УДК 678

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ 3D-ПЕЧАТИ ИЗ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛИМЕРОВ И ПОЛИМЕР-КОМПОЗИТОВ

© 2026 А.И. Колотий[1], С.Б. Ермаков[2]

[1] Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия
[2] Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, Россия

Статья поступила в редакцию 11.06.2026

В работе исследуется влияние типа материала и направления печати на механические свойства изделий, полученных методом 3D-печати из высокотемпературных термопластов и полимерных композитов, включая PEEK, PEEK-CF, PA12, PA12-CF и PC. Проведён анализ факторов качества 3D-печати с использованием методики FMEA, позволивший выделить критические параметры: качество филамента, стабильность процесса печати и стратегия заполнения. На основе полнофакторного эксперимента (5 материалов × 3 схемы укладки) выполнены испытания 60 образцов на растяжение. Установлено, что направление печати является доминирующим фактором, определяющим прочностные характеристики: концентричная и прямолинейная схемы обеспечивают максимальные значения прочности, тогда как поперечная ориентация приводит к снижению прочности в 2–3 раза. Армирование углеродным волокном повышает прочность вдоль направления экструзии до 30–50 %, но не улучшает, а местами снижает прочность при поперечной ориентации вследствие образования концентраторов напряжений. Показано, что при оптимальной траектории печати прочностные характеристики изделий сопоставимы с параметрами литых термопластов. Полученные результаты подтверждают ключевую роль направления заполнения и межслойной адгезии в формировании качества изделий и определяют направления дальнейшей оптимизации технологий 3D-печати высокотемпературных полимеров.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, межслойная адгезия, механические свойства, прочность при растяжении, FMEA, качество.

DOI: 10.37313/1990-5378-2026-28-5-201-209
EDN: TATXMU

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания «Разработка моделей деградации служебных свойств металлических и композиционных материалов для строительства в условиях многолетнемерзлых грунтах» (FSEG-2024-0009).

ВВЕДЕНИЕ

Аддитивное производство (3D-печать) полимерных материалов в последние годы интенсивно развивается как альтернатива традиционным методам изготовления технологичных изделий и деталей сложной геометрии. Однако, несмотря на высокий потенциал технологии 3D-печати, её промышленное внедрение сдерживается рядом факторов, напрямую связанных с обеспечением качества напечатанных изделий, отсутствием стандартизации, вариативность свойств используемого сырья и недостаточную отработанность технологий производства [1–3].

На данный момент для деталей, полученных методом 3D-печати, (FFF или FDM), отсутствует нормативно-техническая документация (НТД), регламентирующая, контроль качества и свойств получаемых изделий. Определение механических свойств напечатанных образцов [4], как правило, проводятся по стандартам, разработанным для традиционно перерабатываемых пластмасс ГОСТ 34370 (ISO 527 или ASTM D638), что не учитывает особенности структуры изделия, полученного методами 3D-печати. Отсутствие стандартизированных методик приводит к тому, что результаты испытаний, полученные различными исследователями, зачастую плохо сопоставимы, а прогнозирование эксплуатационных свойств изделий затруднено [5–7].

Существенной проблемой остаётся качество исходного сырья — в частности, используемых филаментов. Для ряда коммерчески доступных материалов типичны нестабильность диаметра нити, неравномерное распределение армирующих частиц и другие дефекты, негативно влияющие на стабильность процесса печати [8]. Дополнительную неопределённость вносит отсутствие паспорта качества и полной информации о химическом составе материала, что затрудняет контроль входных параметров

Колотий Александр Игоревич, аспирант, научный сотрудник НТК «Новые технологии и материалы». E-mail: aleksandr.spbpu@gmail.com
Ермаков Сергей Борисович, директор Центра технологических инициатив. E-mail: ermakovsb@tyuiu.ru

и воспроизводимость результатов. В совокупности это приводит к значительной вариабельности механических характеристик напечатанных изделий даже при строго фиксированных режимах печати.

Кроме того, технологические параметры процесса 3D-печати — температура экструзии, скорость подачи, вид заполнения, направление слоёв — существенно влияют на межслойную адгезию и структурную однородность изделий. Недостаточная адгезия слоёв, усадка и деформации при охлаждении приводят к формированию дефектов, вызывающих снижение прочности в направлении, перпендикулярном слоям. Это особенно критично для высокотемпературных полимеров, таких как PEEK или PC, обладающих высокой степенью кристалличности и склонных к термическим деформациям. Следствием указанных факторов является невозможность гарантировать стабильное качество изделий, что ограничивает использование 3D-печати при проектировании ответственных деталей в машиностроении, авиакосмической и медицинской промышленности. Таким образом, обеспечение высокого и воспроизводимого качества изделий, полученных методом 3D-печати, остаётся одной из центральных задач современной аддитивной технологии [9, 10].

В последние годы значительное внимание уделяется повышению механических свойств 3D-печатных изделий за счёт оптимизации траектории печати (ориентации волокон, стратегии заполнения) и использования композитных филаментов с наполнителями (углеродными или стеклянными волокнами), которые повышают жёсткость и снижают усадку. Однако влияние конкретных схем заполнения и направленности волокон на качество и механические свойства изделия полученное методом 3D-печати требует дальнейшего систематического изучения.

