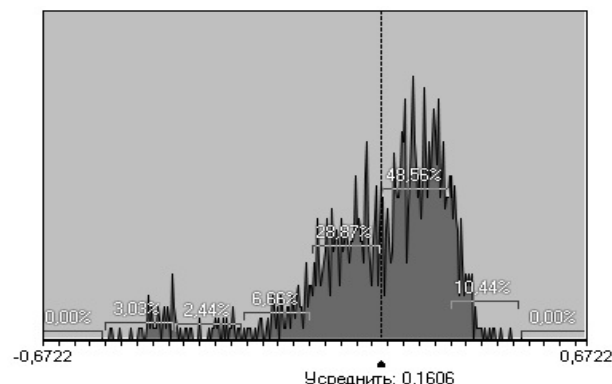


Рис. 4. Гистограмма отклонений совмещения эталонных и измеренных данных: $-6\sigma - 0\%$; $-5\sigma - 0\%$; $-4\sigma - 3,03\%$; $-3\sigma - 2,44\%$; $-2\sigma - 6,66\%$; $-1\sigma - 28,87\%$; $1\sigma - 48,56\%$; $2\sigma - 10,44\%$; $3\sigma - 0\%$; $4\sigma - 0\%$; $5\sigma - 0\%$; $6\sigma - 0\%$

Таблица 2

Результаты совмещения моделей

Параметр	Значение
Минимальное отклонение, мм	-0,5058
Максимальное отклонение, мм	0,4815
Среднее отклонение, мм	0,1606
Среднеквадратичное отклонение	0,2342
Стандартное отклонение	0,1705
Вариация	0,0291
Среднее положительное отклонение, мм	0,2109
Среднее отрицательное отклонение, мм	-0,1751

Анализируя результаты совмещения моделей, можно сделать первичные заключения о достаточно высокой точности совмещения напечатанной детали с исходной 3D-моделью, о чем свидетельствуют значения СКО и СО. По этим данным невозможно сделать точное заключение о пригодности напечатанной детали к дальнейшей эксплуатации и конкретным значениям отклонений от пространственной геометрии на наиболее важных поверхностях (например, посадочных и рабочих), которые будут определять работоспособность и собираемость изделия. Поэтому для уточнения необходимо провести трехмерный анализ отклонений.

Для проведения трехмерного анализа необходимо задать значения предельных отклонений. Были заданы значения $\pm 0,1$ мм. С учетом этих допусков была построена трехмерная модель отклонений (рис. 5).

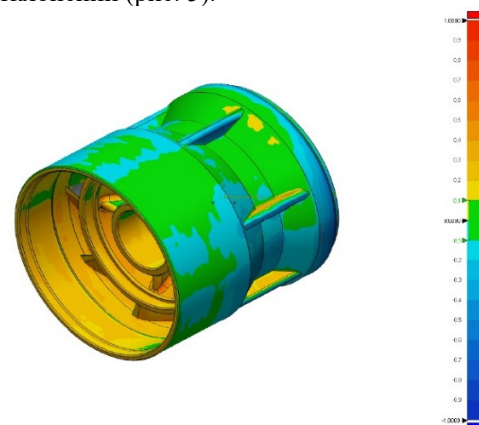


Рис. 5. Объемная модель результатов 3D анализа отклонений геометрических размеров

Гистограмма распределения отклонений представлена на рисунке 6.

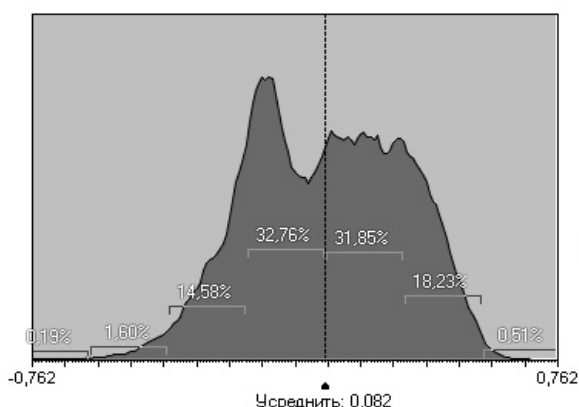


Рис. 6. Гистограмма 3D сравнения отклонений геометрии:
 $-6\sigma - 0,0098\%$; $-5\sigma - 0,0184\%$; $-4\sigma - 0,1894\%$; $-3\sigma - 1,5963\%$;
 $-2\sigma - 14,5788\%$; $-1\sigma - 32,7578\%$; $1\sigma - 31,851\%$; $2\sigma - 18,2285\%$;
 $3\sigma - 0,5081\%$; $4\sigma - 0,0224\%$; $5\sigma - 0,0116\%$; $6\sigma - 0,0059\%$

В таблице 3 приведены результаты статистического анализа данных 3D сравнения моделей.

