

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЖЁСТКОСТИ АНИЗОТРОПНОЙ FDM-СТРУКТУРЫ В CAE-СРЕДЕ

*Шеметов Л.И., Вершинин Д.В., Терёхин С.Н., Распопина В.Б.*  
*Иркутский национальный исследовательский технический университет,*  
*Иркутск*

**Ключевые слова:** аддитивные технологии, FDM-печать, нитевидная структура, процент заполнения, шаблон печати, эффективный материал, эффективный модуль упругости, конечно-элементная модель.

**Аннотация.** Одной из наиболее востребованных в машиностроении аддитивных технологий является FDM-печать. Однако отсутствует однозначная обоснованная теория расчёта на прочность изделий, выполненных с помощью этой технологии. Гипотеза об однородности и сплошности для напечатанной детали не работает из-за дискретности нитевидной структуры, заполняющей её объём. В статье предлагается заменить FDM-структуру объёма детали сплошным материалом, с эквивалентными характеристиками жёсткости. Для обоснования данной гипотезы был проведён численный эксперимент в CAE-среде.

## DEFINING THE STIFFNESS PARAMETERS OF AN ANISOTROPIC FDM STRUCTURE IN A CAE-ENVIRONMENT

*Shemetov L.I., Vershinin D.V., Terekhin S.N., Raspopina V.B.*  
*Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk*

**Keywords:** additive technologies, FDM printing, filament structure, infill percentage, print pattern, finite element model, modulus of elasticity.

**Abstract.** One of the most demanded additive technologies in engineering is FDM printing. However, there is no clear and justified theory for calculating the strength of products made using this technology. The hypothesis of homogeneity and continuity for the printed part does not work due to the discreteness of the filament structure filling its volume. This article proposes replacing the FDM volume structure with a solid material with equivalent stiffness characteristics. To justify this hypothesis, a numerical experiment was conducted in a CAE environment.

### Введение

В настоящее время наблюдается большой интерес со стороны всех отраслей машиностроения к аддитивным технологиям. К числу наиболее распространенных и доступных методов 3D-печати относится FDM-печать (Fused Deposition Modeling). Её востребованность обусловлена сочетанием экономичности, доступности, простоты реализации, возможности совершенствовать как технологичность изделия, так и его механические свойства. В основе этой технологии лежит процесс экструзии расплавленного термопласта. В данном состоянии материал перерабатывается в нитевидную структуру, которая послойно укладывается в деталь согласно заданной цифровой модели в соответствии с управляющей программой.

Технология FDM-печати может быть использована для создания сложных геометрических форм, которые трудно или дорого изготовить с использованием традиционных методов или которые образованы сборкой нескольких деталей (рис. 1). Она может быть использована для создания специальной оснастки (рис. 2).

Продукты FDM-технологии могут обладать характеристиками, сопоставимыми с характеристиками изделий, выполненных с помощью традиционных технологий.



Рис. 1. Патрубки, изготовленные методом FDM-печати; фото: ООО «Total Z»



Рис. 2. Обтяжной пуансон, изготовленный методом FDM-печати; фото: ddmlab.ru

### Описание проблемы

Одним из ограничивающих факторов для широкого внедрения FDM-технологии в отраслях машиностроения является отсутствие однозначной обоснованной теории расчёта на прочность изделий, выполненных с помощью этой технологии. Нитевидность структуры, заполняющей объём детали, не соответствует ключевой гипотезе механики твёрдого деформируемого тела об однородности и сплошности материала, заполняющего объём детали [1]. Соответственно классический подход к расчёту на прочность твёрдых деформируемых тел не позволит получить корректные результаты для изделий, полученных с помощью FDM-печати. В некотором приближении его можно применить для стопроцентного заполнения объёма. В остальных случаях это приведёт к некорректным результатам оценки параметров напряжённо-деформированного состояния изделия, поскольку действует эта гипотеза только в пределах объёма нити, образующей структуру. При не стопроцентном заполнении объёма детали материалом существует незаполненное пространство между нитями. Чем меньше процент заполнения, тем больше межнитевое пространство.

