

УДК 539.4
EDN GNCVWP (<https://elibrary.ru/gncvwp>)
DOI 10.33113/mkmk.ras.2023.29.02.03



ПРОЧНОСТЬ ОБРАЗЦОВ ИЗ ПОЛИЭФИРЭФИРКЕТОНА, ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ ПОСЛОЙНОГО НАПЛАВЛЕНИЯ С ДВУХСЛОЙНЫМ ПЕРЕПЛЕТЕНИЕМ*

Погребной А.В.

*Акционерное общество «Центральный научно-исследовательский институт
машиностроения» (АО «ЦНИИМаш»), г. Королёв, Россия*

АННОТАЦИЯ

Метод послойного наплавления (FDM) является одной из самых распространенных в мире аддитивных технологий и широко применяется в различных отраслях как для прототипирования деталей, так и для получения функциональных полимерных материалов с заданными свойствами. Известно, что полученные методом FDM материалы обладают низкой стабильностью прочностных свойств и сильно выраженными анизотропными характеристиками. В настоящее время, одной из актуальных проблем синтезируемых материалов является низкая прочность межслойной связи. Для решения этой проблемы большинство методов 3D-печати совершенствуются в направлении оптимизации технологических параметров с целью получения материалов с более высокими и стабильными механическими свойствами.

По результатам ранее проведенного исследования образцов из полилактида (PLA) было показано, что двухслойное переплетение, реализованное между полимерными нитями материала, оказывает влияние на прочностные характеристики.

В связи с актуальностью применения различных высокотемпературных конструкционных полимерных материалов для 3D-печати функциональных деталей, в настоящей работе исследовалось влияние двухслойного переплетения на прочность при одноосном статическом растяжении образцов из полиэфирэфиркетона (ПЕЕК).

В статье систематизированы наиболее часто встречающиеся в литературе работы о влиянии различных параметров 3D-печати методом FDM на механические свойства образцов из ПЕЕК. Приводится сравнение прочностных характеристик образцов с переплетением и без переплетения, полученных при статическом растяжении, сравнивается характер их разрушения.

Полученные при статическом растяжении поперек полимерных нитей прочностные характеристики образцов указывают на существование принципиальной возможности использования двухслойного переплетения для повышения прочности полимерных материалов, изготавливаемых с использованием аддитивной технологии.

Ключевые слова: полиэфирэфиркетон; механические свойства; прочность при растяжении; структура; двухслойное переплетение; 3D-печать; метод послойного наплавления

TENSILE STRENGTH OF POLYETHERETHERKETONE SAMPLES 3D-PRINTED VIA FUSED DEPOSITION MODELING METHOD WITH DOUBLE-LAYER WEAVE

* Автор выражает благодарность коллективу компании ООО «Тоталзед», Российская Федерация, за предоставленную возможность изготовления тестовых образцов из ПЕЕК с использованием промышленного 3D-принтера «AnyForm 500 Pro» для проведения исследования.

Pogrebnoi A.V.

JSC «Central Research Institute for Machine Building», Korolev, Russia

ABSTRACT

Fused Deposition Modeling method (FDM) is one of the most available additive manufacturing technologies in the world. It is being widely applied in different areas for rapid prototyping and fabricating functional polymer materials with desired characteristics. FDM 3D-printed materials have low stability and high anisotropy of mechanical properties. Currently, low interlayer bonding is the actual problem of FDM 3D-printed materials. Most 3D-printing methods are being improved by optimization of main printing parameters to enhance mechanical properties.

Previous study of polylactide 3D-printed samples showed that double-layer weaving formed between polymer threads affected the strength of the material and its fracture pattern.

Due to wide application of different high temperature engineering thermoplastic polymers for 3D-printing functional parts, the aim of this work was to study the effect of double-layer weave on the tensile strength of polyetheretherketone (PEEK) samples.

This work presents a systematic review of the most frequently cited papers about the effect of different 3D-printing parameters on mechanical properties of 3D-printed PEEK. Performed characteristics of the samples obtained by static unidirectional tension and their fracture behavior show that double-layer weave can be potentially implemented for additively manufactured polymer materials to improve their mechanical properties.

Keywords: polyetheretherketone; mechanical properties; tensile strength; structure; double-layer weave; 3D-printing; fused deposition modeling

ВВЕДЕНИЕ

Возможность изготовления деталей методом послойного наплавления (*Fused Deposition Modeling*, или *FDM*) из современных конструкционных полимерных и полимерных композиционных материалов (полифенилсульфона, полиэфиримида, полиэфирэфиркетона, и др.) [1-3] появилась благодаря интенсивному развитию аддитивных технологий. Несмотря на более чем тридцатилетнюю историю развития метода FDM, вопросы влияния различных параметров 3D-печати и вариантов внутренней структуры на свойства материалов, полученных аддитивным способом, по-прежнему являются актуальными и мало изученными. Материалы, полученные методом FDM, имеют низкую стабильность прочностных свойств и ярко выраженные анизотропные характеристики, по сравнению с материалами, получаемыми методами литья. В одной из ранних работ было показано, что упругие свойства термопластичных деталей, изготовленных методом FDM, в направлении укладки полимерных нитей значительно отличаются от свойств в перпендикулярном направлении [4].

