

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС, ИЗГОТОВЛЕННЫХ АДДИТИВНЫМ СПОСОБОМ ПРИ ВАРЬИРОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

© 2025 Л.Б. Гаспарова, М.В. Якимов, В.Д. Косоуров

Самарский государственный технический университет, г. Самара, Россия

Статья поступила в редакцию 09.09.2025

В современном машиностроении одной из основных задач является повышение надежности и долговечности деталей и узлов конструкций. К изготовлению изделий постоянно возрастают требования, связанные с необходимостью экономии дефицитных дорогостоящих металлов и сплавов и, как следствие, замены их на экономически более выгодные варианты. Одна из основных тенденций – применение в конструкциях деталей, выполненных из пластмасс. Современные технологии изготовления позволяют получать изделия из пластмасс путем их 3D-печати на принтере. Широкое распространение для получения таких деталей получил метод послойного наплавления FDM (Fused Deposition Modeling). Параметры печати – это факторы, влияющие на механическую прочность объектов, напечатанных на 3D-принтере. На механическую прочность объектов, напечатанных на 3D-принтере, влияют такие параметры, как высота (толщина) слоя, скорость печати и процентное значение геометрии заполнения, количество периметров, шаблон заполнения и другие. В статье исследуется влияние перечисленных параметров на прочность зубчатого колеса, изготовленного из материалов PLA+ и PLA CF. Рассматривается задача оптимизации параметров 3D-печати, влияющих на физические, механические и качественные характеристики деталей, изготовленных с применением аддитивных технологий. Разработан испытательный стенд для оценки прочности зубчатой шестерни, изготовленной из различного пластика при помощи 3D принтера Bambulab P1S, при действии крутящего момента. Приведены экспериментальные данные по предельному крутящему моменту, приводящему к разрушению шестерни. Проведен сравнительный анализ полученных результатов для коэффициентов заполнения от 60 до 100%, высоты слоя от 0,15 до 0,25 мм, количества периметров от 2-6.

Ключевые слова: 3D печать, высота слоя, скорость печати, плотность заполнения, количество периметров, оптимизация, параметры.

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-3(2)-299-306

EDN: SXUVFQ

ВВЕДЕНИЕ

В современном производстве все более возрастает роль аддитивных технологий или 3D-печати – нового метода изготовления деталей. Благодаря недавним усовершенствованиям в области аддитивных технологий, полученные изделия используются во многих областях [1]. Изначально эти изделия были пригодны для быстрого прототипирования моделей, теперь используются для изготовления уникальных деталей и изделий на заказ. По сравнению с формообразующим и субтрактивным производством аддитивные технологии производства обладают многими преимуществами: незначительные потери материалов, создание очень сложных объектов без оснований и крепежных элементов, экономичное производство, простота в использовании и т.д. [2].

3D-печать основана на концепции построения объекта последовательно наносимыми слоями, отображающими контуры модели. Одним из распространенных методов 3D-печати является – экструзионный. При этом методе (рис.1) нить из термопластика подается в печатающую головку, где разогревается и выдавливается через экструдер на подвижную платформу 3D-принтера [3, 4].

Повышение надежности и долговечности подобных деталей является важнейшей задачей инженеров-конструкторов. В настоящее время, несмотря на широкое распространение 3D-печати пластиком, недостаточно полно представлены данные об исследованиях механических характеристик изготавливаемых изделий, о влиянии комплекса технологических режимных параметров печати на эти характеристики.

Это затрудняет возможность спрогнозировать физические свойства конечной продукции. Поэтому экспериментальные исследования влияния режимных параметров 3D-печати пластиком на механические характеристики изделий актуальны и представляют научный и практический интерес.