Существует большое разнообразие шаблонов печати и гибкий инструментарий управления процентом заполнения материалом печати внутри объёма FDM-детали (рис. 3).

Варьируя плотность нитевидной структуры, можно добиться разного процента заполнения материалом печати внутри объёма FDM-детали. Варьируя шаблон печати при прочих равных условиях, можно повлиять на прочностные характеристики FDM-детали.

В большинстве случаев шаблоны FDM-печати обладают общим свойством. Это периодичность, формируемых нитевидных структур (рис. 4). Данное свойство позволяет предположить, что для описания механических характеристик FDM-структуры в макрообъёме можно задействовать приём с заменой дискретной периодической структуры на некоторый сплошной материал с эквивалентными жёсткостными характеристиками. Причём характер периодичности структуры позволяет говорить об анизотропии FDM-материала. По сути, речь идёт об эффективных упругих характеристиках FDM-структуры [2].

Теория эффективного материала прежде всего ассоциирована с изучением механического поведения композиционных материалов [3]. Однако направленность нитевидной FDM-структуры позволяет применить теорию для оценки её эффективных модулей упругости. В пределах исследуемого объёма не представляет труда рассмотреть зависимость между усреднёнными по деформированному объёму напряжениями и деформациями.

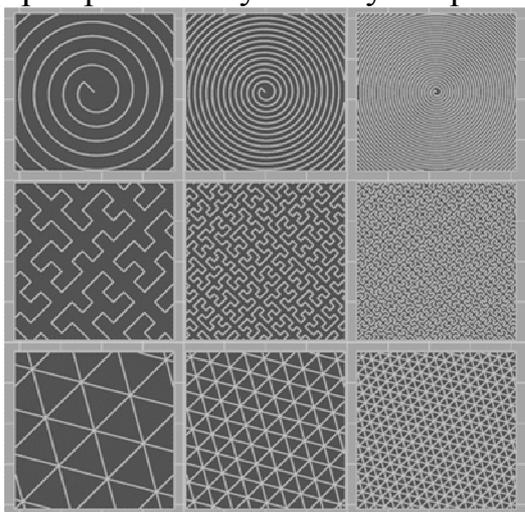


Рис. 3. Три шаблона печати с разными процентами заполнения

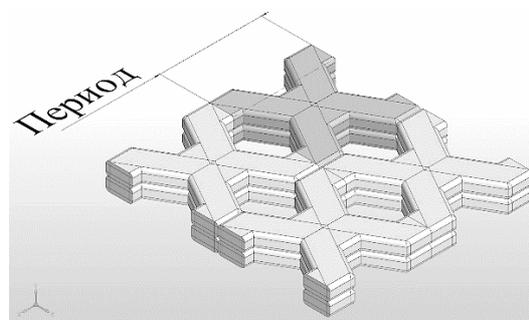


Рис. 4. Периодичность FDM-структуры

### Решение проблемы

Целью данной работы является выявление эффективных характеристик жёсткости FDM-структур, созданных разными шаблонами заполнения, и сравнение их между собой. Для достижения цели были задействован подход оценки эффективного модуля продольной упругости в CAE-среде.

Материал для формирования виртуальных моделей – условный термопластик. Для исследования были выбраны три шаблона заполнения «прямолинейный», «сетка», «соты» (рис. 5).

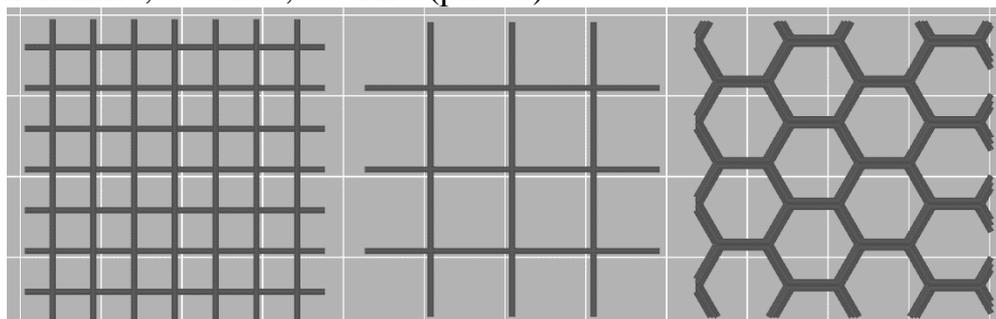


Рис. 5. Структура, напечатанная шаблоном заполнения «прямолинейный», «сетка», «соты»

Исследования проводились в цифровой среде отечественной CAE-системы Fidesys, в основе которой лежит метод конечных элементов. Система обладает специализированным инструментарием для определения эффективных характеристик неоднородных материалов. В частности, она успешно моделирует упругие характеристики композитов и пористых материалов в формате эффективного материала [4, 5].

