

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМА FDM-ПЕЧАТИ КОМПОЗИТАМИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ТРЕБУЕМЫХ КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

И. Д. Марканов, Р. А. Вдовин, Е. С. Гончаров, А. О. Фирсин

Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С. П. Королева,
Россия, 443086, г. Самара, Московское шоссе, д. 34

В данной статье были рассмотрены свойства различных материалов для 3D-печати, а именно пластиков, в том числе полиамидов, а также композитных или инженерных пластиков с примесями углеволокна и стекловолокна. С учетом данных свойств и проведенных экспериментов, направленных на выявление линейной усадки и максимальной выдерживаемой экспериментальными образцами нагрузки, был подобран наиболее подходящий режим выращивания образцов определенным материалом на 3D-принтере. Как итог, был определен оптимальный режим 3D-печати различных конструкций деталей из композитных материалов для достижения заданных конструкторско-технологических параметров.

Ключевые слова: 3D-печать, аддитивное производство, аддитивные технологии, FDM-печать, 3D-принтер, композитные материалы, режим печати, пластик.

Введение

Аддитивное производство (АП) представляет собой процесс, при котором объекты создаются путем последовательного нанесения тонких слоев материала на основании трехмерной электронной модели. В отличие от традиционных методов производства, которые обычно включают удаление материала из заготовки, при аддитивном производстве материал добавляется слой за слоем. Это позволяет получать сложные и точные геометрические формы [1, 2].

Для изготовления практически любого изделия или прототипа наиболее эффективным и удобным методом аддитивного производства является 3D-печать пластиком, особенно с использованием технологии FDM (fused deposition modeling). Эта технология основана на принципе нагретого и экструдированного пластика [3]. В процессе FDM-печати используется специальный принтер для создания объектов путем плавления пластикового филамента и нанесения его тонкими слоями на основе трехмерной модели. Другими словами, технология FDM состоит в последовательном нагреве и нанесении слоев пластичного материала, что позволяет постепенно создавать трехмерный объект. Эта технология широко применяется для создания функциональных прототипов, моделей и готовых изделий в различных отраслях промышленности.

Целью работы является определение наиболее оптимального режима FDM-печати для изготовления изделий или технологической оснастки из композитных пластиков, которые будут удовлетворять требованиям конструктора и технолога.

1. Выбор материала и ориентация образцов

Для достижения наилучших свойств изделий или деталей, изготовленных из пластика, необходимо

выбрать оптимальные параметры печати. Определение оптимальных параметров основано на выполнении определенных критериев при изготовлении изделия. Образцы, соответствующие ГОСТ 33693-2015 (рис. 1), были созданы для определения наилучшего режима печати. Затем они были исследованы на механические свойства путем разрыва, а также была измерена шероховатость и усадка.

Образцы изготавливались из трех композитных пластиков:

FORMAX — инженерный термопластик на основе ABS с добавлением углеволокна до 15 %, обладающий способностью выдерживать большие нагрузки и высокие температуры. Основными преимуществами являются простота и стабильность при печати, а также повышенная прочность и жесткость;

РА ABS GF-8 состоит из смеси акрилонитрилбутадиенстирола (ABS) и полиамида (РА6) с добавлением 8 % стекловолокна. Этот материал идеально подходит для печати конечных изделий, которым требуется высокая ударопрочность и стойкость к ультрафиолету. Он также инертен к большинству химических растворителей.

РА 66 GF-33 является композитным материалом из полиамида 66, смешанного с армированием стекловолокном на 33 %.

Образцы выращивались из нескольких видов композитов в различных направлениях на платформе построения 3D-принтера: горизонтально, вертикально и под углом 45°, при разных температурах экструзии. Такая вариативность была принята, чтобы определить влияние ориентации на печатном столе и температуры на механические свойства изделий [4]. Ниже представлена табл. 1, в которой отражены используемые материалы, а также температуры, при которых выращивались образцы.