В связи с этим, одной из главных тенденций развития метода FDM и других аддитивных технологий является получение материалов с более высокими и стабильными механическими свойствами. Сегодня современное программное обеспечение совершенствуется в направлении моделирования структуры материалов, проведения виртуальных испытаний и оптимизации конструкции полимерных изделий [5]. Создаются и обновляются профили 3D-печати, реализующие возможности настройки и контроля известных управляющих и зависимых параметров в зависимости от используемых полимерных материалов [6].

В настоящее время большинство методов 3D-печати по технологии FDM основано на «нисходящем» принципе слайсинга, то есть разделения исходной 3D-модели детали на отдельные слои, уложенные друг на друга. Это приводит к актуальной проблеме низкой прочности связи между слоями материала.

Для уменьшения влияния слабой межслойной связи на общие механические свойства материала применяются методы, основанные на оптимизации технологических параметров 3D-печати [6-8], на использовании дополнительных источников тепла [9], и на включении в состав материала различных добавок [2] или армирующих волокон [5,8]. В работе [10] было предложено задавать переплетение между несколькими слоями материала для увеличения прочности напечатанных деталей. В статье [11] показано, что при незначительной разнице в прочности у образцов с двухслойным переплетением наблюдалась лучшая повторяемость прочностных свойств по сравнению с образцами без переплетения.

Вместе с тем, в литературе можно встретить и другие методы 3D-печати, основанные на предварительном проектировании структуры отдельных слоев из элементарных структурных элементов и последующем синтезе внутренней структуры целого материала. В отличие от принципа слайсинга, данный подход позволяет реализовать движение экструдера по более сложным траекториям укладки материала, в том числе представленным в виде зигзагов [12] или тригонометрических функций [13].

В настоящей работе приводятся результаты исследования влияния двухслойного переплетения на прочность при одноосном растяжении образцов из полиэфирэфиркетона (ПЕЕК).

ПЕЕК является полукристаллическим термопластичным материалом, плотность и механические свойства которого напрямую зависят от соотношения кристаллических участков с высокой степенью упорядоченности молекул, и аморфных участков со случайным распределением молекул [14].

В таблице 1 приведен краткий обзор наиболее часто встречающихся в литературе работ, в которых исследовалось влияние различных параметров 3D-печати методом FDM на механические свойства образцов из ПЕЕК. В предпоследнем столбце таблицы указаны округленные минимальные и максимальные значения предела прочности при растяжении (σ_{Bi}), достигнутые внутри соответствующих диапазонов изменяемых параметров.

Результаты исследований [14-16] показывают, что с увеличением температуры экструзии (T_e) и окружающей среды (T_a) [14,16] происходит увеличение степени кристаллизации, что приводит к улучшению прочностных свойств материала. Вместе с тем, механические свойства образцов из ПЕЕК также зависят от ряда других факторов: угла укладки полимерных нитей (θ) [17-19], высоты слоя (h) [16,17,19,20], скорости печати (F) [16,19,20], и плотности заполнения (I) [19,21]. При этом, хотя влияние температуры платформы построения на прочность незначительно, его важно учитывать для предотвращения деформации деталей [19]. Различные высокотемпературные режимы печати [14,22-25] также влияют на степень кристаллизации и механические свойства ПЕЕК.

Таблица 1.

Краткий обзор работ в области исследования влияния основных параметров 3D-печати на механические свойства образцов из РЕЕК.

№	$T_e, ^\circ\text{C}$	$T_a, ^\circ\text{C}$	$F, \text{мм/с}$	$d, \text{мм}$	$h, \text{мм}$	$\theta, ^\circ$	$I, \%$	$\sigma_{Bt}, \text{МПа}$	Ист.
1	360-480	25	40	0.4	0.2	0	100	48.5-58.5	[14]
2	360-420	-	20	0.4	0.2	45/-45	100	79.0-84.0	[15]
3	380-410	90	50	0.4	0.2	0	100	75.0-88.0	[16]
4	420	25-200	40	0.4	0.2	0	100	58.0-84.0	[14]
5	400	25-90	50	0.4	0.2	0	100	75.0-85.0	[16]
6	400	-	17-26	0.4	0.2	45/-45	100	68.3-57.0	[20]
7	400	90	30-50	0.4	0.2	0	50	74.0-86.0	[16]
8	400	90	50	0.4	0.1-0.3	0	100	78.0-88.0	[16]
9	400	-	20	0.4	0.1-0.25	45/-45	100	63.5-68.0	[20]
10	400	-	20	0.6	0.25-0.4	45/-45	100	39.0-58.0	[20]
11	410	-	13	0.4	0.1	90-0	100	72.9-82.6	[18]
12	400	-	20	0.4	0.2	45/-45	20-100	60.6-98.9	[21]
13	400	145	20	0.4	0.2	45/-45	100	76.0	[22]
14	450	290	40	0.7	0.25	45/-45	100	66.9	[23]
15	525	-	30	0.4	0.1	0	100	87.3	[24]
16	435	75	35	0.6	0.1	90	100	43.1	[25]

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Образцы для испытаний были напечатаны в количестве 5 шт. каждой серии (серия *A* – без переплетения нитей, серия *B* – с переплетением нитей). Для изготовления образцов использовался РЕЕК марки «U3 РЕЕК» с диаметром нити 1.75 мм производства «U3Print», Российская Федерация. Основные свойства данного материала по данным производителя представлены в таблице 2.