Цель настоящей работы — исследование влияния различных направлений печати и содержания углеволокна в материал на механические свойства изделий, напечатанных методом 3D печати. Работа направлена на выявление закономерностей, позволяющих повысить прочность и изотропность напечатанных образцов, что является необходимым условием для их применения в ответственных конструкциях.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

В исследовании использовались термопласты, широко применяемые в инженерных задачах: полиамид 12 (PA12), поликарбонат (PC) и полиэфирэфиркетон (PEEK), а также их композиционные аналоги, армированные мелкодисперсным углеродным волокном — PA12-CF и PEEK-CF. Составы материалов, заявленные производителями, приведены в таблице 1. Выбор материалов обусловлен необходимостью охватить диапазон от конструкционных до высокотемпературных полимеров, отличающихся по степени кристалличности и термостойкости.

Таблица 1. Составы исследуемых материалов

Материал	Полимер	Наполнитель	Добавки
PEEK	PEEK 100%	-	
PEEK CF	PEEK 85%	Углеволокно 15%	
PA12	PA12 76-97%		3-24%
PA12 CF	PA12 75-85%	Углеволокно 14-16%	3-10%
PC	PC 100%		

В композитах в качестве наполнителя применялось мелкодисперсное углеволокно, ориентированное преимущественно вдоль оси экструдируемой нити. Анализ углеродсодержащих образцов методом сканирующей электронной микроскопии показал, что длина волокон составляет 0,1–0,2 мм при диаметре до 0,006 мм, что соответствует отношению длины к диаметру порядка 30 (Рисунок 1).

Для полимерных композитов подобные наполнители обычно характеризуются соотношением длинны к диаметру – критической длинной, определяемой по формуле:

$$l_{кр}=\frac{\sigma_{в} d}{2\tau}, \quad (1)$$

где d – диаметр волокна; $\sigma_{в}$ – прочность волокна при растяжении; τ – предельное касательное напряжение на границе волокна и матрицы [11, 12].

В зависимости от прочности наполнителя и матрицы соотношение критической длины к диаметру наполнителя варьируется от 10 до 200, чем прочнее волокно тем выше отношение, однако в условиях технологии FDM-печати увеличение длины волокон ограничено риском их заклинивания в сопле экструдера.

Для каждого материала были отработаны оптимальные режимы печати в соответствии с рекомендациями производителя филамента и техническими особенностями принтера, основные параметры приведены в таблице 2. Перед печатью все материалы проходили предварительную сушку

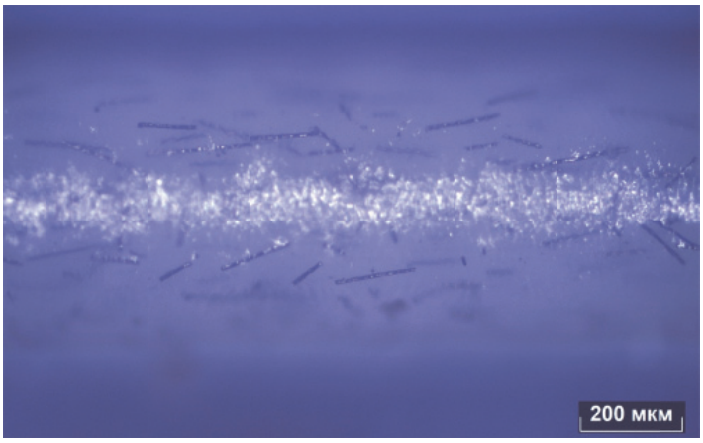


Рисунок 1 – PEEK CF, расположение наполнителя (коротких углеродных волокон).

Таблица 2 – Параметры печати

Материал	Температура экструдера, °С	Температура стола, °С	Температура в камере, °С	Скорость печати, мм/с	Сушка до печати Темп./Время	Отжиг после печати Темп./Время
PEEK	440	150	70	30	130°С /6ч	200°С/8ч
PEEK CF	440	150	70	30	130°С /6ч	200°С/8ч
PA12	290	110	70	50	70°С /12ч	–
PA12 CF	300	110	70	40	70°С /12ч	–
PC	300	120	70	30	110°С /6ч	–

согласно требованиям производителя. Образцы из высокотемпературных полимеров (PEEK и PEEK-CF) после изготовления подвергались термообработке: отжигу в печи при 200 °С в течение 8 ч с последующим контролируемым охлаждением со скоростью порядка 10 °С/ч.