Каждый образец имеет специальную маркировку, где указан материал, из которого был напечатан

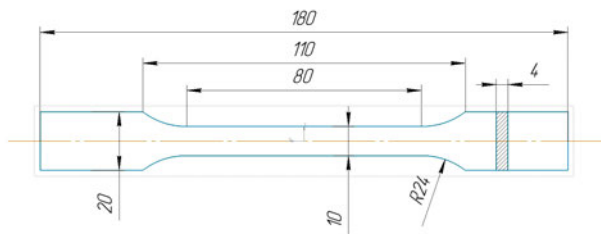


Рис. 1. Вид образца для определения механических свойств при растяжении по ГОСТ 33693 – 2015

Fig. 1. Type of sample for determining mechanical properties under tension according to GOST 33693 – 2015

Таблица 1. Материалы образцов и температурные режимы
Table 1. Sample materials and temperature conditions

Материал	Температура сопла, град.	Температура стола, град.
Formax	270	105
	280	
	290	
PA ABS GF-8	270	120
	280	
	290	
PA 66 GF-33	305	140
	310	
	320	

Таблица 2. Маркировки образцов каждой целевой группы
Table 2. Labeling of samples of each target group

№ 1	Горизонтально параллельно столу
№ 2	Горизонтально «ребром»
№ 3	Вертикально
№ 4	«Плашмя» под 45 градусов
№ 5	«Ребром» под 45 градусов
№ 6	Вертикально при уменьшенной температуре
№ 7	Вертикально при увеличенной температуре

образец, а также порядковый номер, отражающий определенное направление выращивания и температуру. В табл. 2 приведены эти маркировки.

Расположения образцов на печатном столе представлены ниже (рис. 2). Каждый набор образцов состоит из семи штук. Пять из них выращены в пяти разных направлениях, а остальные два — вертикально при разных температурах. Такой подход позволяет точно определить, как изменение

температуры печати влияет на межслойную адгезию и, в конечном счете, на механические свойства изделия. При более высокой температуре печати межслойная адгезия становится сильнее, что делает образцы более прочными и труднее разрушаемыми по слоям. Однако такое повышение температуры может привести к ухудшению качества поверхности и нарушению печатного процесса [5].

Помимо вышеперечисленного, температура печати и расположение на печатном столе также влияют на усадку образцов. При более высокой температуре плавления материала усадка будет больше из-за длительного времени остывания. Также чем ближе образец к платформе построения, тем больше он будет остывать и, как результат, тем больше будет его усадка. На печатном столе образцы расположены под разными углами и подвержены различному температурному воздействию в зависимости от их положения.

2. Подбор параметров печати

Теперь рассмотрим подробнее параметры, при которых выращивались исследуемые образцы [6].

Параметры выращивания образцов, которые оставались постоянными:

- диаметр сопла (0,5 мм);
- высота слоя (0,25 мм);
- обдув – 0 %;

– скорости печати — представлены на рисунке ниже, в зависимости от структуры, которая печаталась, будь то заполнение или внешний периметр (рис. 3).

Экструзионный множитель или коэффициент экструзии равен 1. Высота слоя печати образцов составляет 0,25 мм, что является оптимальным значением. Увеличение этого параметра приводит к ухудшению качества поверхности образцов [7]. Снижение высоты слоя сильно увеличивает время печати и увеличивает вероятность появления разрывов между слоями из-за плохой адгезии. Количество периметров образцов составляет 3, что является стандартным значением (рис. 4).

Поддерживающая структура играет важную роль в процессе печати и необходима для поддержки наклонных поверхностей изделия. Поддержки различных типов выбираются в зависимости от геометрии изделия и используемого материала. В нашем случае мы использовали два типа поддержек: органические и аккуратные.