Неотъемлемой составляющей конечно-элементного подхода является корректное описание геометрии модели. Была выявлена геометрия простейших повторяющихся элементов структур исследуемых шаблонов заполнения в плоскости печати. Для шаблонов заполнения «сетка» и «прямолинейный» вид в плане – это равномерная сетка с квадратными ячейками. Значит повторяющаяся геометрия – это квадрат (рис. 6,а,б). Для шаблона «соты» повторяющаяся геометрия на виде в плане – это X-образная форма (рис. 6,в). Причём для шаблонов «сетка» и «соты» поверхность межслойного контакта обусловлена плоскими площадками нити печати по всему слою, а для «прямолинейного» только в местах пересечения нитей. Значит для шаблонов «сетка» и «соты» в направлении нормали к плоскости печати несплошностей между слоями нет, в случае с «поленницей» они периодически возникают (рис. 6).

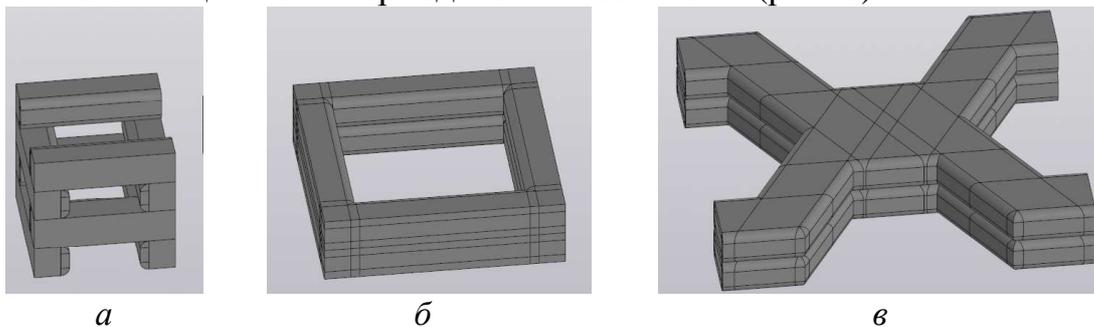


Рис. 6. FDM-структура шаблона заполнения: а – прямолинейный; б – сетка; в – соты

Геометрические параметры сетки зависят от технологических параметров печати. А именно, период сетки зависит от процента заполнения, толщина стенки ячейки принята равной ширине экструзии. Эти параметры задаются при построении управляющей программы 3D-принтера. Для исследуемой геометрии приняты следующие параметры экструзии: ширина слоя 0,4 мм; высота слоя 0,2 мм.

Под процентом заполнения понимают долю рассматриваемого объёма, заполненную материалом. Без учета топологии FDM-структуры процент заполнения  $k$  можно определить как

$$k = \frac{A_z}{A_{яч}},$$

где  $A_z$  – заполненная материалом доля объема повторяющейся геометрии;  $A_{яч}$  – объем всей повторяющейся геометрии.

Для построения геометрии соответствующего заполнения мы варьировали размеры промежутков между линиями печати и анализировали объем, занимаемый материалом. Объем вычислялся встроенными средствами CAD-системы.

В специализированном модуле программного комплекса CAE Fidesys построены конечно-элементные модели элементарной геометрии (рис. 7).

Характеристики материала выкладываемой нити: модуль Юнга 3000 МПа, коэффициент Пуассона 0,34, плотность 1,04 г/см<sup>3</sup>.

