

Аддитивное производство изделий с пространственным армированием непрерывным волокном

© 2022

Торубаров Иван Сергеевич^{*1}, аспирант кафедры «Автоматизация производственных процессов»
Дроботов Алексей Владимирович¹, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Автоматизация производственных процессов»
Гущин Илья Александрович¹, аспирант кафедры «Автоматизация производственных процессов»
Вдовин Денис Сергеевич², кандидат технических наук,
доцент кафедры «Многоцелевые гусеничные машины и мобильные роботы»
Плотников Александр Леонтьевич¹, доктор технических наук,
профессор кафедры «Автоматизация производственных процессов»
Яковлев Алексей Андреевич¹, доктор технических наук,
профессор кафедры «Автоматизация производственных процессов»

¹Волгоградский государственный технический университет, Волгоград (Россия)

²Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Москва (Россия)

*E-mail: is.torubarov@gmail.com

Поступила в редакцию 19.04.2022

Принята к публикации 10.06.2022

Аннотация: Одной из ключевых задач в аддитивном производстве изделий из пластика по технологии послойного наплавления материала (*Fused Filament Fabrication, FFF*) является обеспечение их прочности. Малая прочность самих полимерных материалов и ярко выраженная анизотропия их механических свойств ограничивают применение объемной печати как альтернативы традиционным технологиям мелкосерийного производства. Самым перспективным решением задачи повышения прочности печатных изделий остается применение армирования непрерывным волокном. Известен ряд установок для аддитивного производства и программных продуктов, позволяющих подготовить управляющую программу для объемной печати с армированием, однако при всех достоинствах им, так же как и обычным печатным изделиям, присущ большой разброс прочности в различных направлениях (в плоскости слоя и перпендикулярно ему, в направлении выращивания). Сгладить анизотропию свойств изделий в технологии *FFF* и обеспечить им более широкие возможности применения в производстве конечных изделий в настоящей работе предлагается за счет армирования непрерывным волокном по пространственным траекториям. В ходе работы 3D-принтер с возможностью печати с применением пяти степеней свободы и программное обеспечение по подготовке управляющих программ модернизированы под процесс печати с укладкой непрерывного волокна, выработаны режимы печати с армированием, изготовлены образцы для стандартных испытаний на статический изгиб. Установлено, что армирование повышает прочность печатного образца, при этом предложенный способ объемного армирования обеспечивает меньшую прочность на изгиб по сравнению со стандартным плоским армированием с однонаправленной укладкой волокон, однако разрушение объемно армированных образцов происходило без ярко выраженного расслоения.

Ключевые слова: аддитивные технологии; *FFF*; 3D-печать; 5D-печать; армирование; непрерывное углеволокно.

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке гранта фонда «Сколково» № МГ18/20 и гранта РФФИ № 20-37-90133.

Для цитирования: Торубаров И.С., Дроботов А.В., Гущин И.А., Вдовин Д.С., Плотников А.Л., Яковлев А.А. Аддитивное производство изделий с пространственным армированием непрерывным волокном // *Frontier Materials & Technologies*. 2022. № 2. С. 92–104. DOI: 10.18323/2782-4039-2022-2-92-104.

ВВЕДЕНИЕ

Текущий этап развития аддитивных технологий характеризуется активным проникновением в различные отрасли производства и определением номенклатуры изделий, для изготовления которых целесообразно применить аддитивный способ вместо традиционных литья или обработки резанием. Этот процесс имеет ряд ограничений, связанных с принципиально неустранимыми особенностями аддитивного производства: температурной усадкой расплава материала после его укладки, слоистой структурой получаемых изделий, невысокой производительностью. Кроме того, в техноло-

гии послойного направления материала (*Fused Filament Fabrication, FFF*) очень существенным остается такой недостаток, как низкая прочность на границах раздела последовательно наложенных слоев.

В статье [1] кратко описаны некоторые известные способы борьбы с этой проблемой: оптимизация режимов печати, применение высокотемпературных и наполненных короткими армирующими волокнами материалов, создание объектов не из плоских, а из изогнутых слоев, в том числе с применением методов многокоординатной печати.

Использование пластика, наполненного короткими волокнами, остается самым простым и экономичным

подходом, что объясняет огромное количество соответствующих филаментов на рынке материалов для FFF-печати. Однако независимо от степени наполнения полимера максимум прочности, который оказался доступен для печатных изделий, – это показатели изделий, изготовленных традиционными методами, такими как литье под давлением или пултрузия [2].

При этом остается актуальной проблема разной прочности в зависимости от ориентации слоев. Существует большое количество исследований, показывающих сильный разброс прочности печатных образцов в зависимости от их ориентации на столе 3D-принтера. Наиболее ярко проблему анизотропии можно проследить по результатам стандартных испытаний на растяжение и изгиб, в которых одна группа образцов располагается на столе плашмя (и разрушающая нагрузка работает на деформацию всех слоев одновременно), а другая группа – вертикально (и разрушающая нагрузка вызывает быстрый разлом образца по слоям). Так, в обзорной работе [3] указывается разность прочности в этих двух направлениях от 30 до 77 % для разных пластиков (в первую очередь полиамидов и ABS-пластика) при испытаниях на растяжение.

В то же время анизотропия характерна и для «наполненных» филаментов – ABS с короткими волокнами до 82 % при растяжении [3] и от 45 до 207 % при изгибе [4]. В исследовании [5] показана анизотропия образцов из чистого полиамида (PA) и полиамида с короткими волокнами (PA/CF), которая составила 175 и 244 % соответственно при испытаниях на растяжение, а при испытаниях на изгиб разность прочности в двух направлениях составила 205 % для PA и 317 % для образцов из PA/CF. Кроме того, в данной работе отмечается рост прочности плоско ориентированного образца на изгиб при добавлении коротких волокон с 110 до 142 МПа, однако при литье под давлением образцы из PA показывают 122 МПа (на 11 % больше печатного образца), а из PA/CF – 173 МПа (на 22 % больше).

Аналогичные результаты демонстрируют и испытания образцов из высокотемпературных пластиков: для ULTEM 9085 разница в прочности 84–86 % при растяжении и 68 % при изгибе, по экспериментальным данным работ [6; 7]; для PEEK – 395–730 % при растяжении и 787 % при изгибе, по данным обзора [8]. Согласно [9], добавление коротких углеродных волокон позволило увеличить межслойную прочность PEEK при разрыве с 6,96 до 36,28 МПа, но получить больший прирост возможно только за счет дополнительной термообработки в печи.

Другие, более сложные в реализации, подходы обеспечивают в отдельных случаях существенный прирост прочности, а применение многоосевой печати даже позволяет сгладить анизотропию прочностных свойств объекта. В публикациях [1; 10] были рассмотрены некоторые из таких способов и предложен новый способ пятиосевой печати с использованием наклонно-поворотного модуля вместо плоского стола, а также показано, что за счет изменения формы и ориентации слоев печатного изделия можно добиться двукратного повышения прочности на том же материале. Впрочем, зачастую многоосевая печать реализуется как выращивание изделия не плоскими, а изогнутыми слоями с помощью многоосевого манипулятора, как в работе [11]. На при-

мере изделия в виде изогнутой полосы авторами также демонстрируется двух- и трехкратное повышение прочности на разрыв (в зависимости от ориентации) за счет непрерывного вытягивания линий материала вдоль линии нагружения образца [11].

Тем не менее полимер есть полимер: если оригинальное металлическое изделие серьезно нагружено, эффективным «печатным» аналогом для него может быть лишь модель, спеченная из металлического порошка. Самым перспективным способом дальнейшего повышения прочности изделий из пластика остается их армирование с помощью непрерывного волокна. Наиболее полный обзор разработанных методов укладки термопластика с непрерывным волокном приведен в [12], а в [13] рассмотрены некоторые важные патенты в этой области.

Для уменьшения количества пор в жгуте волокон и для того, чтобы волокно как можно лучше соединилось с основным (полимерным) материалом, чаще всего применяется армирующий материал в виде препрега, т. е. жгута или ленты из волокон, предварительно пропитанных связующим материалом (чаще всего применяют PA и PEEK). Известны способы экструзии препрега (например, технология *Markforged*), коэкструзии препрега с пластиком (*Anisoprint*), «консолидации на месте» (технология *Arevo*, препрег нагревается лазером и соединяется с платформой прижимным роликом).

