

DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-4-26-37

Распопина В.Б., Мартынова В.В.Иркутский национальный исследовательский технический университет,***E-mail: raspopina_vb@ex.istu.edu*

ВЛИЯНИЕ ВНЕШНЕЙ ОБОЛОЧКИ НА ПРОЧНОСТЬ FDM-СТЕРЖНЯ С НИЗКИМ ПРОЦЕНТОМ ЗАПОЛНЕНИЯ

Аннотация. Целью данной работы является оценка влияния внешней оболочки стержня, изготовленного с применением FDM-печати, на его статическую прочность при центральном растяжении. Специфика FDM-печати обуславливает дискретную структуру заполнения внутреннего объема детали. Заданная геометрия и размеры детали обеспечивается внешней оболочкой. В этой связи оценить корректно прочность такой детали с помощью уже существующих методик расчёта не представляется возможным. Для достижения поставленной цели были проведены экспериментальные исследования. Поскольку для изготовления стержня по FDM-технологии используются термопластичные материалы, то для выбора формы и размеров образцов и проведения испытаний за основу был принят ГОСТ для испытания пластмасс на растяжение. При неизменном проценте заполнения внутреннего объема образцов изменялись параметры толщины внешней оболочки. По результатам испытаний было выявлено, что на общую прочность стержня при прочих равных условиях оказывают влияние доля площади оболочки по отношению к номинальной площади поперечного сечения образца и характер распределения толщины оболочки по контуру сечения. Были выявлены зависимости, определяющие влияние параметров внешней оболочки стержня на его прочностные свойства. Полученные знания являются предпосылкой для теоретического обоснования влияния параметров оболочки FDM-стержня на его прочность.

Ключевые слова: аддитивные технологии, FDM-печать, образец, испытание на растяжение; внешняя оболочка.

Введение. Аддитивные технологии быстро, но неотвратимо меняют производственные процессы высокотехнологичных отраслей промышленности. В противовес традиционным технологиям аддитивные позволяют «выращивать/печатать» деталь практически любой геометрической формы и размеров, снижая при этом время производственного процесса и расход материалов [1, 2]. Пределом являются технические возможности 3D-принтера и характеристики материалов.

К числу наиболее востребованных относится аддитивный технологический процесс послойного наплавления термопластичного материала или FDM-печать (Fused Deposition Modelling - моделирование методом послойного наплавления). В основе FDM-печати лежит экструзия термопластичного материала. Печатающая головка принтера слой за слоем наносит материал в виде нитевидной структуры в соответствии с управляющей программой. Основой для создания управляющей программы является 3D-модель детали, адаптированная к данной технологии. Расходными материалами для FDM-печати являются пластичные материалы, которые обладают способностью при нагревании обратимо переходить в вязкотекучее состояние.

Изначально технология FDM-печати использовалась для создания моделей и макетов. К настоящему времени линейка термопластиков

значительно расширилась за счёт термопластичных материалов с механическими характеристиками, сопоставимыми с металлами [3–5]. В частности, в авиастроении широко распространён термопластик ULTEM. Его прочностные свойства соизмеримы со свойствами алюминия, предел прочности на растяжение ULTEM 9085 составляет порядка 70 МПа. Другим перспективным инженерным термопластиком является РЕЕК (полиэфирэфиркетон). Его плотность составляет порядка одной трети от плотности алюминия, при этом он в восемь раз прочнее. Значительно повышают механические характеристики термопластичных материалов наполнители. В частности, широко используются стеклонанополненные, угленанополненные материалы. К настоящему моменту технические возможности оборудования позволили выйти на металлонанополненные материалы.

Однако несмотря на все преимущества данной технологии, в производственные процессы изготовления несущих деталей она не интегрирована. Это прежде всего объясняется отсутствием возможности корректной оценки параметров напряжённо-деформированного состояния таких изделий.

Описание проблемы. В изделиях, выполненных с помощью традиционных вычитающих технологий, технологий формообразования, материал непрерывно заполняет объём деталей. Для таких изделий методики анализа параметров

напряжённо-деформированного состояния как в аналитической, так и в CAE-среде существуют и позволяют получать результаты с высокой степенью точности [6–8]. В деталях, выполненных с помощью FDM-технологии, материал заполняет

объём дискретно. В процессе изготовления детали материал каждого слоя добавляется в форме нити по траектории, определяемой командами управляющей программы печати (рис. 1).

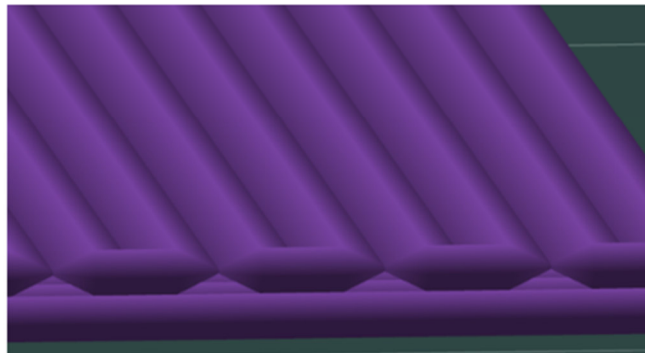
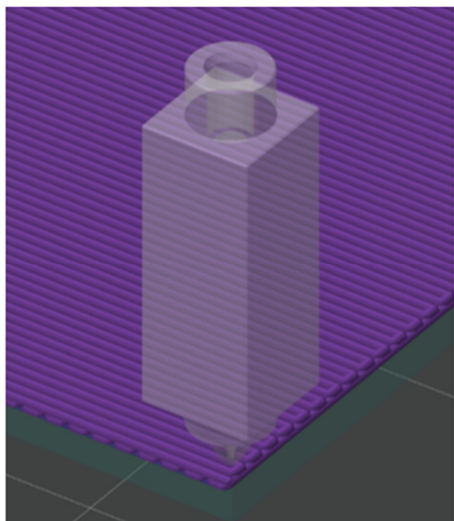


Рис. 1 Модель двух напечатанных слоёв в слайсере «OrcaSlicer»

Прочность такого изделия определяется свойствами материала, который аддитивно перерабатывается и параметрами, определяющими процесс этой переработки/печати [9–11]. Причём параметры печати можно разделить на две группы: физическую и геометрическую. Под параметрами печати физической группы, в первую очередь, следует понимать скорость печати и температурный режим. К параметрам печати геометрической группы следует отнести высоту слоя, ширину экструзии, шаблон заполнения, процент заполнения, направление укладки нити внутри заполняемого объёма и прочее.

В силу актуальности вопроса оценки прочности FDM-деталей активно ведутся исследования в этом направлении [12, 13]. По большей части это экспериментальные исследования. В работах [14–17] представлены полученные на основе экспериментальных данных зависимости силовых и жёсткостных характеристик аддитивно переработанного материала от процента

заполнения, шаблона заполнения и направления нитей печати заполнения. Как правило, речь ведётся о заполнении внутреннего объёма в 100%. В частности, в этом случае интерес представляет ортотропность FDM-изделий [18, 19].