Гаспарова Лана Багратовна, кандидат педагогических наук, доцент кафедры технологии машиностроения, станки и инструменты. E-mail: gasparova@mail.ru

Якимов Михаил Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения, станки и инструменты. E-mail: miku@yandex.ru

Косоуров Владимир Дмитриевич, студент. E-mail: kosourov.2002@gmail.com

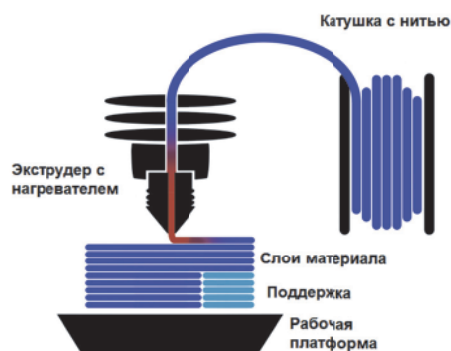


Рисунок 1 – Принцип 3D-печати методом FDM

Основная цель исследования - анализ факторов, влияющих на механическую прочность объектов, напечатанных на 3D-принтере методом FDM, и выбор оптимальных технологических параметров и режимов печати, способствующих повышению прочностных и эксплуатационных характеристик.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве экспериментального объекта была выбрана деталь типа – зубчатое колесо, общий вид и геометрические размеры которого представлен на рис. 2.

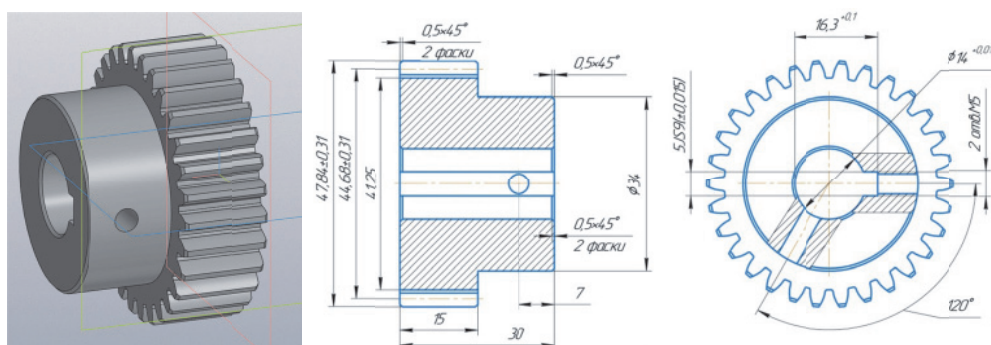


Рисунок 2 – Экспериментальный объект – зубчатое колесо (геометрические параметры)

Экспериментальные зубчатые колеса были напечатаны из пластика PLA CF и PLA+ (рис.3) на 3D принтере Bambulab P1S в количестве 54 штук при следующих режимах печати: температура экструдера – 215 °C; скорость печати внешнего периметра – 60 мм/с, внутреннего периметра – 55 мм/с, коэффициент подачи пластика – 0,98; диаметр сопла экструдера – 0,4 мм; ширина нити – 0,42 мм; высота слоев – 0,15-0,25 мм; температура стола первого слоя – 60 °C; температура стола остальных слоев – 55 °C.



Рисунок 3 – Экспериментальные зубчатые колеса: PLA CF (слева), PLA + (справа)

Материал PLA CF сочетает свойства стандартного PLA (биоразлагаемого полимера) и углеродного волокна [5-7]. Благодаря добавлению карбоновых частиц, PLA CF обладает улучшенной жёстко-

стью, прочностью и сниженным весом. Материал PLA+ позволяет обеспечить напечатанным деталям повышенную гибкость, жесткость и ударопрочность по сравнению с обычным пластиком PLA. Механические и тепловые характеристики материалов приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Технические характеристики материалов зубчатого колеса

Технические характеристики	PLA CF	PLA+
Механические свойства		
Плотность	1,29 г/см ³	1,23 г/см ³
Предел прочности	49 МПа	63 МПа
Прочность на изгиб	89 МПа	74.2 МПа
Модуль упругости при изгибе	6320	2375 МПа
Тепловые свойства		
Температура тепловой деформации	91 °С, 0.45 МПа	53 °С, 0.45 МПа

Для экспериментальных испытаний напечатанных зубчатых колес был спроектирован и изготовлен стенд (рис. 4), позволяющий проводить испытания образцов на прочность при действии на них крутящего момента.

Стенд состоит из корпуса 1, который представляет собой 2 параллельные пластины, соединенные между собой с помощью болтов 2 и имеющие 3 парных отверстия под оси для шестерен. Внутри корпуса на осях размещаются три шестерни: неподвижная 3, изготовленная из стали, экспериментальная 4, изготовленная из пластика и шестерня 5, изготовленная из стали и имеющая возможность поворота вокруг оси. Ось шестерни 5 представляет собой болт 6, на головку которого вставляется динамометрический ключ, создающий крутящий момент и имитирующий нагрузку на зубья экспериментальной шестерни 4. Все три шестерни находятся в зацеплении друг с другом. Изменение значения крутящего момента в зацеплении шестерен позволило определить предельный момент, приводящий к разрушению экспериментальной шестерни 4.

