

Математическое и компьютерное моделирование

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 004.925.8:62-408.6

doi: 10.30987/2658-6436-2025-2-35-44

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ, ИЗГОТОВЛЯЕМЫХ МЕТОДОМ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, С ПОМОЩЬЮ СОЗДАНИЯ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ИЗДЕЛИЯ

Елена Евгеньевна Биткина^{1✉}, Антон Владимирович Шимохин²,

Елена Вячеславовна Николаева³

^{1, 2} Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, г. Омск, Россия

³ Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

¹ ee.sh03@mail.ru, <http://orcid.org/00000000-0002-7243-2174>

² shimokhin@yandex.ru, <http://orcid.org/00000000-0002-2048-3180>

³ nikolaeva_eva@mail.ru

Аннотация. Интенсификация развития информационных технологий и систем автоматизированного проектирования непрерывно способствуют повышению уровня автоматизации при проектировании изделий различного назначения. Один из этапов жизненного цикла продукции это создание прототипа изделия. Для изготовления прототипа в настоящее время активно применяются аддитивные технологии и 3D моделирование. Однако при использовании данных технологий необходимо учитывать свойства пластика, а именно усадку, которая влияет на размеры прототипа изделия. Усадка влияет на размеры изделия, которые получаются после изготовления аддитивными методами. Таким образом, актуальность исследования заключается в разработке имитационной компьютерной модели, учитывающей параметры, влияющие на процесс изготовления прототипа изделия, и позволяющая изготовить модель, повышая точность ее изготовления. Для создания данной модели проведены исследования параметров, которые влияют на отклонение размеров изделия от заданных в 3D модели. В данной имитационной модели за исследуемые параметры взяты плотность заполнения и отклонение размеров от номинально заданных размеров детали. На основе полученных значений исследуемых параметров разработана математическая модель, которая дает возможность спрогнозировать значения отклонений размеров детали в зависимости от плотности заполнения. Разработанная имитационная модель позволит создавать 3D модель прототипа с размерами, в которые заложены отклонения на усадку, что повышает точность изготовления деталей методом аддитивных технологий.

Ключевые слова: имитационная модель, аддитивные технологии, усадка пластика, математическая модель

Для цитирования: Биткина Е.Е., Шимохин А.В., Николаева Е.В. Моделирование процесса проектирования деталей, изготавляемых методом аддитивных технологий, с помощью создания имитационной модели изделия // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2025. №2 (28). С. 35-44. doi: 10.30987/2658-6436-2025-2-35-44.

Original article

Open Access Article

SIMULATING THE DESIGN PROCESS FOR PARTS MANUFACTURED USING ADDITIVE TECHNOLOGIES THROUGH CREATING AN IMITATION PRODUCT MODEL

Elena E. Bitkina^{1✉}, Anton V. Shimokhin², Elena V. Nikolaeva³

^{1,2} Omsk State Agrarian University Named After P.A. Stolyipin, Omsk, Russia

³ Omsk State Technical University, Omsk, Russia

¹ ee.sh03@mail.ru, <http://orcid.org/00000000-0002-7243-2174>

² shimokhin@yandex.ru, <http://orcid.org/00000000-0002-2048-3180>

³ nikolaeva_eva@mail.ru

Abstract. The continuous development of information technologies and automated design systems contributes to increasing automation levels in product design across various industries. One important stage in the product life cycle is creating prototypes. Currently, additive manufacturing techniques and 3D modelling are widely used for prototype production. However, when employing such methods, it is essential to consider material properties of plastics, particularly shrinkage, which affects the dimension of the prototype product. Shrinkage influences actual sizes of parts produced via additive processes compared to their initial designs. Therefore, the research aimed at developing a simulation-based computer model that accounts for factors influencing prototype fabrication accuracy becomes relevant. This study investigates key parameters affecting dimensional deviations from predefined values specified in CAD models. These include filling density and deviation from nominal dimensions. Based on the obtained values of the parameters under study, the authors develop a mathematical model enabling prediction of size variations depending on filling density. This simulation model will facilitate creation of 3D prototypes incorporating compensation for plastic shrinkage, thereby enhancing precision in producing components using additive manufacturing.

Keywords: simulation model, additive technologies, plastic shrinkage, mathematical model

For citation: Bitkina E.E., Shimokhin A.V., Nikolaeva E.V. Simulating the Design Process for Parts Manufactured Using Additive Technologies Through Creating an Imitation Product Model. Automation and modeling in design and management, 2025, no. 2 (28). pp. 35-44. doi: 10.30987/2658-6436-2025-2-35-44.

