



Научная статья
2.6.17 – Материаловедение (технические науки)
УДК 691.175

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.041

EDN: FJMUGT

РАЗРАБОТКА ФИЛАМЕНТОВ С НЕПРЕРЫВНЫМ ВОЛОКНОМ ДЛЯ FDM ПЕЧАТИ

Ленар Нургалеевич Шафигуллин ¹, Наталья Владимировна Романова ²,
Азат Талгатович Габдрахманов ³, Эдуард Владимирович Панфилов ⁴,
Андрей Михайлович Сотников ⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Набережночелнинский институт (филиала) Казанского Федерального Университета, Набережные Челны, Россия

¹ misharin_82@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7947-801X>

² romnatav@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2484-346X>

³ veyron000@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-4667-8311>

⁴ panfilov@kamaz.ru, <http://orcid.org/0009-0009-1066-8219>

⁵ sotnikovand@mail.ru, <http://orcid.org/0009-0006-6164-8806>

Аннотация. Полимерные композиционные материалы конструкционного и функционального назначения являются одними из самых многочисленных и разнообразных видов материалов. Их применение в различных областях техники обеспечивает значительный экономический эффект по сравнению с традиционными, изготовленными из металла, узлами и деталями. Применение филаментов с непрерывным волокном для изготовления изделий из полимерных композиционных материалов методом FDM печати позволяет создавать прототипы и масштабные модели в короткие сроки при минимальных затратах, что соответствует современным тенденциям перехода к кастомизированному производству. Изготовлены лабораторные образцы филаментов на основе полиэтилена высокого давления и сополимера этилена с винилацетатом, армированного непрерывным базальтовым волокном. Проведён анализ полученных композиций по внешнему виду, геометрическим размерам, плотности, содержанию связующего, микроструктуре, количеству нитей в базальтовом волокне. Анализ внешнего вида деталей, изготовленных из полимерных композиций, выявил наличие незначительных видовых дефектов (коробления, деформации, прижоги, расслоение). Система «Полиэтилен–базальтовое волокно» подходит для производства анизотропных композиционных изделий автомобильной промышленности, беспилотных летательных аппаратов в виду своей низкой стоимости, доступности большого марочного ассортимента полиэтилена в РФ и отечественного производителя базальтового волокна.

Ключевые слова: филамент, непрерывное волокно, полимерный композиционный материал, FDM печать.

Благодарности: Работа выполнена за счет гранта Академии наук Республики Татарстан, предоставленного молодым кандидатам наук (постдокторантам) с целью защиты докторской диссертации, выполнения научно-исследовательских работ, а также выполнения трудовых функций в научных и образовательных организациях Республики Татарстан в рамках Государственной программы Республики Татарстан «Научно-технологическое развитие Республики Татарстан (соглашение № 49/2024-ПД от 16.12.2024 г.)».

Для цитирования: Разработка филаментов с непрерывным волокном методом для fdm печати / Л. Н. Шафигуллин [и др.] // Ползуновский вестник. 2026. № 2, С. 285–290. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.041. EDN: <https://elibrary.ru/FJMUGT>.

Original article

DEVELOPMENT OF CONTINUOUS FILAMENTS FOR FDM PRINTING

Lenar N. Shafigullin ¹, Natalia V. Romanova ², Azat T. Gabdrakhmanov ³,
Eduard V. Panfilov ⁴, Andrey M. Sotnikov ⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Kazan Federal University, Kazan, Russia

¹ misharin_82@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7947-801X>

² romnatav@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2484-346X>

³ veyron000@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-4667-8311>

⁴ panfilov@kamaz.ru, <https://orcid.org/0009-0009-1066-8219>

⁵ sotnikovand@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-6164-8806>

Abstract. Polymer composite materials for structural and functional purposes are among the most numerous and diverse types of materials. Their use in various fields of technology provides a significant economic effect compared to traditional units and parts made of metal. The use of filaments with continuous fiber for the manufacture of products from polymer composite materials by FDM printing allows you to create prototypes and scale models in a short time at minimal cost, which corresponds to modern trends in the transition to customized production. Laboratory samples of filaments based on high-density polyethylene and ethylene-vinyl acetate copolymer reinforced with continuous basalt fiber were manufactured. The obtained

© Шафигуллин Л. Н., Романова Н. В., Габдрахманов А. Т., Панфилов Э. В., Сотников А. М., 2026

compositions were analyzed for appearance, geometric size, density, binder content, microstructure, and the number of threads in the basalt fiber. Analysis of the appearance of parts made from polymer composites revealed the presence of minor visible defects (warping, deformation, burns, delamination). The Polyethylene-Basalt Fiber system is suitable for the production of anisotropic composite products for the automotive industry, the production of unmanned aerial vehicles due to its low cost, the availability of a large range of polyethylene brands in the Russian Federation and a domestic manufacturer of basalt fiber.