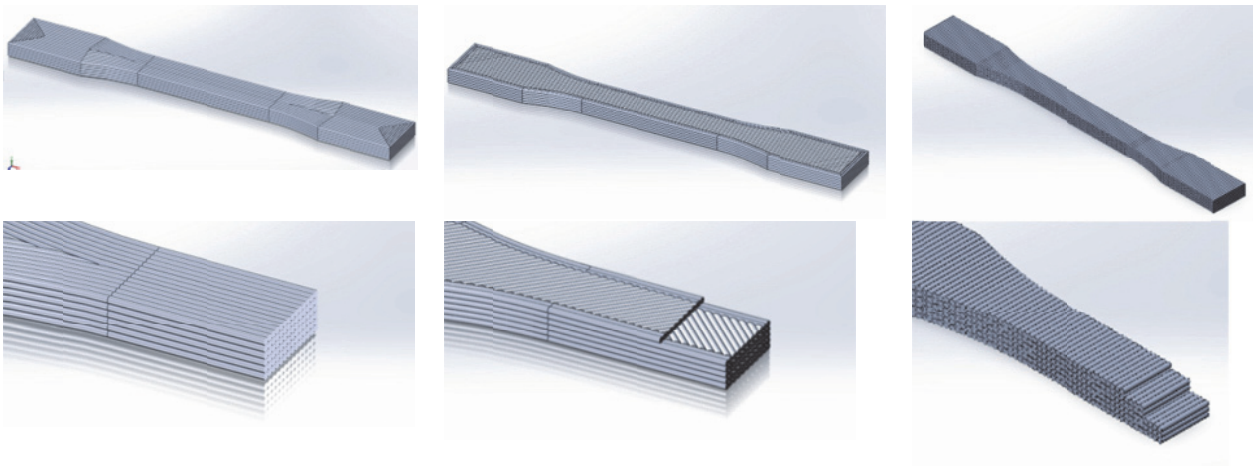
Выбор типа образца для испытаний на растяжение осуществлялся с учётом особенностей технологии 3D-печати и требований нормативных документов. На начальном этапе использовались образцы типа 1А по ГОСТ 11262-2017 (эквивалент ISO 527-2, тип 1А), однако в ходе предварительных испытаний было выявлено, что данные образцы часто разрушались в зоне переходного радиуса, а не в рабочей зоне образца. Это обусловлено малым радиусом скругления шейки, что при послойном построении и наличии 3D-печатной структуры приводит к появлению мест концентрации напряжений и преждевременному разрушению. Для устранения данного эффекта был выбран образец типа 1В по ГОСТ 11262-2017, отличающийся увеличенным радиусом сопряжения между рабочей частью и захватными головками, а также его аналог Type I по ASTM D638, с увеличенной шириной рабочей части. Проведённые сравнительные испытания показали, что различий в прочностных характеристиках между типами 1В и Type I не наблюдается, при этом вероятность разрушения вне рабочей зоны существенно снизилась. Толщина всех испытанных образцов составляла 4 мм, что обеспечивало достаточную жёсткость при захвате и соответствовало требованиям обоих стандартов. Толщина слоя составляла 0,2 мм, диаметр сопла — 0,4 мм, заполнение — 100 %.

Для анализа влияния траектории укладки материала были выбраны три схемы заполнения (рисунок 2):

- прямолинейная (0°/90°) — чередование ортогональных направлений слоёв, создающее сетчатую структуру, и двумя периметрами для минимизации концентраторов по краям образца;
- концентрическая — траектория, повторяющая контур образца, способствующая равномерному распределению напряжений и улучшенному сцеплению с оболочкой;
- поперечная (90°) — все слои ориентированы перпендикулярно направлению приложения нагрузки, что позволяет оценить межслойную адгезию.

Изготовление образцов выполнялось на промышленном 3D-принтере CreatBot F430, оснащённом закрытой термокамерой, обеспечивающей стабильную температуру при печати высокотемпературных полимеров и соплом с максимальной температурой печати 450°С.

В данной работе для оценки качества применялся метод опроса квалифицированных специалистов FMEA. На сегодняшний день FMEA является одной из стандартных методик анализа надёжности изделий и процессов, для которой сформированы унифицированные формы представления результатов и устоявшиеся правила проведения [13]. Подобно другим методам функционального анализа, процедура включает два ключевых этапа:



A B C

Рисунок 2 – Схемы заполнения:
A – концентрическая, B – прямолинейная, C – поперечная

Для оценки риска дефекта вычислим приоритетное число риска (ПЧР) – количественную оценку комплексного риска дефекта, по следующей формуле:

$$ПЧР = S \times O \times D,$$

где S – Значимость несоответствия – параметр тяжести последствий для потребителя
O – Вероятность возникновения – параметр частоты возникновения дефекта
D – Вероятность обнаружения – параметр вероятности необнаружения дефекта

Таблица 3 – FMEA анализ

Вид дефекта		Значимость несоответствия	Вероятность возникновения	Вероятность обнаружение	ПЧР
Качество филамента	Толщина нити	5	3	4	60
	Хим. состав	8	2	10	160
	Наполнитель	8	2	7	112
Качество печати	PEEK	6	6	6	216
	PEEK CF	6	7	6	252
	PA12	5	4	6	120
	PA12 CF	5	6	6	180
	PC	4	5	5	100
Качество заполнения	Прямолинейное	6	7	7	294
	Концентричное	6	5	7	210
	Поперечное	8	8	7	448

По результатам расчета наибольшую величину ПЧР имеют дефекты связанные с качеством печати и качеством заполнения и являются приоритетными направлениями для устранения.

Для проведения верификации FMEA анализа был спланирован эксперимент по полнофакторной схеме с независимыми факторами «материал» и «схема заполнения» (5 типов материала × 3 варианта укладки). Для каждого сочетания условий изготавливалось не менее четырех идентичных образцов, то есть для статистической надёжности проводились испытания 60 образцов. Такой подход позволил непосредственно сравнить влияние состава (наполнителя) материала и стратегии заполнения на прочностные характеристики напечатанных изделий.