Таблица 3

Результаты 3D сравнения геометрии моделей

Параметр	Значение
Минимальное отклонение, мм	-1,2111
Максимальное отклонение, мм	1,2108
Среднее отклонение, мм	0,082
Среднеквадратичное отклонение	0,241
Стандартное отклонение	0,2267
Вариация	0,0514
Среднее положительное отклонение, мм	0,2324
Среднее отрицательное отклонение, мм	-0,1497
В поле допуска, %	27,98
Вне поля допуска, %	72,02

В целом, поскольку среднее отклонение положительное, можно сделать вывод о том, что в основном при печати происходит увеличение размеров относительно номинальных, то есть имеется припуск на последующую механическую обработку. Однако, большие значения минимальных и максимальных отклонений, а также высокая доля поверхностей, находящихся вне поля допуска, свидетельствуют о наличии нарушений при 3D-печати. Было проведено детальное изучение месторасположений максимальных и минимальных отклонений геометрии, в ходе которого установлено, что зона максимального отклонения находится в месте примыкания направляющих лопаток к ступичной части, что является недопустимым. При этом данный дефект печати носит единичный характер так как не повторяется на других лопатках. Зона минимальных отклонений располагается на боковой поверхности ребер жесткости, при этом на противоположной стороне каждого из ребер находится зона положительных отклонений. Это свидетельствует об угловом отклонении при печати.

Немаловажным фактором является точность геометрических размеров в направлениях координатных осей XY. Для их определения был произведен анализ в одном поперечном (рис. 7) сечении. Результаты статистической обработки приведены в таблице 4.

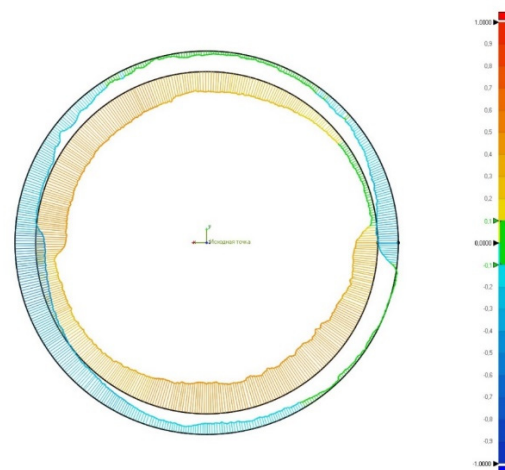


Рис. 7. Отклонения поперечного сечения от круглости

Таблица 4

Результаты анализа отклонения поперечного сечения от круглости

Параметр	Значение
Минимальное отклонение, мм	-0,4705
Максимальное отклонение, мм	0,4958
Среднее отклонение, мм	0,0736
Среднеквадратичное отклонение	0,2942
Стандартное отклонение	0,2848
Вариация	0,0811
Среднее положительное отклонение, мм	0,3342
Среднее отрицательное отклонение, мм	-0,1767
В поле допуска, %	21,9814
Вне поля допуска, %	78,0186

По результатам анализа данных об отклонении от круглости в поперечном сечении, можно сделать вывод о незначительных проблемах с механической частью 3D-принтера, так как на карте отклонений видно, что в одной зоне происходит уменьшение размеров по сравнению с номинальным. В некоторых случаях это может зависеть от технического состояния приводных ремней и направляющих валов. Если наблюдается более выраженное различие размеров по двум взаимно перпендикулярным осям, это может свидетельствовать о неверной калибровке шаговых двигателей в прошивке 3D-принтера.

Также был проведен анализ отклонений в пространственной геометрии в направлении оси Z (рис. 8). Результаты анализа представлены в таблице 5.