В ходе анализа система автоматически решает в статической постановке задачи растяжения вдоль каждой координатной оси и задачи сдвига в каждой координатной плоскости. Величина приложенной деформации составляет 0,2%. Задачи решаются в линейной постановке.

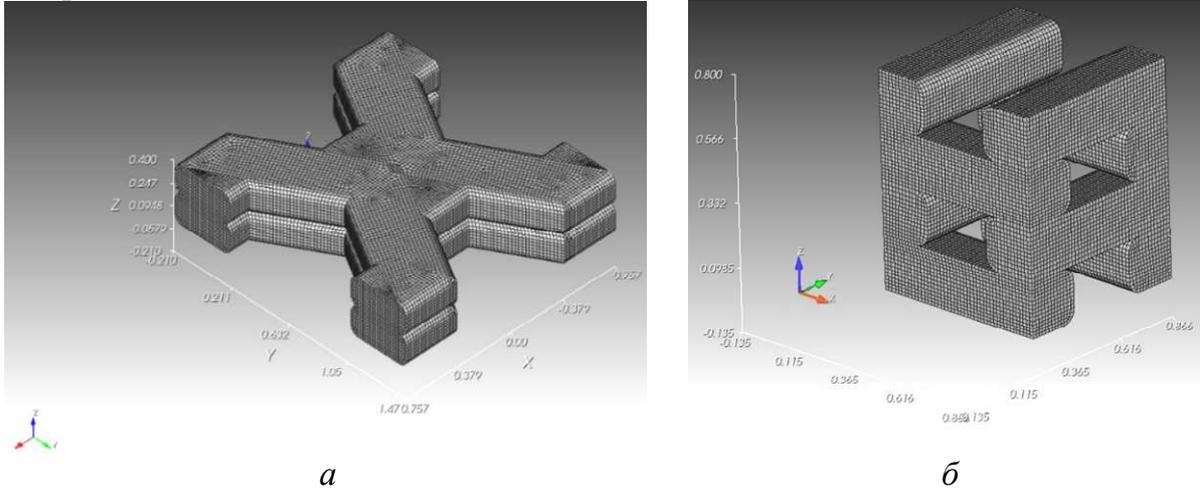


Рис. 7. Конечно-элементная модель FDM-структуры 60% заполнения:  
а – соты, б – прямолинейный

### Анализ полученных результатов

Результатом расчета являются эффективные модули упругости и эффективная плотность ортотропного FDM-материала, а также модули сдвига и коэффициент Пуассона во взаимно-перпендикулярных плоскостях (табл. 1-3). Не были получены значения для 90% заполнения «соты» из-за вырождения шаблона заполнения (рис. 8). Это объясняется пределом минимальных размеров, которые может получить FDM-принтер.

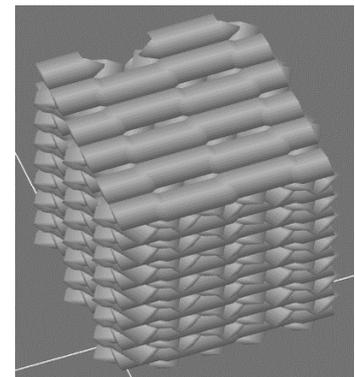


Рис. 8. Вырождение шаблона заполнения

Табл. 1. Эффективные свойства элементарной ячейки заполнения «прямолинейный»

	$E_x$ , МПа	$E_y$ , МПа	$E_z$ , МПа	$G_{xy}$ , МПа	$G_{xz}$ , МПа	$G_{yz}$ , МПа	$\mu_{xy}$	$\mu_{xz}$	$\mu_{yz}$	$\rho$ , г/мм <sup>3</sup>
10%	166,74	166,74	86,87	39,21	39,21	28,31	0,14	0,14	0,07	0,0001
20%	345,16	345,35	208,38	87,54	87,51	71,61	0,16	0,16	0,09	0,0002
30%	535,48	535,48	365,93	145,82	145,82	130,52	0,18	0,18	0,11	0,0003
40%	732,60	732,60	555,38	212,86	212,86	202,48	0,20	0,20	0,12	0,0004
50%	941,31	941,31	780,65	290,30	290,30	286,33	0,22	0,22	0,13	0,0005
60%	1161,43	1161,6	1039,51	377,59	377,62	378,62	0,23	0,23	0,14	0,0006
70%	1390,19	1390,19	1329,44	473,72	473,72	475,54	0,25	0,25	0,16	0,0007
80%	1629,00	1629,00	1651,97	578,71	578,71	575,66	0,26	0,26	0,17	0,0008
90%	1882,12	1882,12	2007,19	692,38	692,38	679,54	0,27	0,27	0,18	0,0009