Keywords: filament, continuous fiber, polymer composite material, FDM printing.

Acknowledgements: The work was carried out at the expense of a grant from the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, provided to young candidates of science (postdoctoral students) for the purpose of defending a doctoral dissertation, carrying out research work, and also performing work functions in scientific and educational organizations of the Republic of Tatarstan within the framework of the State Program of the Republic of Tatarstan "Scientific and Technological Development of the Republic of Tatarstan (agreement No. 49/2024-PD dated 16.12.2024).

For citation: Shafigullin, L. N., Romanova, N. V., Gabdrakhmanov, A. T., Panfilov, E. V., Sotnikov, A. M. (2026). Development of filaments with continuous fiber method for fdm printing. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 285-290. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2026.02.041. EDN: <https://elibrary.ru/FJMUGT>.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из актуальных и важных задач, входящих в приоритетные «Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 г.», является разработка конструкционных полимерных композиционных материалов (ПКМ) со специальными свойствами на основе термореактивных или термопластичных матриц (в том числе наномодифицированных), углеродных, стеклянных или органических наполнителей, а также технологий изготовления полуфабрикатов и изделий из них [1, 2].

ПКМ конструкционного и функционального назначения являются одними из самых многочисленных и разнообразных видов материалов. Их применение в различных областях техники обеспечивает значительный экономический эффект по сравнению с традиционными, изготовленными из металла, узлами и деталями. При изготовлении деталей из ПКМ упрощается технология их изготовления и сборки, снижается масса, сокращается стоимость и расходы на эксплуатацию готовых изделий. Более 40 лет в качестве полимерной матрицы использовались термореактивные материалы. Однако многокомпонентность термореактивных связующих, их ограниченная жизнеспособность, длительность процесса отверждения, многооперационность процесса переработки, недостаточная воспроизводимость свойств материалов, сложности утилизации брака и отходов переработки и создание безопасных для окружающей среды условий стимулировали поиски использования в качестве альтернативы связующих в виде термопластичных матриц [1–4]. Термопластичные матрицы обладают рядом преимуществ: заданная молекулярная масса; гораздо более долгий (до 10 лет) срок хранения полуфабриката; короткий технологический цикл получения изделия; способность к обратимым деформациям; возможность вторичной переработки; не токсичность; минимальное, по сравнению с реактопластами выделение летучих веществ.

Процесс производства изделий из термопластичного композиционного материала менее трудоемок в условиях крупномасштабного производства, хотя и требует специальной производственной линии. Это упрощает получение деталей сложной конфигурации, повышает производительность оборудования, создавая предпосылки для его автоматизации [5–7].

Безусловным трендом последних десятилетий является автоматизация ручного труда. Большую роль в этом сыграла популяризация 3D-принтеров, благодаря которым возможно создание прототипов и масштабных моделей в короткие сроки при минимальных затратах. Наиболее распространенными типами принтеров являются принтеры, работающие

по технологиям FDM, SLA: FDM – печать основывается на послойном создании объема изделия с помощью полимерного расплава; SLA/DLP – печать основывается на послойном отверждении фотополимера под действием луча лазера или света светодиода [8–9].

В технологии FDM используется филамент, также называемый прутком, а в технологии SLA/DLP используется жидкая смола, которая при воздействии УФ отверждается в изделие. Производство непрерывно армированного материала на основе смолы достаточно проблематично, так как чтобы изготовить изделие, придется повторно перевести смолу в жидкое состояние без потери физико-механических свойств смолы.

Перспективным направлением является освоение и внедрение технологий, позволяющих печатать дискретно- и непрерывно- армированными полимерными композиционными материалами, что позволит не только существенно увеличить качество, скорость и точность выкладки, но и, самое главное, снизить стоимость конечного изделия. Таким образом, разработка филамента с непрерывно армированным волокном является актуальной задачей для технологии FDM [10–15].

Целью исследований является разработка филаментов с непрерывным волокном для изготовления изделий из полимерных композиционных материалов методом FDM печати.