Таблица 2.

Основные свойства исходного РЕЕК, использованного для 3D-печати.

№	Наименование параметра		Значение
1	Плотность, г/см ³		1.30
2	Температура плавления $T_m, ^\circ\text{C}$		343
3	Температура стеклования $T_g, ^\circ\text{C}$		143
4	Коэффициент теплового расширения, мкм/м $\times^\circ\text{C}$	при $T < T_g$	50
		при $T > T_g$	140
5	Предел прочности на растяжение, МПа		98

Образцы были получены с использованием промышленного 3D-принтера «AnyForm 500 Pro» (ООО «Тоталзед», Российская Федерация) с высокотемпературной активной камерой, высокотемпературным экструдером, прецизионной системой перемещения и областью печати по длине, ширине, и высоте соответственно – 500×500×500 мм.

Результаты работ [19,26,27] показывают, что в процессе печати и последующего остывания образцы из РЕЕК подвержены сильной деформации и расслоению. С целью уменьшения риска возникновения деформации печатаемых образцов и их возможного отрыва от платформы построения площадь первого слоя каждого образца была увеличена, суммарная толщина образцов уменьшена с 14 слоев до 6 слоев, а на стеклянную поверхность платформы дополнительно наносился адгезив. Основные параметры 3D-печати образцов из РЕЕК представлены в таблице 3.

Таблица 3.
Основные параметры FDM 3D-печати исследуемых образцов из РЕЕК.

№	Наименование параметра	Значение
1	Температура экструзии, °С	480
2	Температура в активной камере, °С	200
3	Температура подогреваемой платформы, °С	150
4	Толщина первого слоя, мм	0.15
5	Толщина последующих слоев, мм	0.2
6	Диаметр сопла экструдера, мм	0.4
7	Скорость печати (в том числе для первого слоя), мм/мин	700
8	Плотность заполнения, %	100
9	Угол ориентации полимерных нитей в слое, °	90

Все образцы были выполнены в виде полосы длиной 121 мм, шириной 20.7 мм, и толщиной 1.2 мм.

Расчетное время печати каждого образца составило около 60 мин. Изготовление образцов каждой серии осуществлялось последовательно, при этом снятие всех образцов с платформы построения производилось примерно через 60 мин после завершения печати последнего образца из серии и их совместного остывания в активной камере.

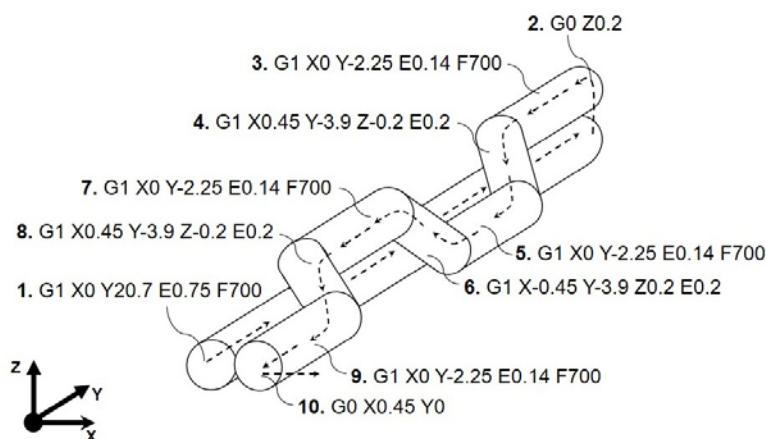
Внутренняя структура образцов без переплетения была получена параллельной укладкой полимерных нитей, ориентированных перпендикулярно оси растяжения (ОХ).

Для получения образцов с переплетением использовался метод, подробно описанный в предыдущем исследовании [11]. На рис.1 показан процесс укладки полимерных нитей и приведены простейшие управляющие команды на языке *G-Code* для создания переплетения.

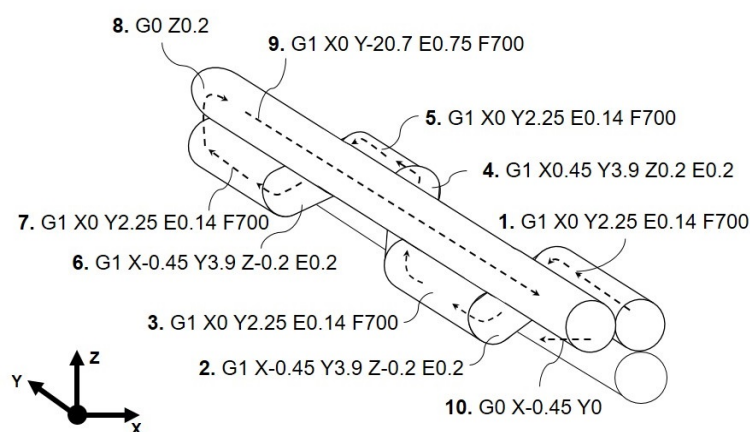
Каждая простейшая команда содержит значения координат для перемещения печатающей головки и двух основных параметров 3D-печати: экструзии (E , мм) и скорости печати (F , мм/мин). Первый параметр определяет количество материала, выдавливаемого экструдером на каждом отрезке траектории перемещения печатающей головки. Второй параметр определяет скорость перемещения печатающей головки. Значения параметра экструзии на каждом участке траектории перемещения экструдера задавались по формуле, где h – высота слоя, w – ширина раstra, d – диаметр филамента, L – длина отрезка траектории перемещения экструдера, M – мультипликатор экструзии (принимался равным единице) [28]