Согласно официальным данным *Markforged*, прочность образцов, армированных непрерывным углеволокном, составляет около 800 МПа при растяжении и 540 МПа при изгибе, а для непрерывного стекловолокна – 590 и 200 МПа соответственно. Материалом пропитки волокна и внешних контуров образца выступал *Onyx* (PA6 с рубленым углеволокном). Следует отметить, что эти данные получены для образцов, заполненных волокном сплошную, причем волокно ориентировалось в одном направлении (по длине образца). В исследовании [14], основанном на технологии *Markforged*, для образцов с 20 % заполнения угле- и стекловолокном (также в одном направлении) был получен предел прочности при растяжении, равный 104 и 83 МПа. При этом образцы, армированные стекловолокном в других направлениях (45 и 90° к направлению разрывающей нагрузки) показали 37 и 22 МПа, т. е. 44 и 27 % от прочности продольно армированных образцов.

В другом исследовании по технологии *Markforged* [15] приводятся экспериментальные значения прочности при растяжении сплошную заполненных образцов – 598 МПа для однонаправленного армирования (по длине образца) и от 294 до 211 МПа для вариантов армирования, где продольные армирующие волокна чередовались с волокнами, расположенными под углом, т. е. от 49 до 35 % от прочности продольно армированных образцов.

В работе [16] по технологии *Arevo* использовался принципиально иной метод сплавления слоев образца, сплошную заполненного филаментом из 50 % непрерывного углеволокна и 50 % высокопрочного PEEK-пластика. Волокна ориентировались только двумя способами: однонаправленным и «квазиизотропным» (чередование слоев, в которых волокно ориентировалось под углами –45/90/45/0°). Однонаправленные образцы показали прочность 1420 МПа при растяжении и 1173 МПа

при изгибе, квазиизотропные – 479 и 492 МПа соответственно, т. е. 34 и 42 % от прочности продольно армированных образцов.

При сопоставлении последнего исследования с данными обзора [8] видно, что использование армирования вкупе с новым способом сплавления позволило примерно в 14 раз повысить прочность при растяжении и в 8 раз при изгибе, однако ценой такого достижения становится значительное усложнение оборудования. По существу, аддитивная установка *Arevo* по принципу работы, производительности и цене ближе к оборудованию для автоматизированной выкладки препрегов [17], нежели к «композитным» 3D-принтерам.

Кроме того, описанные выше методы не предлагают решения первичной проблемы: низкой прочности печатных изделий в направлении, перпендикулярном плоскости построения. Все данные об анизотропии армированных образцов в приведенных публикациях отражают ориентацию волокон в плоскости слоя, но не разницу прочности в горизонтальном и вертикальном направлениях.

Сглаживание анизотропии механических свойств печатного объекта требует принципиального изменения его структуры, и это можно сделать только за счет его выращивания неплоскими слоями на основе процесса печати, использующего дополнительные степени свободы (наклон и вращение) изделия в процессе производства [18]. Этот подход уже показал свою действенность для изделий из чистого *ABS*-пластика [1].

Аналогичный способ укладки армирующих волокон описан в работе [19], авторы которой использовали filament *Markforged* с непрерывным волокном для армирования образцов из *PLA*. На первом этапе печати образца из плоских слоев основного материала (*PLA*) строился сердечник прямоугольного сечения, затем сердечник наклонялся на 90° , и по длине образца на сердечник «навивался» основной материал и армирующие волокна. В работе испытывались на растяжение и изгиб 4 вида образцов: с «объемным» расположением волокон, навитых на сердечник в 2 слоях под углом в 0 (однонаправленное армирование) и $\pm 45^\circ$, без армирования с «объемным» расположением основного материала (с ориентацией нитей *PLA* под углом $-45/0/45^\circ$), а также контрольные образцы, построенные по стандартной технологии печати плоскими слоями с однонаправленным расположением армирующих волокон. Представленные данные показывают некоторый прирост прочности как за счет добавления волокон в образец, состоящий из объемных слоев, так и за счет объемного расположения волокон по сравнению с плоским расположением. Однако из-за отсутствия «плоскослойных» образцов с различной ориентацией армирующего слоя

нельзя в полной мере соотнести показатели объемно армированных образцов с плоско-армированными.

В исследовании [20], в отличие от предыдущей публикации, не только изложен подход к объемному армированию полимерного изделия, но и описан способ автоматической подготовки управляющей программы 3D-принтера, основанный на конечно-элементном моделировании напряжений в теле объекта. На примере нескольких моделей сложной формы авторами показано однозначное преимущество объемного армирования. Тем не менее описанный способ подготовки программы и печати самого изделия малопроизводителен, требует печати подушки из вспомогательного (растворимого) материала для правильной ориентации модели на наклонно-поворотном столе. Все это ограничивает область применения данного подхода преимущественно изготовлением сложных форм наподобие представленных в работе.

Цель работы – исследование влияния армирования печатного изделия непрерывным волокном (в частности, волокна, уложенного по пространственным координатам) на его прочность при статическом изгибе.

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для изготовления образцов, армированных непрерывным волокном, с выкладкой материала по пространственным траекториям использовался *FFF*-принтер *Stereotech* модели *520 Fiber*. Базовая модель принтера *520* предусматривает возможность замены плоского стола на наклонно-поворотный модуль для печати с применением суммарно пяти степеней свободы печатающей головки и изделия. В данной модификации принтер дополнительно оснащен печатающей головкой для подачи и укладки непрерывного волокна при печати в стандартном 3D-режиме и при использовании пятиосевого режима. Стандартная трехосевая печать на столе осуществляется так же, как на любом другом *FFF*-принтере.

Для оценки точности печати и прочностных свойств полученных изделий на опытном образце принтера была изготовлена серия образцов методами стандартной *FDM/FFF*-печати и многоосевой печати. Форма тестового образца, порядок прочностных испытаний и методика обработки результатов определены ГОСТ 4648-2014 «Пластмассы. Метод испытания на статический изгиб». Образец изображен на рис. 1, его номинальные размеры: длина $l=95\pm 2$ мм, ширина $b=15\pm 0,2$ мм, высота $h=8\pm 0,2$ мм.

На рис. 2 показана структура армирования тестовых образцов трех видов: группа 1 – образцы, изготовленные

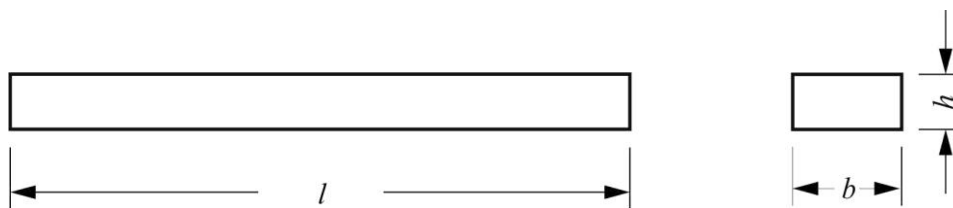


Рис. 1. Образец для испытаний на статический изгиб
Fig. 1. A specimen for static bending tests