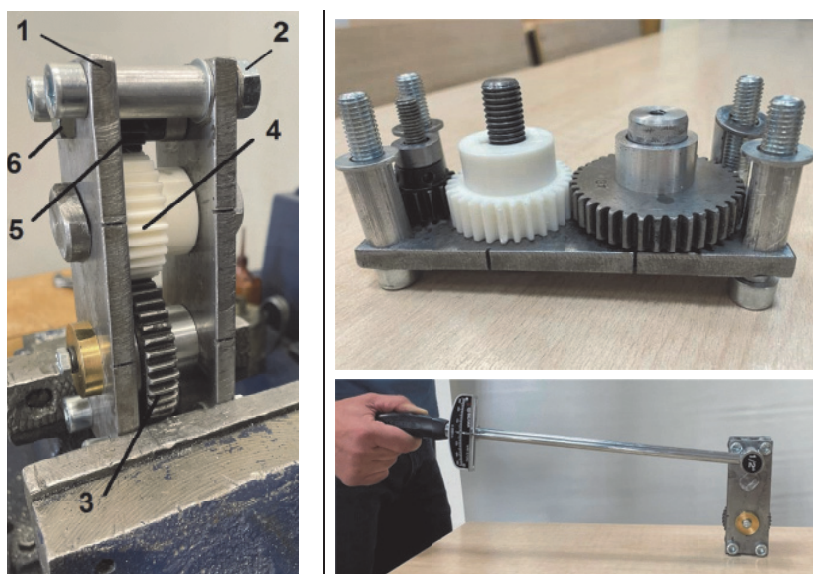


Рисунок 4 – Экспериментальный испытательный стенд

Испытания экспериментального зубчатого колеса на прочность заключаются в создании крутящего (предельного) момента в зубчатом зацеплении, приводящего к разрушению образца [8, 9]. Параметры образцов для испытаний представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Параметры образцов для испытаний

Параметр	Значение
Плотность заполнения, %	60...100
Высота слоя, мм	0,15 ... 0,25
Шаблон заполнения	гирийд
Количество периметров	2-6

Параметр «Плотность заполнения» определяет процентное содержание внутреннего материала, используемого внутри модели, и влияет на прочность и массу модели. Параметр «Количество периметров» определяет количество проходов по контуру модели, также влияет на прочность модели. Параметр «Высота слоя» определяет толщину каждого отдельного слоя в напечатанной детали, влияет на качество напечатанной поверхности и прочность модели.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты испытаний представлены в таблицах 3 и 4. В таблице 3 представлен протокол испытаний экспериментальных зубчатых колес.

Таблица 3 – Протокол испытаний экспериментальных зубчатых колес

Высота слоя, мм	Количество периметров	Плотность заполнения, %	Крутящий момент, Нм	
			Материал 1 PLA+	Материал 2 PLA CF
0.15	2	60	9,6	10
		80	10,4	8,8
		100	10,6	10,4
	4	60	9,2	12,4
		80	12	11,6
		100	12,4	10,4
	6	60	12	8,4
		80	12,4	10,4
		100	12,4	11,6
0.2	2	60	11,2	8,8
		80	11,6	9,6
		100	12,4	12
	4	60	11,6	12,4
		80	12	12,8
		100	12,4	13,6
	6	60	12	14,4
		80	13,2	15,2
		100	13,8	12,8
0.25	2	60	11,4	9,6
		80	11,6	11,2
		100	12	12
	4	60	11,2	12,4
		80	11,6	12,4
		100	12,4	11,2
	6	60	12,4	14
		80	12,4	12
		100	12,4	10,8

Анализ результатов разрушения образцов показал, что наибольший предельный крутящий момент 15,2 Нм выдержали образцы из материала PLA CF и 13,8 Нм образцы из материала PLA+ со следующими параметрами печати:

- PLA+ высота слоя 0.2 мм, количество периметров – 6 и плотность заполнения – 100%.
- PLA CF высота слоя 0.2 мм, количество периметров – 6 и плотность заполнения – 80%.