Органическая поддержка имеет форму, похожую на дерево, она достаточно плотная и устойчивая у основания, а затем разветвляется по мере приближения к изделию. Она используется только в определенных местах, что позволяет ее легко удалить без повреждения окружающих деталей и с минимальным расходом материала. Однако, дан-

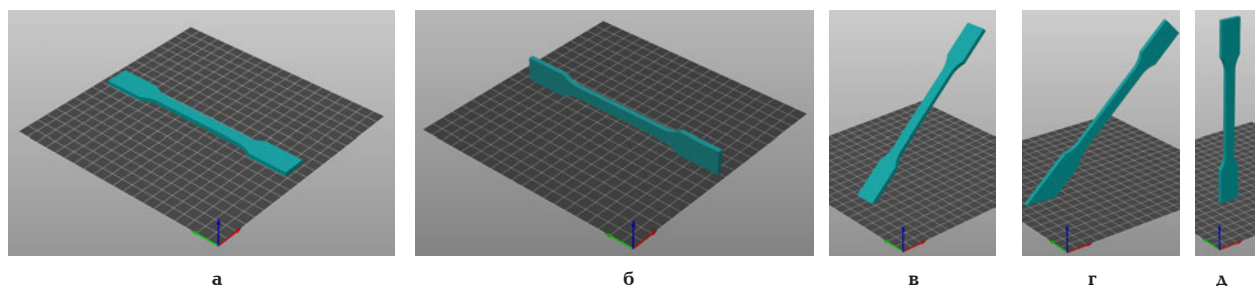


Рис. 2. Расположение образцов: а — № 1; б — № 2; в — № 4; г — № 5; д — № 3, № 6, № 7

Fig. 2. Arrangement of samples: а — No. 1; б — No. 2; в — No. 4; г — No. 5; д — No. 3, No. 6, No. 7

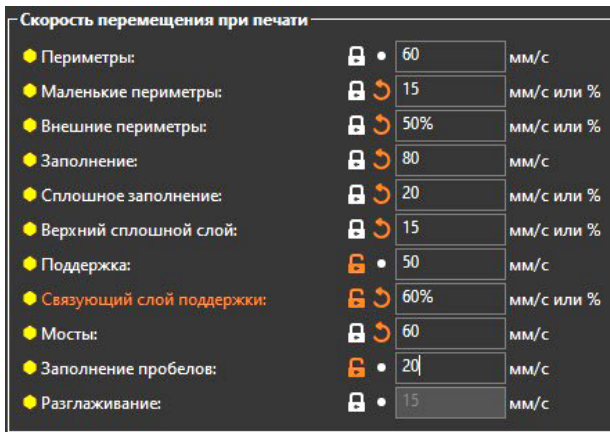


Рис. 3. Параметры скоростей печати
Fig. 3. Print speed parameters

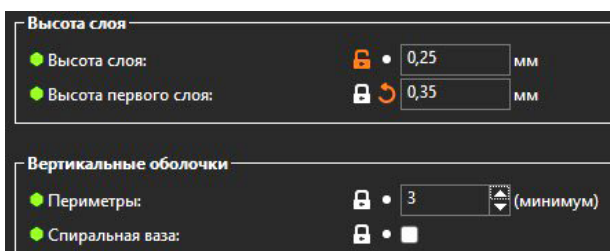


Рис. 4. Установка параметров высоты слоя и количества периметров
Fig. 4. Setting the parameters of the layer height and the number of perimeters

ная поддержка не обеспечивает достаточной устойчивости для горизонтальных, плоских выступов. Она показывает лучшие результаты при поддержке в углах или свесах.

Стиль поддержки «аккуратный» представляет собой прямоугольную, прямолинейную структуру, которая отличается от органической поддержки (рис. 5). Вместо ветвей и разветвлений она состоит из вертикальных столбиков, которые покрывают всю область выступа, свеса или моста. Этот тип поддержки хорошо подходит для различных видов свисающих поверхностей. Однако, как недостаток, она сложнее удаляется и может привести к повреждению поверхности модели. Кроме того, такой тип поддержки требует больше материала для печати.

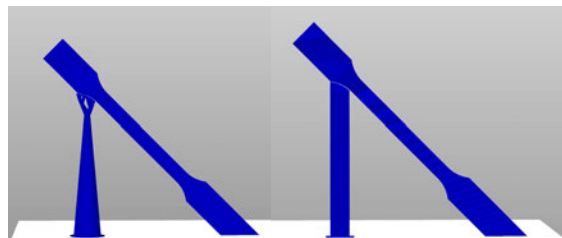


Рис. 5. Органическая и «аккуратная» поддержка
Fig. 5. Organic and «neat» support



Рис. 6. Универсальная испытательная машина TIRAtest 28300
Fig. 6. The TIRAtest 28300 universal testing machine

3. Исследование свойств образцов

Испытания на механические свойства проводились на универсальной испытательной машине TIRAtest 28300 (Германия) (рис. 6). Образцы устанавливались в гидравлические зажимные устройства и растягивались до разрушения путем перемещения верхней траверсы, нижняя траверса при этом неподвижна [8].