Однако, специфика FDM-печати такова, что помимо перечисленных параметров на прочностные характеристики изделия может оказывать значимое влияние толщина внешней оболочки. Под внешней оболочкой FDM-детали в данном случае понимается несколько внешних слоёв плотно уложенных нитей печати. Количество слоёв оболочки регулируется (рис.2). Внешняя поверхность крайнего слоя оболочки определена геометрией и размерами детали. Оболочка FDM-детали, имеющей боковые грани, состоит из трёх компонент: периметра (боковые грани) (см. рис. 2, а), низа оболочки и верха оболочки (см. рис. 2, б).

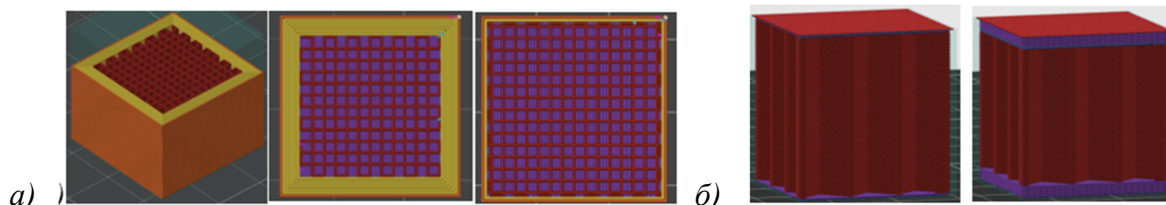


Рис. 2. Технологические модели куба: а – разные толщины периметра; б – верх и низ внешней оболочки разной толщины с заполнением

Варьируя параметрами толщины оболочки при прочих равных условиях, можно добиться требуемых механических характеристик детали, не изменяя её размер, форму и процент заполне-

ния. В зависимости от геометрических параметров оболочки силовой поток по-разному распределяется между заполнением и оболочкой. При-

чём, чем меньше процент заполнения внутреннего объёма, тем большую долю силового потока берёт на себя внешняя оболочка.

В данной работе был рассмотрен вопрос о влиянии внешней оболочки на прочностные характеристики растянутого стержня с прямоугольным поперечным сечением с низким процентом заполнения внутреннего объёма. Было принято заполнение внутреннего объёма детали материалом в 25 % по шаблону заполнения «Линии» (см. рис. 2). Для анализа этого вопроса были использованы экспериментальный и аналитический подходы.

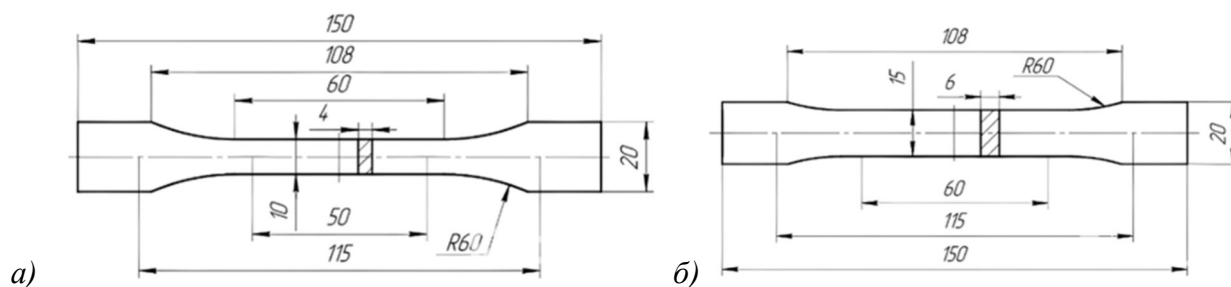


Рис. 3. Образцы для экспериментов: а – образец типа В, ГОСТ 11262-2017; б – образцы с модифицированной геометрией образца типа В, ГОСТ 11262-2017

Причиной увеличения размеров поперечного сечения является стремление учесть масштабный фактор при исследовании влияния оболочки на прочность стержня. При этом у обоих типов образцов соотношение ширины к высоте сечения составляет 2/5.

Испытания проводились на разрывной машине для статических испытаний Shimadzu AGS-10kN XD со скоростью нагружения 2 мм/мин.

Материал, из которого были изготовлены образцы – термопластик ABS (акрилонитрил-бутадиен-стирол), производитель - отечественная компания REC. Печать образцов осуществлялась

Исходные данные для эксперимента. Для проведения экспериментов за основу был принят метод испытания на растяжение пластмасс, регламентированный ГОСТом 11262-2017. К настоящему моменту нормативной документации для экспериментального исследования свойств аддитивно переработанного термопластика нет.

Для экспериментов были приняты образцы двух типов внешней геометрии. Первый тип внешней геометрии соответствует стандартному образцу типа В (рис. 3, а); второй тип внешней геометрии отличается от первого размерами поперечного сечения (рис. 3, б).

на принтере Bambu Lab P1S, страна производитель Китай. Диаметр сопла – 0,4 мм. При печати образцы располагались плашмя (рис. 4). Внутреннее заполнение образцов было выполнено по шаблону заполнения «сетка» с плотностью 25 процентов. Физические параметры печати для всех типов образцов следующие: скорость печати 160 мм/сек; температура рабочего стола 90 °С; температура сопла для первого слоя – 260 °С; для последующих слоев – 270 °С; ширина экструзии 0,4; толщина слоя 0,2. Технологические модели образцов формировались в слайсере «OrcaSlicer».

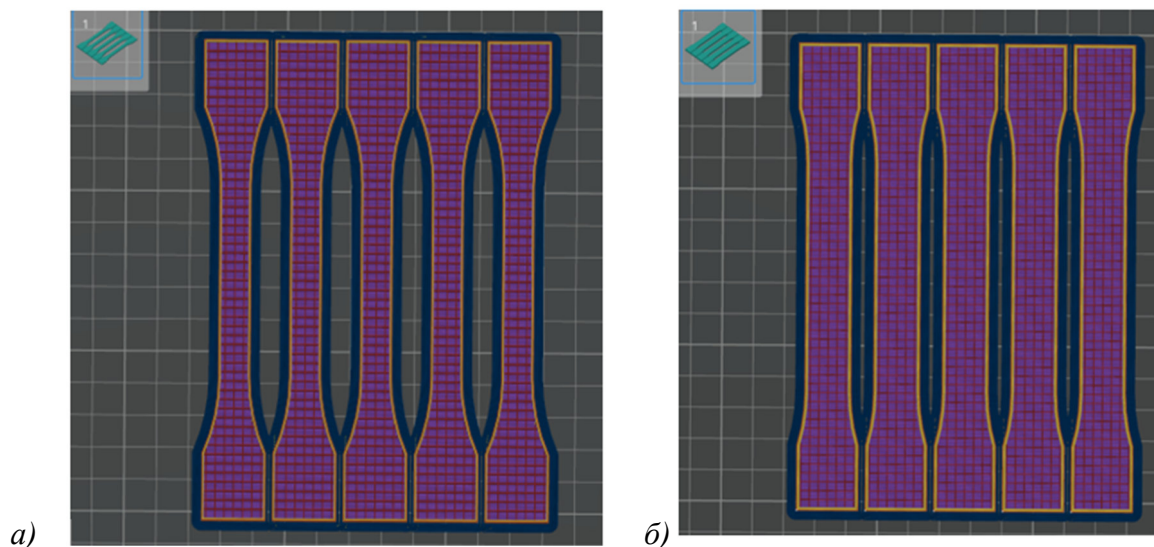


Рис. 4. Расположение образцов и направление нитей заполнения: а – образцы первого типа внешней геометрии; б – образцы второго типа внешней геометрии

Направление продольных нитей печати в заполнении образцов совпадает с направлением линии действия силы, то есть угол наклона нитей заполнения 0° (см. рис. 4). Такая ориентация нитей заполнения внутреннего объема образца принята, потому что в этом случае максимальная растягивающая нагрузка наибольшая при прочих равных условиях. Иные направления нитей заполнения образца делают его менее прочным. Это подтверждено экспериментальными исследованиями, результаты которых описаны в статье [10].