Наименьший предельный крутящий момент 8.4 Нм показали образцы из материала PLA CF и 9.2 Нм образцы из материала PLA+ со следующими параметрами печати:

- PLA+ высота слоя 0.15 мм, количество периметров – 4 и плотность заполнения – 60%.
- PLA CF высота слоя 0.15 мм, количество периметров – 6 и плотность заполнения – 60%.

На рис. 5 представлены графики зависимости наибольшего предельного крутящего момента от количества периметров при различной высоте слоя из материалов PLA CF и PLA +.

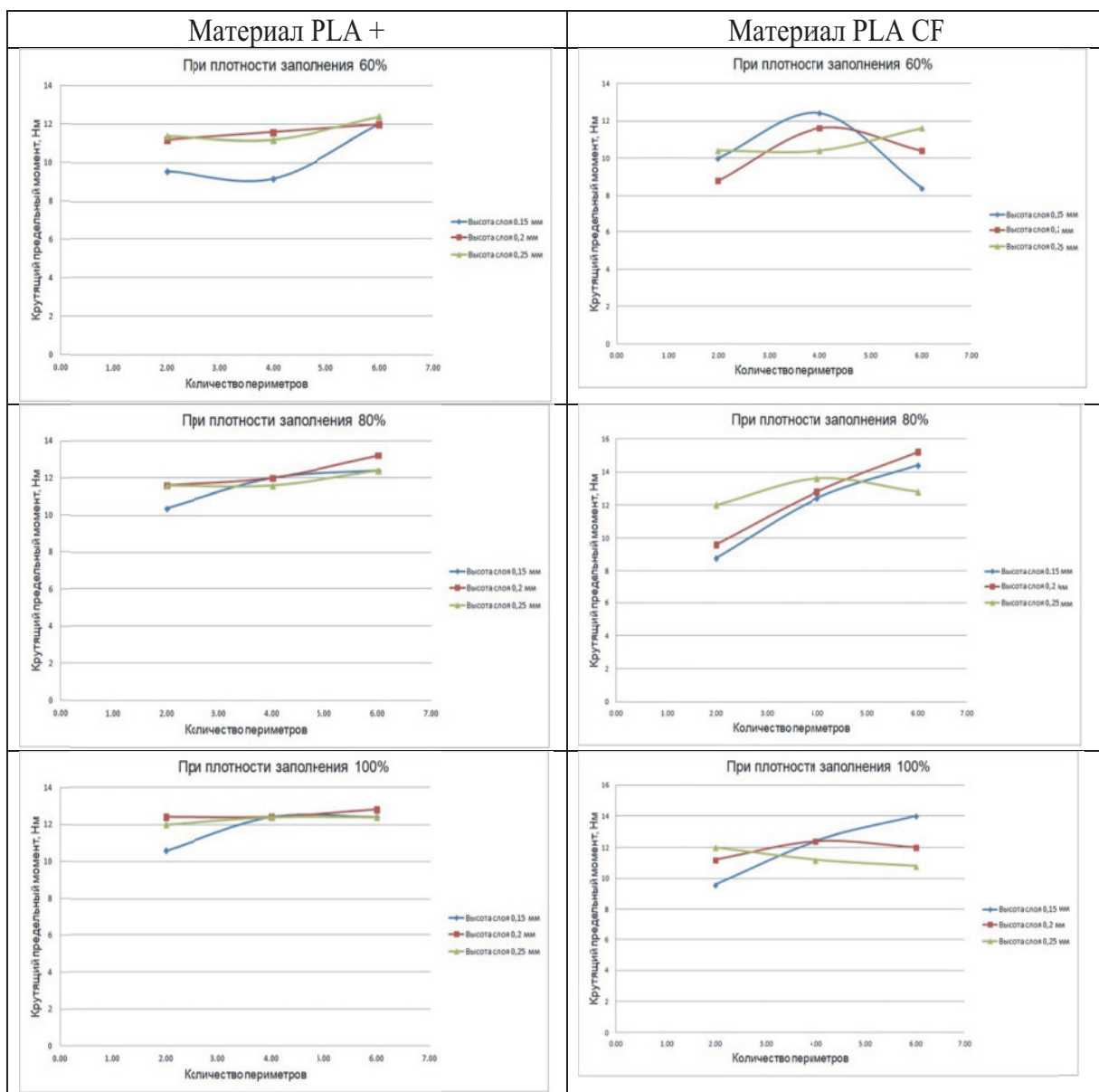


Рисунок 5 – Графики зависимости наибольшего предельного крутящего момента от количества периметров для различных значений высоты слоя