Результаты испытаний на механические свойства представлены в табл. 3.

Таблица 3. Результаты испытаний на механические свойства
Table 3. Results of tests for mechanical properties

Номер образца	Маркировка образцов								
	PA / ABS GF8			FORMAX			PA66 GF30		
	σВ, МПа	σ0,2, МПа	A, %	σВ, МПа	σ0,2, МПа	A, %	σВ, МПа	σ0,2, МПа	A, %
1	49	24	2,78	56	39	1,24	87	39	3,04
2	51	23	4,8	65	47	0,92	84	36	2,95
3	13	6	1,49	29	23	0,53	28	20	0,42
4	25	16	2,24	18	0	0,14	13	10	0,37
5	22	9	3,11	38	27	0,96	26	18	0,97
6	20	10	1,48	33	25	0,56	16	16	0,24
7	15	8	1,44	41	33	0,65	24	17	0,45

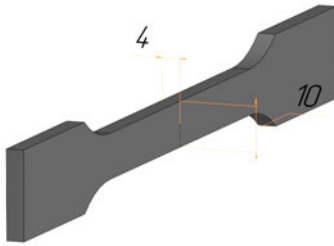


Рис. 7. Линейные размеры образцов, исследуемые на предмет усадки
Fig. 7. Linear dimensions of the samples examined for shrinkage

Из анализа табл. 3 можно сделать вывод, что все три типа образцов обладают небольшим относительным удлинением, что указывает на их хрупкость. Образец PA / ABS GF8 № 2 имеет наибольшую степень удлинения, а образец PA66 GF30 № 1 имеет наибольший предел прочности и предел текучести. Образцы с маркировкой FORMAX име-

ют наименьшую степень удлинения, что делает их самыми хрупкими.

Таким образом, образцы из материала PA66 GF30, напечатанные при температуре 280 градусов, параллельно плоскости печатного стола, оказались наиболее прочными. После печати образцов было произведено исследование их линейной усадки [9].

Уменьшение объема и размеров материала при его формировании и охлаждении называется усадкой [10]. Усадка является важным показателем свойств материала, вызывающим внутренние напряжения. Поэтому при разработке процессов 3D-печати необходимо учитывать данное свойство.

Линейная усадка — это разница между размерами 3D-модели и полученного изделия на 3D-принтере. Она измеряется в процентах от размеров исходной модели. Для определения линейной усадки провели измерение линейных размеров образцов с помощью гладкого микрометра МК-25 с ценой деления 0,01 мм и допустимой погрешностью $\pm 0,004$ мм. Проводилось измерение двух линейных размеров, а и b, соответствующих 4 и 10 мм на 3D-модели (рис. 7).

Таблица 4. Результаты измерения образцов из FORMAX и величины линейной усадки
Table 4. Measurement results of FORMAX samples and linear shrinkage values

FORMAX	Толщина (a)			Ср. зн.	α_i (a), %	Ширина (b)			Ср. зн.	β_i (b), %
№ 1	4,26	4,11	4,22	4,20	-4,9	10,03	10,00	9,95	9,99	0,1
№ 2	4,18	4,13	4,16	4,16	-3,9	10,49	10,46	10,69	10,55	-5,5
№ 3	4,13	4,13	4,13	4,13	-3,3	10,01	10,03	10,11	10,05	-0,5
№ 4	4,09	4,04	4,19	4,11	-2,7	10,02	9,91	10,00	9,98	0,2
№ 5	4,03	4,04	4,07	4,05	-1,2	10,09	10,09	10,08	10,09	-0,9
№ 6	4,11	4,05	4,06	4,07	-1,8	10,13	10,10	10,11	10,11	-1,1
№ 7	4,08	4,11	4,10	4,10	-2,4	10,09	10,08	10,06	10,08	-0,8