Введение

Внедрение цифровых технологий на производство, в образовательный процесс и другие области позволило снизить стоимость оборудования и материалов для изготовления изделий посредством аддитивной печати. Модели, изготовленные с помощью аддитивных технологий, могут использоваться на различных производствах, что положительно влияет на развитие технологических решений [1 – 3]. Для 3D печати применяются различные материалы. Выбранный материал влияет как на эстетический вид изделия, так и на эксплуатационные свойства. Если эксплуатационные свойства позволяют, то можно говорить и о замене материала и метода изготовления деталей. Традиционный способ изготовления деталей отличается от аддитивного производства на нескольких циклах. В случае изготовления детали традиционным способом, применение 3D модели не обязательно, а при использовании аддитивных технологий электронная модель обязательна. В этом случае необходимо рассмотреть стадии жизненного цикла изделия. В соответствии с ГОСТ 53791-2010 в этапы жизненного цикла продукции производственно-технологического назначения входят проведение опытно-конструкторских работ, а также производство и испытание [3]. При выполнении этих двух пунктов необходимо учитывать назначение изделия, условия эксплуатации, материал и технологию изготовления. Материалы, которые применяются для изготовления, имеют свою особенность. Отличительной чертой аддитивной технологии является то, что необходимо учитывать отклонение размеров у изготовленного образца от электронной модели, которое возникает из-за усадки материала. Причем в случае применения метода 3D печати FDM следует учитывать, не только усадку, указанную производителем, но и дополнительную, которая возникает из того, что детали могут иметь разную степень заполнения, внутреннюю структуру, этим обусловлено исследование зависимости усадки от заполнения детали и создание имитационной модели, в которой учтены отклонения. Поэтому актуальным становится исследование по созданию имитационной электронной модели, в которой будут включены отклонения размеров прототипа от размеров 3D модели. Выявление отклонения размеров прототипа детали и задание их при проектировании электронной модели позволит разработать математическую модель, которая будет использоваться для

прогнозирования значения отклонения в зависимости от плотности заполнения. Проектировщику необходимо иметь значения допусков, которые надо закладывать на этапе проектирования 3D модели, чтобы изготовленная модель соответствовала техническому заданию. Совершенствование процесса автоматизированного проектирования и снижения количества рабочих образцов или готовых изделий с учетом выявленных параметров позволит повысить эффективность процессов использования материалов, с учетом современных способов изготовления деталей.

Материалы, модели, эксперименты и методы

Аддитивное производство – процесс создания моделей практически любой формы на основе цифровой модели [4, 5]. Для изготовления модели применяются жидкие порошкообразные, бумажные или листовые материалы.

На рис. 1 представлены основные технологии аддитивного производства и материалы, которые используются для изготовления деталей. *Fused Deposition Modelling (FDM)* – технология нанесения послойного наплавления материала. Рабочая платформа перемещается по оси z, экструдер перемещается по осям x и у снизу вверх. Нити для печати могут быть пластиковые или металлические [6]. Также могут применяться пищевые материалы. FDM-печать одна из самых дешевых и простых, что делает ее популярной. Модели, которые созданы по технологии FDM, характеризуются упругостью и прочностью. Точность построения находится в пределах от 0,027 мм до 1 мм. Поверхность, напечатанная данным методом, как правило, слоистая. Данная технология наиболее доступная и популярная. Имеет как преимущества, так и определенные недостатки [7]. Для данного вида печати используются различные пластики, это и *PLA*, *ABC* и *PETG* и др.



Рис. 1. Основные технологии 3D печати и материалы
Fig. 1. Basic 3D Printing Technologies and Materials

Multi Jet Printing (MJP) – моделирование методом многоструйной печати. Принцип основан на послойном построении модели из восковых или фотополимерных материалов. Применяется как правило для создания прототипов, моделей для испытаний, оснастки.

Electron-beam freeform fabrication (EBF3) – технология нагревания металлической нити до точки плавления с помощью электронного пучка высокой мощности. С помощью данного способа получается объекты, почти не отличающиеся от трехмерных цифровых моделей. Постобработка при таком способе не нужна.

Laminated Object Manufacturing (LOM) – технология печати объектов методом ламинирования, в которой используются тонколистовые материалы. Слои бумаги или другого материала последовательно склеиваются, а затем обрезаются по форме. Особенность данной печати заключается в том, что во время *LOM*-печати выделяется дым. Основное применение данного метода – создание прототипов и архитектурных макетов.

На качество печати влияет температура плавления, скорость печати, а также плотность заполнения. Данные параметры влияют на конечный продукт. Для создания имитационной модели и проведения исследований были выбраны следующие параметры: изменения значений геометрических параметров электронной модели и плотность заполнения.