Траектория укладки нити печати каждого слоя – равномерная сетка с квадратными ячейками. Поскольку положение каждого квадрата от

слоя к слою не смещается, то слои «прикрепляются» друг к другу не точечно, а по всей траектории укладки нити в слое.

Из анализа рисунка заполнения образцов (см. рис. 4) следует, что самым ослабленным будет сечение, которое включает только продольные нити и оболочку. Следовательно образцы будут разрушаться по этому сечению – сечению нетто. Его геометрия представлена на рис. 5, а. Реальная внутренняя геометрия сечений нетто для обоих типов внешней геометрии образцов представлена на рис.5, б, в.

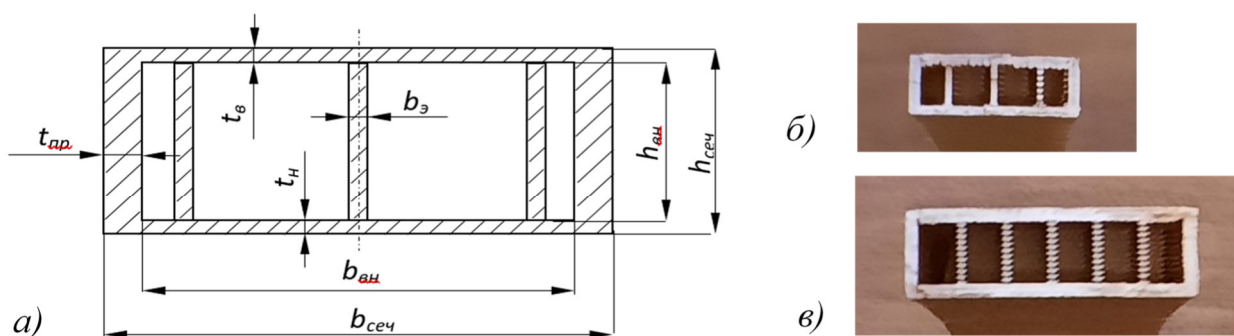


Рис. 5. Поперечное сечение нетто рабочей части образца: а – строение поперечного сечения; б – поперечное сечение образца геометрической формы первого типа; в – поперечное сечение образца геометрической формы второго типа

Было испытано три серии образцов с разной внешней и внутренней геометрией. Первая серия образцов содержит три типа образцов, вторая серия – четыре типа образцов, третья серия – четыре типа образцов. Для каждого типа было напечатано и испытано по пять образцов. Данные о внутренней и внешней геометрии образцов представлены в таблице 1.

В таблице 1 представлены следующие обозначения:

- $A_{ном}$ – номинальная площадь поперечного сечения образца;

- $A_{з_нетто}$ – часть площади поперечного сечения образца, приходящаяся на площади поперечных сечений нитей печати в заполнении (см. рис. 5),

$$A_{з_нетто} = b_э \cdot h_{вн} \times n,$$

где $b_э$ – ширина экструзии; $h_{вн}$ – высота внутреннего прямоугольника сечения, приходящегося на заполнение; n – число продольных нитей в заполнении;

- $A_{об}$ – часть площади поперечного сечения образца, приходящаяся на внешнюю оболочку (см. рис. 5)

$$A_{об} = t_{пр} \cdot h_{сеч} \times 2 + t_в \cdot b_{вн} + t_н \cdot b_{вн},$$

$t_{пр}$ – толщина периметра (параметр печати); $h_{сеч}$ – высота сечения; $t_в$ – толщина верхней оболочки (параметр печати); $b_{вн}$ – ширина внутреннего прямоугольника сечения, приходящегося на заполнение; $t_н$ – толщина нижней оболочки (параметр печати);

- $A_{нетто}$ – площадь поперечного сечения образца, учитывающая только поперечные сечения нитей заполнения и оболочки (см. рис. 5),

$$A_{з_нетто} = b_э \cdot h_{вн} \times n + A_{об};$$

- $\Delta_{об_нетто}$ – доля от площади поперечного сечения образца нетто, приходящаяся на внешнюю оболочку;

- $\Delta_{об_ном}$ – доля от номинальной площади поперечного сечения образца, приходящаяся на внешнюю оболочку.

Варьируемыми в пределах каждой серии образцов были толщины верха и низа оболочки (см. рис. 5, а).

Таблица 1

Параметры внешней и внутренней геометрий образцов

Тип образца	Верх, слой	Низ, слой	Периметр, слой	$A_{з_нетто}, мм^2$	$A_{об}, мм^2$	$A_{нетто}, мм^2$	$\Delta_{об_нетто}, \%$	$\Delta_{об_ном}, \%$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
$A_{ном} = b_{сеч} \times h_{сеч} = 10 \times 4 = 40 мм^2$								
1.1	5	4	2	2,64	21,52	24,16	89,073	53,8
1.2	3	3	2	3,36	16,48	19,84	83,065	41,2
1.3	2	2	2	3,84	13,12	16,94	76,741	32,8
$A_{ном} = b_{сеч} \times h_{сеч} = 15 \times 6 = 90 мм^2$								
2.1	5	4	2	8,4	33,72	42,12	80,057	37,467
2.2	4	4	2	8,8	31,04	39,84	77,912	34,489
2.3	3	3	2	9,6	25,68	35,28	72,789	28,533
2.4	2	2	2	10,4	20,32	30,72	66,146	22,578
3.1	6	6	3	7,2	44,64	51,84	86,111	49,600
3.2	5	4	3	8,4	37,08	45,48	81,530	41,200
3.3	4	4	3	8,8	34,56	43,36	79,705	38,400
3.4	3	3	3	9,6	29,52	39,12	75,460	32,800

Анализ результатов. Результаты испытаний о значениях максимальной нагрузки приведены в таблице 2. В каждой серии испытаний образцов наблюдалась устойчивая повторяемость

качественной и количественной картины роста нагрузки и деформации. В частности, на рис. 6 представлена произвольная выборка образцов, по одному типу из каждой серии.