Таблица 5. Результаты измерения образцов из PA ABS GF-8 и величины линейной усадки
Table 5. Measurement results of PA ABS GF-8 samples and linear shrinkage values

PA ABS GF-8	Толщина (a)			Ср. зн.	α_i (a), %	Ширина (b)			Ср. зн.	β_i (b), %
№ 1	3,95	4,00	4,03	3,99	0,2	9,90	9,88	9,90	9,89	1,1
№ 2	3,95	3,94	3,95	3,95	1,3	9,95	9,95	9,95	9,95	0,5
№ 3	4,22	4,19	4,13	4,18	-4,5	10,16	10,11	10,77	10,35	-3,5
№ 4	4,25	4,25	4,18	4,23	-5,7	10,24	10,27	10,30	10,27	-2,7
№ 5	4,13	4,20	4,10	4,14	-3,6	10,18	10,18	10,15	10,17	-1,7
№ 6	4,05	4,00	4,05	4,03	-0,8	10,11	10,15	10,12	10,13	-1,3
№ 7	4,10	4,10	4,13	4,11	-2,7	10,14	10,17	10,16	10,16	-1,6

Таблица 6. Результаты измерения образцов из PA 66 GF-30 и величины линейной усадки
Table 6. Measurement results of PA 66 GF-30 samples and linear shrinkage values

PA 66 GF-30	Толщина (a)			Ср. зн.	α_i (a), %	Ширина (b)			Ср. зн.	β_i (b), %
№ 1	4,22	4,17	4,27	4,22	-5,5	10,30	10,55	10,40	10,42	-4,2
№ 2	4,75	4,85	4,83	4,81	-20,3	10,15	10,11	10,27	10,18	-1,8
№ 3	4,23	4,27	4,30	4,27	-6,7	10,29	10,23	10,24	10,25	-2,5
№ 4	4,29	4,33	4,93	4,52	-12,9	10,40	10,30	10,30	10,33	-3,3
№ 5	4,15	4,16	4,37	4,23	-5,7	10,36	10,33	10,40	10,36	-3,6
№ 6	4,19	4,26	4,25	4,23	-5,8	10,49	10,55	10,40	10,48	-4,8
№ 7	4,23	4,22	4,24	4,23	-5,7	10,43	10,35	10,33	10,37	-3,7

Таблица 7. Определение оптимальных режимов печати
Table 7. Determining the optimal printing modes

Материал	Направление выращивания	Т сопла, град.	Т стола, град.	Лин. усадка (а, b), %	Макс. нагрузка, МПа	Степень удлинения
FORMAX	№ 1	280	105	4,9/0,1	56	1,24
	№ 5	280	105	1,2/0,9	38	0,96
PA ABS GF-8	№ 1	280	120	0,2/1,1	49	2,78
	№ 2	280	120	1,3/0,5	51	4,8
PA 66 GF-30	№ 1	310	140	5,5/4,2	87	3,04
	№ 5	310	140	5,7/3,6	26	0,97

В табл. 4–6 представлены результаты измерения образцов и величин свободной линейной усадки, расчет которой проводился по формуле (1):

$$\alpha_l = (l_0 - l) / l_0, \quad (1)$$

где l_0 — соответствующий размер на 3D-модели, мм; l — соответствующий размер на образце после усадки, мм.

Проанализировав табл. 4–6, можно сделать вывод, что в каждой группе образцов наименьшая усадка по двум размерам: у № 5 из FORMAX (1,2 % и 0,9 %), № 1 из PA ABS GF-8 (0,2 % и 1,1 %) и № 5 из PA 66 GF-30 (5,7 % и 3,6 %). Отсюда можно сделать вывод, что наименьшая усадка у образца № 1 из PA ABS GF-8 (0,2 % и 1,1 %).

4. Определение оптимального материала и параметров печати

После проведения вышеописанных экспериментов и с учетом параметров материалов, заявленных производителем, можно сформировать оптимальный перечень варьируемых параметров печати и определить оптимальный материал и режим печати им на 3D-принтере.