Табл. 2. Эффективные свойства элементарной ячейки заполнения «сетка»

	$E_x$ , МПа	$E_y$ , МПа	$E_z$ , МПа	$G_{xy}$ , МПа	$G_{xz}$ , МПа	$G_{yz}$ , МПа	$\mu_{xy}$	$\mu_{xz}$	$\mu_{yz}$	$\rho$ , Г/мм <sup>3</sup>
10%	189,61	189,61	262,24	81,54	81,54	44,64	0,29	0,29	0,10	0,0001
20%	391,04	391,04	522,71	164,39	164,39	95,54	0,29	0,29	0,12	0,0002
30%	602,04	602,04	786,38	249,82	249,82	155,10	0,30	0,30	0,14	0,0003
40%	826,17	826,17	1051,18	338,02	338,02	224,77	0,30	0,30	0,15	0,0004
50%	1026,89	1026,89	1316,80	406,88	406,88	275,03	0,31	0,31	0,16	0,0005
60%	1258,79	1258,79	1590,05	475,91	475,91	354,96	0,31	0,31	0,17	0,0006
70%	1556,34	1556,34	1880,04	596,55	596,55	494,08	0,31	0,31	0,20	0,0007
80%	1895,64	1895,64	2173,89	722,15	722,15	649,52	0,32	0,32	0,24	0,0008
90%	2321,15	2321,16	2485,88	880,22	880,22	835,42	0,32	0,32	0,29	0,0009

Табл. 3. Эффективные свойства элементарной ячейки заполнения «соты»

	$E_x$ , МПа	$E_y$ , МПа	$E_z$ , МПа	$G_{xy}$ , МПа	$G_{xz}$ , МПа	$G_{yz}$ , МПа	$\mu_{xy}$	$\mu_{xz}$	$\mu_{yz}$	$\rho$ , Г/мм <sup>3</sup>
10%	197,82	176,86	274,65	77,12	89,89	90,40	0,27	0,22	0,20	0,0001
20%	394,50	365,37	550,13	158,75	179,96	182,05	0,27	0,22	0,20	0,0002
30%	596,75	577,95	835,63	249,62	274,15	279,68	0,28	0,22	0,21	0,0003
40%	799,83	813,74	1119,85	348,17	369,03	380,38	0,28	0,22	0,22	0,0004
50%	1004,07	1079,16	1403,39	453,81	465,02	485,33	0,29	0,22	0,24	0,0005
60%	1231,07	1394,52	1703,52	568,93	567,87	600,97	0,28	0,22	0,25	0,0006
70%	1374,72	1594,82	1874,21	635,80	627,49	669,57	0,28	0,23	0,26	0,0007
80%	1704,41	2019,46	2200,66	768,08	746,94	806,36	0,28	0,24	0,29	0,0008
90%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

На основании полученных численных значений программного комплекса CAE Fidesys для наглядности можно построить графическое отображение зависимости модуля упругости по направлениям осей координат при различном проценте заполнения и типе шаблона заполнения (рис. 9-11).