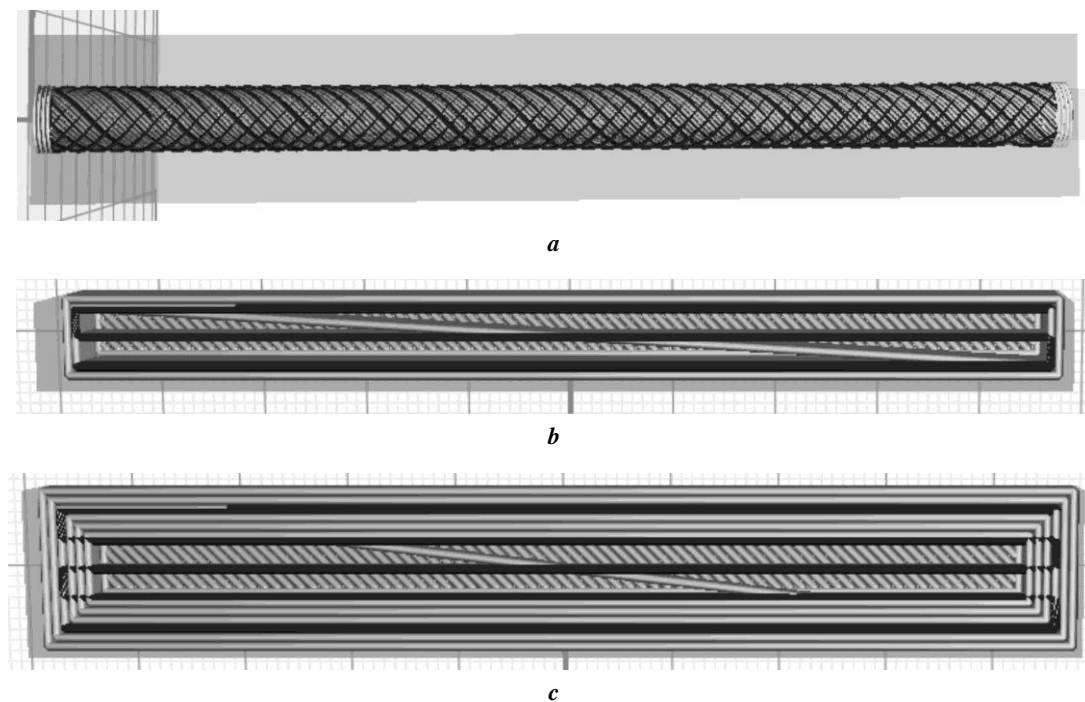


Рис. 2. Структура армирования образцов разных групп: **a** – группа 1; **b** – группа 2; **c** – группа 3
Fig. 2. The reinforcement structure for specimens of various groups: **a** – group 1; **b** – group 2; **c** – group 3

по технологии 5D-печати со спиралевидной укладкой непрерывного волокна; группы 2 и 3 – стандартные 3D-печатные образцы с плоской укладкой волокна поперек направления приложения нагрузки (группа 2, рис. 2 b) и вдоль этого направления (группа 3, рис. 2 c). Промежуток между линиями волокна примерно равнялся ширине линии; таким образом, волокном заполнено 50 % площади каждого слоя.

На рис. 3 а обозначены геометрические параметры цилиндрической армирующей структуры, а на рис. 3 b указано расположение армирующих волокон в кольцевом сечении каждого армирующего слоя. Толщина каждого слоя составила 0,125 мм (всего 7 цилиндрических армирующих слоев).

На рис. 4 изображены плоские армирующие структуры и соответствующие им схемы плоского армирующего слоя с расположением отдельных волокон: рис. 4 а – образец группы 2 (с поперечным армированием), рис. 4 b – образец группы 3 (с продольным армированием). Толщина каждого слоя составила 0,2 мм (всего 20 и 14 плоских армирующих слоев соответственно в образцах групп 2 и 3).

Для изготовления всех образцов использовались следующие материалы: полимерная основа – стеклонанополненный полиамид PA12, армирование – непрерывное углеволокно, пропитанное термопластичным связующим на основе полиамида.

Процесс 3D-печати изделия по пяти координатам схематично изображен на рис. 5. В общем виде процесс состоит из трех этапов: производство поддерживающей оснастки на цилиндрической приемной поверхности, создание на нем первой части изделия (сердечника цилиндрической или любой другой формы), последующее наложение материала на первую часть по пространственным траекториям.

Для подготовки управляющих программ (*g-code*) по 3D-моделям практически произвольной формы разработано собственное программное обеспечение *STE Slicer*.

Всего было изготовлено 15 тестовых образцов: 5 – по технологии пятиосевой печати с укладкой (навивкой) непрерывного волокна, 10 – по технологии стандартной трехосевой печати с укладкой непрерывного волокна в одной из двух продольных плоскостей образца (по 5 образцов для каждого направления укладки). Образцы рассортированы на 3 группы и маркированы следующим образом: 1.*n* – пятиосевые образцы, 2.*n*, 3.*n* – трехосевые образцы с укладкой волокна в плоскостях *YZ*, *XY* соответственно; *n*=1...5. Плотность заполнения слоев пластиком и волокном для всех образцов составила 30 % от объема. Заполнение образцов группы 1 пластиком и волокном производилось крест-накрест прямыми линиями под углом $\pm 45^\circ$ от продольной оси образца. Заполнение образцов групп 2 и 3 пластиком производилось аналогично, волокно укладывалось только в направлении продольной оси образца в связи с технологическими ограничениями.

Отсчет объема использованного волокна производился с помощью счетчика экструдера (по количеству оборотов двигателя подачи). Суммарная длина волокна в каждом образце группы 1: 9593 мм; группы 2: 9242 мм (на 3,66 % меньше); группы 3: 9414 мм (на 1,86 % меньше). На рис. 6 представлены фотографии полученных образцов.

Контроль тестовых образцов производился путем измерения линейных размеров и их сверки с приведенным в ГОСТ допуском, а также оценки внешнего вида (отсутствие значительных дефектов, трещин, пор, заметных отклонений от номинальной формы).

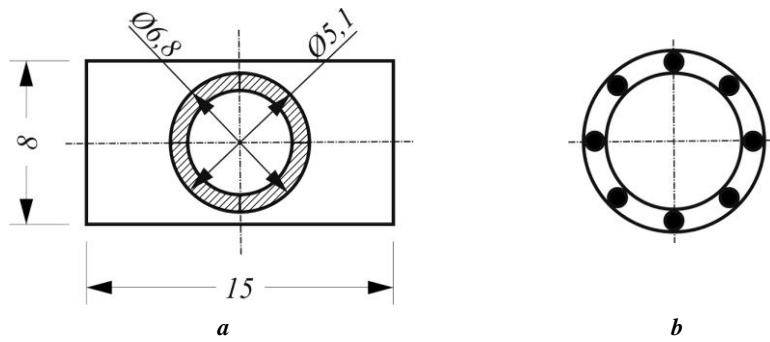


Рис. 3. Геометрические параметры цилиндрического армирования образца группы 1:
a – расположение и размеры зоны армирования относительно полимерной матрицы;
b – расположение отдельных армирующих волокон в кольцевой зоне армирования
Fig. 3. Geometric parameters of cylindrical reinforcement of the 1st group specimen:
a – the location and sizes of a reinforcement area regarding a polymer matrix;
b – the location of separate fibers in a circular reinforcement area

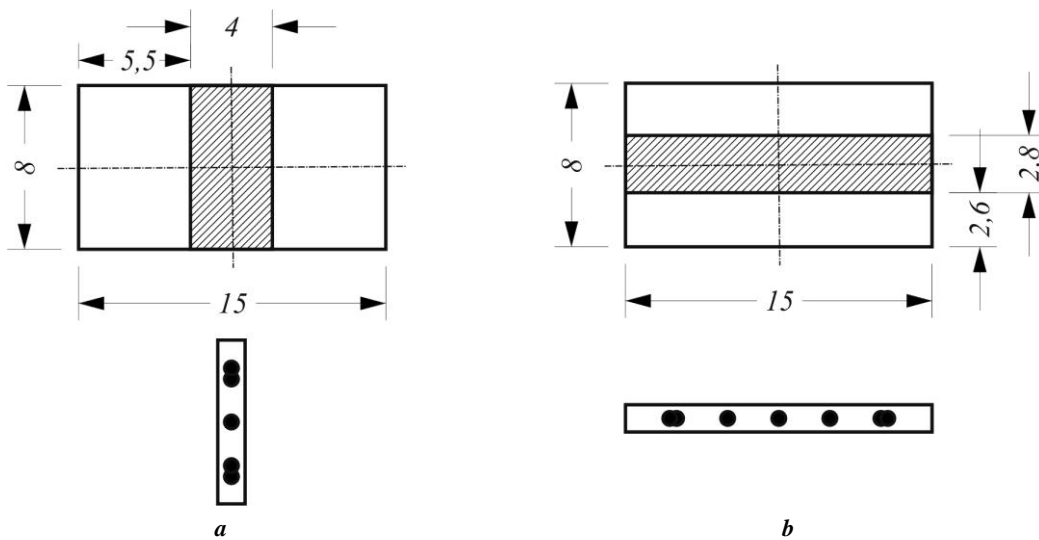


Рис. 4. Геометрические параметры плоского армирования: **a** – образец группы 2; **b** – образец группы 3
Fig. 4. Geometric parameters of flat reinforcement: **a** – a specimen of group 2; **b** – a specimen of group 3