Для создания математической модели, с помощью которой прогнозируется значение отклонения размеров изделия от заданных значений? изучалась усадка изделий, выполненных из пластика *PLA* в зависимости от плотности заполнения.

Достоинства *PLA*: низкая усадка, нетоксичен и биоразлагаемый. Недостатки *PLA*: со временем становится хрупким, нежелательная эксплуатация при высоких температурах, воздействии ультрафиолета и большие значения шероховатости, приводит к высокому трению [8, 9].

Изделия, которые изготавливаются по технологии *FDM*, могут быть подвержены усадке и деформации [10, 11]. Это наиболее распространенные дефекты, которые возникает в процессе послойного наплавления. В связи с тем, что наплавляемые нити охлаждаются с разной температурой, меняется и форма детали. Также на деформацию и усадку влияет плотность наполнения детали, так как образующиеся внутри перегородки будут иметь разные длины и толщину. Разные виды пластика по-разному деформируются. В связи с этим был проведен комплекс экспериментальных исследований, который позволил определить значение отклонений от заданного размера при изготовлении деталей технологией *FDM* и на основе полученных значений создана имитационная компьютерная модель в программе КОМПАС-3D. Для проведения исследования использовался принтер *FlashForgeDreamer*.

Для проведения эксперимента была выбрана цилиндрическая поверхность с отверстием, эскиз которой представлен на рис. 2, *a*.

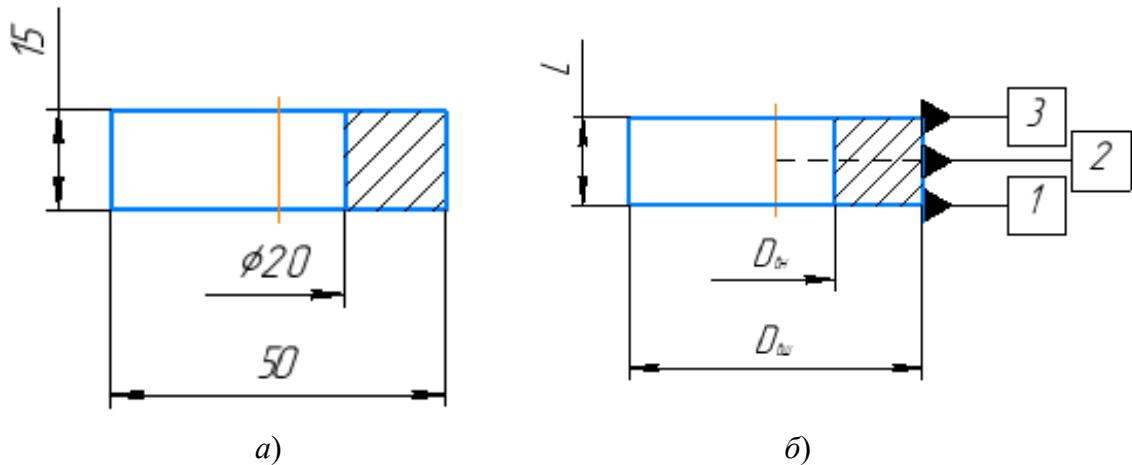


Рис. 2. Геометрические параметры заготовки
а – размеры опытного образца (заготовки); б – условные параметры размеров образцов

Fig. 2. Geometric parameters of the workpiece
a – dimensions of the prototype (workpiece); b – conventional parameters of the dimensions of the samples

Для изготовления образцов устанавливались следующие параметры печати: температура слоя – $t_{\text{слоя}} = 0,2$ мм; форма заполнения – шестиугольники; $S_{\text{печать}}$ – скорость печати, мм/сек; температура стола – $t_{\text{стола}} = 65$ °C; температура пластика – $t_{\text{пластика}} = 210$ °C;

Исследуемые параметры: наружный диаметр цилиндра с отверстием.

Измерения проводились в трех сечениях на разной высоте: 1 – внешний диаметр цилиндра, который соприкасается со столом (рис. 2, б); 2 – внешний диаметр цилиндра, на расстоянии 7,5 мм от стола (см. рис. 2, б); 3 – внешний диаметр цилиндра, на расстоянии 15 мм от стола (см. рис. 2, б).

В каждом сечении измерялись значения наружного диаметра ($D_{\text{вн}}$), через каждые 30° .

Результаты

В результате проведенных измерений получен массив данных, который позволил смоделировать процесс проектирования цилиндрической детали, которая изготавливается методом аддитивных технологий. В табл. 1. представлены размеры диаметров, измеренных в поперечном сечении в месте 2 (см. рис. 2) через каждые 30° . На основе полученных значений было установлено, что у образцов, имеются отклонения значений от номинально заданного размера.