$$E = \frac{[h^2\pi + 4h(w-h)]}{\pi d^2} L \times M.$$

В связи с приближенным характером расчета параметра E по формуле, полученные значения корректировались по результатам предварительной 3D-печати.



а



б

Рис.1. Приближенный метод создания структуры образцов с двухслойным переплетением: а) слева-направо; б) справа-налево.

2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Ширина и толщина изготовленных образцов были измерены электронным штангенциркулем типа ШЦЦ-I-125-ГОСТ 166-89 (ЗАО «ПО «Челябинский инструментальный завод», Российская Федерация) после обрезки первого слоя по периметру тестовых образцов и обработки боковых граней наждачной бумагой.

Прочность образцов при статическом растяжении определялась на электромеханической разрывной машине «Instron» модели 3369, Великобритания при постоянной скорости движения активного захвата, равной 2 мм/мин. Испытания на прочность проводились в лабораторных условиях при температуре 23°C.

Визуальный анализ образцов проводился с использованием цифрового микроскопа «Dino-Lite Premier» модели AM7013MZT («AnMo Electronics Corporation», Тайвань).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

3.1. Характер разрушения образцов при одноосном растяжении.

Результаты визуального анализа образцов позволяют сделать вывод о том, что при заданных параметрах 3D-печати обеспечивается достаточное сплавление полимерных нитей между слоями материала (рис.2-3).

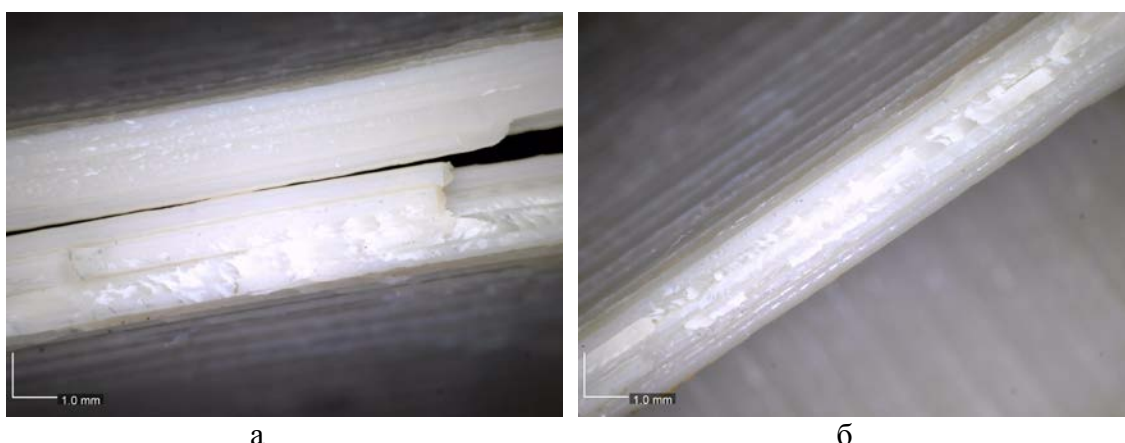


Рис.2. Поверхности разрушения образцов A4 (а) и A5 (б).

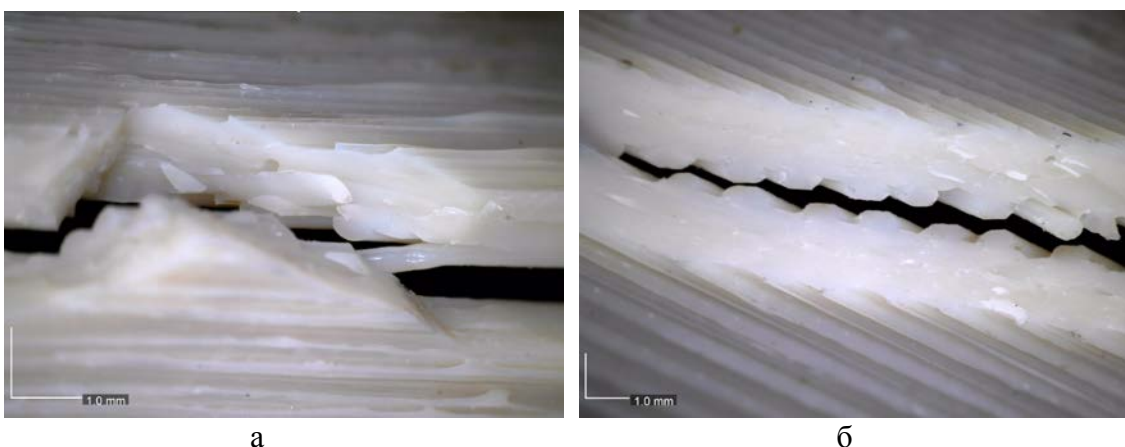


Рис.3. Поверхности разрушения образцов B1 (а) и B2 (б).

