МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.7.047+620.174 EDN: CRKIBD

Братцев В. Г., Бревнов А. А., Поданёва В. К., Балашов Д. В.
Донбасский государственный технический университет
**E-mail: somp@dontu.ru*

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ 3D-ПЕЧАТИ НА ПРОЧНОСТЬ ПРИ ИЗГИБЕ ОБРАЗЦОВ ИЗ ПОЛИЭТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТ-ГЛИКОЛЯ

В статье рассмотрены результаты испытаний на изгиб образцов из полиэтилентерефталат-гликоля, напечатанных на 3D-принтере, с разным сочетанием технологических параметров: заполнения, структуры, толщины слоя. Дана оценка влияния указанных параметров на предел прочности при изгибе. Приведены эмпирические зависимости для расчета предела прочности при изгибе. Рассмотрена взаимосвязь предела прочности с пористостью. Определены относительная и удельная прочность для разных сочетаний параметров. Даны практические рекомендации по выбору параметров для конструкторов.

Ключевые слова: *полиэтилентерефталат-гликоль, PETG, 3D-печать, образец, предел прочности на изгиб, заполнение, структура, толщина, слой, пористость, ориентация, слайсер.*

Полиэтилентерефталат-гликоль (PET-G или PETG) — один из универсальных пластиков для любительской и профессиональной 3D-печати послойным наплавлением (FDM — Fused Deposition Modeling или FFF — Fused Filament Fabrication). Применяется в том числе для изготовления деталей, воспринимающих силовые нагрузки. В машиностроении это могут быть прототипы изделий, единичные и мелкосерийные небольшие корпуса, основания, катушки, фланцы, втулки, кронштейны, прижимы. В литейном производстве осваивается изготовление из PETG мелкой модельной оснастки.

Из-за особенностей слоистой структуры наибольшую опасность для напечатанных деталей представляют изгибающие нагрузки. В общедоступных источниках недостаточно данных о пределе прочности при изгибе для разных сочетаний параметров печати.

Цель исследования — оценить влияние на предел прочности при изгибе образцов из PETG, напечатанных на 3D-принтере, параметров печати: заполнения, структуры, толщины слоя.

Объект исследования — прочность при изгибе образцов из PETG, напечатанных на 3D-принтере.

Предмет исследования — зависимость прочности при изгибе от технологических параметров печати: заполнения, структуры, толщины слоя, пористости.

В работе поставлены ***задачи***:

1. Рассмотреть применимость стандартов на испытания пластиков на изгиб к образцам, напечатанным на 3D-принтере, и выбрать подходящую методику испытаний.

2. Обосновать выбор параметров, влияющих на прочность при изгибе образцов из PETG, напечатанных на 3D-принтере. Провести испытания на изгиб образцов, напечатанных с разным сочетанием технологических параметров.

3. Разработать способ определения момента сопротивления сечения изгибу для структур, получаемых 3D-печатью, и определить фактические пределы прочности при изгибе для каждого образца.

4. Выявить зависимости между пределом прочности и заполнением, структурой, толщиной слоя, пористостью. Предложить математические зависимости для расчета предела прочности при изгибе.

5. Дать рекомендации по выбору оптимальных сочетаний технологических параметров печати для разных условий применения конструируемых деталей.

Стандарты на испытания пластмасс на изгиб. Первоначально в качестве основного был рассмотрен ГОСТ 4648-2014 «Пластмассы. Метод испытания на статический изгиб» [1]. На его основании проводились испытания на изгиб образцов, напечатанных методом FFF (FDM), в работах [2, 3].

Стандарт устанавливает методику испытаний на изгиб термопластичных пластмасс, применяемых в том числе для экструзии слоистых листов, из которых изготавливаются образцы. Однако в области применения не упоминаются материалы пористой структуры, получаемые послойным наплавлением. Для ячеистых материалов и слоистых структур, имеющих ячеистое строение, указано применять ГОСТ 18564-2017 «Пластмассы ячеистые жесткие. Методы испытания на статический изгиб» [4]. Область применения данного норматива также не распространяется на пластики для 3D-печати.

Образцы, получаемые послойным наплавлением на 3D-принтерах, имеют следующие характерные особенности:

1. ***Неоднородность структуры***: сплошные наружные слои формируют оболочку, под которой располагаются слои с заданным геометрическим рисунком и плотностью заполнения, образующие пространственную слоисто-пористую структуру.

2. ***Анизотропию*** механических свойств, вызванную слоисто-пористой структурой и ориентацией линий филамента в каждом слое.

3. ***Размеры ячеек*** пор зависят от заданной плотности заполнения и типа геометрического рисунка.

Перечисленные особенности не учитываются в рассмотренных стандартах, поэтому методика испытаний требует корректировки. Рассмотрим методику, применяемую изготовителем филамента. В техническом паспорте на PETG филамент от компании Ultimaker [5] прочность при изгибе определяется по методу ISO 178:2019. На основании версии 2010 года был разработан ГОСТ 4648-2014, поэтому размеры образцов одинаковые: 80×10×4 мм (длина×ширина×толщина). Изготовитель указывает, что механические свойства отличаются в зависимости от ориентации образца. Предел прочности при изгибе приведен для изгиба вдоль каждой координатной оси. Оговорены: угол наклона линий в слое относительно осей X, У — 45º, тип структуры — сетка и заполнение — 100 %. Толщина слоя — 0,15 мм, слайсер — Cura 4.9, образцы печатались поштучно, выдерживались при комнатной температуре не менее 24 часов перед испытанием.

Образцы, применяемые в испытаниях, не позволяют оценить влияние структуры, заполнения, толщины слоя на прочность деталей из PETG при изгибе. Применение результатов испытаний предусмотрено только для контроля качества материала, но не конструкторских расчетов [1].

Для напечатанного стандартного образца отношение суммарной толщины верхней и нижней оболочки к толщине образца составляет 0,2–0,5 (при базовых настройках слайсера сверху и снизу по 3 слоя, толщиной 0,2–0,3 мм). При таком соотношении увеличивается влияние поверхностных слоев на прочность при изгибе. На практике такое соотношение характерно для деталей типа пластин, дисков, втулок, стенок корпусов. Для фланцев, кронштейнов, рычагов, подошв и приливов корпусов характерна большая толщина, а указанное отношение менее 0,2 (печать со 100%-ным заполнением не рассматриваем как нетипичный случай). Из сказанного следует необходимость увеличения толщины образца для учета влияния внутренней слоисто-пористой структуры на прочность при изгибе.