Испытания на растяжение выполнялись в соответствии с требованиями ГОСТ 11262-2017 на разрывной машине РЭМ-100 при нормальных лабораторных условиях, при температуре 23 °C. Перед установкой в испытательную систему на каждый образец наносились метки расчётной длины для последующего определения удлинения. Фактические геометрические параметры — толщина и ширина рабочей части — измерялись с использованием точного измерительного инструмента, после чего образец фиксировался в захватах машины. Нагружение осуществлялось в режиме контролируемой деформации со скоростью перемещения подвижного захвата 1 мм/мин. В процессе испытания регистрировалась зависимость «усилие – перемещение захватов», что обеспечивало получение первичных данных о механическом поведении материала. По завершении испытания измерялось

остаточное удлинение образца, а зарегистрированное усилие пересчитывалось в напряжение с учётом фактической площади поперечного сечения.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Результаты испытаний на растяжение приведены на рисунке 3.

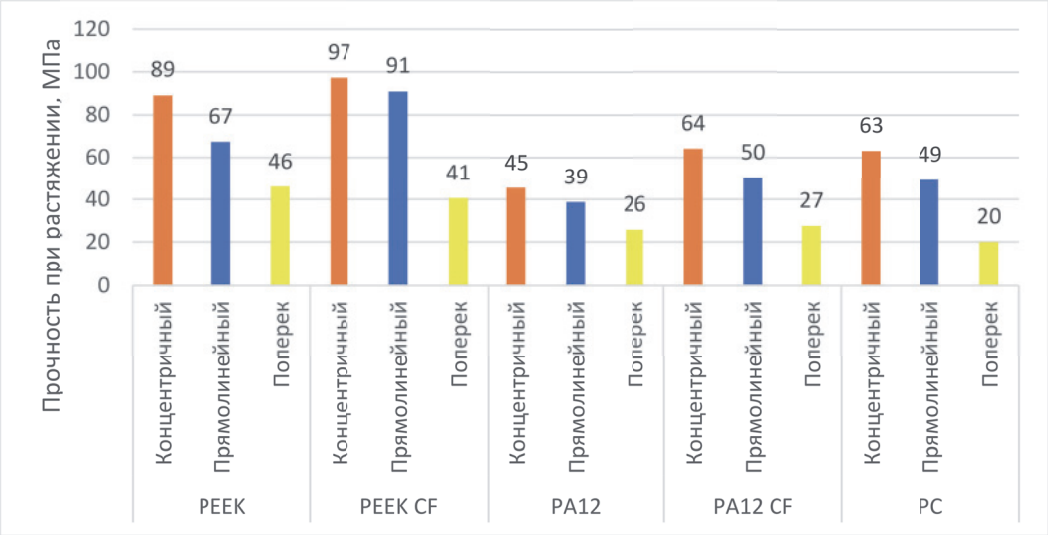


Рисунок 3 – Результаты испытаний

Исследования образцов, формируемых аддитивными методами, демонстрируют выраженную зависимость механических свойств от направления печати и наличия наполнителя. На диаграмме представлены значения прочности при трех ориентациях печатных дорожек: концентричной, прямолинейной и поперечной, для пяти материалов: PEEK, PEEK CF, PA12, PA12 CF, PC.

Во всех случаях наблюдается одна и та же тенденция:

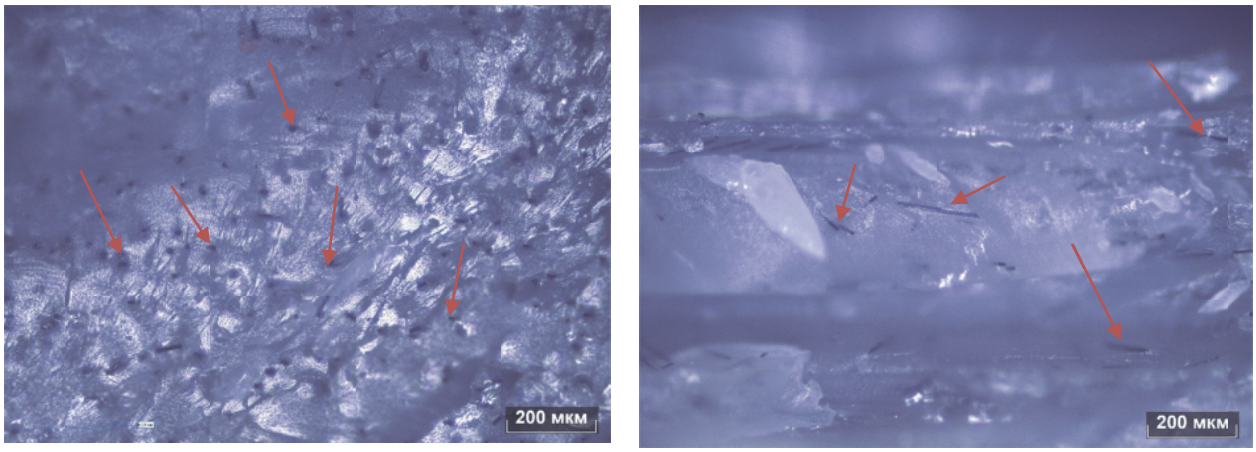
- Концентричная ориентация обеспечивает максимальные значения прочности.
- Прямолинейная ориентация дает несколько меньшие значения, но остается близкой к концентричной.
- Поперечная ориентация приводит к резкому снижению прочности для всех материалов.