Характер разрушения образцов совпадает с результатом, полученным в предыдущей работе для образцов из PLA. Образцы без переплетения разрушились вдоль линии контакта между полимерными нитями (рис.2), а образцы с переплетением не имеют ярко выраженной плоскости разрушения, ориентированной вдоль полимерных нитей.

Геометрия сопла экструдера оказывает влияние на шероховатость образцов и целостность полимерных нитей переплетения при попеременном движении печатающей головки между соседними слоями материала. Аналогичная проблема отмечалась в работе [10] при исследовании материала с переплетением, реализованным между пятью отдельными слоями в каждой секции. Одним из существенных недостатков заявленного авторами метода является наличие

участков, где отсутствует переплетение между полимерными нитями отдельных секций, что приводит к сохранению актуальной проблемы слабой связи между слоями и последующего расслоения.

В отличие от [10], в настоящей работе показано, что двухслойное переплетение может быть реализовано непосредственно между полимерными нитями, что позволяет изменить послойный характер разрушения анизотропного материала.

3.2. Результаты статических испытаний образцов на растяжение.

Необходимо отметить, что малая толщина и высокая шероховатость поверхности образцов не позволили обеспечить надежную фиксацию тензометра и построить диаграммы зависимости номинального напряжения от деформации, дающие более полные представления о механических характеристиках получаемого материала.

В таблице 4 приведены результаты проведенных статических испытаний на растяжение для образцов из РЕЕК с переплетением и без переплетения. Коэффициент вариации, указанный в таблице 4 в круглых скобках, определялся в процентах как отношение выборочного среднего квадратичного отклонения (СКО) к среднему значению предела прочности.

Таблица 4.

Сравнение характеристик образцов без переплетения (А) и с переплетением (В), полученных при статическом растяжении поперек полимерных нитей.

№	Ширина образца b_i , мм	Толщина образца h_i , мм	Максимальная нагрузка, предшествующая разрушению $F_{i\max}$, Н	Предел прочности при растяжении σ_{Bi} , МПа	Среднее значение предела прочности при растяжении $\bar{\sigma}_b$, МПа (СКО, S / Коэффициент вариации, %)
A1	20.24	1.37	1699.52	61.29	56.06 (6.42 / 11.5)
A2	20.04	1.40	1652.79	58.91	
A3	20.18	1.39	1707.35	60.87	
A4	20.43	1.35	1462.37	53.02	
A5	20.42	1.41	1330.14	46.20	
B1	21.05	1.48	1445.77	46.41	54.16 (12.08 / 22.3)
B2	21.32	1.34	1367.24	47.86	
B3	21.35	1.33	1552.83	54.69	
B4	21.14	1.28	2027.45	74.93	
B5	21.14	1.46	1447.64	46.90	

По результатам проведенных испытаний среднее значение предела прочности при растяжении для образцов без переплетения составило 56.06 МПа (при минимальном значении 46.20 МПа и максимальном значении 61.29 МПа).

Для образцов с переплетением среднее значение предела прочности при растяжении оказалось равным 54.16 МПа (при минимальном значении 46.41 МПа и максимальном значении 74.93 МПа).

При сравнении минимальных и средних значений предела прочности, двухслойное переплетение не оказывает существенного влияния на прочность при растяжении образцов из РЕЕК.

Наблюдаемый в каждой серии для одинаковых по составу и способу получения образцов разброс значений предела прочности может объясняться отклонениями в размерах образцов и различиями в условиях их изготовления. В ходе последовательной 3D-печати одни образцы находились в активной камере 3D-принтера чуть дольше, чем другие. Результаты работ [16,17] показывают, что от выбранного теплового режима зависит степень кристаллизации РЕЕК, с ростом которой улучшаются его механические свойства. Следовательно, разная продолжительность нахождения образцов в активной камере 3D-принтера могла повлиять на их механические свойства.

С учетом вышеизложенного, при практически одинаковых нижних значениях, двухслойное переплетение заметно увеличивает максимальное значение предела прочности, что указывает на принципиальную возможность повышения прочности по сравнению с образцами без переплетения.

Вместе с тем, более высокая нестабильность прочностных свойств у образцов с двухслойным переплетением по сравнению с образцами без переплетения, может объясняться наличием дефектов (пустот, наплывов и др.), являющихся концентраторами напряжений.

Для уменьшения количества дефектов, наблюдаемых в структуре материала, требуется оптимизировать метод формирования слоев с переплетением нитей, с учетом влияния геометрии сопла экструдера на целостность полимерных нитей в процессе попеременного движения печатающей головки между разными слоями материала. Оптимальный метод должен учитывать влияние особенностей структуры получаемых с использованием аддитивных технологий материалов на их прочностные свойства при различных режимах нагружения.