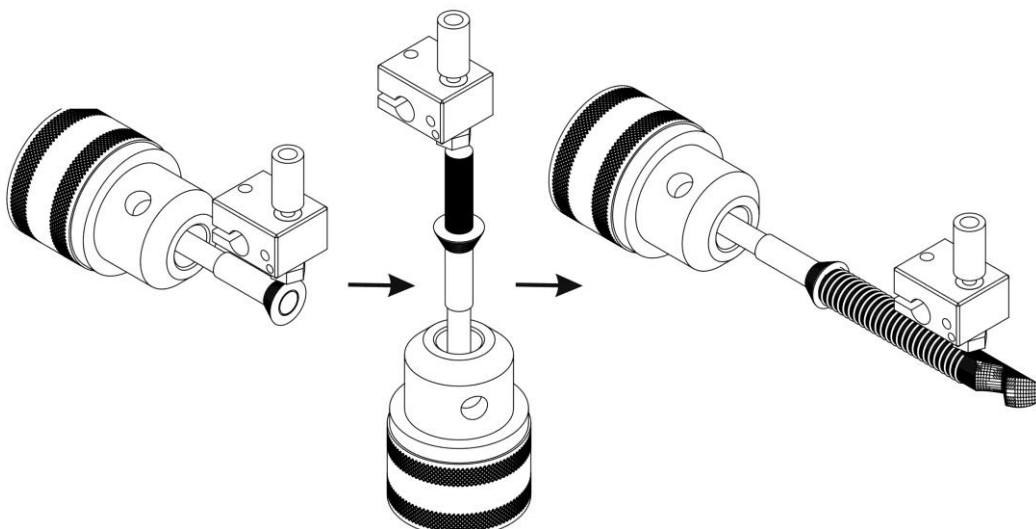
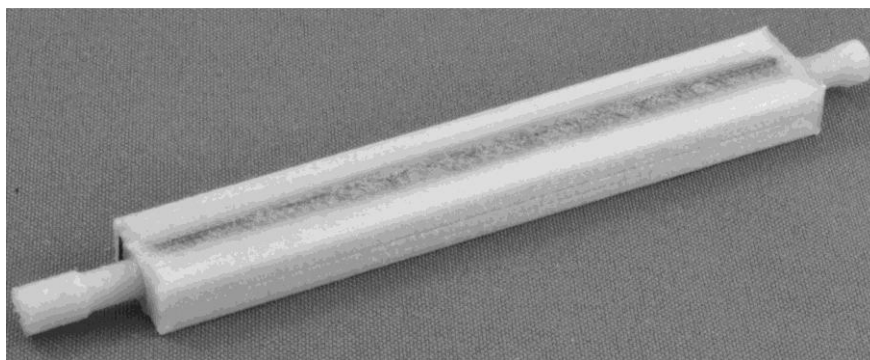
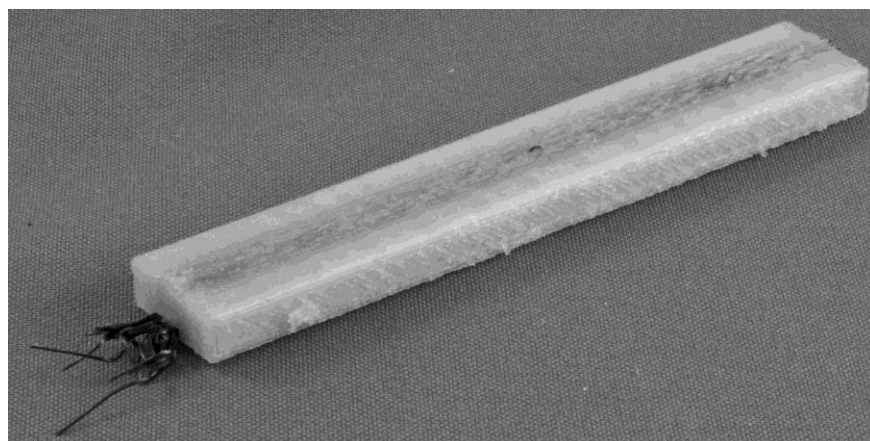


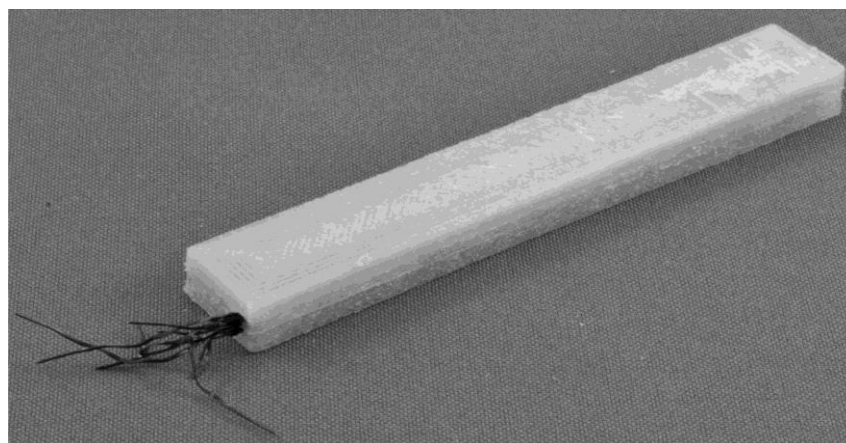
Рис. 5. Схема процесса 3D-печати по 5 координатам
Fig. 5. The process scheme of 3D printing according to five axis



a



b



c

Рис. 6. Печатные образцы для испытаний на статический изгиб:
a, b, c – первые образцы из групп 1, 2 и 3 соответственно
Fig. 6. Printed specimens for static bending tests:
a, b, c – first specimens of groups 1, 2, and 3 respectively

Измерения длины произведены с помощью штангенциркуля с электронным отсчетом с погрешностью измерения $\pm 0,01$ мм, измерения ширины и высоты образцов – с помощью микрометра с электронным отсчетом с погрешностью измерения $\pm 0,001$ мм. Обработка результатов произведена в соответствии с ГОСТ Р 8.736-2011 «Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения».

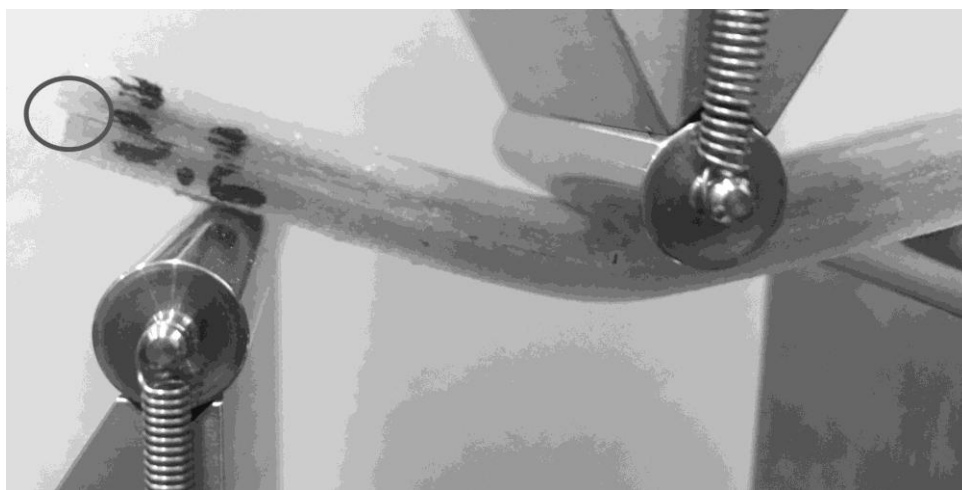
РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Результаты испытаний образцов получены в лаборатории автономной некоммерческой образовательной организации высшего образования «Сколковский институт науки и технологий». Испытания проводились с параметрами, указанными в таблице 1.