Сравнительно малая толщина поверхностных слоев может быть причиной локального смятия и прогиба верхних сжатых волокон до достижения предельных значений напряжений в нижних растянутых волокнах. Вероятно, более подвержены такому явлению образцы с минимальной толщиной оболочки и малым заполнением (до 30–40 %), соответственно, большим расстоянием между внутренними вертикальными элементами (рис. 1).

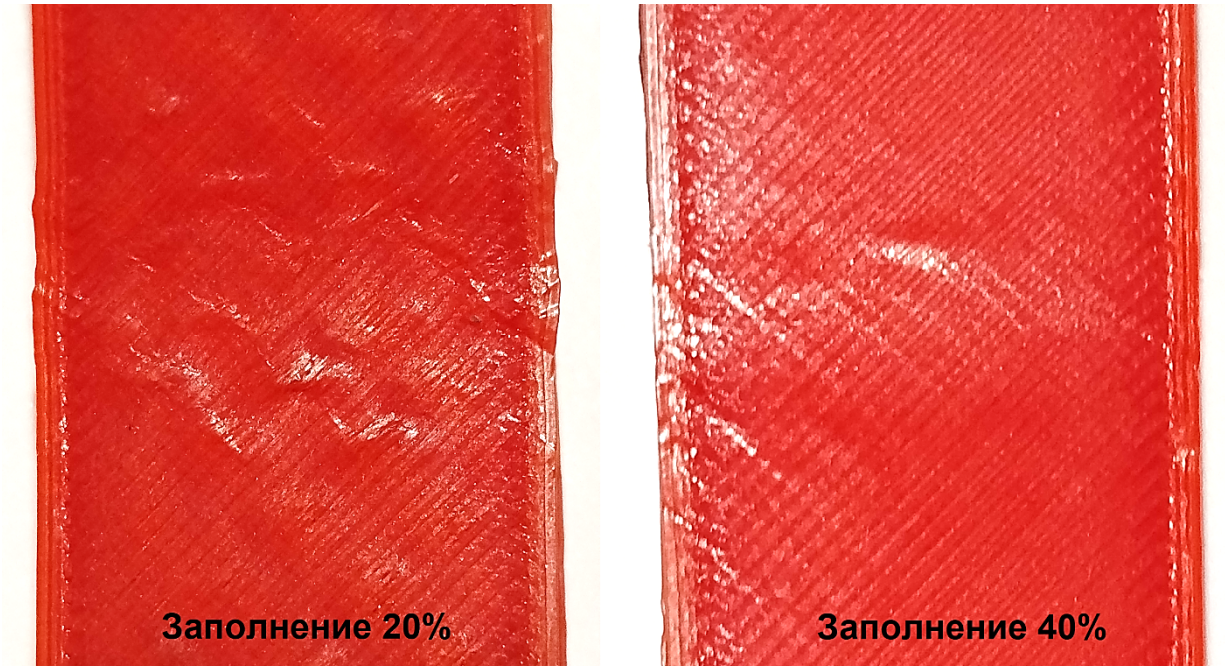


Рисунок 1 — Локальные деформации на внутренней стороне образцов

С целью уменьшения концентрации напряжений следует увеличить радиусы опор и пуансона, что соответствует требованиям к приспособлению для испытаний ячеистых пластиков [4]. В таблицу 1 сведены размеры образцов и опор, рекомендуемые стандартами.

Размеры образцов были приняты с учетом влияния размеров на механические свойства. В таблице 2 представлены принятые размеры образцов и данные о влиянии размеров на механические характеристики.

Предполагается, что принятые размеры образцов обеспечат приближение результатов испытаний к фактическим характеристикам прочности типовых деталей. Увеличение влияния касательных напряжений на процесс отражает смешанный характер разрушения деталей, наблюдаемый на практике.

Выбор параметров. Настраиваемые характеристики печати условно можно разделить на группы:

– настраиваемые на принтере (диаметр сопла, зазор);

– оперативно управляемые (температура стола, сопла; обдув, скорость печати);

– задаваемые в слайсере (толщина слоя, структура, плотность заполнения, толщина оболочек, ретракция, ориентация модели относительно стола, поддержки).

Таблица 1

Размеры образцов для испытаний на статический изгиб по стандартам

Параметр	ГОСТ 4648-2014		ГОСТ 18564-2017	
	Рекомендуемые	Допускаемые	Рекомендуемые	Допускаемые
Длина L, мм	80 ± 2	–	120,00 ± 1,20	≥ (l + 50)
Ширина b, мм	10,0 ± 0,2	15,0 ± 0,5	25,00 ± 0,25	≥ 2 h
Толщина h, мм	4,0 ± 0,2	5 < h ≤ 10	20,00 ± 0,20	15–38
Расстояние между опорами l, мм	64	(16 ± 1) $h_{ср}$	100 ± 1	12 h–16 h
Радиус нагружающего наконечника и опор R_1, R_2, мм	5,0 ± 0,2	5,0 ± 0,2	15 ± 1	5,0 ± 0,1

Таблица 2

Влияние размеров образцов на механические свойства

Параметр	Принятое значение	Влияние на механические свойства
Длина L, мм	150 ± 1,0	Увеличение снижает влияние краевых эффектов, улучшает стабильность закрепления
Ширина b, мм	20 ± 0,2	Увеличение повышает сопротивление изгибу, влияет на характер разрушения
Толщина h, мм	10 ± 0,2	Увеличение повышает неоднородность деформации, снижает прочность — масштабный фактор
Расстояние между опорами l, мм	100 ± 1	Уменьшение отношения l/h увеличивает влияние касательных напряжений, способствующих разрушению от межслоевого сдвига
Радиус нагружающего наконечника и опор R_1, R_2, мм	15 ± 1	Увеличение снижает концентрацию напряжений

Каждый из перечисленных параметров оказывает влияние на качество печати и в разной степени на прочность детали. В исследованиях [2, 3] рассмотрено влияние на прочность при изгибе: диаметра сопла, температуры печати, заполнения, ориентации модели.