МЕТОДЫ

Изготовление лабораторных образцов филамента, армированного непрерывным волокном для FDM печати производилось на экструзионной линии на базе экструдера Brabender Plasti Corder.

В качестве полимерных матриц использованы полиэтилен высокого давления (ПВД) марки 15803-020 и сополимер этилена с винилацетатом с высоким показателем текучести расплава (ПТР) Сэвилен СЭВ марки 11808-340.

В качестве армирующего наполнителя выбраны базальтовый ровинг трощеный с замасливателем KB42 и базальтовый ровинг UD (директ) с замасливателем KB-42a производства ООО «Каменный век».

Сравнительный анализ полученных композиций проведен по следующим характеристикам: внешний вид [16], геометрические размеры [16], плотность [17], содержание связующего [18], микроструктура [19], количество нитей в базальтовом волокне [20].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Лабораторная партия филамента из полиэтилена, армированного непрерывным базальтовым волокном, изготавливалась по технологическому режиму, представленному в таблице 1. Температура переработки ПВД 15803-020 завышена для повышения ПТР,

РАЗРАБОТКА ФИЛАМЕНТОВ С НЕПРЕРЫВНЫМ ВОЛОКНОМ ДЛЯ FDM ПЕЧАТИ

что позволило на выходе из экструзионной оснастки получить расплав с более высокой температурой, следовательно, увеличить время контакта расплавленного полимера с волокном. Таким образом, увеличена адгезия полимера к армирующему компоненту.

Производство филамента производилось в экс-

периментальном режиме со скоростью волокна 5 м/мин, в результате удается получить поверхность филамента гладкой, без дефектов. Таким образом, в час возможно производить до 300 метров филамента, а за смену можно получить около 1800 метров, что приблизительно равняется 6 катушкам.

Таблица 1 – Технологический режим изготовления лабораторной партии филамента

Table 1 – Technological mode of manufacturing a laboratory batch of filament

№	Параметры	Значение
1	Температура по зонам, °C	
	Зона 1	230
	Зона 2	230
	Зона 3	230
	Зона 4	230
	Оснастка	230
2	Производительность экструдера, г/мин	5
3	Скорость волокна, м/мин	2

Проведены эксперименты по получению филамента на основе СЭВ с высоким ПТР (28-40 г/10 мин при температуре 125 °C). Эксперименты проводились на технологических режимах переработки ПВД 15803-020 для сравнительного анализа. Установлено, что базальтовое волокно лучше смачивается расплавом Сэвилена, однако не удается достичь равномерного покрытия из-за высокой текучести материала. При этом производительность линии получения филамента, непрерывно армированного волокном, может быть увеличена до 10–20 м/мин.

Изготовлена лабораторная партия филамента, армированного непрерывным базальтовым волокном. Вид катушки филамента представлен на рисунке 1.

Филамент имеет эллиптическую форму. Это вызвано неравномерным охлаждением и большой величиной усадки ПВД-15803-020. Филамент армирован непрерывным базальтовым волокном по всей длине произведенного филамента.

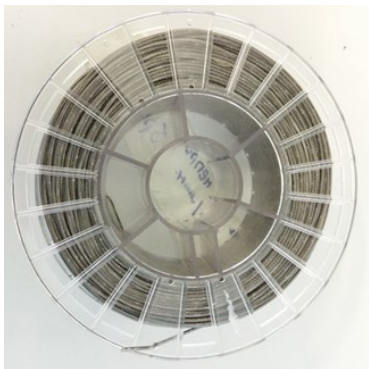


Рисунок 1 – Филамент из ПВД 15803-020, непрерывно армированного базальтовым волокном
Figure 1 – Filament made of HDPE 15803-020, continuously reinforced with basalt fiber

Проведен эксперимент по получению филамента из высокотекучего Сэвилена марки СЭВ 11808-340. Вид катушки филамента представлен на рисунке 2.

По внешнему виду катушки филамента установлено, что полимеры марки Сэвилена и на основе полиолефинов с ПТР более 10 г/мин не пригодны для получения филаментов с непрерывным волокном. Высокая текучесть при воздушном охлаждении филамента приводит к формированию эллипсоидной формы филаментов. При этом нужно отметить темный цвет филамента, что свидетельствует о пропитке некоторых волокон базальта.



Рисунок 2 – Образцы филамента из Сэвилена СЭВ 11808-340 и базальтового волокна

Figure 2 – Samples of filament from Sevilen SEV 11808-340 and basalt fiber

При сравнении филамента из Сэвилена с филаментом из ПВД, видно, что по внешнему виду филамент из полиэтилена более равномерный по диаметру и длине.