Таблица 5

Результаты анализа отклонения пространственной геометрии продольного сечения

Параметр	Значение
Минимальное отклонение, мм	-0,9445
Максимальное отклонение, мм	1,2435
Среднее отклонение, мм	0,1635
Среднеквадратичное отклонение	0,2684
Стандартное отклонение	0,2129
Вариация	0,0453
Среднее положительное отклонение, мм	0,2649
Среднее отрицательное отклонение, мм	-0,1076
В поле допуска, %	25,0521
Вне поля допуска, %	74,9479

ИНФОРМАТИКА

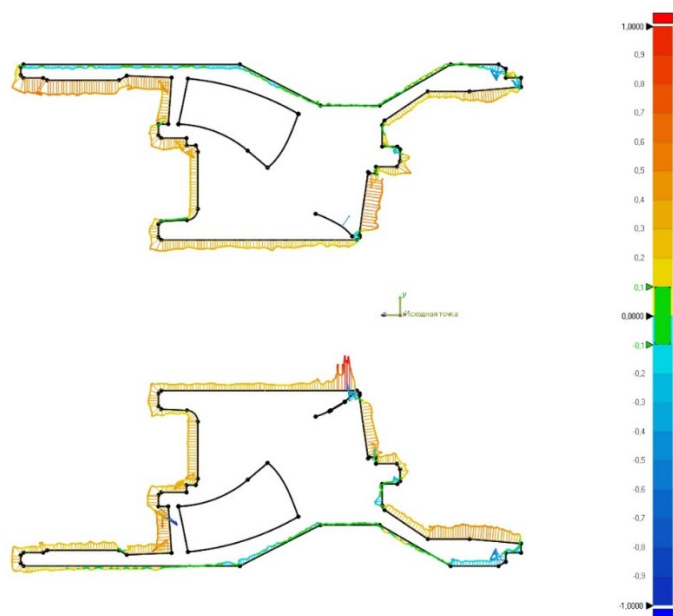


Рис. 8. Отклонения пространственной геометрии продольного сечения

Анализ результатов статистического расчета и визуального отображения векторов отклонений подтверждает предположение о нарушении механической калибровки осей 3D-принтера. Из-за этого происходит деформация детали с нарушением ее концентричности. Положительный максимум свидетельствует о местной переэкструзии материала, которая могла быть вызвана нарушением в подаче материала, скапливанием на кончике сопла 3D-принтера и последующим отрывом в указанной зоне излишков материала.

При проведении анализа пространственной геометрии необходимо четко понимать назначение детали, проводить тщательное изучение отдельных поверхностей с категоризацией на рабочие, сопрягаемые и необрабатываемые поверхности. Также необходимо верно назначать допуски на размеры и взаимное расположение поверхностей с учетом технических требований на изделие.

Значительное внимание в настоящее время в сфере аддитивного производства уделяется вопросам оптимизации временных затрат на изготовление деталей. Однако, при этом мало кто учитывает, что зачастую печатаются изделия, которые по своим геометрическим параметрам не соответствуют изначальной модели. Полученные результаты исследования позволят обратить внимание на проблематику 3D-печати, связанную с технологическими особенностями. Следует значительное внимание уделять не только повышению производительности 3D-печати, но и техническому состоянию и настройке 3D-принтера перед печатью.

Заключение

Проведенное исследование позволило выявить преобладающие факторы, способствующие отклонениям в пространственной геометрии деталей, изготовленных методом аддитивного производства Fused Deposition Modeling (FDM). Главный вывод заключается в том, что основным фактором, влияющим на отклонения геометрии, является приоритет скорости печати над точностью размеров изделия и целостностью

поверхности. Это подчеркивает важность сбалансированного подхода к оптимизации параметров, учитывающего как эффективность производства, так и геометрическую точность.

Установлено, что постоянный мониторинг технического состояния оборудования для аддитивного производства необходим для минимизации отклонений, связанных с геометрией. Изменения в износе сопла, консистенции экструзии и термической стабильности оборудования были определены как значительные факторы, способствующие неточностям в размерах.

Полученные результаты подчеркивают необходимость комплексного исследования дополнительных критических элементов, влияющих на точность печати, включая качество и состав материала, точный выбор параметров печати (например, высота слоя, плотность заполнения, скорость печати) и точность настроек принтера.

В данном исследовании использовалось программное обеспечение 3D Systems Control X, предоставляя точные инструменты геометрической оценки и позволяя проводить детальный анализ размеров. Широкие возможности контроля Control X, в частности, в области юстировки, оценки допусков и визуализации отклонений, позволили точно выявлять и количественно оценивать отклонения. Это стало важным шагом в оценке ограничений процесса FDM и его оптимизации.

В заключение следует отметить, что необходимы дальнейшие исследования для уточнения параметров, используемых при FDM-печати, и разработки улучшенных правил эксплуатации. Это позволит повысить точность и качество продукции при использовании FDM-печати, тем самым приведя ее в соответствие со строгими промышленными и техническими требованиями к прецизионному производству.