Значения исследуемых параметров
Values of the parameters under study

Таблица 1

Table 1

	Плотность заполнения, %										
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	...	100
Наружный диаметр, цилиндра, сечение 2, 0°	49,75	49,55	49,48	49,83	49,59	49,63	49,97	49,99	49,99		49,90
Наружный диаметр, цилиндра, сечение 1, 30°	49,76	49,51	49,87	49,88	49,74	49,79	49,79	49,80	49,87		49,93
...
Наружный диаметр, цилиндра, сечение 1, 150°	49,73	49,49	49,68	49,65	49,82	49,70	49,86	49,81	49,88		49,83

На основе экспериментальных данных построена диаграмма, представленная на рис. 3, которая демонстрирует значения диаметров у опытных образцов, измеренных во втором поперечном сечении, изготовленных из пластика PLA в зависимости от плотности заполнения.

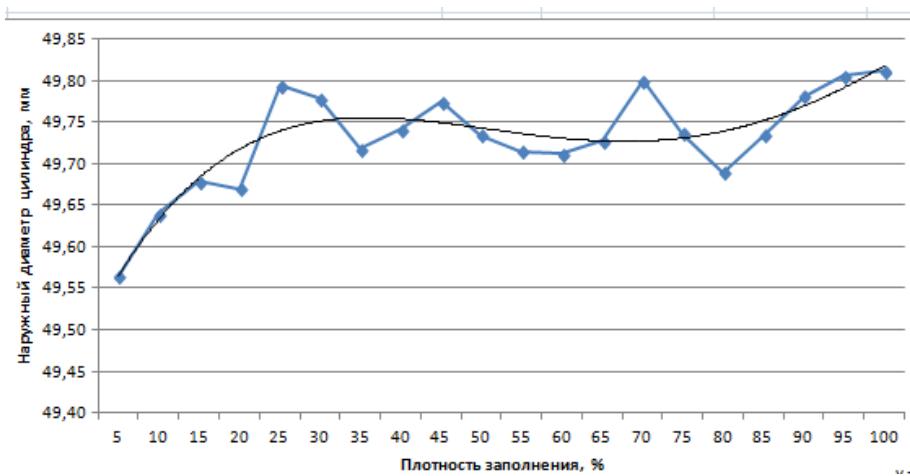


Рис. 3. Значения наружного диаметра цилиндра для образцов из пластика PLA в сечении 2
Fig. 3. Values of the outer diameter of the cylinder for PLA plastic samples in section 2

В результате обработки данных получена полиномиальная зависимость, которая используется для определения значения размера цилиндрической поверхности, рассматриваемых образцов с наружным диаметром 50 мм, которая будет напечатана методом аддитивных технологий в зависимости от плотности заполнений:

$$f(D_{\text{вн}}) = 0,00001P_z^4 + 0,00059P_z^3 - 0,01252P_z^2 + 0,10189P_z + 49,47470. \quad (1)$$

Отклонение размера диаметра цилиндра от номинального диаметра при разной плотности заполнения находится с использованием формулы:

$$\Delta_{Pz} = D_{\text{ном}} - D_{\text{вн}}, \quad (2)$$

где $D_{\text{ном}}$ – заданный внешний диаметр цилиндра, в данном эксперименте равен 50 мм.

Для определения среднего значения отклонения воспользуемся следующим выражением:

$$\bar{\Delta}_{Pz} = \frac{\sum \Delta_{Pz}}{6}. \quad (3)$$

Для оценки степени отклонения значения действительных размеров от среднего значения, находится среднеквадратическое отклонение, которое находится с помощью выражения:

$$S_{Pz} = \sqrt{\frac{\sum_i^n (\Delta_{Pzi} - \bar{\Delta}_{Pz})_i^2}{n-1}}, \quad (3)$$

где – n количество измеряемых значений диаметров, в данном эксперименте $n = 6$.

В результате проведенных вычислений найдены значения отклонений, которые возникают при изготовлении деталей методом *FDM* печати, и которые необходимо учитывать для работы с имитационной моделью с целью повышения точности изготовления деталей.