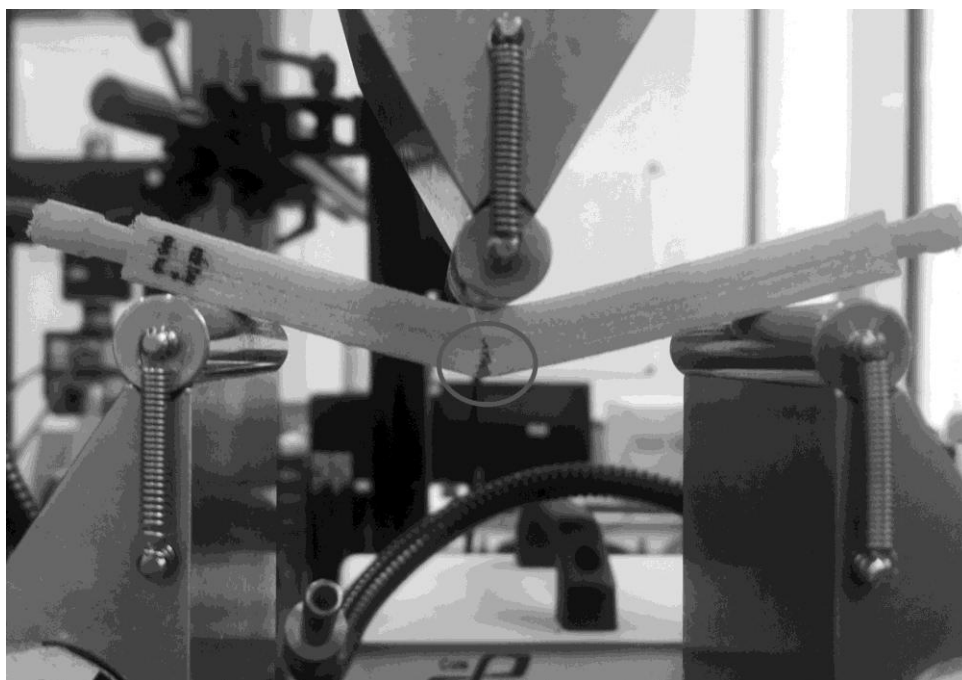
Образцы в процессе испытания показаны на рис. 7. В случае образцов, изготовленных по пятиосевой технологии (с цилиндрическим армированием, рис. 7 а), разрушение (разрыв нижних слоев) происходило равномерно,

Таблица 1. Параметры испытаний печатных образцов
Table 1. Test parameters of printed specimens

Скорость испытаний	1 мм/мин
Испытательная машина	Instron 5969 (датчик силы на 1 кН)
Оснастка	Оснастка на трехточечный изгиб WTF-FL-173. Расстояние между опорами 71 мм (соотношение $L:h=8:1$), диаметры роликов 10 мм
Измерение прогиба	На основании данных о перемещении траверсы. Учитывается поправка на податливость машины, равная 0,2746 мм/кН
Определение модуля	Путем аппроксимации зависимости изгибающего напряжения от относительной деформации методом наименьших квадратов между точками с относительной деформацией, равной 0,05 и 0,25 %



a



b

Рис. 7. Печатные образцы в процессе испытаний:

a – образец группы 1; *b* – образец группы 3

Fig. 7. Printed specimens in the process of testing:

a – a specimen from group 1; *b* – a specimen from group 3

без потери цельности всего образца. Напротив, для плоскоармированных образцов (рис. 7 б) характерным оказалось почти мгновенное расслоение образца по границе раздела «пластик/волокно».

В ходе испытания образцы последовательно прошли четыре стадии разрушения, как показано на рис. 8:

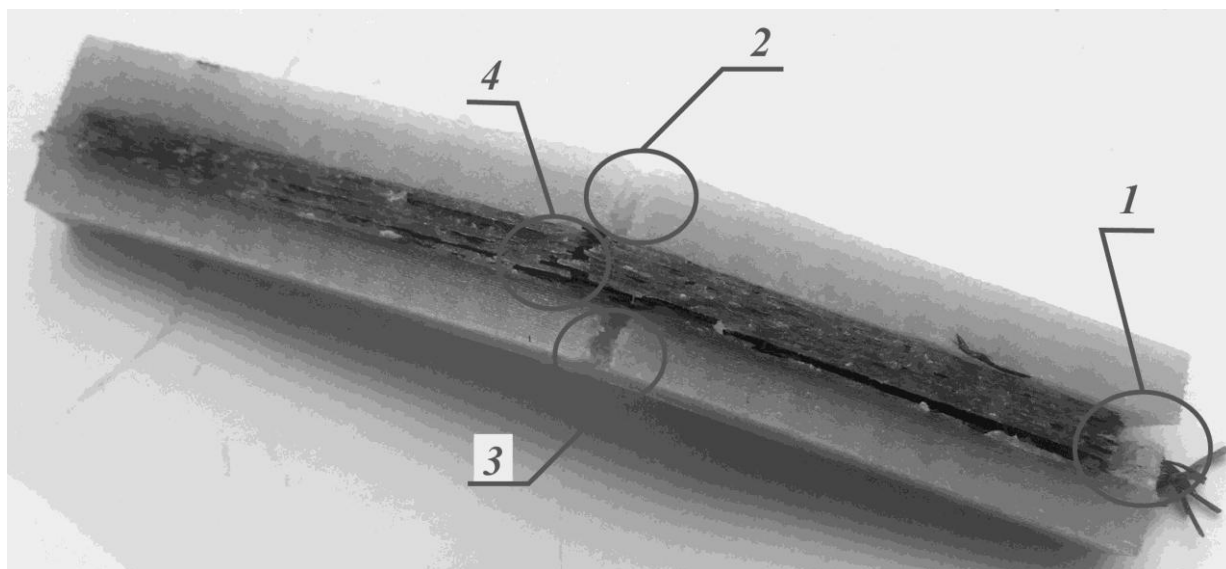
1) отслоение пластика от области, содержащей волокно, и разрушение части волокон внутри армированной зоны;

2) разрушение пластика со стороны растяжения;

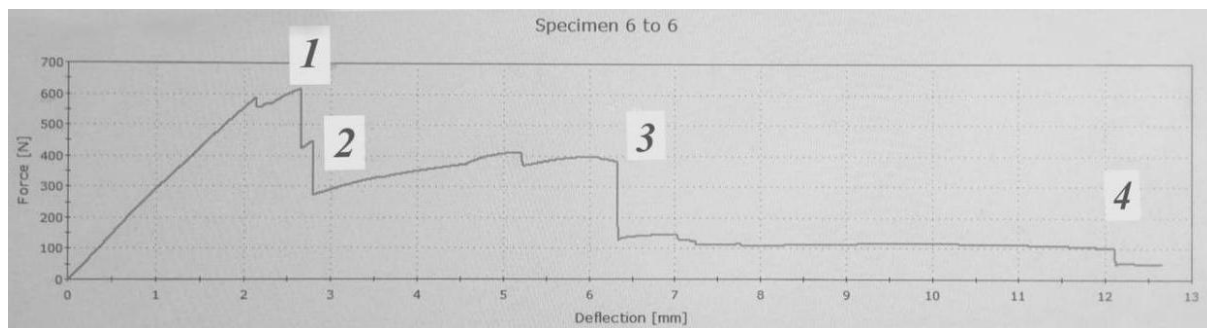
3) разрушение второй пластиковой части со стороны растяжения;

4) разрушение содержащей волокно части со стороны растяжения.

На рис. 8 б изображен качественный вид кривой нагружения. Четыре пика на ней соответствуют описанным выше стадиям. За критическое значение нагрузки для каждого образца выбрано значение силы в точке 1, данные величины занесены в таблицу 2 с результатами испытаний.



a



b

Рис. 8. Характер разрушения печатных образцов:
a – образец группы 2 с обозначением последовательности разрушений;
b – соответствующая ему кривая нагружения

Fig. 8. The destruction nature of printed specimens:
a – a specimen of group 1 with designation of break-ups' sequence; b – corresponding load curve

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Согласно методике расчета, изложенной в стандарте, предел прочности при изгибе определяется по формуле

$$\sigma = \frac{3FL}{2bh^2},$$

где $L=71$ мм – расстояние между опорами;
 F – максимальная сила;

b – ширина образца;

h – толщина образца.