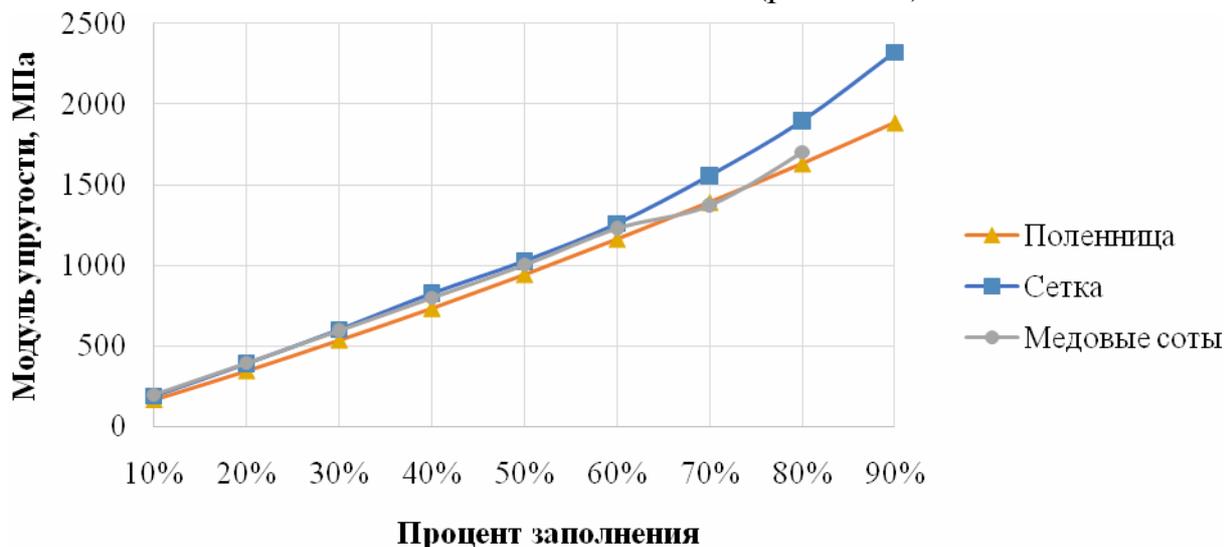


Рис. 9. Зависимость модуля упругости  $E_x$  от процента заполнения

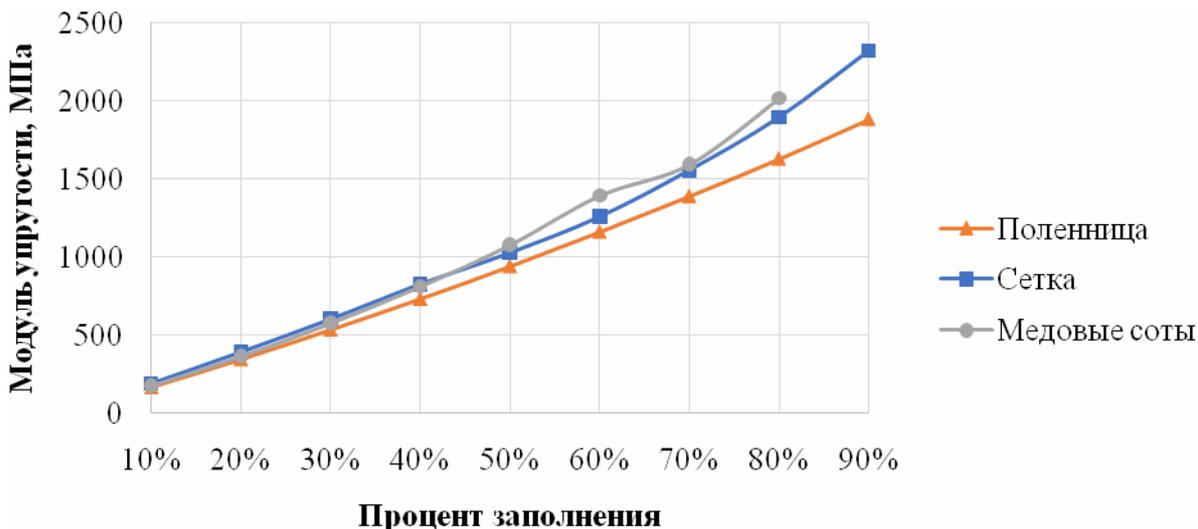


Рис. 10. Зависимость модуля упругости  $E_y$  от процента заполнения

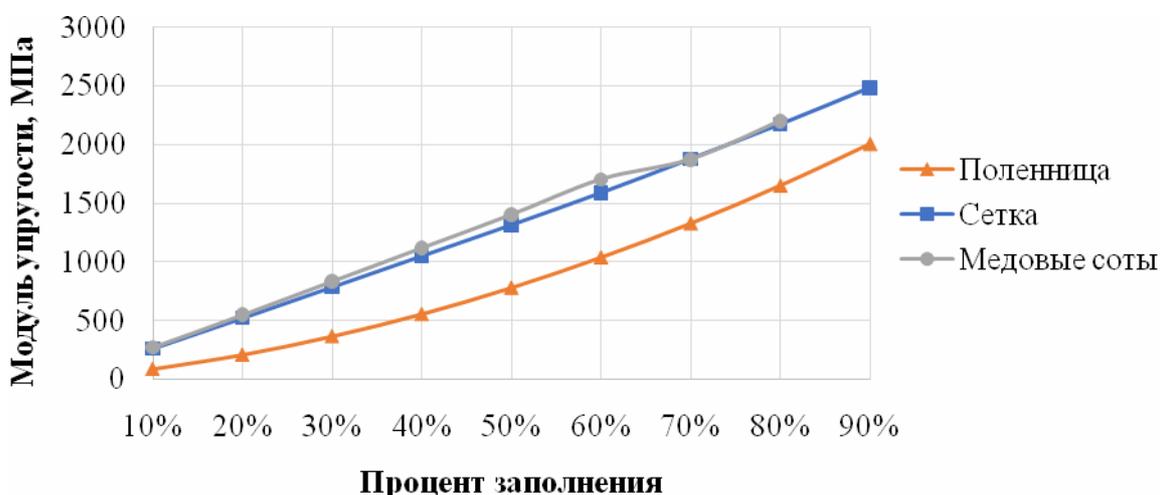


Рис. 11. Зависимость модуля упругости  $E_z$  от процента заполнения

Графики показывают, что тип заполнения «прямолинейный» уступает по упругим характеристикам. В случае же с «сеткой» и «сотами» наблюдаются схожие упругие характеристики. Но в случае выбора предпочтительно выбирать шаблон типа «сетка». Шаблон состоит из прямых линий без резкого изменения траектории печати, в отличие от «сот». Сложная траектория печати с часто меняющимся направлением может привести к колебательным движениям ходовой части конструкции принтера, что повлияет на движение сопла. Это в свою очередь может негативно повлиять на качество экструзии материала и точность получаемых размеров.

### Заключение

Гипотеза эквивалентного материала имеет большое значение в области 3D-печати, так как она позволяет создавать объекты с предсказуемыми упругими характеристиками. Это может привести к экономии материала, снижению веса и улучшению эффективности производства.

Однако следует отметить, что гипотеза эквивалентного материала является упрощенной моделью и не всегда полностью соответствует реальным свойствам материалов. Поэтому для конкретного применения необходимы дополнительные исследования.