Благодарности

Данная статья подготовлена в рамках выполнения 1-го этапа научно-исследовательской работы, реализуемой за счет средств федерального бюджета (источник финансирования – Минобрнауки РФ) по теме: «Разработка научных, методологических и практических основ реверсивного инжиниринга для решения комплексных задач импортозамещения в агропромышленном комплексе Российской Федерации» (шифр научной темы FZNW-2024-0026).

Литература

1. Абрамова Т.С. Аддитивные технологии в современном мире // Молодая наука : Сборник статей по итогам II Научных чтений молодых исследователей, Новосибирск, 18 апреля 2023 года. Новосибирск: Сибирский государственный университет путей сообщения, 2023. С. 10-16.
2. Абросимов С.Н., Буткарев А.Г., Тихонов-Бугров Д.Е. О внутренней топологии изделий, напечатанных на 3D принтере // Современное образование: содержание, технологии, качество. 2022. Т. 1. С. 121-122.
3. Афошин А.А. Влияние скорости на геометрические размеры изделий при 3D-печати по FDM-технологии // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. 2019. № 15(58). С. 113-118.
4. Бирюков Ю.А., Кардаш Д.Е. Барьеры, препятствующие развитию аддитивных технологий // Строительные и дорожные машины. 2023. № 5. С. 48-52.
5. Гуцин И.А. Аддитивное производство изделий повышенной прочности на пятиосевых FDM 3D-принтерах : диссертация на

соискание ученой степени кандидата технических наук / Гушин Илья Александрович, 2023. 139 с.

6. Дворянкин О.А., Дворянкин А.О. Влияние режимов 3D-печати на усадку моделей изготавливаемых методами FDM печати // Тенденции развития науки и образования. 2023. № 101-4. С. 136-142. DOI 10.18411/trnio-09-2023-193.

7. Елисейкин Е.И., Калачев О.Н. Влияние особенностей подготовки цифровой модели на качество поверхностей изделия в FDM 3D-печати // Актуальные проблемы автоматизации и энергосбережения в ТЭК России : Материалы Всероссийского с международным участием научно-практического семинара, Нижневартовск, 06 апреля 2018 года. Нижневартовск: Нижневартовский государственный университет, 2018. С. 120-123.

8. Зверовицков А.Е., Шелахаев Д.А., Нестеров С.А. Исследование точности размеров, обеспечиваемых технологией 3D-печати // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2019. № 1(49). С. 66-78. DOI 10.21685/2072-3059-2019-1-6.

9. Кочетова А.А. Особенности применения и развития аддитивных технологий // Инновации и инвестиции. 2023. № 10. С. 224-225.

10. Михальченко А.А., Невзорова А.Б. Анализ факторов, влияющих на размерную точность углов изделий при отработке технологии 3D-печати // Труды БГТУ. Серия 2: Химические технологии, биотехнология, геоэкология. 2024. № 1(277). С. 82-86. DOI 10.52065/2520-2669-2024-277-11.

11. Михальченко А.А., Невзорова А.Б. Повышение точности 3d-печати методом FDM путем изменения параметров 3D-принтера // Стратегия и тактика развития производственно-хозяйственных систем : сборник научных трудов. Гомель: Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого, 2023. С. 140-143.

12. Можегова Ю.Н., Климова И.В. Анализ возможностей аддитивных технологий, применяемых в машиностроении // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2022. № 12. С. 531-536. DOI 10.36652/0202-3350-2022-23-12-531-536.

13. Нестеров В.Е. Повышение точности изделий из пластика, изготовленного по технологии FDM, в аддитивном производстве // Энергосбережение и инновационные технологии в топливно-энергетическом комплексе : материалы Национальной с международным участием научно-практической конференции студентов, аспирантов, учёных и специалистов, Тюмень, 20-22 декабря 2023 г. Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2023. С. 68-70.

14. Поротикова И.В., Кириллова М.Б., Сербул Д.В. Повышение точности изделий, изготавливаемых с помощью 3D-принтеров // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4: Промышленные технологии. 2022. № 1. С. 99-102. DOI 10.46418/2619-0729_2022_1_15.

15. Поротикова И.В., Сербул Д.В., Кириллова М.Б. Технология моделирования и изготовления детали сложной формы с применением 3D-печати // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4: Промышленные технологии. 2021. № 4. С. 66-74. DOI 10.46418/2619-0729_2021_4_8.