Стоит заметить, что для материала PLA+ при увеличении высоты слоя от 0.15 до 0,25 мм и количестве периметров от 2 до 6 при 100% плотности заполнения наибольший предельный крутящий момент колеблется от 11,6 до 12,4 Нм. В то время как для материала PLA+ диапазон предельного крутящего момента составляет от 10,4 до 13,6 Нм при тех же условиях печати.

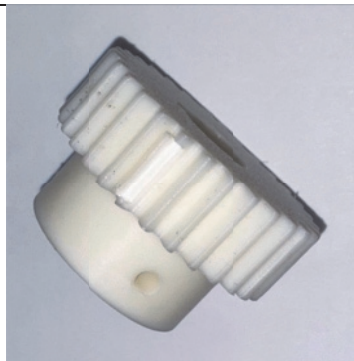
Полученные зависимости на рис. 5 демонстрируют, что при использовании параметра «Количество периметров» равным 4 для материала PLA+ величина наибольшего предельного крутящего момента одинакова при высоте слоя от 0.15 до 0.25 мм и плотности 80 и 100%. При плотности заполнения 60% для материала PLA+ величина наибольшего предельного крутящего момента при высоте слоя 0.15 мм значительно ниже, чем при высоте 0.2 и 0.25 мм.

При использовании параметра «Количество периметров» равным 4 для материала PLA CF величина наибольшего предельного крутящего момента схожа только при высоте слоя 0.15 и 0,2 мм и плотности от 80 до 100%. При плотности заполнения 60 и 100% при высоте слоя 0.25 мм величина наибольшего предельного крутящего момента ниже, чем для других параметров высоты слоя при количестве параметров – 4.

Следует отметить основное влияние на предельный крутящий момент высоты слоя при плотности заполнения 100% и количестве периметров – 6. Так, наибольший предельный крутящий момент для пластика PLA+ при высоте слоя 0.2 мм, а для пластика PLA CF уже при высоте слоя 0.15 мм.

В таблице 4 представлены фотографии экспериментальных образцов после испытаний.

Таблица 4 – Общий вид экспериментальных образцов после испытаний

Параметры экспериментального образца	Фото образца	Характер дефекта
Плотность заполнения – 100%, высота слоя – 0,25 мм, количество периметров – 4		Смятие зуба
Плотность заполнения – 100%, высота слоя – 0,2 мм, количество периметров – 2		Выврваны зубья у основания

ВЫВОДЫ

1. Исследовано 54 образца из материалов PLA CF и PLA+, изготовленных методом 3D-печати и имеющих плотность заполнения от 60 до 100 %, высоту слоя (от 0.15 до 0,25 мм), количество периметров от 2-6 и шаблон заполнения – гириод.

2. Получены зависимости предельного крутящего момента от плотности заполнения, значений высоты слоя и количества периметров.

3. Проведена оценка влияния указанных параметров 3D-печати на прочность зубчатых колес.

3. При высоте слоя 0.15 мм наибольший крутящий момент варьируется в широком диапазоне (8.4–12.4 Нм для PLA+ и 8.8–12.4 Нм для PLA CF). Наименьшие значения наблюдаются при плотности заполнения 60% и 6 периметрах для материала PLA CF - 8.4 Нм. При высоте слоя 0.2 мм значения наибольшего крутящего момента выше (11.2–13.8 Нм для PLA+ и 8.8–15.2 Нм для PLA CF). Наименьшие значения наблюдаются при плотности заполнения 60% и 2 периметрах для материала PLA CF - 8.8 Нм. Максимальное значение для PLA CF достигается при 6 периметрах и плотности заполнения 80% (15.2 Нм). При высоте слоя 0.25 мм наибольший крутящий момент остаётся стабильно высоким (11.2–12.4 Нм для PLA+ и 9.6–14 Нм для PLA CF). Наибольшее значение для PLA CF наблюдается при 6 периметрах и 60% заполнения (14 Нм). Таким образом, увеличение высоты слоя до 0.2 мм способствует росту крутящего момента, особенно для материала PLA CF. Дальнейшее увеличение высоты (0.25 мм) не всегда даёт прирост.