Для выполнения слайсинга требуется задавать весь перечень параметров, но часть из них нельзя изменить при настройке принтера или в процессе печати: толщину слоя, структуру, заполнение, ориентацию. Толщина оболочек также задается в слайсере, зависит от количества сплошных наружных слоев и выбранной толщины слоя печати. Ориентация детали определяет расположение слоев относительно действующих усилий, что может быть учтено конструктором. Производители филамента также приводят показатели прочности в зависимости от ориентации образцов (рис. 2) при печати и испытаниях [5].

Таким образом, ввиду отсутствия данных от производителей филамента, наибольший интерес представляет влияние структуры, заполнения и толщины слоя на прочность при изгибе. Анализ разрушения напечатанных деталей вследствие изгиба позволяет сделать предположение о совместном влиянии указанных характеристик на прочность. Сведений об исследованиях совместного влияния структуры, заполнения, толщины слоя на прочность при изгибе найти не удалось, что подтверждает актуальность проблемы. Для комплексной оценки влияния выбранных параметров на прочность приняты характеристики образцов, указанные в таблице 3.

Эксперимент трехфакторный, число уровней для факторов структура и толщина слоя — 3, для фактора заполнение — 4. Общее число вариантов образцов — N = 36.

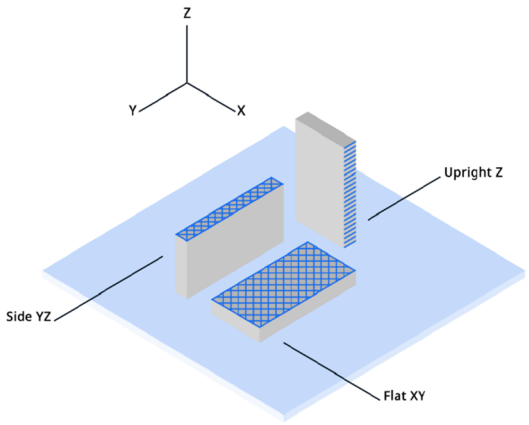


Рисунок 2 — Схема ориентации образцов

Таблица 3

Технологические параметры образцов

Структура	Заполнение, %	Толщина слоя, мм
Прямолинейная	20, 40, 60, 80	0,2; 0,25; 0,3
Сетка (45°)		
Соты		

Слайсинг проводили в программе PrusaSlicer-2.9.4. Толщина наружных оболочек в зависимости от толщины слоя приведена в таблице 4.

Печать выполнялась филаментом PETG от компании ABS-Maker на принтере ALKINOID 4060 HT. Температура стола при печати первых 3-х слоев — 80 ºС, следующих — 70 ºС. Температура сопла: 230 ºС и 220 ºС соответственно. Диаметр сопла — 0,4 мм. Настройки скорости печати представлены на рисунке 3. Все образцы печатались на столе параллельно плоскости XY.

Компания ABS-Maker не предоставляет информацию о прочности напечатанных образцов на изгиб. Поэтому в качестве эталона принята прочность образца из PETG Ultimaker, напечатанного в плоскости XY со 100 % заполнения, структура — сетка 45º, толщина слоя — 0,15 мм, предел прочности при изгибе $\sigma_{изг} = 79$ МПа [5].

Испытания образцов на статический изгиб проводились на универсальной испытательной машине МИМ.2-200-3.1-16.1.1. Скорость испытаний принята 2 мм/мин по рекомендациям [1]. Схема испытаний представлена на рисунке 4.

Испытывали по два образца каждого варианта, для расчетов принимали среднее значение двух испытаний. При разнице между значениями более 10 % испытывали не менее двух дополнительных образцов. Выбросы более 10 % не учитывали при расчете среднего значения. Перед испытаниями образцы выдерживали сутки при комнатной температуре. Фото испытаний на рисунке 5.

Таблица 4

Толщина наружных оболочек образцов

Толщина слоя, мм	Толщина вертикальных оболочек, мм	Толщина горизонтальных оболочек, мм	
		нижней	верхней
0,2	1,26	0,75	0,6
0,25	1,24	0,85	0,75
0,3	1,22	0,95	0,9

Примечание: количество вертикальных сплошных слоев по периметру образца — 3, количество горизонтальных сплошных слоев оболочки сверху и снизу образца — 3. Толщина первого слоя — 0,35 мм.

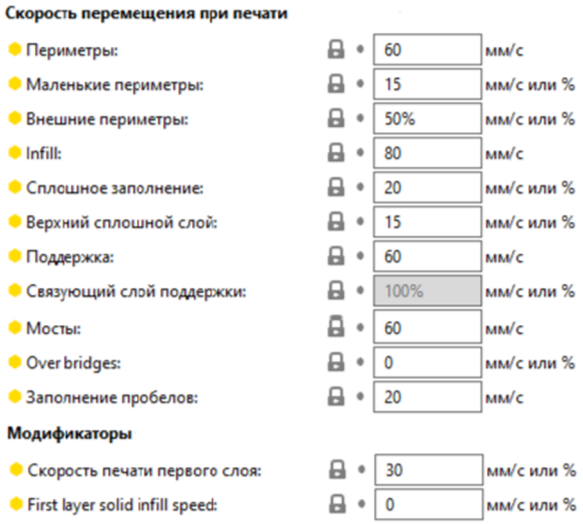


Рисунок 3 — Настройки скорости печати

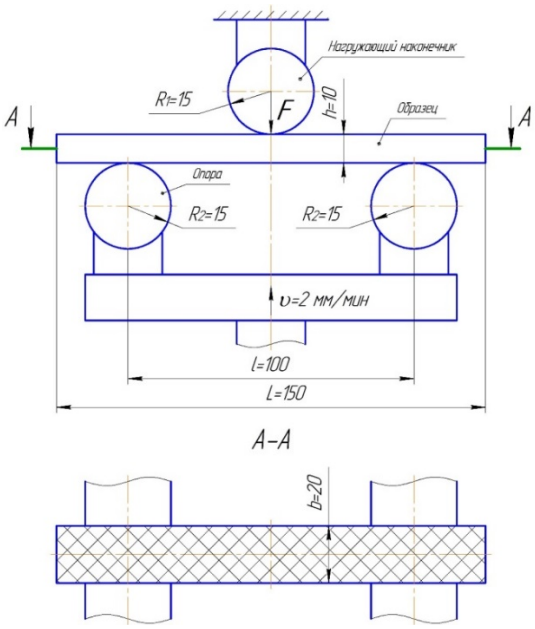


Рисунок 4 — Схема испытаний

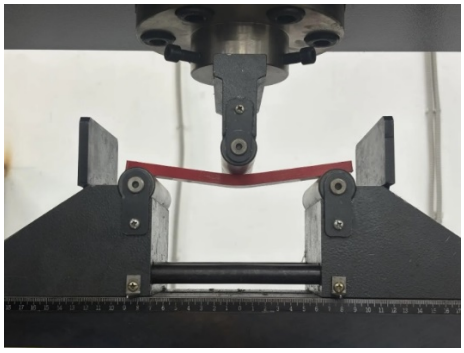


Рисунок 5 — Процесс испытаний

Определение фактического момента сопротивления изгибу. В методиках стандартов [1, 4] изгибающее напряжение σ_f и разрушающее напряжение при изгибе $\sigma_{изг}$ (предел прочности при изгибе), соответственно, вычисляют по формуле