Для волокнистых и ортотропных материалов при поперечном изгибе важно оценить не только критическое значение нормальных напряжений, распределенных по линейному закону поперек толщины образца, но и величину касательных напряжений, которые распределяются параболически. Их максимум приходится на нейтральный слой посередине толщины образца, оценить его можно с помощью формулы Журавского:

Таблица 2. Результаты контроля и испытаний образцов
Table 2. The results of control and tests of specimens

Группа 1 – образцы с объемным армированием							
Образец	Длина <i>l</i> , мм	Толщина <i>h</i> , мм	Ширина <i>b</i> , мм	Максимальная сила <i>F</i> , Н	Предел прочности по изгибу σ , МПа	Предел прочности по расслоению τ , МПа	Модуль <i>E</i> , ГПа
1.1	95,28	8,25	15,13	398,8	41,24	2,40	1,10
1.2	95,35	8,23	14,79	432,5	45,98	2,66	1,22
1.3	95,40	8,19	14,63	439,3	47,68	2,75	1,12
1.4	95,28	8,37	14,81	422,0	43,32	2,55	1,06
1.5	95,47	8,37	14,76	427,8	44,06	2,60	0,784
Среднее				424,1	44,455	2,59	1,056
Стандартное отклонение среднего				15,5	2,473	0,13	0,16
Группа 2 – образцы с плоским «вертикальным» армированием							
2.1	95,04	8,78	15,41	560,1	50,21	3,10	1,52
2.2	95,10	9,16	15,53	560,1	45,78	2,95	1,05
2.3	95,16	8,61	15,41	616,6	57,48	3,49	2,85
2.4	95,11	8,95	15,61	523,0	44,55	2,81	0,86
2.5	95,06	8,93	15,40	537,8	46,64	2,93	0,99
Среднее				559,5	48,932	3,06	1,46
Стандартное отклонение среднего				35,6	5,226	0,26	0,82
Группа 3 – образцы с плоским «горизонтальным» армированием							
3.1	95,19	8,35	14,76	792,7	82,04	4,82	1,44
3.2	95,12	8,14	15,18	745,7	78,96	4,53	1,36
3.3	95,12	8,47	14,74	785,5	79,11	4,72	1,72
3.4	95,07	8,43	14,76	752,7	76,42	4,54	1,63
3.5	95,15	8,68	14,83	797,6	76,03	4,65	1,32
Среднее				774,9	78,510	4,65	1,49
Стандартное отклонение среднего				23,9	2,426	0,13	0,17

$$\tau = \frac{Q_y S_x}{J_x b},$$

где Q_y – перерезывающая сила в образце, $Q_y = \frac{F}{2}$ для трехточечного изгиба;

$S_x = \frac{h}{2} \cdot b \cdot \frac{h}{4}$ – статический момент поперечного сечения образца;

$J_x = \frac{bh^3}{12}$ – изгибный (осевой) момент инерции сечения;

b – ширина образца;
 h – толщина образца.

Вычисляя по данным таблицы 2, получим следующие средние значения прочности для образцов каждой группы: $\sigma_1=44,46$ МПа, $\sigma_2=48,93$ МПа, $\sigma_3=78,51$ МПа, $\tau_1=2,59$ МПа, $\tau_2=3,06$ МПа, $\tau_3=2,59$ МПа.

В результате дополнительных испытаний образцов из PA12 без волокна установлено, что неармированный образец, имеющий прямоугольное сечение 8×15 мм, изготовленный на пятиосевом 3D-принтере, при трехточечном изгибе с расстоянием между опорами 64 мм выдерживает нагрузку $F_{HA}=292$ Н, показывая прочность на изгиб:

$$\sigma_{HA} = \frac{3F_{HA}L}{2bh^2} = \frac{3 \cdot 292 \text{ Н} \cdot 64 \text{ мм}}{2 \cdot 15 \text{ мм} \cdot (8 \text{ мм})^2} = 29,2 \text{ МПа},$$

где $L=64$ мм – расстояние между опорами;
 $b=15$ мм – ширина образца;
 $h=8$ мм – высота образца.

Эксперимент согласуется со справочными данными¹, согласно которым экструзионный PA12 имеет прочность в диапазоне 50...65 МПа, а также соответствует сравнительным данным для 3D-печатного PA12 порядка 35 МПа, согласно [21]. Максимальное касательное напряжение, в зависимости от различных теорий прочности, можно принять в соотношении

$$\tau_{max} = (0,5...0,6)\sigma_{max}.$$

В таком случае максимальное касательное напряжение для PA12 составит не менее 14,6 МПа. Однако по результатам испытаний образцов группы 3, где разрушение произошло по расслоению в нейтральном слое по неармированному пластику, можно сделать вывод, что при 3D-печати межслоевая прочность значительно ниже, чем прочность сплошного PA12, полученного литьем или экструзией.

Таким образом, прирост прочности на изгиб за счет армирования составил от 50 до 150 % (увеличение в 1,5 и 2,5 раза) в зависимости от схемы армирования. Плоско армированные образцы показали разброс значений прочности в 1,5 раза. Наибольший показатель (78,51 МПа), достигнутый в случае «горизонтального» армирования, соответствует наиболее рациональной схеме армирования для нагрузки в виде трехточечного изгиба, причем для плоско армированных образцов волокна располагались не в виде сетки, а в виде прямых линий по длине образца (однонаправленный композит).

Армированные образцы из групп 2 и 3, изготовленные методом стандартной 3D-печати, с укладкой материала (пластика и волокна) в плоских слоях, показывают разницу прочности в 1,6 раза – от 48,93 МПа при «вертикальном» армировании (образцы группы 2) до 78,51 МПа при «горизонтальном» армировании (образцы группы 3). Стоит отметить, что «вертикальное» армирование при данном направлении приложения нагрузки – нерациональный вариант. «Горизонтальная» схема армирования среди трех рассмотренных является более подходящей с точки зрения повышения прочности.

Следует отметить, что полученное при указанных условиях значение уступает результатам *Markforged* (540 МПа), полученным для образцов с габаритами около 114×3×10 мм. Такая разница обусловлена тем, что у изготовленных образцов была армирована совсем небольшая часть от их объема (рис. 3 и 4), да и та часть заполнена армирующими волокнами лишь на 50 %, в то время как образцы *Markforged* имеют сплошное армирование.

В образцах, изготовленных по технологии 5D-печати, благодаря симметричному расположению армирующего слоя прочность при изгибе будет одинаковой, независимо от поворота образца вокруг своей оси. В то

же время абсолютное значение прочности для них уступает числам, полученным для образцов с «горизонтальным» армированием.

Вполне ожидаемо, что при сглаживании анизотропии механических свойств (симметричном 5D-армировании) результирующий показатель прочности будет находиться на среднем уровне, а не на уровне наилучшего результата для однонаправленных образцов, что и подтверждено экспериментально. Тем не менее при испытаниях 5D-образцов были отмечены следующие факторы, отрицательно влияющие на величину предела их прочности: неоптимальная для данного вида нагружения ориентация волокон в армирующем слое (сетка вместо прямых линий); несплошное армирование.

Кроме того, из-за особенностей технологии 5D-печати давление, оказываемое соплом на предыдущий слой при спиральной выкладке волокна, было меньше, чем при прямолинейной выкладке в плоских слоях. Это обстоятельство ухудшило соединение волокон между собой и слоями пластика, что также уменьшило прочность.

ВЫВОДЫ

1. Применение непрерывного углеволокна для армирования полимерного изделия, полученного методом объемной печати по технологии *FFF*, обеспечивает увеличение прочности в 1,5...2,5 раза в зависимости от используемой схемы армирования.

2. Предложенный способ армирования печатного изделия по пятиосевой технологии (спиральная укладка армирующих волокон с образованием цилиндрических армирующих слоев) менее эффективна по сравнению с обычным плоским армированием при однонаправленном расположении волокон в плоских армирующих слоях.

3. В технологии объемной печати по технологии *FFF* с применением армирования из непрерывного волокна ключевое значение для прочности изделия имеет обеспечение надежного соединения армирующих волокон с основой (матрицей) из термопластика.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Характер разрушения образцов в проводившихся испытаниях показывает, что в дальнейшей работе первоочередной следует считать задачу обеспечения наилучшей консолидации армирующих волокон с пластиковой матрицей. В частности, алгоритмы для генерации траекторий выкладки волокна и полимера должны быть модифицированы таким образом, чтобы в зоне армирования отсутствовали какие-либо пустоты.