Таблица 2

Значения максимальных сил образцов

	1.1	1.2	1.3	2.1	2.2	2.3	2.4	3.1	3.2	3.3	3.4
$F_{max}, Н$	749,63	650,09	498,72	1245,90	1131,13	1139,61	1156,15	1534,41	1357,31	1273,69	1102,39

Качественная картина зависимости между растягивающей силой и абсолютной продольной деформацией, наблюдаемая на представленных диаграммах, характерна для всех образцов соответствующих серий. А именно, на диаграммах первой серии прослеживается линейная зависимость практически до максимального уровня нагрузки. На диаграммах второй и третьей серий испытаний отчетливо просматривается «излом» линий линейной зависимости, то есть наблюдается билинейность в пределах упругой зоны.

Сравнительный анализ полученных диаграмм с каноническим видом диаграммы растяжения полимеров (рис. 7) показывает их полную идентичность до точки, соответствующей точке вынужденной эластичности $\sigma_{вэ}$ на диаграмме растяжения полимеров [20]. Более того, предшествующие экспериментальные исследования показали, что до уровня нагрузки порядка 60% от максимального значения силы поведение образца подчиняется закону Гука [21]. На диаграмме растяжения полимера – это участок OA (см. рис. 7). Затем происходит уменьшение тангенса угла наклона, что соответствует появлению в материале, наряду с упругими деформациями, деформаций вынужденно-эластических (AB).

Если учесть данную логику поведения полимеров, по появляется вопрос о том, какие деформации действуют в образцах второй и третьей серий на втором линейном участке диаграмм растяжения образцов. А именно, там действуют только упругие деформации или упругие в сочетании с вынужденно-эластическими. По формальным признакам, да, поскольку на этом участке диаграмм происходит уменьшение тангенса угла наклона. Однако учитывая внутреннюю FDM-структуру образца, ответ может быть не столь однозначным. Нужны дальнейшие исследования.

Другой отличительной особенностью между диаграммами трёх серий испытаний является характер изменения напряжений после максимума диаграммы. Образцы первой серии показывают логику пластичного материала, образцы третьей серии – логику хрупкого материала, промежуточный характер у второй серии образцов.

В пределах каждой серии образцов номинальная площадь поперечного сечения $A_{ном}$ одинаковая (см. Табл. 1). Более того она одинаковая у образцов второй и третьей серий образцов. Отличие между образцами этих серий в толщине периметра. У образцов второй серии толщина периметра 0,8 мм (2сл \times b_э), у образцов третьей серии – 1,2 мм (3сл \times b_э).

В пределах каждой серии за счёт варьирования толщины верха и низа оболочки происходило изменение площади $A_{об}$. Были построены

графики зависимости F_{max} от $A_{об}$ для каждой серии образцов (рис. 8, рис. 9, рис. 10).

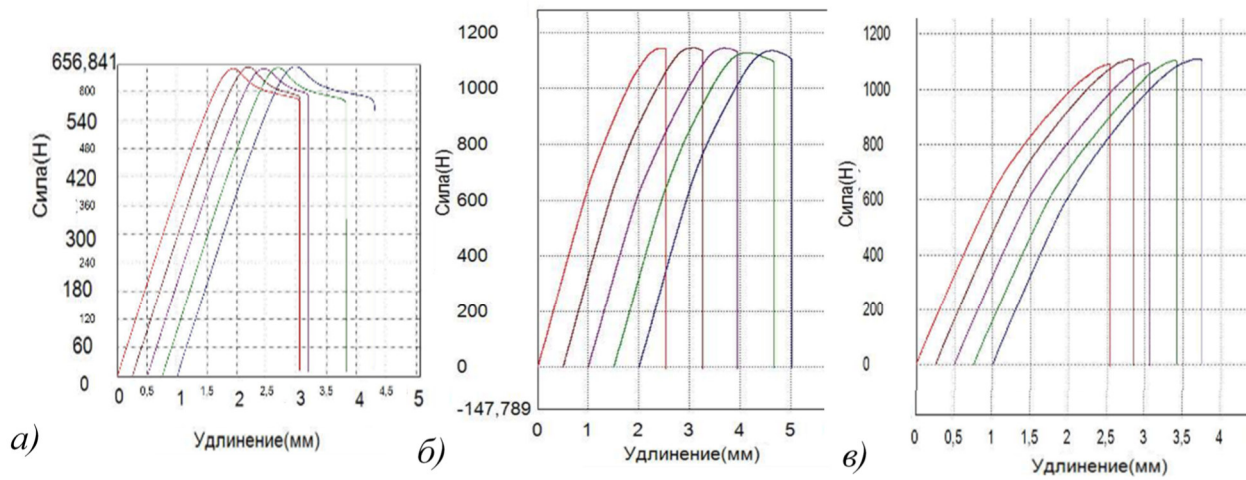


Рис. 6. Диаграммы растяжения FDM-образцов: а – серия 1, тип 1.2; б – серия 2, тип 2.3; в – серия 3, тип 3.4

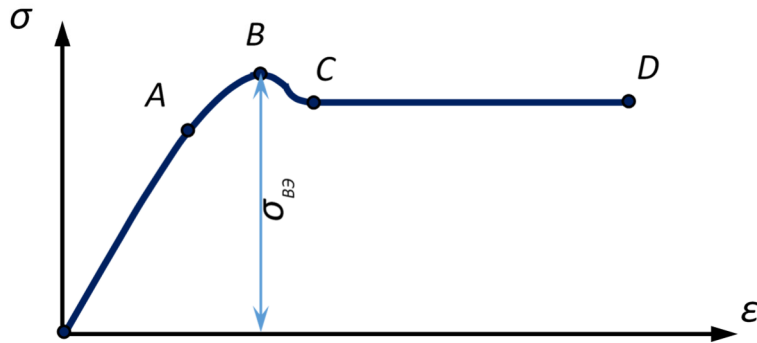


Рис. 7. Поперечное сечение нетто рабочей части образца: а – строение поперечного сечения;