16. Потанов А.А. Конструкторско-технологическое обеспечение FDM-печати // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 5. С. 388-396. DOI 10.24412/2071-6168-2024-5-388-389.

17. Родичев А.Ю., Горин А.В. Совершенствование процесса применения аддитивной технологии при техническом обслуживании и ремонте машин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2023. № 3(359). С. 58-67. DOI 10.33979/2073-7408-2023-359-3-58-67.

18. Савицкий В.В., Голубев А.Н., Быковский Д.И. Исследование влияния параметров 3D-печати на размерную точность изделий // Вестник Витебского государственного технологического университета. 2018. № 2(35). С. 52-61. DOI 10.24411/2079-7958-2018-13506.

19. Симачук А.С. Перспективы использования аддитивных технологий // Коррекционно-педагогическое образование: электронный журнал. 2022. № 4(34). С. 76-79.

STUDY OF DEVIATIONS OF THE ACTUAL GEOMETRY OF PARTS MANUFACTURED BY 3D-PRINTING TECHNOLOGY FROM THE NOMINAL GEOMETRY OF THEIR DIGITAL COUNTERPARTS

Maria Yu. Karelina, Moscow Automobile and Road Technical University (MADI), Moscow, Russia;
State University of Management, Moscow, Russia, karelinamu@mail.ru

Vladimir V. Filatov, State University of Management, Moscow, Russia, 2vfilatov@gmail.com

Ilya S. Nefyolov, State University of Management, Russia, Moscow, iljanefelov@yandex.ru

Dmitry S. Taldykin, State University of Management, Moscow, Russia

Moscow Automobile and Road Technical University (MADI), Moscow, Russia, dima.dima.taldykin@mail.ru

Abstract

Recently, additive technologies have been actively introduced into various manufacturing processes, including agriculture and the production of machinery and equipment. Despite the continuous improvement of 3D printing equipment, the problem of accuracy of printed products remains relevant. With the increased reliability requirements of additive products, spatial deviations occurring in the 3D printing process have a significant impact on the quality of the final product. The main objective of this study was to identify and analyze the spatial geometry deviations between printed products and their electronic 3D model. The study utilized geometric dimensioning techniques, including the use of 3D scans of printed parts and their remanufacturing using FDM (Fused Deposition Modeling) technology. A turbine pump guide part was selected as the object of study. Typical deviations in the spatial geometry of products printed using this technology were identified, the main causes of which are mechanical malfunctions of equipment and violations in the settings of 3D printers. Based on the data obtained, recommendations for optimizing 3D printing processes aimed at improving the quality of manufactured parts were developed. The application of these recommendations, including the use of software for control and adjustment of printing, will not only improve the quality of printed products, but also reduce material intensity in the production of complex parts, which will contribute to the further development of additive technologies.

Keywords: 3D printing, quality control, spatial geometry, deviations, software.