Такое распределение подтверждает ключевую роль направленности заполнения: при концентричном заполнении наиболее эффективно воспринимаются растягивающие нагрузки; при поперечной ориентации доминируют межслойные связи, которые обладают существенно меньшей несущей способностью.

Направление печати является доминирующим фактором, разница между максимальной и минимальной ориентациями достигает 2–3 раз. Материалы с наполнением (CF) усиливаются (прочность растет на 30-40%) вдоль направления экструдируемых волокон, но при печати в поперечном направлении их прочность снижается на 43%. Это объясняется положением волокна в материале (рисунок 1) - волокно при печати с концентричным заполнением располагается вдоль оси приложения усилия и в результате работает полноценно на разрыв (рисунок 4 А), а при печати заполнения поперек, волокно располагается поперек оси приложения усилия и работает как дефект и концентратор (рисунок 4 Б). На рисунке 4 показан механизм работы мелкодисперсного углеволокна, при приложении усилия вдоль и поперек направлению печати.

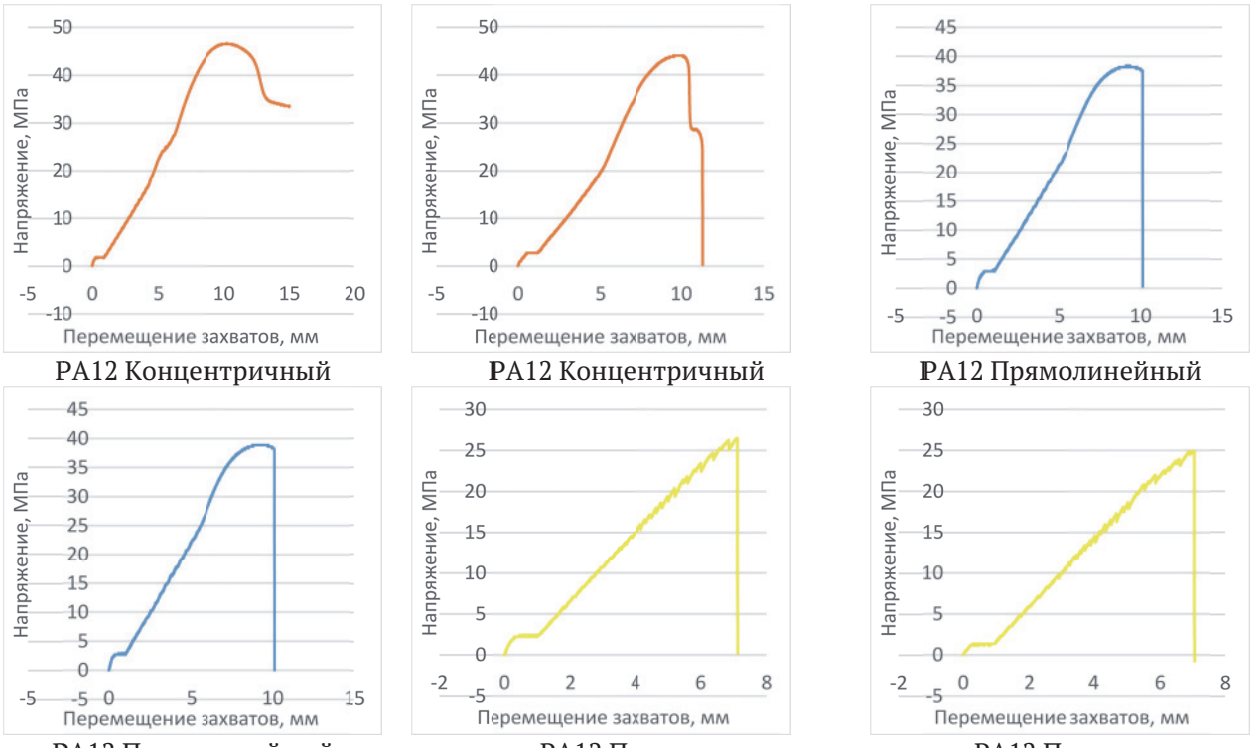
Анализ прочности при растяжении различных полимерных материалов позволил выявить выраженную зависимость механических характеристик от направления укладки нитей в процессе 3D-печати [14]. Однако оценка только максимального напряжения не отражает полноту поведения материала при статическом растяжении. Для более глубокого понимания механизмов деформации и разрушения образцов был проведён анализ диаграмм «напряжение– перемещение захватов» полученных для материалов PEEK, PEEK CF, PA12, PA12 CF и PC при трёх ориентациях печати: концентричной, прямолинейной и поперечной, пример таких диаграмм для PA12 показан на рисунке 5. Эти диаграммы позволяют проследить изменения напряжений на всех стадиях растяжения, оценить способность материала к пластическому течению и определить особенности разрушения образцов в зависимости от структурной ориентации.