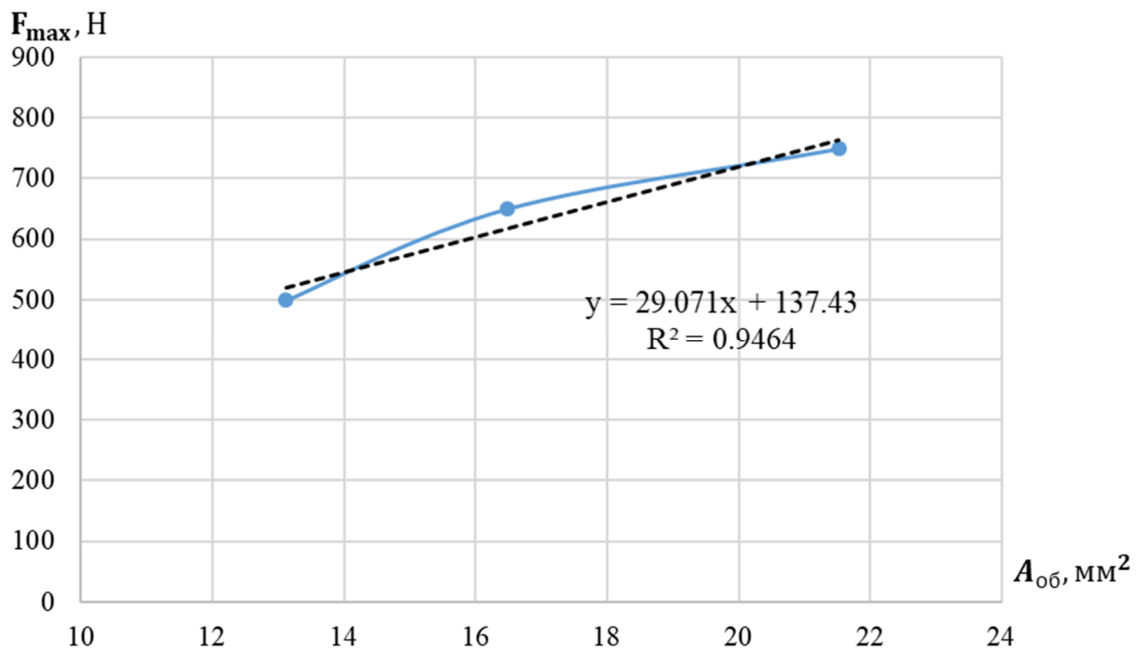


Рис. 8. График зависимости растягивающей максимальной силы от площади поперечного сечения оболочки образцов серии 1

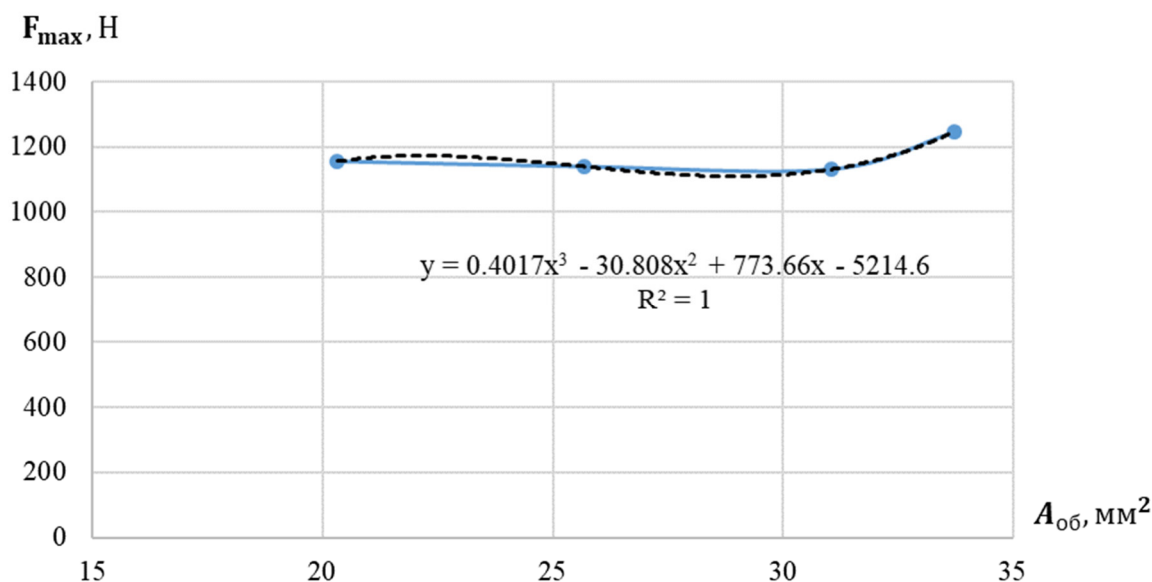


Рис. 9. График зависимости растягивающей максимальной силы от площади поперечного сечения оболочки образцов серии 2

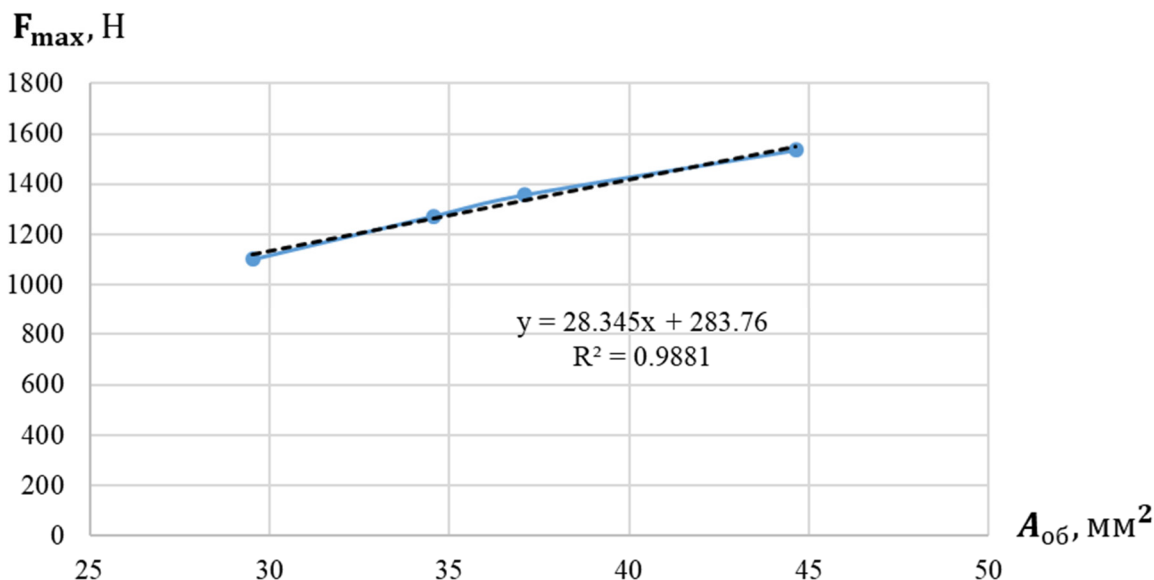


Рис. 10. График зависимости растягивающей максимальной силы от площади поперечного сечения оболочки образцов серии 3

Для образцов серии 1 и серии 3 графики показывают одинаковую качественную картину. А именно, оба графика с высокой степенью достоверности аппроксимируются линейными полиномами (рис.8, рис.10). Для графика серии 2 величину достоверности аппроксимации, равную единице, даёт полином третьей степени (рис. 9). Общим для образцов серий 1 и 3, является то, что суммарная толщина боковых граней оболочки, $2t_{np}$, (см. рис. 5) составляет 16 % от ширины сечения $b_{сеч}$. У образцов серии 2 этот параметр составляет 10,7 %.

Согласно теории центрального растяжения нормальные напряжения в поперечных сечениях стержня определяются по формуле

$$\sigma = N/A,$$

где N – продольная сила, действующая в рассматриваемом сечении; A – площадь рассматриваемого сечения, которая воспринимает продольную силу N .

Следовательно, учитывая характер полученных диаграмм растяжения (см. рис. 8-10), чтобы определить фактические напряжения σ_{max} в поперечных сечениях образцов, следует оценить площадь нетто $A_{нетто}$ при максимальной нагрузке F_{max} . Для всех типов образцов значения $A_{нетто}$ приведены в таблице 3 в порядке возрастания.