5. Анализ влияния количества периметров на прочностные свойства колес показал следующее. При печати с параметром 2 периметра крутящий момент относительно низкий (9.6–12 Нм для PLA+ и 8.8–12 Нм для PLA CF), 4 периметра – значения увеличиваются (9.2–12.4 Нм для PLA+ и 11.6–13.6 Нм для PLA CF), 6 периметров – наблюдаются максимальные значения (12–13.8 Нм для PLA+ и 8.4–15.2 Нм для PLA CF). Таким образом, увеличение количества периметров до 6 приводит к росту крутящего момента, особенно для PLA CF. Плотность заполнения 80–100% обеспечивает высокий крутящий момент для обоих материалов. Для PLA CF максимальные значения достигаются при 80% заполнения и 6 периметрах.

6. Материал пластика PLA CF может обеспечивать более высокие значения крутящего момента, но требует точного подбора параметров (6 периметров, 80% заполнения). Материал PLA+ более стабилен и менее чувствителен к изменениям параметров

Полученные результаты исследований следует учитывать при проектировании зубчатых колес для изготовления их методом 3D-печати. В дальнейшем планируется изучить влияние других режимов печати (температура экструдера, скорость печати, шаблон заполнения и др.) на прочностные характеристики и качество полученной детали.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гарипова, Л. И.* Анализ прочностных характеристик изделий, полученных методом 3D-печати / Л. И. Гарипова, А. С. Батраков, М. А. Кальбах // Современное машиностроение. Наука и образование. – 2024. – № 13. – С. 233–244. – DOI 10.18720/SPBPU/2/id24-98.
2. *Ермакова, В.А.* Исследование прочностных характеристик изделий, полученных методом 3D-печати из PLA / В. А. Ермакова [и др.] // Наука и техника. – 2022 – Т. 21. – № 2. – С. 107–113. – URL: <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-2-107-113>.
3. *Dragos Gabriel Zisopol* A theoretical-experimental study on the influence of FDM parameters on the dimensions of cylindrical spur gears made of PLA // Engineering, Technology & Applied Science Research, 2023, Vol. 13, No. 2, pp.10471-10477.
4. *Lazuardi, Muhammad Akhlis Rizza* The effect of 3D printing parameters on the tensile strength of acrylonitrile butadiene styrene filament for designing CNC router machine gears // Journal Polimesin, No.5, Vol.21, 2023, pp.555-559
5. *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. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48051104>.
6. *Mazzanti V., Malagutti L., Mollica F.* FDM 3D Printing of Polymers Containing Natural Fillers: A Review of their Mechanical Properties // Polymers 2019. 11 (7). 1094 URL: DOI: 10.3390/polym11071094
7. *Sztorch B., Brzqkalski D., Pakula D. et al.* Natural and Synthetic Polymer Fillers for Applications in 3D Printing - FDM Technology Area // Solids. 2022. 3 (3). 508-548 – URL: <https://www.mdpi.com/2673-6497/3/3/34/htm>.
8. *Носко, Е. А.* Экспериментальная оценка влияния параметров 3D-печати на прочность изделия / Е. А. Носко, И. В. Одинокова, А. Ю. Чеканов // Journal of Advanced Research in Technical Science. – 2018. – № 9-1. – С. 35-46.
9. *Гарипова, Л.И.* Механические характеристики деталей, изготавливаемых методом FDM-печати / Л.И. Гарипова, А.С. Батраков, Ф.Ф. Хабибуллин // Изв. вузов. Авиационная техника. – 2024. – № 1.