Анализ кривых напряжение– перемещение захватов показывает, что независимо от типа материала и наличия армирования диаграммы имеют схожую структурную форму и включают повто-



А Б

Рисунок 4 – изломы образцов PEEK CF:
А – концентричное заполнение, Б – поперечное заполнение;
стрелками указаны выходы волокон на поверхность разрушения



PA12 Концентричный PA12 Концентричный PA12 Прямолинейный

PA12 Прямолинейный PA12 Поперек PA12 Поперек

Рисунок 5 – пример диаграмм напряжений для PA12

ряющиеся участки, отражающие универсальные механизмы деформации полимерных образцов, полученных методом 3D печати.

Первая область диаграммы соответствует начальному этапу приложения нагрузки, когда, вероятно, происходит распределение усилия от захватов к образцу, это можно отнести к особенностям испытательной машины. Рост напряжения здесь носит линейный характер, но его величина определяется не столько реальным растяжением материала, сколько процессом передачи нагрузки от захватов к внутренним слоям структуры. После завершения перераспределения нагрузка начинает восприниматься всем объёмом материала.

Второй участок кривой представляет собой линейно-упругую область, соответствующую упругому поведению материала в диапазоне малых деформаций. На этом этапе напряжение возрастает пропорционально удлинению, а деформация остаётся полностью обратимой. Однако по мере дальнейшего увеличения удлинения кривые постепенно выходят из строгой линейной зависимости, и начинает проявляться характерная кривизна графиков. Прямолинейная и концентричная ориентации продолжают демонстрировать устойчивый рост напряжения, что связано с тем, что экстру-

дированные дорожки воспринимают нагрузку вдоль своей оси и работают как непрерывные волокна. Напротив, поперечная ориентация начинает ограничиваться межслойной адгезией, которая значительно слабее прочности самих дорожек экструзии и не имеет прочного контакта между макромолекулами. В результате у образцов с поперечной экструзией не формируется участок плато и наблюдается хрупкое разрушение.

После выхода из линейной упругой области рост напряжения начинает замедляться, что является признаком начала развития вынужденной эластичности (пластической деформации). В полимерной матрице активируются процессы перестройки макромолекулярных цепей и перераспределения напряжений. Это соответствует переходу от полностью обратимой деформации к области, где в материале начинают возникать микроскопические необратимые изменения. Зона перехода характеризуется максимальными напряжениями. У ряда материалов в этом диапазоне наблюдается снижение напряжения при увеличении удлинения. Это явление соответствует деформационному размягчению, вызванному релаксацией внутренних напряжений, сформировавшихся при упругой деформации. Для 3D-печатных – структур оно также связано с локальным перераспределением нагрузки между дорожками, частичным выпрямлением нитей и стабилизацией межслойных контактов. Деформационное размягчение наиболее выражено у чистых полимеров (PA12, PEEK, PC), и практически отсутствует или сглажено у хрупких поперечных ориентаций и композитов с CF-наполнением, что хорошо согласуется с материалами, изложенными в [15].

Отдельно следует отметить, что некоторые из исследованных образцов не достигают стадий вынужденной эластичности и деформационного размягчения. Их разрушение происходит уже на линейной упругой области. Это скорее всего связано с развитием скрытых дефектов в межслойных контактах при увеличении деформации и ограниченной прочностью межфазных связей. В таких случаях механизм разрушения носит ярко выраженный хрупкий характер, и кривая напряжение– перемещение захватов обрывается без перехода к пластическому течению или вытяжению. Для печатных образцов это является типичным проявлением зависимости прочности от направления печати, отражающим доминирующую роль межслойной адгезии как наиболее слабого звена структуры.

Полученные результаты показывают, что механические свойства 3D-печатных термопластов определяются прежде всего направлением укладки дорожек и качеством межслойного взаимодействия [16]. Измеренные значения прочности подтверждают выраженную зависимость прочности от направления печати: при переходе от концентричной к поперечной ориентации прочность образцов значительно уменьшается в 2–3 раза, в зависимости от материала (таблица 4).

Таблица 4 – Прочность вдоль и поперек направления печати

Материал	**Концентричное, МПа**	**Поперечное, МПа**	**Снижение, %**
PEEK	89,1	46,0	48
PEEK-CF	97,1	40,5	58
PA12	45,4	25,7	43
PA12-CF	64,0	27,4	57
PC	63,1	19,9	68

Таким образом, ориентация слоёв сама по себе вносит решающий вклад в формирование механического отклика напечатанных образцов.

Армирование короткими углеродными волокнами приводит к выраженному упрочнению вдоль направления экструзии, однако совсем не улучшает, а иногда даже ухудшает прочность в поперечной ориентации (таблица 5), что показывает негативное влияния поперечного расположения наполнителя на прочность изделия.

ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований получены значения прочности. Особенно при продольной и концентрической ориентациях заполнения, прочностные характеристики напечатанных образцов сопоставимы с характеристиками для литых термопластов, что подтверждает перспективность технологии 3D-печати для изготовления функциональных конструктивных изделий. Од-

Таблица 5 – Сравнение чистых полимеров с ПКМ

Сопоставляемая пара	Концентричное	Прямолинейное	Поперечное
PEEK-CF к PEEK	+9 %	+35 %	−12 %
PA12-CF к PA12	+41 %	+30 %	+7 %

нако для формирования более полной картины механического поведения полимеров необходимо учитывать дополнительные эксплуатационные и технологические факторы. Существенное влияние оказывает влагопоглощение, способное изменять модуль и прочность, а также режимы постобработки, в частности термический отжиг, который способствует релаксации внутренних напряжений, повышению кристалличности и улучшению межслойной адгезии. Изучение этих факторов является важным направлением дальнейших исследований, позволяющим повысить надёжность и предсказуемость свойств печатных компонентов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кондрашов, С. В.* Влияние технологических режимов FDM-печати и состава используемых материалов на физико-механические характеристики FDM-моделей (обзор) / С. В. Кондрашов, А. А. Пыхтин, С. А. Ларионов, А. Е. Сорокин // Труды ВИАМ. – 2019. – № 10(82). – С. 34-49. – DOI 10.18577/2307-6046-2019-0-10-34-49.
2. *Alcock B., Andreassen E.* A review of recent advances in additive manufacturing with polymer materials // Digitalization and Sustainable Manufacturing: Twin Transition in Norway. Routledge, 2024. P. 251–299. DOI 10.4324/9781032693415-16.
3. *Sanei S. H. R., Popescu D.* 3D-Printed Carbon Fiber Reinforced Polymer Composites: A Systematic Review // Journal of Composites Science. 2020. Vol. 4, no. 3. Art. 98. DOI 10.3390/jcs4030098.
4. ГОСТ Р 59101–2020. Пластмассы. Филаменты для аддитивных технологий. Общие требования к технологическим процессам. – М.: Станадртинформ, 2020. – 7 с.
5. *Özen A., Auhl D., Völlmecke C., Kiendl J., Abali B. E.* Optimization of Manufacturing Parameters and Tensile Specimen Geometry for Fused Deposition Modeling (FDM) 3D-Printed PETG // Materials. 2021. Vol. 14, no. 10. Art. 2556. DOI 10.3390/ma14102556.
6. *Давидчук, В. А.* Методика проведения испытаний на растяжение изделий, изготовленных при помощи аддитивной технологии / В. А. Давидчук // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – № 6. – С. 233–238.
7. *Marabello G., Borsellino C., Di Bella G.* Carbon Fiber 3D Printing: Technologies and Performance—A Brief Review // Materials. 2023. Vol. 16, no. 23. Art. 7311. DOI 10.3390/ma16237311.
8. *Загидуллин, Р. С.* Экспериментальное исследование и способ повышения качества FDM 3D-печати за счет нивелирования вариабельности диаметра прутка филамента / Р. С. Загидуллин, В. Д. Жуков, Н. В. Родионов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – № 3. – С. 265-271.
9. *Goh G. D., Sing S. L., Yeong W. Y.* Process–Structure–Properties in Polymer Additive Manufacturing via Material Extrusion: A Review // Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences. 2020. Vol. 45, no. 2. P. 113–133. DOI 10.1080/10408436.2018.1549977.
10. *Маренкова, А. В.* Моделирование 3D-печатных образцов из пластика для испытания на растяжение / А. В. Маренкова и др. // Аддитивные технологии. – 2020. – № 4. – С. 24-30.
11. *Шульга, А. В.* Композиты. Часть 1. Основы материаловедения композиционных материалов / А. В. Шульга. – М.: НИЯУ МИФИ, 2013. – 96 с.
12. *Коротеева, Л. И.* Проектирование композиционных материалов с заданной структурой и свойствами / Л. И. Коротеева, А. В. Шаронов, П. А. Астахов, Н. А. Миронов, Сергеева А. В. // Пластические массы. – 2016. – № 5-6. – С. 15-16.
13. ГОСТ Р 27.303–2021 (МЭК 60812:2018). Надежность в технике. Анализ видов и последствий отказов. – М.: Российский институт стандартизации, 2021. – 66 с.
14. *Xin H., Chen Q., Zhang T., Yang L., Bei M.* Impact of raster angle on mechanical and surface properties of FDM carbon fiber reinforced polyether ether ketone // Engineering Plastics Application. 2025. Vol. 53, no. 3. P. 104-111. DOI 10.3969/j.issn.1001-3539.2025.03.014.
15. *Шишонок, М. В.* Современные полимерные материалы / М. В. Шишонок. – Минск: Вышэйшая школа, 2017. – 278 с. – ISBN 978-985-06-2902-9.
16. *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. P. 249–259. DOI 10.1016/j.matdes.2018.03.015.

IMPROVING THE QUALITY OF PRODUCTS MANUFACTURED BY 3D PRINTING FROM HIGH-TEMPERATURE POLYMERS AND POLYMER COMPOSITES

© 2026 A.I. Kolotiy[1], S.B. Ermakov[2]

[1] Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia
[2] Tyumen Industrial University,Tyumen, Russia

The study investigates the influence of material type and printing orientation on the mechanical properties of components produced by 3D printing from high-temperature thermoplastics and polymer composites, including PEEK, PEEK-CF, PA12, PA12-CF, and PC. A quality analysis of the 3D-printing process was carried out using the FMEA methodology, which made it possible to identify critical parameters such as filament quality, printing process stability, and infill strategy. Based on a full factorial experiment (5 materials × 3 infill patterns), tensile tests of 60 specimens were performed. It was established that printing orientation is the dominant factor determining mechanical performance: concentric and linear infill strategies provide the highest tensile strength, whereas transverse orientation reduces strength by a factor of 2–3. Carbon-fiber reinforcement increases strength along the extrusion direction by 30–50%, but does not improve—and in some cases reduces—strength in the transverse orientation due to the formation of stress concentrators. It is shown that, with an optimized printing trajectory, the mechanical properties of printed components become comparable to those of injection-molded thermoplastics. The obtained results confirm the key role of infill strategy and interlayer adhesion in determining the quality of 3D-printed components and outline directions for further optimization of 3D-printing of high-temperature polymers.