Вычисленные значения максимальных напряжений для всех типов образцов колеблются

в окрестности 30 МПа с доверительным интервалом порядка 2 МПа. Выбивается из этой линейки значений напряжений, только напряжения для образцов типа 2.4. Предел вынужденной эластичности термопластика ABS может составлять от

29,4 до 48,3 МПа. Соответственно, полученное среднее значение σ_{max} соответствует пределу вынужденной эластичности термопластика ABS.

Таблица 3

Значения максимальных сил и напряжений

Тип образца	$\Delta_{об\ netto}, \%$	$A_{netto}, мм^2$	$F_{max}, Н$	$\sigma_{max}, МПа$
1.3	76,74	16,94	498,716	29,440
1.2	83,06	19,84	650,09	32,767
1.1	89,07	24,16	749,628	31,028
2.4	66,15	30,72	1156,15	37,635
2.3	72,79	35,28	1139,61	32,302
3.4	75,46	39,12	1102,39	28,18
2.2	77,91	39,84	1131,13	28,392
2.1	80,06	42,12	1245,9	29,58
3.3	79,71	43,36	1273,69	29,374
3.2	81,53	45,48	1357,31	29,844
3.1	86,11	51,84	1534,41	29,599
Среднее				30,740

Диаграмма зависимости F_{max} от A_{netto} для всех типов образцов представлена на рис. 11. Она показывает рост максимальной силы с ростом площади сечения нетто практически по линей-

ной зависимости. Все точки графика за исключением двух определяют линейную функцию с величиной достоверности аппроксимации близкой к единице.

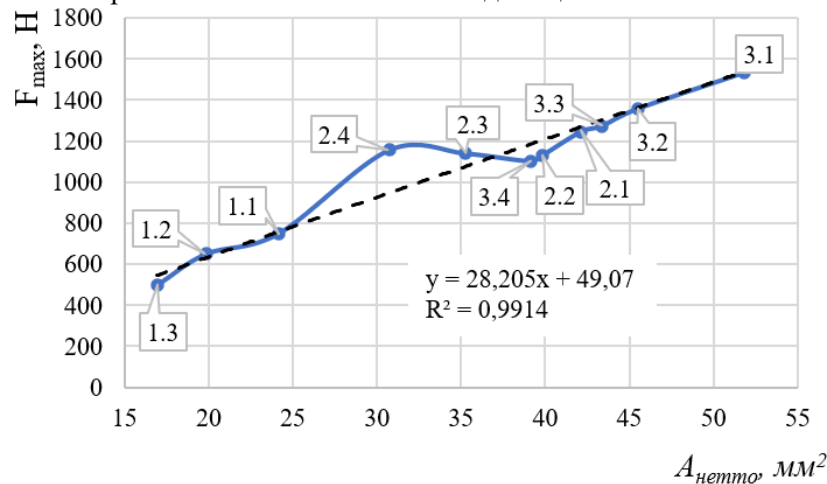


Рис. 11. График зависимости F_{max} от A_{netto} для всех типов образцов

Особенно отклоняется от линейного тренда точка, обозначающая образец типа 2.4. У этого образца величина $\Delta_{об\ netto}$ самая незначительная,

рис. 12 (см. табл. 3), при значении A_{netto} , принадлежащем монотонно возрастающей последовательности значений.

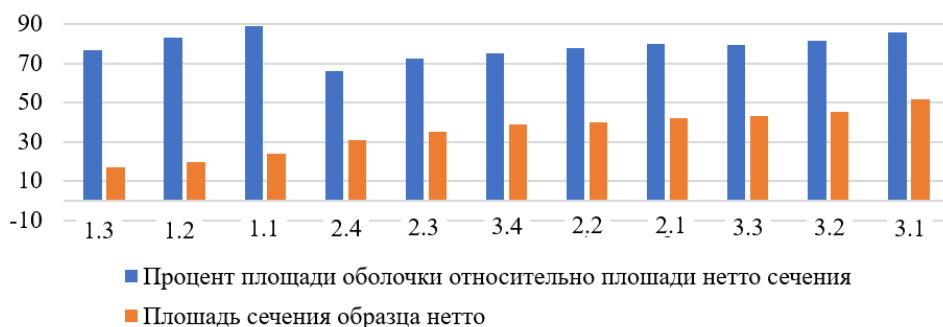


Рис. 12. Гистограмма соотношения процента площади оболочки и площади сечения нетто

Выводы. Результаты анализа проведённых испытаний привели к следующим выводам.

В о-первых, полученные графики зависимости «Растягивающая сила – абсолютная продольная деформация» (см. рис. 6) показывают, что до уровня максимальной силы качественные картины деформирования аддитивно переработанного в стержень термопластика с низким процентом заполнения и стержня из термопластика, изготовленного по традиционной технологии (сплошное заполнение объёма), идентичны. Однако требуются дополнительные исследования поведения материала, переработанного в FDM-структуру внутреннего объёма образца, для объяснения этой картины соответствия.

Во-вторых, на данном этапе исследований выявлено, что характер распределения материала по контуру внешней оболочки влияет на величину максимальной растягивающей силы. В частности, при меньшей площади сечения нетто максимальная сила может быть больше, чем для образца с сечением с большей площадью нетто. Возможно, это связано с разницей в перераспределении силовых потоков между нитями печати на уровне максимальной силы. Необходимы дальнейшие исследования для уточнения этого вывода и обоснования либо опровержения предположения.