Проанализировав табл. 7, мы можем сделать вывод, что в зависимости от цели в изготовлении того или иного изделия, нужно делать выбор в сторону лучшей усадки, а именно ее отсутствия, или же в сторону наибольшей устойчивости к нагрузкам. Таким образом, если нам нужна точная технологическая оснастка или изделие, которые должны соответствовать размерам своей исходной модели, их следует выращивать из PA ABS GF-8 или FORMAX, поскольку у них наименьшая усадка, а если нам нужна технологическая оснастка, которая сможет выдерживать большие нагрузки, то следует при ее изготовлении использовать материал PA 66 GF-30, поскольку он хорошо выдерживает нагрузку, а также имеет большую степень удлинения.

Заключение

В первом разделе данной статьи было дано общее понятие термину «аддитивное производство», а также рассмотрена технология FDM-печати, с помощью которой впоследствии были изготовлены опытные образцы.

Во втором разделе выбраны композитные материалы для изготовления образцов, определено их расположение на рабочем столе 3D-принтера и заданы температуры печати. Кроме того, образцы были помечены для идентификации.

В третьем разделе были выбраны и подробно рассмотрены параметры печати, которые использовались для выращивания образцов.

В четвертом разделе статьи были проведены эксперименты с использованием определенного оборудования; получены и проанализированы результаты экспериментов.

Благодарности

Работа выполнена в рамках реализации программы развития Самарского университета на 2021–2030 годы в рамках программы «Приоритет–2030» при поддержке Правительства Самарской области.

Список источников

- Вдовин Р. А. Разработка и внедрение в производство цифровой гибридной технологии изготовления лопаток ГТД на основе методов быстрого прототипирования // Вестник РГТУ имени П. А. Соловьева. 2019. № 4 (51). С. 47–52. EDN: QDLSDO.
- Dizon J. R. C., Espera A. H., Chen Q. [et al.]. Mechanical characterization of 3D-printed polymers // Additive Manufacturing. 2018. Vol. 20. P. 44–67. DOI: 10.1016/j.addma.2017.12.002.
- Балякин А. В., Гончаров Е. С., Злобин Е. П. Анализ технологических возможностей и ограничений 3d-принтеров для изготовления прототипов ГТУ // Всероссийский научно-технический форум по двигателям и энергетическим установкам имени Н. Д. Кузнецова, посвященный 110-летию ПАО «ОДК-КУЗНЕЦОВ». Самара: Изд-во Самарского национального исследовательского университета имени академика С. П. Королева, 2022. С. 20–22. EDN: NTBQMY.
- Mohd Khairul Nizam M. A. N. B., Ismail K. I. B., Yap T. C. The effect of printing orientation on the mechanical properties of FDM 3D printed parts // Innovative Manufacturing, Mechatronics and Materials Forum 2021. Springer, 2022. P. 75–85. DOI: 10.1007/978-981-19-2890-1_8.
- Kristiawan R. B., Imaduddin F., Ariawan D. [et al.]. A review on the fused deposition modeling (FDM) 3D printing: Filament processing, materials, and printing parameters // Open Engineering. 2021. Vol. 11, no. 1. P. 639–649. DOI: 10.1515/eng-2021-0063.
- Pérez M., Medina-Sánchez G., García-Collado A. [et al.]. Surface Quality Enhancement of Fused Deposition Modeling (FDM) Printed Samples Based on the Selection of Critical Printing Parameters // Materials. 2018. Vol. 1 (8). DOI: 10.3390/ma11081382.
- Iqbal H. Optimizing the printing parameters of FDM 3D printers for improved mechanical properties. URL: <https://www.researchgate.net/publication/368748176> (дата обращения: 11.09.2023).
- Doshi M., Mahale A., Singh S. K. [et al.]. Printing parameters and materials affecting mechanical properties of FDM-3D printed Parts: Perspective and prospects // Materials Today Proceedings. 2022. Vol 50 (9). P. 2269–2275. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.10.003.

9. Çakan B. G. Effects of raster angle on tensile and surface roughness properties of various FDM filaments // Journal of Mechanical Science and Technology. 2021. Vol. 35 (8). P. 3347–3353. DOI: 10.1007/s12206-021-0708-8.