Keywords: polymer composite materials, interlayer adhesion, mechanical properties, tensile strength, FMEA, quality.

DOI: 10.37313/1990-5378-2026-28-5-201-209
EDN: TATXMU

REFERENCES

1. *Kondrashov, S. V.* Vliyanie tekhnologicheskih rezhimov FDM-pechati i sostava ispol'zuemyh materialov na fiziko-mekhanicheskie harakteristiki FDM-modelej (obzor) / S. V. Kondrashov, A. A. Pyhtin, S. A. Larionov, A. E. Sorokin // Trudy VIAM. – 2019. – № 10(82). – S. 34-49. – DOI 10.18577/2307-6046-2019-0-10-34-49.
2. *Alcock B., Andreassen E.* A review of recent advances in additive manufacturing with polymer materials // Digitalization and Sustainable Manufacturing: Twin Transition in Norway. Routledge, 2024. P. 251–299. DOI 10.4324/9781032693415-16.
3. *Sanei S. H. R., Popescu D.* 3D-Printed Carbon Fiber Reinforced Polymer Composites: A Systematic Review // Journal of Composites Science. 2020. Vol. 4, no. 3. Art. 98. DOI 10.3390/jcs4030098.
4. GOST R 59101–2020. Plastmassy. Filamenty dlya additivnyh tekhnologij. Obshchie trebovaniya k tekhnologicheskim processam. – M.: Stanadrtinform, 2020. – 7 s.
5. *Özen A., Auhl D., Völlmecke C., Kiendl J., Abali B. E.* Optimization of Manufacturing Parameters and Tensile Specimen Geometry for Fused Deposition Modeling (FDM) 3D-Printed PETG // Materials. 2021. Vol. 14, no. 10. Art. 2556. DOI 10.3390/ma14102556.
6. *Davidchuk, V. A.* Metodika provedeniya ispytanij na rastyazhenie izdelij, izgotovlennyh pri pomoshchi additivnoj tekhnologii / V. A. Davidchuk // Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. – 2022. – № 6. – S. 233–238.
7. *Marabello G., Borsellino C., Di Bella G.* Carbon Fiber 3D Printing: Technologies and Performance—A Brief Review // Materials. 2023. Vol. 16, no. 23. Art. 7311. DOI 10.3390/ma16237311.
8. *Zagidullin, R. S.* Eksperimental'noe issledovanie i sposob povysheniya kachestva FDM 3D-pechati za schet nivelirovaniya variabel'nosti diametra prutka filamenta / R. S. Zagidullin, V. D. Zhukov, N. V. Rodionov // Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. – 2023. – № 3. – S. 265-271.
9. *Goh G. D., Sing S. L., Yeong W. Y.* Process–Structure–Properties in Polymer Additive Manufacturing via Material Extrusion: A Review // Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences. 2020. Vol. 45, no. 2. P. 113–133. DOI 10.1080/10408436.2018.1549977.
10. *Marenkova, A. V.* Modelirovanie 3D-pechatnyh obrazcov iz plastika dlya ispytaniya na rastyazhenie / A. V. Marenkova i dr. // Additivnye tekhnologii. – 2020. – № 4. – S. 24-30.
11. *Shul'ga, A. V.* Kompozity. Chast' 1. Osnovy materialovedeniya kompozicionnyh materialov / A. V. Shul'ga. – M.: NIYaU MIFI, 2013. – 96 s.
12. *Koroteeva, L. I.* Proektirovanie kompozicionnyh materialov s zadannoj strukturoj i svojstvami / L. I. Koroteeva, A. V. Sharonov, P. A. Astahov, N. A. Mironov, Sergeeva A. V. // Plasticheskie massy. – 2016. – № 5-6. – S. 15-16.
13. GOST R 27.303–2021 (MEK 60812:2018). Nadezhnost' v tekhnike. Analiz vidov i posledstvij otkazov. – M.: Rossijskij institut standartizacii, 2021. – 66 s.
14. *Xin H., Chen Q., Zhang T., Yang L., Bei M.* Impact of raster angle on mechanical and surface properties of FDM carbon fiber reinforced polyether ether ketone // Engineering Plastics Application. 2025. Vol. 53, no. 3. P. 104-111. DOI 10.3969/j.issn.1001-3539.2025.03.014.
15. *Shishonok, M. V.* Sovremennye polimernye materialy / M. V. Shishonok. – Minsk: Vyshejshaya shkola, 2017. – 278 s. – ISBN 978-985-06-2902-9.
16. *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. P. 249–259. DOI 10.1016/j.matdes.2018.03.015.

Aleksandr Kolotiy, Postgraduate Student, Research Fellow at the STC «New Technologies and Materials».
E-mail: aleksandr.spbpu@gmail.com
Sergey Ermakov, Director of the Center for Technological Initiatives. E-mail: ermakovsb@tyuiu.ru