Определение закономерности влияния параметров оболочки на величину растягивающей силы позволит управлять прочностными свойствами FDM-стержня.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шимохин А.В., Союнов А.С., Биткина Е.Е., Янковский К.А. К вопросу о применении аддитивной технологии на предприятиях сельскохозяйственного машиностроения // Тракторы и сельхозмашины. 2022. Т. 89, № 5. С. 357–365. DOI: 10.17816/0321-4443-111103
2. He F., Alshammari Y. L. A., Khan M. The Effect of Printing Parameters on Crack Growth Rate of FDM ABS Cantilever Beam under Thermo-mechanical Loads // Procedia Structural Integrity. Vol. 34. 2021. Pp. 59–64. DOI: 10.1016/j.prostr.2021.12.009.
3. Ананьев С. В 8 раз прочнее алюминия: 3D-печать надежного компонента из PEEK / [Электронный ресурс] https://blog.iqb.ru/shanghai-electric-peek-case/?bx_sender_conversion_id=455501&utm_source=newsletter&utm_medium=mail&utm_campaign=blog - дата обращения: 17.04.2025 г.
4. Чехович А. От воска до металла: обзор основных материалов для 3D-печати / iQB technologies [Электронный ресурс] <https://blog.iqb.ru/3d-printing-materials/> - дата обращения: 17.04.2025 г.
5. Иванов М.С., Морозова В.С., Павлюкович Н.Г. Влияние технологических режимов изготовления на свойства консолидированных пластин углепластика на основе полиэфирэфиркетона // Труды ВИАМ. 2025. № 3 (145). С. 60–69. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-3-60-69.
6. Голова Т.А., Андреева Н.В. Анализ методов расчета слоистых пластин и оболочек для расчета многослойных конструкций // Вестник евразийской науки. 2019. Т. 11, № 5. С. 36–41. EDN FVGMEO.
7. Букатый А.С., Букатый С.А. Расчёты деталей на прочность с учётом жёсткости напряжённого со стояния // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2022. Т. 21, № 1. С. 34–41. DOI: 10.18287/2541-7533-2022-21-1-34-41
8. Капырин К.И., Катунин А.А., Трясцин А.П. Валковая штамповка как метод интенсивной пластической деформации // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. № 12. С. 125–141. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-12-125-141
9. Dezaki M.L., Ariffin M. The Effects of Combined Infill Properties in FDM Process // Patterns on Mechanical Polymers. Vol. 12, No. 12., 2020, P. 2792. DOI:10.3390/polym12122792
10. Syrlybayev D., Zharylkassyn B., Seisekulova A., Akhmetov M., Perveen A., Talamona D. Optimization of Strength Properties of FDM Printed Parts - A Critical Review // Polymers. 2021. Vol. 13, No. 10. 1587. DOI: 10.3390/polym13101587
11. Распопина В.Б., Мартынова В.В., Ступина Е.А. Влияние направления печати по FDM-технологии на механические свойства изделия // iPolytech Journal. 2024. Т. 28, № 4. С. 477–487. DOI: 10.21285/1814-3520-2024-4-477-487. EDN GFOMXF.
12. Vyavahare S., Teraiya S., Panghal D., Kumar S. Fused deposition modelling: a review // Rapid Prototyping Journal. Vol. 26 No. 1, 2020. Pp. 176–201. DOI: 10.1108/RPJ-04-2019-0106
13. Singh S., Singh R. Fused deposition modelling based rapid patterns for investment casting applications: a review // Rapid Prototyping Journal. 2014. Vol. 22. No. 1. Pp. 123–143. DOI: 10.1108/RPJ-02-2014-0017
14. Ракишев А., Доненбаев Б., Джамалудин Х. Р. Исследование механических характеристик FDM деталей (3D-печати): эмпирические и компьютерные методы // Наука и техника Казахстана. 2023. № 3. С. 113–121. DOI: 10.48081/MFBQ8991
15. Петров П.А., Агзамова Н.С., Шмакова В.А. Свойства пластика PETG после 3D-печати по технологии FFF // Станкоинструмент. 2022 № 1 (026). С. 52–59. DOI: 10.22184/2499-9407.2022.26.1.52.59

16. Faizaan M., Baloor S.S., Nunna S., Mallya R. A study on the overall variance and void architecture on MEX-PLA tensile properties through printing parameter optimization // Scientific Reports. 2025 №15. Pp. 3103–3126. DOI: 10.1038/s41598-025-87348-2

17. Gao G., Xu F., Xu J., Tang G., Liu Z. A Survey of the Influence of Process Parameters on Mechanical Properties of Fused Deposition Modeling Parts // Micromachines. 2022. Vol. 13, No. 4. Pp. 553–561. DOI: 10.3390/mi13040553

18. Corapi D., Morettini G., Pascoletti G., Zitelli C., Characterization of a polylactic acid (PLA) produced by Fused Deposition Modeling (FDM) technology // Procedia Structural Integrity. 2019, vol. 24. Pp. 289–295. DOI: 10.1016/j.prostr.2020.02.026.

19. Bechný V., Matuš M., Czán A., Nový F. Influence of the Orientation of Parts Produced by Additive Manufacturing on Mechanical Properties // Manufacturing Technology. 2024, Vol. 24, No. 1. Pp. 2–8. DOI: 10.21062/mft.2024.021

20. Тагер А.А. Физико-химия полимеров. Издание 4-е, переработанное и дополненное. М. Научный мир, 2007. 576 с.

21. Raspopina V., Perelygina A., Shemetov L., Grigorov P. Dependence Between the Mechanical Characteristics of the Material and the FDM Sample Made from This Material // Safety in Aviation and Space Technologies : Select Proceedings of the 9th World Congress "Aviation in the XXI Century". Cham: Springer Nature Switzerland AG. 2022. Pp. 215–227. DOI: 10.1007/978-3-030-85057-9_18. EDN WABJQW.

Информация об авторах

Распопина Вера Борисовна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры самолётостроения и эксплуатации авиационной техники. E-mail: raspopina_vb@ex.istu.edu. Иркутский национальный исследовательский технический университет, Россия, 664074, Иркутск, ул. Лермонтова, д. 83.

Мартынова Валентина Владимировна, студентка кафедры самолётостроения и эксплуатации авиационной техники. E-mail: martynovavalentina1202@mail.ru. Иркутский национальный исследовательский технический университет, Россия, 664074, Иркутск, ул. Лермонтова, д. 83.

Поступила 11.06.2025 г.

© Распопина В.Б., Мартынова В.В., 2026

**Raspopina V.B., Martynova V.V.*

Irkutsk National Research Technical University,

**E-mail: raspopina_vb@ex.istu.edu*

THE INFLUENCE OF THE OUTER SHELL ON THE STRENGTH OF AN FDM ROD WITH A LOW FILLING PERCENTAGE

Abstract. *The purpose of this work is to evaluate the effect of the outer shell of a rod made using FDM printing on its static strength under central tension. The discrete filling structure of the internal volume of the part is determined by the specifics of the FDM printing. The specified geometry and dimensions of the part are provided by the outer shell. It is not possible to correctly assess the strength of such a part using existing calculation methods. Experimental studies were conducted to achieve this goal. Since thermoplastic materials are used for the manufacture of rods using FDM technology, GOST for tensile testing of plastics was adopted as the basis for selecting the shape and size of samples and conducting tests. With the same percentage of filling of the inner volume of the samples, the thickness parameters of the outer shell changed. According to the test results, it was found that the overall strength of the rod, all other things being equal, is influenced by the proportion of the shell area relative to the nominal cross-sectional area of the sample and the nature of the shell thickness distribution along the contour of the section. The dependencies determining the influence of the parameters of the outer shell of the rod on its strength properties were revealed. The knowledge gained is a prerequisite for the theoretical substantiation of the influence of the parameters of the shell of the FDM rod on its strength.*

Keywords: *additive technologies, FDM printing, sample, tensile testing, the outer shell*

REFERENCES

1. Shimohin A.V., Sojunov A.S., Bitkina E.E., Jankovskij K. A. On the application of additive technology in agricultural machinery enterprises [К во-

проу о применении аддитивной технологии на предприятиях сельскохозжайственного машиностроения]. Tractors and agricultural machines. 2022. Vol. 89. No. 5. Pp. 357–365. DOI.org/10.17816/0321-4443-111103. (rus)