ВЫВОДЫ

Анализ опубликованных данных различных исследователей показал, что механические свойства образцов из РЕЕК зависят от различных параметров 3D-печати методом послойного наплавления.

В настоящей работе было исследовано влияние двухслойного переплетения на прочность при одноосном статическом растяжении образцов из РЕЕК.

Опыты по изготовлению образцов и их последующие механические испытания показали, что заданные параметры 3D-печати обеспечивают достаточно надежное сплавление полимерных нитей между слоями материала с переплетением.

Установлено, что двухслойное переплетение изменяет характер разрушения материала, но не ухудшает его прочностных характеристик. Отмеченное увеличение верхней границы разрушения указывает на перспективу повышения прочности при совершенствовании технологии изготовления.

С учетом полученных ранее результатов для PLA [11], можно предположить, что характер разрушения не зависит от свойств материала и зависит только от вида переплетения.

Полученные результаты подтверждают возможность синтеза новых функциональных полимерных и полимерных композиционных материалов со сложной структурой, основанной на многослойных переплетениях.

ЖИТЕПАТЫПА

1. Slonov A.L., Khashirov A.A., Zhansitov A.A., Rzhetskaya E.V., Khashirova S.Y. *The influence of the 3D-printing technology on the physical and mechanical properties of polyphenylene sulfone* // Rapid Prototyping Journal. – 2018. – Vol.24. – No.7. – Pp.1124-1130.
2. Polyakov I.V., Vaganov G.V., Yudin V.E., Smirnova N.V., Ivan'kova E.M., Popova E.N. *Study of Polyetherimide and Its Nanocomposite 3D Printed Samples for Biomedical Application* // Polymer Science, Ser. A. – 2020. – Vol.62. – No.4. – Pp.337-342.
3. Zanjanijam A.R., Major I., Lyons J.G., Lafont U., Devine D.M. *Fused filament fabrication of peek: a review of process-structure property relationships* // Polymers. – 2020. – Vol.12. – No.8. – 1665.
4. Ahn S.H., Montero M., Odell D., Roundy S., Wright P.K. *Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS* // Rapid Prototyping Journal. – 2002. – Vol.8. – No.4. – Pp.248-257.
5. Dickson A.N., Abourayana H.M., Dowling D.P. *3D Printing of Fibre-Reinforced Thermoplastic Composites Using Fused Filament Fabrication – A Review* // Polymers. – 2020. – Vol.12. – 2188.
6. Ahmad N.N., Wong Y.H., Ghazali N.N.N. *A systematic review of fused deposition modeling process parameters* // Soft Science. – 2022. – Vol.2. – No.11.
7. Moretti M., Rossi A., Senin N. *In-process simulation of the extrusion to support optimisation and real-time monitoring in fused filament fabrication* // Additive Manufacturing. – 2021. – Vol.38. – No.82. – 101817.
8. El Magri A., Vanaei S., Vaudreuil S. *An overview on the influence of process parameters through the characteristic of 3D-printed PEEK and PEI parts* // High Performance Polymers. – 2021. – Vol.33. – No.8. – Pp.862-880.
9. Luo M., Tian X., Zhu W., Li D. *Controllable interlayer shear strength and crystallinity of PEEK components by laser-assisted material extrusion* // Journal of Materials Research. – 2018. – Vol.33. – No.11. – Pp.1632-1641.
10. Yao Y., Ding C., Aburaia M., Lackner M., He L. *A 3D weaving infill pattern for fused filament fabrication* // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2021. – Vol.117. – Pp.3101-3114.
11. Pogrebnoi A.V. *Study of polylactide 3D-printed samples with double-layer weave* // Materials Physics and Mechanics. – 2022. – Vol.48. – No.2. – Pp.289-299.
12. Allum J., Kitzinger J., Yimeng L., Silberschmidt V.V., Gleadall A. *ZigZagZ: Improving mechanical performance in extrusion additive manufacturing by nonplanar toolpaths* // Additive Manufacturing. – 2021. – Vol.38. – 101715.
13. Gleadall A. *FullControl GCode Designer: Open-source software for unconstrained design in additive manufacturing* // Additive Manufacturing. – 2021. – Vol.46. – 102109.
14. Yang C., Tian X., Li D., Cao Yi., Zhao F., Changquan S. *Influence of thermal processing conditions in 3D printing on the crystallinity and mechanical properties of PEEK material* // Journal of Materials Processing Technology. – 2017. – Vol.248. – Pp.1-7.
15. Ding S., Zou B., Wang P., Ding H. *Effects of nozzle temperature and building orientation on mechanical properties and microstructure of PEEK and PEI printed by 3D-FDM* // Polymer Testing. – 2019. – Vol.78. – 105948.
16. Challa B.T, Gummadi S.K., Elhattab K., Ahlstrom J., Sikder P. *In-house processing of 3D printable polyetheretherketone (PEEK) filaments and the effect of fused*