Другой актуальной задачей остается исследование схем армирования изделий, производимых методом пятиосевой печати по технологии *FFF*. В большинстве случаев при изготовлении деталей машин и элементов конструкций требуется обеспечить более сложный вид нагрузки, чем это предполагают стандартные испытания на растяжение или изгиб. Чтобы оценить эффективность такой меры повышения прочности печатных изделий, следует изучить поведение армирующих структур под действием усилий, имитирующих рабочие нагрузки.

¹ Кацнельсон М.Ю., Балаев Г.А. *Пластические массы: Свойства и применение*. Л.: Химия, 1978. 384 с.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Avdeev A., Shvets A., Gushchin I., Torubarov I., Drobotov A., Makarov A., Plotnikov A., Serdobintsev Y. Strength Increasing Additive Manufacturing Fused Filament Fabrication Technology, Based on Spiral Toolpath Material Deposition // *Machines*. 2019. Vol. 7. № 3. Article number 57. DOI: [10.3390/machines7030057](https://doi.org/10.3390/machines7030057).
2. Goh G.D., Yap Y.L., Agarwala S., Yeong W.Y. Recent progress in Additive Manufacturing of Fiber Reinforced Polymer Composite // *Advanced Materials Technologies*. 2018. Vol. 4. № 1. Article number 1800271. DOI: [10.1002/admt.201800271](https://doi.org/10.1002/admt.201800271).
3. Zohdi N., Yang R.C. Material Anisotropy in Additively Manufactured Polymers and Polymer Composites: A Review // *Polymers*. 2021. Vol. 13. № 19. Article number 3368. DOI: [10.3390/polym13193368](https://doi.org/10.3390/polym13193368).
4. Somireddy M., Czekanski A. Anisotropic material behavior of 3D printed composite structures – Material extrusion additive manufacturing // *Materials and Design*. 2020. Vol. 195. Article number 108953. DOI: [10.1016/j.matdes.2020.108953](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108953).
5. Dul S., Fambri L., Pegoretti A. High-Performance Polyamide/Carbon Fiber Composites for Fused Filament Fabrication: Mechanical and Functional Performances // *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2021. Vol. 30. № 7. P. 5066–5085. DOI: [10.1007/s11665-021-05635-1](https://doi.org/10.1007/s11665-021-05635-1).
6. Padovano E., Galfione M., Concialdi P., Lucco G., Badini C. Mechanical and Thermal Behavior of Ultem® 9085 Fabricated by Fused-Deposition Modeling // *Applied Science (Switzerland)*. 2020. Vol. 10. № 9. Article number 3170. DOI: [10.3390/app10093170](https://doi.org/10.3390/app10093170).
7. Zaldivar R.J., Witkin D.B., McLouth T., Patel D.N., Schmitt K., Nokes J.P. Influence of processing and orientation print effects on the mechanical and thermal behavior of 3D-Printed ULTEM Material // *Additive Manufacturing*. 2017. Vol. 13. P. 71–80. DOI: [10.1016/j.addma.2016.11.007](https://doi.org/10.1016/j.addma.2016.11.007).
8. 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. № 8. Article number 1665. DOI: [10.3390/polym12081665](https://doi.org/10.3390/polym12081665).
9. Rodzen K., Harkin-Jones E., Wegrzyn M., Sharma P.K., Zhigunov A. Improvement of the layer-layer adhesion in FFF 3D printed PEEK/carbon fibre composites // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2021. Vol. 149. Article number 106532. DOI: [10.1016/j.compositesa.2021.106532](https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2021.106532).
10. Торубаров И.С., Дроботов А.В., Плотников А.Л., Гушин И.А. Развитие технологии 3D печати с армированием непрерывным волокном // *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 2021. № 8. С. 81–86. DOI: [10.35211/1990-5297-2021-8-255-81-86](https://doi.org/10.35211/1990-5297-2021-8-255-81-86).
11. Yao Y., Zhang Y., Aburaia M., Lackner M. 3D Printing of Objects with Continuous Spatial Paths by a Multi-Axis Robotic FFF Platform // *Applied Science (Switzerland)*. 2021. Vol. 11. № 11. Article number 4825. DOI: [10.3390/app11114825](https://doi.org/10.3390/app11114825).
12. Safari F., Kami A., Abedini V. 3D printing of Continuous Fiber Reinforced Composites: A Review of the Processing, Pre- and Post-Processing Effects on Mechanical Properties // *Polymers and Polymer Composites*. 2022. Vol. 30. P. 1–26. DOI: [10.1177/09673911221098734](https://doi.org/10.1177/09673911221098734).
13. Hu C., Sun Z., Xiao Y., Qin Q. Recent Patents in Additive Manufacturing of Continuous Fiber Reinforced Composites // *Recent Patents on Mechanical Engineering*. 2019. Vol. 12. № 1. P. 25–36. DOI: [10.2174/2212797612666190117131659](https://doi.org/10.2174/2212797612666190117131659).
14. González-Estrada O.A., Pertuz A., Quiroga J. Evaluation of Tensile Properties and Damage of Continuous Fibre Reinforced 3D-Printed Parts // *Key Engineering Materials*. 2018. Vol. 774 KEM. P. 161–166. DOI: [10.4028/www.scientific.net/KEM.774.161](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.774.161).
15. Lupone F., Padovano E., Venezia C., Badini C. Experimental Characterization and Modeling of 3D Printed Continuous Carbon Fibers Composites with Different Fiber Orientation Produced by FFF Process // *Polymers*. 2022. Vol. 14. № 3. Article number 426. DOI: [10.3390/polym14030426](https://doi.org/10.3390/polym14030426).
16. Zhang D., Rudolph N., Woytowicz P. Reliable Optimized Structures with High Performance Continuous Fiber Thermoplastic Composites From Additive Manufacturing (AM) // *International SAMPE Technical Conference*. 2019. Vol. 2019-May. Article number 148951. DOI: [10.33599/nasampe/s.19.1396](https://doi.org/10.33599/nasampe/s.19.1396).
17. Гусев Ю.А., Борщев А.В., Хрульков А.В. Особенности препрегов для автоматизированной выкладки методами ATL и AFP // *Труды ВИАМ*. 2015. № 3. С. 38–44.
18. Пушкарев В.В., Дроботов А.В. Компонровка устройств для объемной печати экструдруемым расплавом деталей сложной формы // *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 2013. № 20. С. 121–123.
19. Zhang K., Zhang W., Ding X. Multi-axis additive manufacturing process for continuous fibre reinforced composite parts // *Procedia CIRP*. 2019. Vol. 85. P. 113–117. DOI: [10.1016/j.procir.2019.09.022](https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.09.022).
20. Fang G., Zhang T., Zhong S., Chen X., Zhong Z., Wang C.C.L. Reinforced FDM: multi-axis filament alignment with controlled anisotropic strength // *ACM Transaction on Graphics*. 2020. Vol. 39. № 6. Article number 204. DOI: [10.1145/3414685.3417834](https://doi.org/10.1145/3414685.3417834).
21. Zhang X., Fan W., Liu T. Fused deposition modeling 3D printing of polyamide-based composites and its applications // *Composites Communications*. 2020. Vol. 21. Article number 100413. DOI: [10.1016/j.coco.2020.100413](https://doi.org/10.1016/j.coco.2020.100413).

REFERENCES

1. Avdeev A., Shvets A., Gushchin I., Torubarov I., Drobotov A., Makarov A., Plotnikov A., Serdobintsev Y. Strength Increasing Additive Manufacturing Fused Filament Fabrication Technology, Based on Spiral Toolpath Material Deposition. *Machines*, 2019, vol. 7, no. 3, article number 57. DOI: [10.3390/machines7030057](https://doi.org/10.3390/machines7030057).
2. Goh G.D., Yap Y.L., Agarwala S., Yeong W.Y. Recent progress in Additive Manufacturing of Fiber Reinforced Polymer Composite. *Advanced Materials Technologies*, 2018, vol. 4, no. 1, article number 1800271. DOI: [10.1002/admt.201800271](https://doi.org/10.1002/admt.201800271).