$$\sigma = \frac{3FL}{2bh^2}, \quad (1)$$

которую можно записать в виде

$$\sigma = \frac{M}{W}, \quad (2)$$

где M — изгибающий момент, Н×мм; W — момент сопротивления изгибу, мм^3.

Для сплошного прямоугольного сечения момент сопротивления вычисляют по формуле

$$W = \frac{bh^2}{6}. \quad (3)$$

Для принятой расчетной схемы изгибающий момент в среднем сечении образца определяют из выражения:

$$M = \frac{FL}{4}. \quad (4)$$

После подстановки выражений (3) и (4) в формулу (2) и сокращения получаем выражение (1). Таким образом, в стандартах [1, 4] изложена методика расчета для образцов сплошного прямоугольного сечения.

В нашем случае поперечное сечение образцов представляет собой решетку (рис. 6), где шаг и ширина вертикальных заполненных элементов зависят от структуры и заполнения. Поэтому момент сопротивления сечения изгибу нельзя вычислять по формуле (3), соответственно, предел прочности при изгибе следует определять по формуле (2).

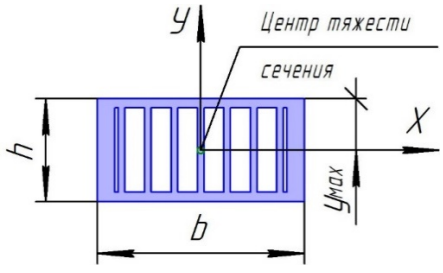


Рисунок 6 — Поперечное сечение образцов

Для нахождения момента сопротивления изгибу требуется найти главный центральный момент инерции сечения I_x. Расчет для составных сечений рационально выполнить в CAD, например, в КОМПАС. Для построения эскиза сечения в программе необходимо определить размеры элементов решетки. Толщины вертикальных и горизонтальных оболочек принимают из настроек слайсера. Ширину вертикальных заполнений и окон можно определить следующими способами:

1. *Фактическим измерением элементов в сечении*. Для этого образец разрезают посередине длины. Затем на инструментальном электронном микроскопе измеряют размеры элементов. В процессе реза образуются заусенцы, искажающие размеры элементов, особенно при высоком заполнении. При измерении просвечивающих деталей возникают сложности с автоматической привязкой. Также неудобство создает ограниченное поле зрения. Способ достаточно трудоемкий и длительный.

2. *Измерением в CAD по масштабируемой фотографии фронтального сечения.* Применяют образец, печать которого, для уменьшения дефектов, остановлена не менее чем на пятом слое после нижних сплошных слоев. Измерение размеров вертикальных элементов, окон выполняют во фронтальном, а не в поперечном сечении. Измерения можно выполнять на микроскопе со сложностями, указанными для первого способа. Чтобы ускорить процесс, образец фотографировали, полученное растровое изображение вставляли во фрагмент КОМПАС. Изображение масштабировали в соответствии с известными размерами, после чего с помощью вспомогательных линий указывали границы элементов, вычерчивали контуры (рис. 7), вычисляли главные центральные моменты инерции сечения и координаты центра тяжести сечения.

Далее по формуле (5) вычисляли моменты сопротивления изгибу:

$$W = \frac{I_x}{y_{max}}, \quad (5)$$

где y_{max} — расстояние от оси x до наиболее удаленной точки поперечного сечения, мм. Трудоемкость данного способа обусловлена необходимостью печати измерительного образца и фотографирования.

3. *Измерением в CAD по масштабируемому скриншоту фронтального сечения из слайсера.* В слайсере с высокой точностью моделируется послойная печать, поэтому выполняли скриншот фронтального сечения в произвольном слое, кроме сплошных. Изображение вставляли во фрагмент КОМПАС и обрабатывали по алгоритму, описанному в способе 2 (рис. 8).

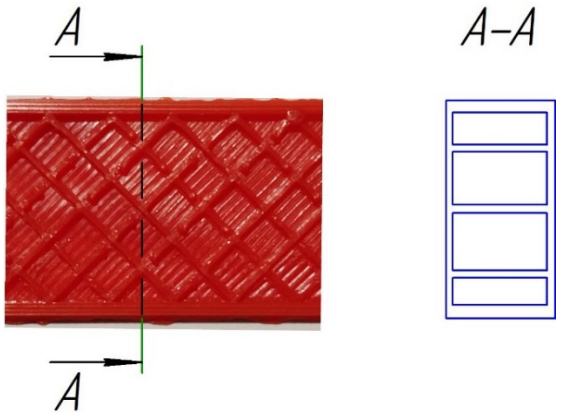


Рисунок 7 — Измерение сечения в КОМПАС по фотографии

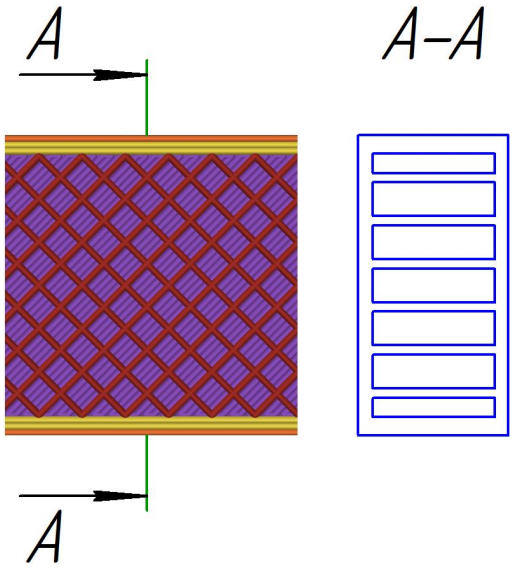


Рисунок 8 — Измерение сечения в КОМПАС по скриншоту из слайсера

Данные о разнице полученных значений моментов сопротивления сечения изгибу по 2-му и 3-му способу представлены в таблице 5.