References

- [1] T. S. Abramova, "Additive technologies in the modern world," *Young Science: Collection of articles based on the results of the II Scientific readings of young researchers*. Novosibirsk, April 18, 2023. Novosibirsk: Sibiryakov State University of Transport; 2023, pp. 10-16.
- [2] S. N. Abrosimov, A. G. Butkarev, D. E. Tikhonov-Bugrov, "On the internal topology of products printed on a 3D printer," *Modern Education: Content, Technologies, Quality*. 2022, no. 1, pp. 121-122.
- [3] A. A. Afoshin, "The influence of speed on the geometric dimensions of products during FDM technology 3D printing," *Collection of scientific works of the Donbas State Technical University*. 2019, no. 15(58), pp. 113-118.
- [4] Y. A. Biryukov, D. E. Kardash, "Barriers hindering the development of additive technologies," *Construction and Road Machinery*. 2023, no. 5, pp. 48-52.
- [5] I. A. Gushchin, "Additive production of high-strength products on five-axis FDM 3D printers," Dissertation for the degree of candidate of technical sciences; 2023, 139 p.
- [6] O. A. Dvoryankin, A. O. Dvoryankin, "The influence of 3D printing modes on the shrinkage of models produced by FDM printing methods," *Trends in the Development of Science and Education*. 2023, no. 101(4), pp. 136-142. doi:10.18411/trnio-09-2023-193
- [7] E. I. Eliseikin, O. N. Kalachev, "The impact of the features of digital model preparation on the quality of product surfaces in FDM 3D printing. Actual Problems of Automation and Energy Saving in the Fuel and Energy Complex of Russia," *Materials of the All-Russian scientific and practical seminar with international participation*, Nizhnevartovsk, April 6, 2018. Nizhnevartovsk: Nizhnevartovsk State University, 2018, pp. 120-123.
- [8] A. E. Zverovshchikov, D. A. Shelakhayev, S. A. Nesterov, "Investigation of dimensional accuracy provided by 3D printing technology," *Proceedings of Higher Educational Institutions. Volga Region. Technical Sciences*. 2019, no. 1(49), pp. 66-78. doi:10.21685/2072-3059-2019-1-6
- [9] A. A. Kochetova, "Features of the application and development of additive technologies," *Innovations and Investments*. 2023, no. 10, pp. 224-225.
- [10] A. A. Mikhachenko, A. B. Nevorova, "An analysis of the factors influencing the dimensional accuracy of the angles of products during the technology of 3D printing," *Proceedings of BSTU*. 2024, no. 1(277), pp. 82-86. doi:10.52065/2520-2669-2024-277-11
- [11] A. A. Mikhachenko, A. B. Nevorova, "Increasing the accuracy of 3D printing by FDM by changing the parameters of the 3D printer," *Strategy and Tactics for the Development of Production and Economic Systems: Collection of Scientific Papers*. Gomel: Gomel State Technical University named after P. O. Sukhoi. 2023, pp. 140-143.
- [12] Yu. N. Mozhegova, I. V. Klimova, "Analysis of the capabilities of additive technologies used in mechanical engineering," *Assembly in mechanical engineering, instrument making*. 2022. No. 12., pp. 531-536. DOI 10.36652/0202-3350-2022-23-12-531-536
- [13] V. E. Nesterov, "Increasing the accuracy of plastic products manufactured using FDM technology in additive production," *Energy Saving and Innovative Technologies in the Fuel and Energy Complex*. Materials of the National scientific and practical conference with international participation of students, graduate students, scientists, and specialists, Tyumen, December 20-22, 2023. Tyumen: Tyumen Industrial University. 2023, pp. 68-70.
- [14] I. V. Porotikova, M. B. Kirillova, D. V. Serbul, "Improving the accuracy of products manufactured using 3D printers," *Bulletin of Saint Petersburg State University of Technology and Design. Series 4: Industrial Technologies*. 2022, no. 1, pp. 99-102. doi:10.46418/2619-0729_2022_1_15
- [15] I. V. Porotikova, D. V. Serbul, M. B. Kirillova, "Technology of modeling and manufacturing a complex-shaped part using 3D printing," *Bulletin of Saint Petersburg State University of Technology and Design. Series 4: Industrial Technologies*. 2021, no. 4, pp. 66-74. doi:10.46418/2619-0729_2021_4_8
- [16] A. A. Potapov, "Design and technological support for FDM printing," *Proceedings of Tula State University. Technical Sciences*. 2024, no. 5, pp. 388-396. doi:10.24412/2071-6168-2024-5-388-389
- [17] A. Y. Rodichev, A. V. Gorin, "Improving the process of applying additive technology in the maintenance and repair of machines," *Fundamental and Applied Problems of Technology and Engineering*. 2023, no. 3(359), pp. 58-67. doi:10.33979/2073-7408-2023-359-3-58-67
- [18] V. V. Savitsky, A. N. Golubev, D. I. Bykovsky, "Investigating the influence of 3D printing parameters on the dimensional accuracy of products," *Bulletin of Vitebsk State Technological University*. 2018, no. 2(35), pp. 52-61. doi:10.24411/2079-7958-2018-13506
- [19] A. S. Simachuk, "Prospects for the use of additive technologies," *Correctional and Pedagogical Education: Electronic Journal*. 2022, no. 4(34), pp. 76-79.

Information about authors:

Maria Yu. Karelina, Ph.D., Doctor of Technical Sciences, Doctor of Pedagogical Sciences, Professor, Automobile and Road Technical University (MADI), Moscow, Russia; Vice-Rector, State University of Management, Moscow, Russia

Vladimir V. Filatov, Ph.D., Associate Professor, Leading Researcher of the Laboratory of Reverse Engineering, State University of Management, Moscow, Russia

Ilya S. Nefyolov, Ph.D., Associate Professor, Research Associate, Reverse Engineering Laboratory, State University of Management, Moscow, Russia

Dmitry S. Taldykin, Technician, Reverse Engineering Laboratory, State University of Management, Moscow, Russia;
Moscow Automobile and Road Technical University (MADI), Moscow, Russia