2. He F., Alshammari Y.L.A., Khan M. The Effect of Printing Parameters on Crack Growth Rate of FDM ABS Cantilever Beam under Thermo-mechanical Loads. *Procedia Structural Integrity*. Vol. 34. 2021. Pp. 59–64. DOI: 10.1016/j.prostr.2021.12.009.
3. Anan'ev S. 8 times stronger than aluminum: 3D printing of a reliable component from PEEK [V 8 raz prochnee aljuminija: 3D pechat' nadezhnogo komponenta iz PEEK]. URL: https://blog.iqb.ru/shanghai-electric-peek-case/?bx_sender_conversion_id=455501&utm_source=newsletter&utm_medium=mail&utm_campaign=blog (date of treatment: 17.04.2025). (rus)
4. Chehovich A. From wax to metal: an overview of the main materials for 3D printing [Ot voska do metalla: obzor osnovnyh materialov dlja 3D-pechati]. *iQB technologies*. URL: <https://blog.iqb.ru/3d-printing-materials>. (date of treatment: 17.04.2025). (rus)
5. Ivanov M.S., Morozova V.S., Pavljukovich N. G. The influence of manufacturing technological modes on the properties of consolidated carbon fiber plates based on polyesteresterketone [Vlijanie tehnologicheskikh rezhimov izgotovlenija na svojstva konsolidirovannyh plastin ugleplastika na osnove poli-jefirjefirketona]. *Proceedings of VIAM*. 2025. № 3 (145). Pp. 60–69. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-3-60-69. (rus)
6. Golova T.A., Andreeva N.V. Calculation of calculations for layered structures of multilayer shells using non-analytical methods [Analiz metodov rascheta sloistyh plastin i obolochek dlja rascheta mnogoslojnyh konstrukcij]. *Bulletin of Eurasian Science*. 2019. Vol. 11, No. 5. Pp. 36–41. FVGMEO EDN. (rus)
7. Bukatyj A.S., Bukatyj S.A. Calculations of parts for strength taking into account the rigidity of the stressed state [Raschjoty detalej na prochnost' s uchjotom zhjostkosti naprjazhjonnoho sostojanija]. *Bulletin of Samara University. Aerospace engineering, technology, and mechanical engineering*. 2022. Vol. 21. No. 1. Pp. 34–41. DOI: 10.18287/2541-7533-2022-21-1-34-41. (rus)
8. Kapyrin K.I., Katunin A.A., Tryshtsin A.P. Roll stamping as an severe plastic deformation method [Valkovaja shtampovka kak metod intensivnoj plasticheskoj deformacii]. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2024. No. 12. Pp. 125–141. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-12-125-141. (rus)
9. Dezaki M.L., Ariffin M. The Effects of Combined Infill Properties in FDM Process. *Patterns on Mechanical Polymers*. 2020. Vol. 12. No. 12. 2792. DOI:10.3390/polym12122792
10. Syrlybayev D., Zharylkassyn B., Seisekulova A., Akhmetov M., Perveen A., Talamona D. Optimization of Strength Properties of FDM Printed Parts - A Critical Review. *Polymers*. 2021. Vol. 13. No. 10. 1587. DOI: 10.3390/polym13101587
11. Raspopina V.B., Martynova V.V., Stupina E. A. The influence of the printing direction using FDM technology on the mechanical properties of a product [Vlijanie napravlenija pečati po FDM-tehnologii na mehanicheskie svojstva izdelija]. *iPolytech Journal*. 2024. Vol. 28. No. 4. Pp. 477–487. DOI: 10.21285/1814-3520-2024-4-477-487. EDN GFOMXF. (rus)
12. Vyavahare S., Teraiya S., Panghal D., Kumar S. Fused deposition modelling: a review. *Rapid Prototyping Journal*. 2020. Vol. 26 No. 1. Pp. 176–201. DOI: 10.1108/RPJ-04-2019-0106
13. Singh S., Singh R. Fused deposition modelling based rapid patterns for investment casting applications: a review. *Rapid Prototyping Journal*. 2014. Vol. 22. No. 1. Pp. 123–143. DOI:10.1108/RPJ-02-2014-0017
14. Rakishev A., Donenbaev B., Dzhamaludin H. R. Investigation of the mechanical characteristics of FDM parts (3D printing): empirical and computer methods [Issledovanie mehanicheskikh harakteristik FDM detalej (3D-pechati): jempiricheskie i komp'juternye metody]. *Science and Technology of Kazakhstan*. 2023. No. 3. Pp. 113–121. DOI: 10.48081/MFBQ8991. (rus)
15. Petrov P.A., Agzamova N.S., Shmakova V.A. Properties of PETG plastic after 3D printing using FFF technology [Svojstva plastika PETG posle 3D-pechati po tehnologii FFF]. *Machine Tool*. 2022. No. 1 (026). Pp. 52–59. DOI: 10.22184/2499-9407.2022.26.1.52.59. (rus)
16. Faizaan M., Baloor S.S., Nunna S., Mallya R. A study on the overall variance and void architecture on MEX-PLA tensile properties through printing parameter optimization. *Scientific Reports*. 2025. No. 15. Pp. 3103–3126. DOI: 10.1038/s41598-025-87348-2
17. Gao G., Xu F., Xu J., Tang G., Liu Z. A Survey of the Influence of Process Parameters on Mechanical Properties of Fused Deposition Modeling Parts. *Micromachines*. 2022. Vol.13. No. 4. Pp. 553–561. DOI: 10.3390/mi13040553
18. Corapi D., Morettini G., Pascoletti G., Zitelli C. Characterization of a polylactic acid (PLA) produced by Fused Deposition Modeling (FDM) technology. *Procedia Structural Integrity*. 2019. Vol. 24. Pp. 289–295. DOI: 10.1016/j.prostr.2020.02.026.
19. Bechný V., Matuš M., Czán A. Nový F. Influence of the Orientation of Parts Produced by Additive Manufacturing on Mechanical Properties.

Manufacturing Technology. 2024. Vol. 24. No. 1. Pp. 2–8. DOI: 10.21062/mft.2024.021

20. Tager A.A. Physico-chemistry of polymers. 4th edition, revised and expanded [Fiziko-himija polimerov. Izdanie 4-e, pererabotannoe i dopolnennoe]. M. Scientific World. 2007. 576 p. (rus)

21. Raspopina V., Pereygina A., Shemetov L., Grigorov P. Dependence Between the Mechanical

Characteristics of the Material and the FDM Sample Made from This Material. Safety in Aviation and Space Technologies : Select Proceedings of the 9th World Congress "Aviation in the XXI Century". Cham: Springer Nature Switzerland AG. 2022. Pp. 215–227. DOI 10.1007/978-3-030-85057-9_18. EDN WABJQW.

Information about the authors

Raspopina, Vera B. PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Aircraft Engineering and Operation of Aviation Equipment. E-mail: raspopina_vb@ex.istu.edu. National Research Technical University. Russia, 664074, Irkutsk, St. Lermontov, 83;

Martynova, Valentina V. Student. E-mail: martynovavalentina1202@mail.ru. National Research Technical University. Russia, 664074, Irkutsk, St. Lermontov, 83

Received 11.06.2025

Для цитирования:

Распопина В.Б., Мартынова В.В. Влияние внешней оболочки на прочность FDM-стержня с низким процентом заполнения // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2026. № 4. С. 26–37. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-4-26-37

For citation:

Raspopina V.B., Martynova V.V. The influence of the outer shell on the strength of an FDM rod with a low filling percentage. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2026. No. 4. Pp. 26–37. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-4-26-37