10. Quan Z., Yushan L., Yujun C. [et al.]. Research on the Shrinkage of Model with Hole in PLA Material Based on the FDM 3D Printing // Tianjin University of Technology & Education, Advances // Intelligent Systems Research. 2017. Vol. 154. P. 547–551.

МАРКАНОВ Илья Денисович, лаборант-исследователь Инжинирингового центра ИЦ-206 Самарского национального исследовательского университета имени академика С. П. Королева (Самарский университет), г. Самара.

SPIN-код: 9645-1120

AuthorID (РИНЦ): 1218561

Адрес для переписки: ilyamarkanoff355@gmail.com

ВДОВИН Роман Александрович, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры технологий производства двигателей, доцент передовой инженерной аэрокосмической школы Самарского университета, г. Самара.

SPIN-код: 6003-6910

AuthorID (РИНЦ): 745142

AuthorID (SCOPUS): 56472716800

Адрес для переписки: vdovin.ra@ssau.ru

ГОНЧАРОВ Евгений Станиславович, инженер кафедры технологий производства двигателей, инженер Инжинирингового центра ИЦ-206, ассистент передовой инженерной аэрокосмической школы Самарского университета, г. Самара.

SPIN-код: 7397-2590

AuthorID (РИНЦ): 1018716

AuthorID (SCOPUS): 57217107476

Адрес для переписки: goncharov.es@ssau.ru

ФИРСИН Андрей Олегович, лаборант-исследователь Инжинирингового центра ИЦ-206 Самарского университета, г. Самара.

Для цитирования

Марканов И. Д., Вдовин Р. А., Гончаров Е. С., Фирсин А. О. Определение оптимального режима FDM-печати композитами для получения требуемых конструкторско-технологических параметров // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2024. Т. 8, № 1. С. 78–85. DOI: 10.25206/2588-0373-2024-8-1-78-85.

Статья поступила в редакцию 23.11.2023 г.

© И. Д. Марканов, Р. А. Вдовин, Е. С. Гончаров, А. О. Фирсин

DETERMINATION OF THE OPTIMAL MODE OF FDM PRINTING WITH COMPOSITES TO OBTAIN THE REQUIRED DESIGN AND TECHNOLOGICAL PARAMETERS

I. D. Markanov, R. A. Vdovin, E. S. Goncharov, A. O. Firsin

Samara National Research University,
Russia, Samara, Moskovskoye Shosse Road, 34, 443086

This paper discusses properties of various 3D printing materials, namely, plastics, including polyamides, along with composite or engineering plastics with inclusions of carbon fiber and fiberglass. We have selected an optimal sample printing mode and carried out experiments, following which we have determined maximal loads for test composite materials, and linear shrinkage. As the result, we have determined an optimal 3D printing mode for various structures of composite material parts with the purpose to reach the set design—engineering parameters.

Keywords: 3D printing, additive manufacturing, additive technologies, FDM printing, 3D printer, composite materials, printing mode, plastic.

Acknowledgements

The work is carried out within the framework of implementation of the programme of development of Samara University for 2021–2030 years under the programme «Priority–2030» with the support of the Government of Samara region.

References

1. Vdovin R. A. Razrabotka i vnedreniye v proizvodstvo tsifrovoy gibridnoy tekhnologii izgotovleniya lopatok GTD na osnove metodov bystrogo prototipirovaniya [Development and deployment of a digital hybrid gte blades manufacturing technique on the basis of fast prototyping methods] // Vestnik RGATU imeni P. A. Solov'yeva. *Vestnik of P. A. Solovyov Rybinsk State Aviation Technical University*. 2019. No. 4 (51). P. 47–52. EDN: QDLSDO. (In Russ.).

2. Dizon J. R. C., Espera A. H., Chen Q. [et al.]. Mechanical characterization of 3D-printed polymers // *Additive Manufacturing*. 2018. Vol. 20. P. 44–67. DOI: 10.1016/j.addma.2017.12.002. (In Engl.).