- deposition modeling parameters on 3D-printed PEEK structures // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* – 2022. – Vol.121. – Pp.1675-1688.
17. Wu W., Geng P., Li G., Zhao D., Zhang H., Zhao J. *Influence of Layer Thickness and Raster Angle on the Mechanical Properties of 3D-Printed PEEK and a Comparative Mechanical Study between PEEK and ABS // Materials.* – 2015. – Vol.8. – No.9. – Pp.5834-5846.
 18. Arif M.F., Kumar S., Varadarajan K.M., Cantwell W.J. *Performance of biocompatible PEEK processed by fused deposition additive manufacturing // Materials Design.* – 2018. – Vol.146. – Pp.249-259.
 19. Gao R., Xie J., Yang J., Zhuo C., Fu J., Zhao P. *Research on the Fused Deposition Modeling of Polyether Ether Ketone // Polymers.* – 2021. – Vol.13. – No.14. – 2344.
 20. Wang P, Zou B, Xiao H, Ding S, Huang C. *Effects of printing parameters of fused deposition modeling on mechanical properties, surface quality, and microstructure of PEEK // Journal of Materials Processing Technology.* – 2019. – Vol.271. – Pp.62-74.
 21. Rinaldi M., Ghidini T., Cecchini, F., Brandao Ana., Nanni F. *Additive layer manufacturing of poly (ether ether ketone) via FDM // Composites Part B.* – 2018. – Vol.145. – Pp.162-172.
 22. Wang R., Cheng K., Advincula R.C., Chen Q. *On the thermal processing and mechanical properties of 3D-printed polyether ether ketone // Materials Research Society Communications.* – 2019. – Pp.1-7.
 23. Sviridov A., Lopatina Iu., Kurganova Iu. *3D-printed polyether ether ketone samples mechanical properties estimation / In Proceedings of the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* – 2019. – Vol.589. – 012021.
 24. Li Y., Lou Y. *Tensile and Bending Strength Improvements in PEEK Parts Using Fused Deposition Modelling 3D Printing Considering Multi-Factor Coupling // Polymers.* – 2020. – Vol.12. – No.11. – 2497.
 25. Vindokurov I., Pirogova Y., Tashkinov M., Silberschmidt V.V. *Effect of Heat Treatment on Elastic Properties and Fracture Toughness of Fused Filament Fabricated PEEK for Biomedical Applications // Polymers.* – 2022. – Vol.14. – No.24. – 5521.
 26. Wu W.Z., Geng P., Zhao J., Zhang Y., Rosen D.W., Zhang H.B. *Manufacture and thermal deformation analysis of semicrystalline polymer polyether ether ketone by 3D printing // Materials Research Innovations.* – 2014. – Vol.18.
 27. Wang Y. Muller W-D., Rumjahn A., Schwitalla A. *Parameters Influencing the Outcome of Additive Manufacturing of Tiny Medical Devices Based on PEEK // Materials.* – 2020. – Vol.13. – No.2. – 466.
 28. Kim S., Andreu A., Kim I., Kim J-H., Lee J., Yoon Y-J. *Continuously varied infill pattern (ConVIP): improvement of mechanical properties and printing speed of fused filament fabrication (FFF) 3D printing // Journal of Materials Research and Technology.* – 2022. – Vol.18. – Pp.1055-1069.

REFERENCES

1. Slonov A.L., Khashirov A.A., Zhansitov A.A., Rzhevskaya E.V., Khashirova S.Y. *The influence of the 3D-printing technology on the physical and mechanical properties of polyphenylene sulfone*. Rapid Prototyping Journal, 2018, Vol.24, No.7, Pp.1124-1130.
2. Polyakov I.V., Vaganov G.V., Yudin V.E., Smirnova N.V., Ivan'kova E.M., Popova E.N. *Study of Polyetherimide and Its Nanocomposite 3D Printed Samples for Biomedical Application*. Polymer Science, Ser. A, 2020, Vol.62, No.4, Pp.337-342.
3. Zanjanijam A.R., Major I., Lyons J.G., Lafont U., Devine D.M. *Fused filament fabrication of peek: a review of process-structure property relationships*. Polymers, 2020, Vol.12, No.8, 1665.
4. Ahn S.H., Montero M., Odell D., Roundy S., Wright P.K. *Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS*. Rapid Prototyping Journal, 2002, Vol.8, No.4, Pp.248-257.
5. Dickson A.N., Abourayana H.M., Dowling D.P. *3D Printing of Fibre-Reinforced Thermoplastic Composites Using Fused Filament Fabrication – A Review*. Polymers, 2020, Vol.12, 2188.
6. Ahmad N.N., Wong Y.H., Ghazali N.N.N. *A systematic review of fused deposition modeling process parameters*. Soft Science, 2022, Vol.2, No.11.
7. Moretti M., Rossi A., Senin N. *In-process simulation of the extrusion to support optimisation and real-time monitoring in fused filament fabrication*. Additive Manufacturing, 2021, Vol.38, No.82, 101817.
8. El Magri A., Vanaei S., Vaudreuil S. *An overview on the influence of process parameters through the characteristic of 3D-printed PEEK and PEI parts*. High Performance Polymers, 2021, Vol.33, No.8, Pp.862-880.
9. Luo M., Tian X., Zhu W., Li D. *Controllable interlayer shear strength and crystallinity of PEEK components by laser-assisted material extrusion*. Journal of Materials Research, 2018, Vol.33, No.11, Pp.1632-1641.
10. Yao Y., Ding C., Aburaia M., Lackner M., He L. *A 3D weaving infill pattern for fused filament fabrication*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, Vol.117, Pp.3101-3114.
11. Pogrebnoi A.V. *Study of polylactide 3D-printed samples with double-layer weave*. Materials Physics and Mechanics, 2022, Vol.48, No.2, Pp.289-299.
12. Allum J., Kitzinger J., Yimeng L., Silberschmidt V.V., Gleadall A. *ZigZagZ: Improving mechanical performance in extrusion additive manufacturing by nonplanar toolpaths*. Additive Manufacturing, 2021, Vol.38, 101715.
13. Gleadall A. *FullControl GCode Designer: Open-source software for unconstrained design in additive manufacturing*. Additive Manufacturing, 2021, Vol.46, 102109.
14. Yang C., Tian X., Li D., Cao Yi., Zhao F., Changquan S. *Influence of thermal processing conditions in 3D printing on the crystallinity and mechanical properties of PEEK material*. Journal of Materials Processing Technology, 2017, Vol.248, Pp.1-7.
15. Ding S., Zou B., Wang P., Ding H. *Effects of nozzle temperature and building orientation on mechanical properties and microstructure of PEEK and PEI printed by 3D-FDM*. Polymer Testing, 2019, Vol.78, 105948.
16. Challa B.T, Gummadi S.K., Elhattab K., Ahlstrom J., Sikder P. *In-house processing of 3D printable polyetheretherketone (PEEK) filaments and the effect of fused*