Учитывая незначительную разницу в значениях моментов, способ 3 приняли основным в данном исследовании.

При определении моментов сопротивления сечения изгибу сделаны ряд допущений:

– Разрушение происходит посередине длины образца. В действительности в процесс вовлечены также прилежащие сечения.

– Образец установлен строго симметрично относительно опор и пуансона. Не учитывается погрешность установки и возможное смещение в начальный момент контакта с пуансоном.

– Форма вертикальных заполненных элементов решетки принята прямоугольной. Фактический поперечный профиль вертикальных элементов может отличаться в зависимости от структуры. В процессе наплавления филамент растекается к низу, сглаживая переходы между слоями. Варианты фактического поперечного сечения и теоретического сечения вертикальных элементов представлены на рисунке 9.

Таблица 5

Вычисленные 2-м и 3-м способами значения W

Способ	W, мм^3		
	№ 4	№ 11	№ 25
2	165	243	308,2
3	165,4	250,8	307,4
Разница, %	0,24	3,21	0,26

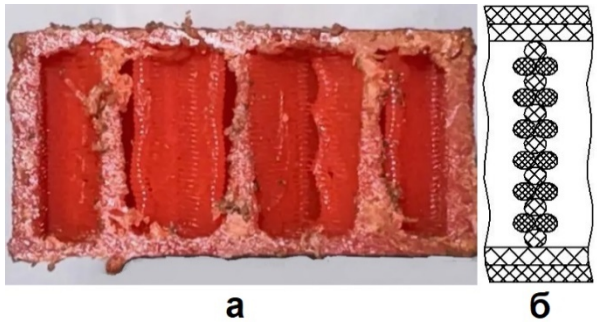


Рисунок 9 — Поперечного сечение (а — фактическое, б — теоретическое) вертикальных элементов

Анализ результатов испытаний образцов из PETG, изготовленных методом FDM-печати, показал, что предел прочности при изгибе существенно зависит от сочетания технологических параметров: плотности заполнения, структуры заполнения и толщины слоя. При этом влияние каждого параметра проявляется во взаимосвязи с геометрией внутренней пористой структуры и фактическим моментом сопротивления сечения.

По результатам испытаний установлено, что с увеличением заполнения от 20 до 80 % прочность при изгибе возрастает для всех рассмотренных структур. Наиболее выраженный прирост наблюдается для структуры «Соты», для которой предел прочности увеличивается с 37,0–38,0 МПа при 20 % заполнения до 54,7–58,5 МПа при 80 % заполнения. Для прямолинейной структуры зафиксирован рост от 36,6–38,0 МПа до 49,5–54,8 МПа. Для структуры «Сетка» прочность изменялась от 45,8–48,1 МПа при 20 % заполнения до 56,0–62,1 МПа при 80 % заполнения. На рисунке 10 отображена зависимость предела прочности при изгибе от заполнения для трех типов структур при толщине слоя 0,25 мм.

Таким образом, структура «Сетка» обеспечивает наибольшую прочность практически во всем исследованном диапазоне заполнений. Вероятно, это объясняется более равномерным распределением материала в сечении и эффективной работой внутренних перемычек при изгибе. Снижение прочности при 40 % может быть объяснено разбросом свойств филамента, в частности, при печати с разных катушек. Структура «Соты» при малом заполнении уступает другим вариантам, однако при увеличении заполнения показывает значительный прирост прочности. Прямолинейная структура занимает промежуточное положение и характеризуется более плавным изменением прочности при росте заполнения.

Влияние толщины слоя проявляется менее однозначно, однако в большинстве случаев увеличение толщины слоя от 0,2 до 0,3 мм приводит к снижению прочности. Это может быть связано с уменьшением числа межслоевых контактов по высоте образца, изменением условий охлаждения экструдируемого материала и ухудшением межслоевой адгезии. На рисунке 11 приведена зависимость предела прочности при изгибе от толщины слоя для структуры «Сетка».

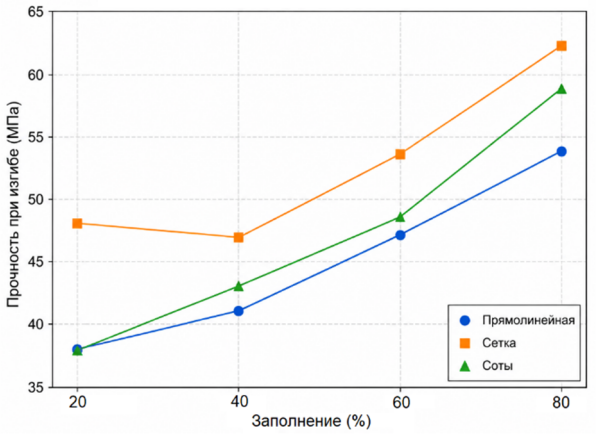


Рисунок 10 — Зависимость предела прочности при изгибе от заполнения

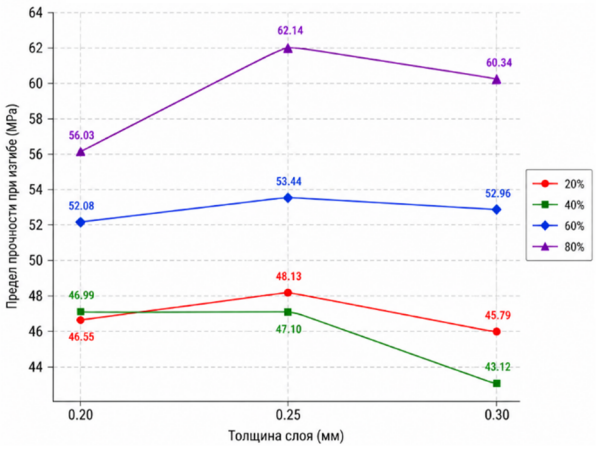


Рисунок 11 — Зависимость предела прочности при изгибе от толщины слоя для «Сетки»

Для структуры «Сетка» наибольшие значения прочности при заполнении 60 и 80 % получены при толщине слоя 0,25 мм. При этом различия между толщиной слоя 0,25 и 0,3 мм при высоком заполнении незначительны. Следовательно, выбор толщины

слоя должен выполняться с учетом не только прочности, но и производительности печати, качества поверхности и требований к точности детали. Наиболее высокую удельную прочность по отношению к заполненной площади сечения показали образцы со структурой «Сетка». Это указывает на более эффективное использование материала в сопротивлении изгибу. Для практического проектирования данный результат особенно важен, так как позволяет снизить массу детали без пропорционального снижения её несущей способности. Графики зависимостей относительной и удельной прочности от структуры, заполнения, толщины слоя отображены на рисунке 12.