3. Balyakin A. V., Goncharov E. S., Zlobin E. P. Analiz tekhnologicheskikh vozmozhnostey i ogranicheniy 3d printerov dlya izgotovleniya prototipov GTU [Analysis of technological capabilities and limitations of 3D printers for GTU prototype production] // Vserossiyskiy nauchno-tehnicheskiy forum po dvigatelyam i energeticheskim ustanovkam imeni N. D. Kuznetsova. *All-Russian Scientific and Technical Forum for Engines and Power Facilities named after N. D. Kuznetsov*. Samara, 2022. P. 20–22. EDN: NTBMY. (In Russ.).

4. Mohd Khairul Nizam, M. A. N. B., Ismail K. I. B., Yap, T. C. The effect of printing orientation on the mechanical properties of FDM 3D printed parts // *Innovative Manufacturing, Mechatronics and Materials Forum 2021*. Springer, 2022. P. 75–85. DOI: 10.1007/978-981-19-2890-1_8. (In Engl.).

5. Kristiawan R. B., Imaduddin F., Ariawan D. [et al.]. A review on the fused deposition modeling (FDM) 3D printing: Filament processing, materials, and printing parameters // *Open Engineering*. 2021. Vol. 11, no. 1. P. 639–649. DOI: 10.1515/eng-2021-0063. (In Engl.).

6. Pérez M., Medina-Sánchez G., García-Collado A. [et al.]. Surface Quality Enhancement of Fused Deposition Modeling (FDM) Printed Samples Based on the Selection of Critical Printing Parameters // *Materials*. 2018. Vol. 1 (8). DOI: 10.3390/ma11081382. (In Engl.).

7. Iqbal H. Optimizing the printing parameters of FDM 3D printers for improved mechanical properties. URL: <https://www.researchgate.net/publication/368748176> (accessed: 11.09.2023). (In Engl.).

8. Doshi M., Mahale A., Singh S. K. [et al.]. Printing parameters and materials affecting mechanical properties of FDM-3D printed Parts: Perspective and prospects // *Materials Today Proceedings*. 2022. Vol 50 (9). P. 2269–2275. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.10.003. (In Engl.).

9. Çakan B. G. Effects of raster angle on tensile and surface roughness properties of various FDM filaments // *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2021. Vol. 35 (8). P. 3347–3353. DOI: 10.1007/s12206-021-0708-8. (In Engl.).

10. Quan Z., Yushan L., Yujun C. [et al.]. Research on the Shrinkage of Model with Hole in PLA Material Based on the FDM 3D Printing // *Tianjin University of Technology & Education, Advances // Intelligent Systems Research*. 2017. Vol. 154. P. 547–551. (In Engl.).

MARKANOV Ilya Denisovich, Laboratory Researcher of Engineering Centre EC-206, Samara National Research University (Samara University), Samara.

SPIN-code: 9645–1120

AuthorID (RSCI): 1218561

Correspondence address: ilyamarkanoff355@gmail.com

VDOVIN Roman Alexandrovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Engine Manufacturing Technologies Department, Associate Professor of Advanced Aerospace Engineering School, Samara University, Samara.

SPIN-code: 6003–6910

AuthorID (RSCI): 745142

AuthorID (SCOPUS): 56472716800

Correspondence address: vdovin.ra@ssau.ru

GONCHAROV Evgeny Stanislavovich, Engineer of Engine Manufacturing Technologies Department, Engineer of Engineering Centre EC-206, Assistant of Advanced Aerospace Engineering School, Samara University, Samara.

SPIN-code: 7397 – 2590

AuthorID (RSCI): 1018716

AuthorID (SCOPUS): 57217107476

Correspondence address: goncharov.es@ssau.ru

FIRSIN Andrey Olegovich, Laboratory Researcher of Engineering Centre EC-206, Samara University, Samara.

For citations

Markanov I. D., Vdovin R. A., Goncharov E. S., Firsin A. O. Determination of the optimal mode of FDM printing with composites to obtain the required design and technological parameters // Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering. 2024. Vol. 8, no. 1. P. 78–85. DOI: 10.25206/2588-0373-2024-8-1-78-85.

Received November 23, 2023.

© **I. D. Markanov, R. A. Vdovin, E. S. Goncharov, A. O. Firsin**