- deposition modeling parameters on 3D-printed PEEK structures*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, Vol.121, Pp.1675-1688.
17. Wu W., Geng P., Li G., Zhao D., Zhang H., Zhao J. *Influence of Layer Thickness and Raster Angle on the Mechanical Properties of 3D-Printed PEEK and a Comparative Mechanical Study between PEEK and ABS*. Materials, 2015, Vol.8, No.9, Pp.5834-5846.
 18. Arif M.F., Kumar S., Varadarajan K.M., Cantwell W.J. *Performance of biocompatible PEEK processed by fused deposition additive manufacturing*. Materials Design, 2018, Vol.146, Pp.249-259.
 19. Gao R., Xie J., Yang J., Zhuo C., Fu J., Zhao P. *Research on the Fused Deposition Modeling of Polyether Ether Ketone*. Polymers, 2021, Vol.13, No.14, 2344.
 20. Wang P, Zou B, Xiao H, Ding S, Huang C. *Effects of printing parameters of fused deposition modeling on mechanical properties, surface quality, and microstructure of PEEK*. Journal of Materials Processing Technology, 2019, Vol.271, Pp.62-74.
 21. Rinaldi M., Ghidini T., Cecchini, F., Brandao Ana., Nanni F. *Additive layer manufacturing of poly (ether ether ketone) via FDM*. Composites Part B, 2018, Vol.145, Pp.162-172.
 22. Wang R., Cheng K., Advincula R.C., Chen Q. *On the thermal processing and mechanical properties of 3D-printed polyether ether ketone*. Materials Research Society Communications, 2019, Pp.1-7.
 23. Sviridov A., Lopatina Iu., Kurganova Iu. *3D-printed polyether ether ketone samples mechanical properties estimation*. In Proceedings of the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, Vol.589, 012021.
 24. Li Y., Lou Y. *Tensile and Bending Strength Improvements in PEEK Parts Using Fused Deposition Modelling 3D Printing Considering Multi-Factor Coupling*. Polymers, 2020, Vol.12, No.11, 2497.
 25. Vindokurov I., Pirogova Y., Tashkinov M., Silberschmidt V.V. *Effect of Heat Treatment on Elastic Properties and Fracture Toughness of Fused Filament Fabricated PEEK for Biomedical Applications*. Polymers, 2022, Vol.14, No.24, 5521.
 26. Wu W.Z., Geng P., Zhao J., Zhang Y., Rosen D.W., Zhang H.B. *Manufacture and thermal deformation analysis of semicrystalline polymer polyether ether ketone by 3D printing*. Materials Research Innovations, 2014, Vol.18.
 27. Wang Y. Muller W-D., Rumjahn A., Schwitalla A. *Parameters Influencing the Outcome of Additive Manufacturing of Tiny Medical Devices Based on PEEK*. Materials, 2020, Vol.13, No.2, 466.
 28. Kim S., Andreu A., Kim I., Kim J-H., Lee J., Yoon Y-J. *Continuously varied infill pattern (ConVIP): improvement of mechanical properties and printing speed of fused filament fabrication (FFF) 3D printing*. Journal of Materials Research and Technology, 2022, Vol.18, Pp.1055-1069.

Поступила в редакцию 17 марта 2023 года.

Сведения об авторе:

Погребной Антон Вадимович – инж., Акционерное общество «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения» (АО «ЦНИИмаш»), г. Королёв, Россия; e-mail: a.v.pogrebnoy@yandex.ru