Для инженерной оценки предела прочности при изгибе проверена регрессионная модель, учитывающая структуру, плотность заполнения и толщину слоя.

$$\sigma_{изг} = 33{,}51 + 27{,}54f - 22{,}89h + 4{,}53K_1 - 0{,}97K_2, \quad (6)$$

где f — заполнение в долях единицы; h — толщина слоя, мм; K_1, K_2 — параметры структуры, для структуры «сетка» $K_1 = 1$, для остальных — $K_1 = 0$, для структуры «соты» $K_2 = 1$, для остальных $K_2 = 0$.

Коэффициент детерминации модели (6) составляет $R^2 = 0{,}95$, средняя относительная ошибка — 3,7 %. Для квадратичной модели коэффициент детерминации 0,96, что подтверждает преимущественно линейный характер зависимости в выбранных диапазонах факторов. Это позволяет применять модель (6) для предварительных расчетов и выбора параметров печати при проектировании. Также можно использовать зависимости из таблицы 6.

На рисунке 13 представлены экспериментальный и теоретический предел прочности при изгибе для каждого образца.

Для оценки влияния отношения длины пролета к толщине образца (l/h) на прочность при изгибе были выполнены выборочные испытания образцов с размерами: L = 200 мм, b = 20 мм, h = 10 мм, l/h = 16. Увеличение расстояния между опорами приводит к росту «кажущейся» прочности — образцы с l/h = 16 показывают на 3,7–10,9 % более высокий предел прочности при изгибе. Разница усиливается при увеличении заполнения:

– при 20–40 % заполнения: $\Delta \approx 3{,}7$–$4{,}7$ %;

– при 60–80 % заполнения: $\Delta \approx 9{,}5$–$10{,}9$ %.

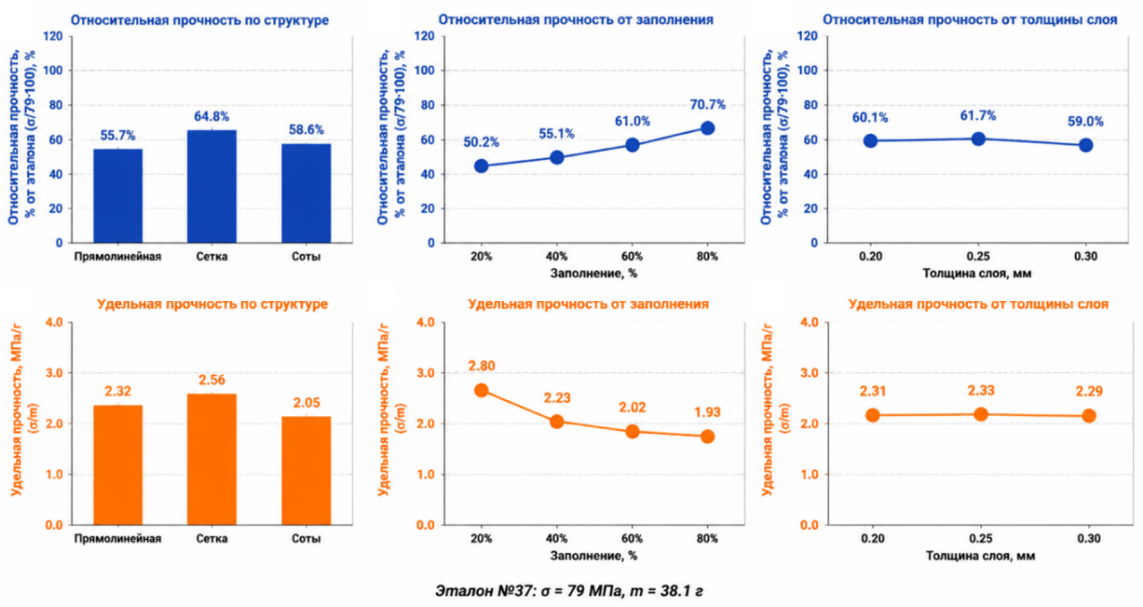


Рисунок 12 — Зависимости относительной и удельной прочности от структуры, заполнения, толщины слоя

Таблица 6

Эмпирические зависимости предела прочности при изгибе

Структура	Предел прочности при изгибе	Коэффициент детерминации
Прямолинейная	$\sigma_{изг} = 33,5 + 27,42f - 22,95h$	0,931
Сетка	$\sigma_{изг} = 36,95 + 28,15f - 20,43h$ или $\sigma_{изг} = 29,47 + 53,82f - 6,75h - 31,67f^2 - 26,37h^2$	0,924 0,948
Соты	$\sigma_{изг} = 31,33 + 27,80f - 20,48h$	0,932

Рисунок 13 — Экспериментальный и теоретический предел прочности при изгибе

При меньшем расстоянии между опорами (100 мм) вклад касательных напряжений и локальных дефектов в зоне приложения нагрузки больше, что приводит к более раннему разрушению. При увеличенном до 160 мм расстоянии преобладает деформация изгиба, разрушение происходит при более высоких напряжениях. Влияние отношения l/h на предел прочности при изгибе показано на рисунке 14.

В ряде работ [6–8] рассмотрено влияние пористости на прочность при изгибе. Пористость связана с заполнением прямой обратной зависимостью, на которую влияют доля цельных оболочек, наличие зазоров между линиями и слоями и другие факторы. Зависимость прочности от пористости имеет обратный характер: снижение пористости сопровождается ростом предела прочности при изгибе. Однако одинаковая пористость для разных структур не всегда приводит к одинаковой прочности, что подтверждает определяющую роль геометрии внутренней структуры. Поэтому в разработанной модели (7) учтено влияние структуры и толщины слоя:

$$\sigma_{изг} = 56,27 + 28,49П - 22,89h + 4,53K_1 - 0,97K_2, \qquad (7)$$

где $П$ — пористость в десятичном выражении,

$$П = 1 - \frac{G_{обр}}{G_{100}}, \qquad (8)$$

где $G_{обр}$, G_{100} — вес испытуемого образца и литьевого образца соответственно.