INVESTIGATION OF THE STRENGTH CHARACTERISTICS OF GEARS MANUFACTURED BY AN ADDITIVE METHOD WITH VARYING TECHNOLOGICAL PARAMETERS

© 2025 L.B. Gasparova, M.V. Yakimov, V.D. Kosourov

Samara State Technical University, Samara, Russia

In modern mechanical engineering, one of the main tasks is to increase the reliability and durability of structural parts and assemblies. The requirements for the manufacture of products are constantly increasing due to the need to save scarce, expensive metals and alloys and, as a result, replace them with economically more profitable options. One of the main trends is the use of plastic parts in structures. Modern manufacturing technologies make it possible to produce plastic products by 3D printing them on a printer. The FDM (Fused Deposition Modeling) method of layered deposition has become widespread for obtaining such parts. Printing parameters are factors that affect the mechanical strength of objects printed on a 3D printer. The mechanical strength of objects printed on a 3D printer is affected by parameters such as the height (thickness) of the layer, the printing speed and percentage of the filling geometry, the number of perimeters, the filling pattern, and others. The article examines the effect of these parameters on the strength of a gear wheel made of PLA+ and PLA CF materials. The problem of optimizing 3D printing parameters affecting the physical, mechanical and qualitative characteristics of parts manufactured using additive technologies is considered. A test bench has been developed to evaluate the strength of a gear made of various plastics using a Bambulab P1S 3D printer under the action of torque. Experimental data on the limiting torque leading to gear failure are presented. A comparative analysis of the results obtained was carried out for filling coefficients from 60 to 100%, layer height from 0.15 to 0.25 mm, and the number of perimeters from 2-6.

Keywords: 3D printing, layer height, printing speed, filling density, number of perimeters, optimization, parameters.

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-3(2)-299-306

EDN: SXUVFQ

REFERENCES

1. *Garipova, L. I.* Analiz prochnostnyh harakteristik izdelij, poluchennyh metodom 3D-pechati / L. I. Garipova, A. S. Batrakov, M. A. Kal'bah // Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie. – 2024. – № 13. – С. 233–244. – DOI 10.18720/SPBPU/2/id24-98.

2. *Ermakova, V.A.* Issledovanie prochnostnykh harakteristik izdelij, poluchennykh metodom 3D-pechati iz PLA / V. A. Ermakova [i dr.] // Nauka i tekhnika. – 2022 – T. 21. – № 2. – S. 107–113. – URL: <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-2-107-113>.
3. *Dragos Gabriel Zisopol* A theoretical-experimental study on the influence of FDM parameters on the dimensions of cylindrical spur gears made of PLA // Engineering, Technology & Applied Science Research, 2023, Vol. 13, No. 2, pp.10471-10477.
4. *Lazuardi, Muhammad Akhlis Rizza* The effect of 3D printing parameters on the tensile strength of acrylonitrile butadiene styrene filament for designing CNC router machine gears // Journal Polimesin, No.5, Vol.21, 2023, pp.555-559
5. *Zhukov A.V.* Plastmassy dlya additivnykh tekhnologij (Obzor) / A. V. Zhukov, A. A. Nikiforov, A. S. Yakovishin // Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2021. – № 4(91). – S. 57-70. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48051104>.
6. *Mazzanti V., Malagutti L., Mollica F.* FDM 3D Printing of Polymers Containing Natural Fillers: A Review of their Mechanical Properties // Polymers 2019. 11 (7). 1094 URL: DOI: 10.3390/polym11071094
7. *Sztorch B., Brzqkalski D., Pakuła D. et al.* Natural and Synthetic Polymer Fillers for Applications in 3D Printing - FDM Technology Area // Solids. 2022. 3 (3). 508-548 – URL: <https://www.mdpi.com/2673-6497/3/3/34/htm>.
8. *Nosko, E. A.* Eksperimental'naya ocenka vliyaniya parametrov 3D-pechati na prochnost' izdeliya / E. A. Nosko, I. V. Odinkova, A. Yu. Chekanov // Journal of Advanced Research in Technical Science. – 2018. – № 9-1. – S. 35-46.
9. *Garipova, L.I.* Mekhanicheskie harakteristiki detalej, izgotavlivaemykh metodom FDM-pechati / L.I. Garipova, A.S. Batrakov, F.F. Habibullin // Izv. vuzov. Aviacionnaya tekhnika. – 2024. – № 1.

Lana Gasparova, Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology, Machine Tools and Tools. E-mail: gasparova@mail.ru
Mikhail Yakimov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology, Machine Tools and Tools. E-mail: mikya@yandex.ru
Vladimir Kosourov, Student. E-mail: kosourov.2002@gmail.com