Поле допуска для образцов из материала PLA
Tolerance field for PLA samples

Таблица 2

Table 2

Номер образца, материал PLA	Максимальное отклонение	Среднее значение отклонения	Среднеквадратическое отклонение	Поле допуска	Поле допуска по среднему значению отклонения
1	-0,68	0,44	0,202262206	h15	h14
2	-0,51	0,36	0,169941166	h14	h13
3	-0,56	0,32	0,191041008	h14	h13
4	-0,52	0,33	0,154402073	h14	h13
5	-0,41	0,20	0,127553910	h13	h12
6	-0,37	0,22	0,101472492	h13	h12
7	-0,48	0,28	0,181484618	h14	h13
8	-0,43	0,26	0,156896994	h14	h13
9	-0,42	0,23	0,164042677	h14	h12
10	-0,42	0,27	0,164772571	h14	h13
11	-0,48	0,29	0,172945078	h14	h13
12	-0,52	0,29	0,189675161	h14	h13
13	-0,46	0,27	0,160176985	h14	h13
14	-0,48	0,20	0,169705627	h14	h12
15	-0,49	0,26	0,162069944	h14	h13
16	-0,52	0,31	0,153101274	h14	h13
17	-0,49	0,27	0,143770651	h14	h13
18	-0,44	0,22	0,153025052	h14	h12
19	-0,42	0,19	0,146651514	h14	h12
20	-0,30	0,19	0,082320512	h13	h12

Для работы с имитационной моделью и создания компьютерной модели, которая позволит учитывать отклонения размеров при изготовлении физической модели построена зависимость, представленная на рис. 4. Данная диаграмма демонстрирует зависимость среднего значения отклонения размера цилиндрической поверхности от определенной плотности заполнения.

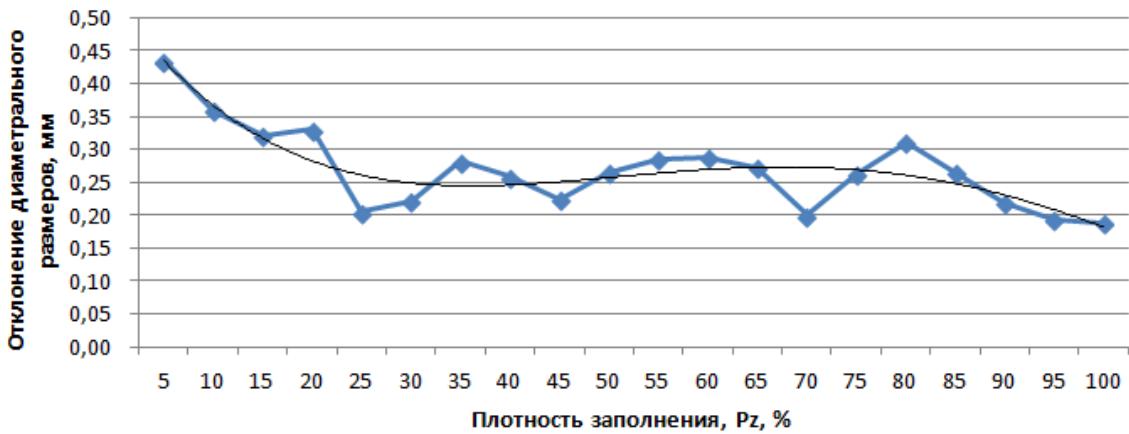


Рис. 4. Зависимость среднего значения отклонения номинального размера от плотности заполнения материала PLA

Fig. 4. Dependence of the average value of the nominal size deviation on the filling density of the PLA material

В результате проведенных исследований получена математическая модель, которая позволяет прогнозировать значение отклонений от номинального размера в зависимости от плотности заполнения изделия:

$$f(D_{\text{ном}}) = 0,00001 \cdot P_z^4 - 0,00059P_z^3 + 0,0125 \cdot P_z^2 - 0,10189 \cdot P_z + 0,52530, \quad (4)$$

где P_z – плотность заполнения детали.

Применение данной математической модели дает возможность спрогнозировать усадку пластика PLA на 0,322 мм при 15 % плотности заполнения.

На рис. 5 представлена диаграмма, позволяющая оценить насколько значения отклонений могут отличаться от среднего значения. Данные для графика получены с использованием выражения (3).

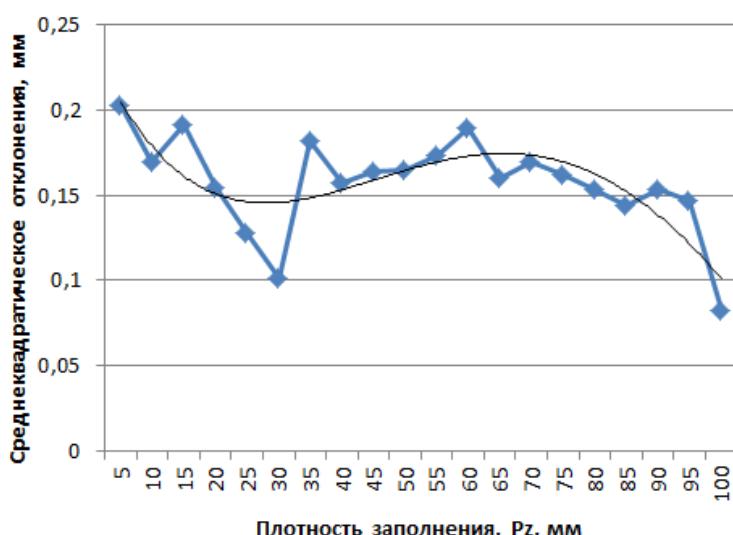


Рис. 5. Среднеквадратическое отклонение размера в зависимости от плотности заполнения