**Список литературы**

1. 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". – 2022. – P. 215-227. – DOI: 10.1007/978-3-030-85057-9\_18.
2. Федотов А.Ф. Прогнозирование эффективных модулей упругости пористых композиционных материалов // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2015. – №1. – С. 32-37. – doi.org/10.17073/1997-308X-2015-1-32-37.
3. Композиционные материалы. Том 2. Механика композиционных материалов / Редактор Дж. Сендецки. – М.: Изд-во Мир, 1978. – 558 с.
4. Левин В.А., Зингерман К.М., Яковлев М.Я., Курденкова Е.О., Немтинова Д.В. О численной оценке эффективных характеристик периодических ячеистых структур с использованием балочных и оболочечных конечных элементов с помощью САЕ Fidesys // Чебышёвский сборник. – 2019. – Т. 20, вып. 2. – С. 523-537.
5. Коновалов Д.А., Яковлев М.Я. О численной оценке эффективных упругих характеристик эластомерных композитов при конечных деформациях с использованием метода спектральных элементов с помощью САЕ Fidesys // Чебышёвский сборник. – 2017. – Т. 18, № 13. – С. 316-329.

**Сведения об авторах:**

*Шеметов Лев Игоревич* – аспирант;

*Вершинин Даниил Владимирович* – студент;

*Терехин Сергей Николаевич* – студент;

*Распопина Вера Борисовна* – к.т.н., доцент, доцент кафедры самолетостроения и эксплуатации авиационной техники.