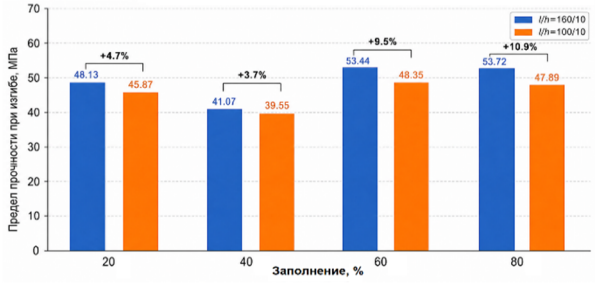


Рисунок 14 — Влияние отношения l/h на предел прочности при изгибе

Следует отметить, что время печати образцов существенно зависит от структуры при одинаковом заполнении. Из рассмотренных структур предпочтительна по времени печати при любом заполнении «Сетка». Это следует учитывать при изготовлении крупных изделий, к примеру, литейных моделей взамен деревянных. Средние значения времени печати по диапазону толщины слоя 0,2–0,3 мм приведены на рисунке 15.

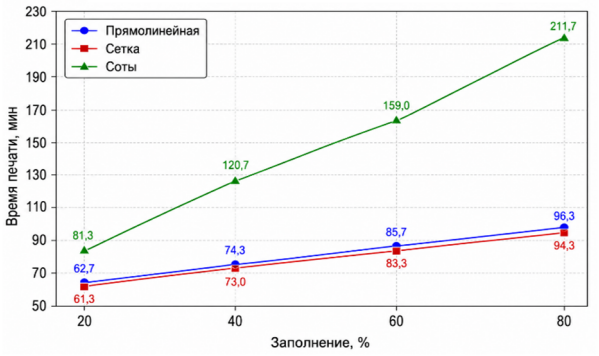


Рисунок 15 — Среднее время печати в зависимости от структуры и заполнения

Практические рекомендации. На основании выполненных испытаний и анализа полученных зависимостей можно предложить следующие рекомендации по выбору параметров FDM-печати деталей из PETG, воспринимающих изгибающие нагрузки:

1. Для деталей, к которым предъявляются максимальные требования по прочности при изгибе, рекомендуется использовать структуру «Сетка» при заполнении 80 % и толщине слоя 0,2–0,25 мм. Такое сочетание обеспечивает предел прочности до 60 МПа по экспериментальным данным и по расчетной модели.

2. Для деталей общего машиностроительного назначения рациональным является сочетание: структура «Сетка», заполнение 60 %, толщина слоя 0,25 мм. При таком режиме достигается предел прочности порядка 53 МПа при существенной экономии материала и времени печати.

3. При необходимости снижения массы детали можно применять заполнение 40 %, однако следует учитывать уменьшение предела прочности и повышенную чувствительность к локальному смятию наружных слоев.

4. Заполнение 20 % рекомендуется применять только для малонагруженных деталей, кожухов, макетов и элементов, для которых прочность при изгибе не является определяющим критерием.

5. При расчете деталей, работающих преимущественно на изгиб, следует использовать повышенный коэффициент запаса: для заполнения 20–40 % — не менее 2,0–2,5; для заполнения 60–80 % — 1,5–2,0.

6. Для деталей, работающих в условиях совместного действия изгиба и сдвига, предпочтительно использовать результаты испытаний образцов с меньшим отношением пролета к толщине, так как они ближе отражают условия эксплуатации массивных FDM-деталей.

Выводы:

1. Установлено, что предел прочности при изгибе образцов из PETG, изготовленных методом FDM-печати, определяется не только плотностью заполнения, но и типом внутренней структуры, определяющей фактическую геометрию сечения, и толщиной слоя, вероятно влияющей на адгезионную прочность.

2. Прямое применение расчетных зависимостей ГОСТ 4648-2014 для сплошного прямоугольного образца к FDM-образцам с пористой структурой может приводить к методической погрешности. Для повышения достоверности расчета необходимо использовать фактический момент сопротивления сечения изгибу. Разработан способ определения фактического момента сопротивления сечения изгибу на основе моделей из слайсера.

3. Структура «Сетка» показала наибольшую эффективность при работе на изгиб. Она обеспечивает высокие значения прочности при всех плотностях заполнения и наиболее рациональное использование материала. Увеличение заполнения с 20 до 80 % приводит к росту предела прочности при изгибе для всех структур. Наиболее заметный относительный прирост установлен для структуры «Соты», однако абсолютные максимальные значения получены для структуры «Сетка». Увеличение толщины слоя с 0,2 до 0,3 мм в большинстве случаев сопровождается снижением прочности, что связано с особенностями формирования межслоевых соединений. Оптимальной с точки зрения сочетания прочности и производительности можно считать толщину слоя 0,25 мм. Сравнение образцов с отношениями $l/h = 10$ и $l/h = 16$ показало, что уменьшение пролета приводит к завышению предела прочности пористых FDM-образцов на 3,7–10,9 %. Это связано с увеличением вклада поперечного сдвига и смешанным характером разрушения.

4. Полученная эмпирическая модель с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,95$ может применяться для предварительной оценки прочности при изгибе FDM-образцов из PETG в диапазоне заполнения 20–80 %, толщины слоя 0,2–0,3 мм и рассмотренных типов структур. Результаты

исследования могут быть использованы конструкторами при выборе параметров печати деталей из PETG, работающих на изгиб, а также при разработке методик испытаний FDM-изделий со слоисто-пористой структурой.

Список источников

1. ГОСТ 4648–2014 (ISO 178:2010). Пластмассы. Метод испытания на статический изгиб. М. : Стандартинформ, 2016. 19 с.

2. Влияние условий 3D-печати полиэтилентерефталатгликоля на механические свойства изделий на его основе / С. В. Котомин, Д. В. Крамарев, И. М. Обидин, С. В. Полунин // Высокомолекулярные соединения. Серия А. 2022. Т. 64. № 6. С. 416–422. DOI: 10.31857/S2308112022700213 EDN WXESSW

3. Исследование прочности изделий, полученных методом 3D-печати / А. В. Балашов [и др.] // Ползуновский вестник. 2016. № 2. С. 61–64. EDN WJHZHT

4. ГОСТ 18564–2017 (ISO 1209-1:2007, ISO 1209-2:2007). Пластмассы ячеистые жесткие. Метод испытания на статический изгиб. М. : Стандартинформ, 2017. 7 с.