3. Zohdi N., Yang R.C. Material Anisotropy in Additively Manufactured Polymers and Polymer Composites: A Review. *Polymers*, 2021, vol. 13, no. 19, article number 3368. DOI: [10.3390/polym13193368](https://doi.org/10.3390/polym13193368).
4. Somireddy M., Czekanski A. Anisotropic material behavior of 3D printed composite structures – Material extrusion additive manufacturing. *Materials and Design*, 2020, vol. 195, article number 108953. DOI: [10.1016/j.matdes.2020.108953](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108953).
5. Dul S., Fambri L., Pegoretti A. High-Performance Polyamide/Carbon Fiber Composites for Fused Filament Fabrication: Mechanical and Functional Performances. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2021, vol. 30, no. 7, pp. 5066–5085. DOI: [10.1007/s11665-021-05635-1](https://doi.org/10.1007/s11665-021-05635-1).
6. Padovano E., Galfione M., Concialdi P., Lucco G., Badini C. Mechanical and Thermal Behavior of Ultem® 9085 Fabricated by Fused-Deposition Modeling. *Applied Science (Switzerland)*, 2020, vol. 10, no. 9, article number 3170. DOI: [10.3390/app10093170](https://doi.org/10.3390/app10093170).
7. Zaldivar R.J., Witkin D.B., McLouth T., Patel D.N., Schmitt K., Nokes J.P. Influence of processing and orientation print effects on the mechanical and thermal behavior of 3D-Printed ULTEM Material. *Additive Manufacturing*, 2017, vol. 13, pp. 71–80. DOI: [10.1016/j.addma.2016.11.007](https://doi.org/10.1016/j.addma.2016.11.007).
8. 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, article number 1665. DOI: [10.3390/polym12081665](https://doi.org/10.3390/polym12081665).
9. Rodzen K., Harkin-Jones E., Wegrzyn M., Sharma P.K., Zhigunov A. Improvement of the layer-layer adhesion in FFF 3D printed PEEK/carbon fibre composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2021, vol. 149, article number 106532. DOI: [10.1016/j.compositesa.2021.106532](https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2021.106532).
10. Torubarov I.S., Drobotov A.V., Plotnikov A.L., Gushchin I.A. Evolvement of the 3d printing with reinforcement by continuous fiber' technology. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2021, no. 8, pp. 81–86. DOI: [10.35211/1990-5297-2021-8-255-81-86](https://doi.org/10.35211/1990-5297-2021-8-255-81-86).
11. Yao Y., Zhang Y., Aburaia M., Lackner M. 3D Printing of Objects with Continuous Spatial Paths by a Multi-Axis Robotic FFF Platform. *Applied Science (Switzerland)*, 2021, vol. 11, no. 11, article number 4825. DOI: [10.3390/app11114825](https://doi.org/10.3390/app11114825).
12. Safari F., Kami A., Abedini V. 3D printing of Continuous Fiber Reinforced Composites: A Review of the Processing, Pre- and Post-Processing Effects on Mechanical Properties. *Polymers and Polymer Composites*, 2022, vol. 30, pp. 1–26. DOI: [10.1177/0967391122-1098734](https://doi.org/10.1177/0967391122-1098734).
13. Hu C., Sun Z., Xiao Y., Qin Q. Recent Patents in Additive Manufacturing of Continuous Fiber Reinforced Composites. *Recent Patents on Mechanical Engineering*, 2019, vol. 12, no. 1, pp. 25–36. DOI: [10.2174/2212797612666190117131659](https://doi.org/10.2174/2212797612666190117131659).
14. González-Estrada O.A., Pertuz A., Quiroga J. Evaluation of Tensile Properties and Damage of Continuous Fibre Reinforced 3D-Printed Parts. *Key Engineering Materials*, 2018, vol. 774 KEM, pp. 161–166. DOI: [10.4028/www.scientific.net/KEM.774.161](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.774.161).
15. Lupone F., Padovano E., Venezia C., Badini C. Experimental Characterization and Modeling of 3D Printed Continuous Carbon Fibers Composites with Different Fiber Orientation Produced by FFF Process. *Polymers*, 2022, vol. 14, no. 3, article number 426. DOI: [10.3390/polym14030426](https://doi.org/10.3390/polym14030426).
16. Zhang D., Rudolph N., Woytowicz P. Reliable Optimized Structures with High Performance Continuous Fiber Thermoplastic Composites From Additive Manufacturing (AM). *International SAMPE Technical Conference*, 2019, vol. 2019-May, article number 148951. DOI: [10.33599/nasampe/s.19.1396](https://doi.org/10.33599/nasampe/s.19.1396).
17. Gusev Yu.A., Borshchev A.V., Khrulkov A.V. Features of prepregs intended for automated laying by ATL and AFP technologies. *Trudy VIAM*, 2015, no. 3, pp. 38–44.
18. Pushkarev V.V., Drobotov A.V. Machine arrangement for 3d printing using extrudable fusion of complex parts. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2013, no. 20, pp. 121–123.
19. Zhang K., Zhang W., Ding X. Multi-axis additive manufacturing process for continuous fibre reinforced composite parts. *Procedia CIRP*, 2019, vol. 85, pp. 113–117. DOI: [10.1016/j.procir.2019.09.022](https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.09.022).
20. Fang G., Zhang T., Zhong S., Chen X., Zhong Z., Wang C.C.L. Reinforced FDM: multi-axis filament alignment with controlled anisotropic strength. *ACM Transaction on Graphics*, 2020, vol. 39, no. 6, article number 204. DOI: [10.1145/3414685.3417834](https://doi.org/10.1145/3414685.3417834).
21. Zhang X., Fan W., Liu T. Fused deposition modeling 3D printing of polyamide-based composites and its applications. *Composites Communications*, 2020, vol. 21, article number 100413. DOI: [10.1016/j.coco.2020.100413](https://doi.org/10.1016/j.coco.2020.100413).

Additive manufacturing of parts with three-dimensional continuous fiber reinforcement

© 2022

Ivan S. Torubarov*¹, postgraduate student of Chair “Production Process Automation”

Aleksey V. Drobotov¹, PhD (Engineering),

assistant professor of Chair “Production Process Automation”

Ilya A. Gushchin¹, postgraduate student of Chair “Production Process Automation”

Denis S. Vdovin², PhD (Engineering),

assistant professor of Chair “Multi-Purpose Tracked Vehicles and Mobile Robots”

Aleksandr L. Plotnikov¹, Doctor of Sciences (Engineering), professor of Chair “Production Process Automation”

Aleksey A. Yakovlev¹, Doctor of Sciences (Engineering), professor of Chair “Production Process Automation”

¹Volgograd State Technical University, Volgograd (Russia)

²Bauman Moscow State Technical University (national research university), Moscow (Russia)

*E-mail: is.torubarov@gmail.com

Received 19.04.2022

Accepted 10.06.2022

Abstract: One of the key challenges in additive manufacturing of plastic goods using the Fused Filament Fabrication (FFF) technology is to ensure their strength. The low strength of polymer materials and the distinct anisotropy of their mechanical properties limit the use of 3D printing as an alternative to the traditional small-scale production technologies. The most promising solution to the goal of increasing the strength of printed goods is the application of continuous fiber reinforcement. Several additive manufacturing devices and software products that allow preparing a control program for 3D printing with reinforcement are known, however, having all their advantages, they, like conventional printed products, have a wide spread in strength in various directions (in the plane of a layer and perpendicularly to it, in the direction of growing). In this paper, the authors propose using the continuous fiber reinforcement along the three-dimensional trajectories to smooth out the anisotropy of the products' properties in the FFF technology and ensure wider possibilities for using them in the production of final goods. In the course of work, a 3D printer with the ability to print using five degrees of freedom and software for preparation of control programs were upgraded for the printing process with laying continuous fiber; printing modes with reinforcement were developed; samples were produced for standard static bending tests. The experiments show that reinforcement improves the printed specimen's strength, and the proposed three-dimensional reinforcement technique ensures the lower flexing strength compared to standard flat reinforcement with uniaxial laying of fibers, though, the destruction of 3D reinforced specimens occurred without evident delamination.

Keywords: additive technologies; FFF; 3D printing; 5D printing; reinforcement; continuous carbon fiber.

Acknowledgements: The work was financially supported by the Skolkovo Foundation grant No. MG18/20 and the RFBR grant No. 20-37-90133.

For citation: Torubarov I.S., Drobotov A.V., Gushchin I.A., Vdovin D.S., Plotnikov A.L., Yakovlev A.A. Additive manufacturing of parts with three-dimensional continuous fiber reinforcement. *Frontier Materials & Technologies*, 2022, no. 2, pp. 92–104. DOI: 10.18323/2782-4039-2022-2-92-104.