Fig. 5. Standard deviation of size depending on filling density

На рис. 6 представлена блок-схема проектирования изделия без применения данной имитационной модели и с применением. Этапы проектирования и изготовления, которые определены штриховой линией, соответствуют применению имитационной модели. Проведенный эксперимент показал, что благодаря использованию имитационной модели, в которой учтены отклонения размеров детали от заданных размеров с учетом плотности заполнения опытный образец изготовили за 1 раз. В то время как без имитационной модели только с третьей попытки деталь получилась с размерами, удовлетворяющими отклонениям от заданных размеров.

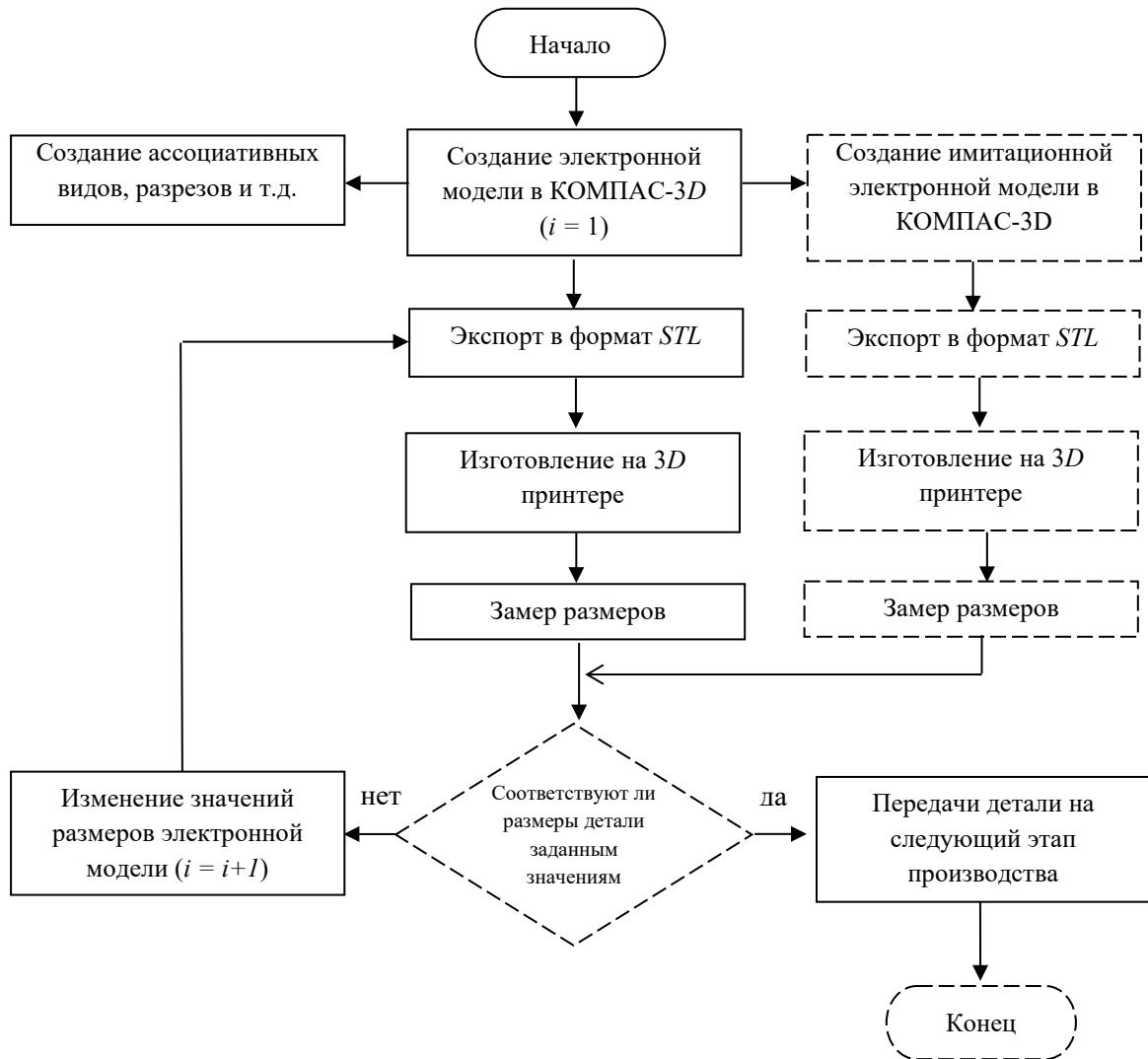


Рис. 6. Блок-схема автоматизации процесса проектирования детали, изготовленной методом аддитивных технологий
Fig. 6. Block diagram of automation of the design process of a part manufactured using additive technologies