5. Ultimaker PETG: Technical data sheet. Ultimaker. 2022. URL: https://um-support-files.ultimaker.com/materials/2.85mm/tds/PETG/Ultimaker-PETG-TDS-v1.00.pdf (date of treatment: 04.06.2026).

6. Горбунов А. В., Смирнов И. А., Федоров В. А. Анализ влияния пористости на прочностные характеристики PETG при изгибе в изделиях аддитивного производства // Аддитивные технологии. 2022. № 1. С. 22–29.

7. Говоров И. С, Потапов А. А., Веневцев А. Ю. Исследование физико-механических свойств образцов после FDM печати // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 11. С. 446–450. EDN SMYLXF

8. Zhang Y., Li X., Wang H. Effect of infill density on porosity and flexural behaviour of PETG parts made by fused filament fabrication // Polymer Testing. 2022. Vol. 112. Art. 107623.

© Братцев В. Г., Бревнов А. А., Поданёва В. К., Балашов Д. В., 2026

Рекомендована к печати к.э.н., доц., зав. каф. ТОМП ДонГТУ Зинченко А. М., гл. инженером ООО «Завод Прогресс 2000» Хлебниковым А. С.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Братцев Виталий Геннадьевич, *зам. директора ИЦ СОМП, УПНИ*
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Россия, e-mail: somp@dontu.ru

Бревнов Александр Аркадьевич, *канд. техн. наук, доцент каф. высшей математики и естественных наук*
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Россия

Поданёва Виктория Константиновна, *инженер ИЦ СОМП, УПНИ*
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Россия

Балашов Дмитрий Владимирович, *лаборант ИЦ СОМП, УПНИ*
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Россия

***Bratsev V. G., Brevnov A. A., Podanyova V. K., Balashov D. V.** *(Donbass State Technical University, Alchevsk, Russia, *e-mail: somp@dontu.ru)*

EFFECT OF 3D-PRINTING PARAMETERS ON FLEXURAL STRENGTH OF POLYETHYLENE TEREPHTHALATE GLYCOL SAMPLES

The article considers the outcomes of bending tests of polyethylene terephthalate glycol samples printed on a 3D-printer with a different combination of technological parameters: filling, structure, layer thickness. The influence of these parameters on the bending strength is estimated. Empirical dependences for calculating the bending strength are given. The interrelation between tensile strength and porosity is considered. The relative and specific strengths for different combinations of parameters are determined. Practical recommendations on the choice of parameters for designers are given.

Key words: *polyethylene terephthalate glycol, PETG, 3D-printer, samples, bending tests, filling, structure, thickness, layer, porosity, orientation, slicer.*

References

1. GOST 4648-2014 (ISO 178:2010). Plastics. Static bending test method [GOST 4648-2014 (ISO 178:2010). Plastmassy. Metod ispytaniya na staticheskij izgib]. M. : Standartinform. 2016. 19 p.

2. Kotomin S. V., Kramarev D. V., Obidin I. M., Polunin S. V. The influence of 3D-printing conditions of polyethylene terephthalate glycol on the mechanical properties of products based on it [Vliyanie uslovij 3D-pechati polietilentereftalatglikolya na mekhanicheskie svojstva izdelij na ego osnove]. Vysokomolekulyarnye soedineniya. Seriya A. 2022. Vol. 64. No. 6. Pp. 416–422. DOI: 10.31857/S2308112022700213 EDN WXESSW

3. Balashov A. V. [et al.]. Investigation of the strength of products obtained by 3D-printing [Issledovanie prochnosti izdelij, poluchennyh metodom 3D-pechati]. Polzunovskiy vestnik. 2016. No. 2. Pp. 61–64. EDN WJHZHT

4. GOST 18564-2017 (ISO 1209-1:2007, ISO 1209-2:2007). Rigid cellular plastics. Static bending test method [GOST 18564-2017 (ISO 1209-1:2007, ISO 1209-2:2007). Plastmassy yacheistye zhyostkie. Metod ispytaniya na staticheskij izgib]. M. : Standartinform. 2017. 7 p.

5. Ultimaker PETG: Technical data sheet. Ultimaker. 2022. URL: https://um-support-files.ultimaker.com/materials/2.85mm/tds/PETG/Ultimaker-PETG-TDS-v1.00.pdf (date of treatment : 04.06.2026).

6. Gorbunov A. V., Smirnov I. A., Fedorov V. A. Analysis of the effect of porosity on the strength characteristics of PETG during bending in additive manufacturing products [Analiz vliyaniya poristosti na prochnostnye harakteristiki PETG pri izgibe v izdeliyah additivnogo proizvodstva]. Additive technologies. 2022. No. 1. Pp. 22–29.

7. Govorov I. S., Potapov A. A., Venevtsev A. Yu. Study of physical and mechanical properties of samples after FDM printing [Issledovanie fiziko-mekhanicheskih svojstv obrazcov posle FDM pechati]. Izvestiya Tula State University. Technical sciences. 2023. No. 11. Pp. 446–450. EDN SMYLXF

8. Zhang Y., Li X., Wang H. Effect of infill density on porosity and flexural behaviour of PETG parts made by fused filament fabrication. Polymer Testing. 2022. Vol. 112. Art. 107623.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Bratsev Vitaly Gennadievich, *Deputy Director of the Engineering Center of "Machine-tool design provision of mechanical facilities", Advanced Research Projects Agency*
Donbass State Technical University,
Alchevsk, Russia, e-mail: somp@dontu.ru

Brevnov Aleksandr Arkadievich, *PhD in Engineering, Assistant Professor of the Department of Mathematics and Natural Sciences*
Donbass State Technical University,
Alchevsk, Russia

Podanyova Viktoriya Konstantinovna, *Engineer of the Engineering Center of "Machine-tool design provision of mechanical facilities", Advanced Research Projects Agency*
Donbass State Technical University,
Alchevsk, Russia

Balashov Dmitry Vladimirovich, *Laboratory Assistant of the Engineering Center of "Machine-tool design provision of mechanical facilities", Advanced Research Projects Agency*
Donbass State Technical University,
Alchevsk, Russia