Заключение

В результате проведенной работы разработана имитационная модель, позволяющая смоделировать процесс проектирования прототипа цилиндрической детали, которая изготавливается по технологии *FDM*. Имитационная модель создается с размерами, в которых учтены отклонения размеров детали в связи с усадкой. Для обеспечения работоспособности данной модели проведены экспериментальные исследования, которые позволили определить значения отклонений размеров детали от номинально заданных. На основе полученных данных разработана математическая модель, которая дает возможность спрогнозировать процесс усадки и определить значения отклонения размеров от номинальных. Которые необходимы для создания компьютерной модели. Данная математическая модель позволяет

определить значения отклонения размеров от номинально заданных в зависимости от плотности заполнения детали. Имитационная модель разработана для моделирования поверхности прототипов деталей, которые изготавливаются из пластика *PLA*. Данный способ актуален для повышения точности изготовления деталей. Практическое применение данной модели возможно в системах САПР, что позволит уменьшить время подготовки производства, получить деталь с требуемыми размерами методом *FDM* в меньшие сроки.

Список источников:

1. Всё о 3D-печати. Аддитивное производство. Основные понятия. URL: https://3dtoday.ru/wiki/3D_print_technology#.D0.A2.D0.B5.D1.85.D0.BD.D0.BE.D0.BB.D0.BE.D0.B3.D0.B8.D0.B8.20.D0.BF.D0.B5.D1.87.D0.B0.D1.82.D0.B84 (дата обращения 09.11.2021)
2. Биткина Е.Е., Таткало А.А., Тарануха И.И. О технологиях 3D печати // Материалы VI Международной научно-практической конференции «Инновационные технологии в АПК, как фактор развития науки в современных условиях». – Омск. – 2021 – С. 208-212.
3. Семенова Е.Г., Махров Н.Г., Борисов С.Г. Внедрение новых методов цифровизации программно-аппаратных комплексов в аддитивном производстве // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. – 2019. - №1. – С. 41-48.
4. ГОСТ 53791-2010 Ресурсосбережение. Стадии жизненного цикла изделий производственно-технического назначения. Общие положения. – М.: Стандартинформ, 2021. – 8 с.
5. Шимохин А.В. Экономическое обоснование внедрения аддитивной технологии в технологические процессы производства продукции // Материалы по итогам научно-исследовательской деятельности Сер. 1 Техническая и естественнонаучная составляющие развития АПК. – Омск, 2021 – С. 775-779.
6. Тарануха И.И., Биткина Е.Е., Таткало А.А. К вопросу использования аддитивных технологий в машиностроении // Материалы III Всероссийской (национальной) научно-практической конференции «Роль научно-исследовательской работы обучающихся в развитии АПК». – Омск, 2022. – С. 416-419.
7. 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.
8. Елиseykin E.I., Kalachev O.N. 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.
9. Подробный гид по выбору пластика для 3D-печати URL:<https://top3dshop.ru/blog/podrobnyj-gid-po-vyboru-plastika-dlya-3d-pechati.html#pla> (дата обращения 10.01.2024)

References:

1. All About 3D Printing. Additive Manufacturing. Basic Concepts [Internet] [cited 2021 Nov 9]. Available from: https://3dtoday.ru/wiki/3D_print_technology#.D0.A2.D0.B5.D1.85.D0.BD.D0.BE.D0.BB.D0.BE.D0.B3.D0.B8.D0.B8.20.D0.BF.D0.B5.D1.87.D0.B0.D1.82.D0.B84
2. Bitkina EE, Tatkalo AA, Tarankha II. About 3D Printing Technologies. In: Proceedings of the 6th International Scientific and Practical Conference on Innovative Technologies in the Agro Industrial Complex as a Factor in the Development of Science in Modern Conditions. Omsk: 2021. p. 208-212.
3. Semenova E.G., Makhrov N.G., Borisov S.G. Introduction of New Methods of Digitalization of Hardware and Software Systems in Additive Production. Automation and Modelling in Design and Management. 2019(1):41-48.
4. GOST 53791-2010 Resources Saving. Stages of Technological Cycle. General Principles. Moscow: Standartinform; 2021.
5. Shimokhin AV. Economic Substantiation of the Introduction of Additive Technology in the Technological Processes of Production of the Production of the Company. In: Proceedings of the Research Activity Results. Series 1: Technical and Natural Science Components of Agricultural Sector Development. Omsk: 2021. p. 775-779.
6. Taranukha II, Bitkina EE, Tatkalo AA. On the Use of Additive Technologies in Mechanical Engineering. In: Proceedings of the 3rd National Scientific and Practical Conference on Role of Students' Research Work in Developing Agriculture. Omsk: 2022. p. 416-419.
7. Mikhalkchenko AA, Nevzorova AB. Improving the Accuracy of FDM 3D Printing by Changing 3D Printer Parameters. In: Proceedings on Strategy and Tactics of Development of Production and Economic Systems. Gomel: Sukhoi State Technical University of Gomel: 2023. p. 140-143.
8. Eliseykin EI, Kalachev ON. Impact of Digital Model Preparation Features on Surface Quality in FDM 3D Printing. In: Proceedings of All-Russian International Scientific and Practical Seminar on Current Problems of Automation and Energy Saving in Fuel and Energy Complex of Russia; 2018 Apr 6; Nizhnevartovsk. Nizhnevartovsk: Nizhnevartovsk State University: 2018. p. 120-123.
9. A Detailed Guide to Choosing Plastics for 3D Printing [Internet] [cited 2024 Jan 10]. Available from: <https://top3dshop.ru/blog/podrobnyj-gid-po-vyboru-plastika-dlya-3d-pechati.html#pla>

10. Всё о PLA – самом популярном пластике для FDM-печати URL: <https://blog.iqb.ru/pla-plastic/>(дата обращения 10.01.2024)
11. 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.
12. Нефелов И.С., Баурова Н.И. Оценка структурных дефектов деталей, изготовленных при различных режимах 3D-печати // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2018. – № 8. – С. 29-32.
13. Печать ABS-пластиком – достоинства и недостатки URL:<https://additiv-tech.ru/publications/pechat-abs-plastikom-dostoinstva-i-nedostatki-materiala-dlya-3d-pechat.html> (дата обращения 10.05.2024)
10. Everything About PLA – the Most Popular Plastic for FDM Printing [Internet] [cited 2024 Jan 10]. Available from: <https://blog.iqb.ru/pla-plastic/>
11. Dvoryankin O.A., Dvoryankin A.O. Effect of 3D Printing Settings on Shrinkage of Models Made by FDM Method. Trends in the Development of Science and Education. 2023;101-4:36-142.
12. Nefelov I.S., Baurova N.I. Evaluation of Structural Defects of Articles Obtained in Various Models of 3D Printing. All Materials: Encyclopaedic Reference Book. 2018;8:29-32.
13. Printing with ABS Plastic – Advantages and Disadvantages [Internet] [cited 2024 May 10]. Available from: <https://additiv-tech.ru/publications/pechat-abs-plastikom-dostoinstva-i-nedostatki-materiala-dlya-3d-pechat.html>

Информация об авторах:

Биткина Елена Евгеньевна

кандидат технических наук, доцент кафедры технического сервиса, механики и электротехники Омского государственного аграрного университета им. П.А. Столыпина, ORCID ID: 0000-0002-7243-2174.

Шимохин Антон Владимирович

кандидат экономических наук, доцент кафедры технического сервиса, механики и электротехники Омского государственного аграрного университета им. П.А. Столыпина, ORCID ID:0000-0002-2048-3180.

Николаева Елена Вячеславовна

кандидат технических наук, доцент кафедры «Нефтегазовое дело, стандартизация и метрология» Омского государственного технического университета.

Information about the authors:

Bitkina Elena Evgenievna

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Technical Service, Mechanics and Electrical Engineering of Omsk State Agrarian University Named After P.A. Stolyipin, ORCID ID: 0000-0002-7243-2174.

Shimokhin Anton Vladimirovich

Candidate of Economic Sciences, Associate Professor at the Department of Technical Service, Mechanics and Electrical Engineering of Omsk State Agrarian University Named After P.A. Stolyipin, ORCID ID: 0000-0002-2048-3180.

Nikolaeva Elena Vyacheslavovna

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Oil and Gas Business, Standardization and Metrology of Omsk State Technical University.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 24.10.2025; одобрена после рецензирования 12.11.2024; принята к публикации 19.02.2025.

The article was submitted 24.10.2025; approved after reviewing 12.11.2024; accepted for publication 19.02.2025.

Рецензент – Малаханов А.А., кандидат технических наук, доцент, Брянский государственный технический университет.

Reviewer – Malakhnov A.A., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Bryansk State Technical University.