Исследуя открытую пористость, установлено, что значение открытой пористости при измерении по изоктану находится в районе 7 %, что означает наличие пор и ламинацию волокна полимером.

Установлено, что содержание полимера в филаменте находится в диапазоне 30±5 %, что свидетельствует о ламинации базальтового волокна полимером (таблица 2).

Расчет количества мономеров в базальтовом ровинге проводился аналитически с использованием ГОСТа для углеродного волокна. Количество нитей в базальтовом волокне для композиции ПВД – базальт трощеный составило 3000, для ПВД – базальт UD 3100 соответственно.

Для базальтового волокна проведены оценочные испытания воздействия замасливателя волокна на адгезию к полимеру. Использовался базальтовый ровинг трощеный с замасливателем KB42, который совместим с эпоксидными, винилэфирными и полиэфирными смолами и базальтовый ровинг UD (однонаправленный) с замасливателем KB42A, который совместим с полипропиленовыми, полиамидными и полиуретановыми. Так как в процессе экструзии время контакта полимера с волокном значительное, то влияние замасливателя на свойства незначительно.

С целью апробации полученных результатов провели пробную печать образцов филамента из Сэвилена СЭВ 11808-340 и базальтового волокна. В качестве FDM

принтера использовали пятиосевой 3D принтер EPIT 5.1 Carbon производство ООО «Воплощение», находящийся в Центре прототипирования КФУ ПИШ КиберАвтоТех. Особенности принтера являются возможность изготовления изделий методом послойного наплавления с пятиосевым управлением. Моделирование обработки выполняли в слайсере FASP (Five Axis Slicer Program),

предназначенное для настройки параметров печати и генерации управляющей программы печати на 3D принтерах «EPIT».

Таким образом, анализ внешнего вида деталей, изготовленных из филамента с непрерывным базальтовым волокном, выявил наличие незначительных видимых дефектов (коробления, деформации, прижоги, расслоение).

Таблица 2 – Параметры композиционных материалов

Table 2 – Appearance and geometric dimensions of the composite material

Материал	№	Внешний вид	Внешний диаметр, мм	Плотность композита, г/см ³	Содержание армирующего наполнителя (базальтовый ровинг), %	Содержание связующего (полиэтилен 15803-020), %
ПВД – базальт трощеный	1	Поверхность гладкая, без посторонних включений, трещин, изломов, механических повреждений и пор	1,66	1,83	71	29
	2		1,80	1,80	70	30
	3		1,75	1,81	71	29
	4		1,90	1,81	69	31
	5		1,84	1,82	70	30
	6		1,71	1,80	73	27
	7		1,78	1,81	70	30
	8		1,67	1,80	71	29
	9		1,87	1,83	70	30
	10		1,88	1,80	70	30
ПВД – базальт UD	1	Поверхность гладкая, без посторонних включений, трещин, изломов, механических повреждений и пор	1,70	1,80	70	30
	2		1,80	1,80	70	30
	3		1,62	1,81	71	29
	4		1,89	1,81	71	29
	5		1,74	1,81	69	31
	6		1,67	1,80	70	30
	7		1,88	1,83	73	27
	8		1,91	1,81	70	30
	9		1,64	1,80	71	29
	10		1,75	1,80	70	30

ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проведенных исследований было выявлено, что для изготовления изделий методом FDM с непрерывным волокном необходимо провести модернизацию технологии. Данная модернизация заключается в следующих изменениях технологической линии:

- все шпули необходимо использовать только с наружной размоткой, в том числе UD. Если размотка будет наружной, можно будет стабильно разматывать больше одной бобины с базальтовым волокном;
- необходимо установить предварительный нагрев волокна перед входом последнего в экструзионную оснастку, так как скорость прохождения волокна через оснастку будет существенно выше, чем на лабораторной линии;
- в части экструзионной оснастки возможно два возможных варианта исполнения:

1) оснастка кабельного типа, рассчитанная на большую производительность линии. Такой подход предполагает создание нескольких экструзионных линий, но при этом нет необходимости серьезной переработки экструзионной оснастки;

2) многоруцевая экструзионная оснастка, в которую подается несколько ровингов с нескольких шпуль, а на выходе получается несколько потоков филамента. В этом случае нет необходимости создания нескольких линий, но потребуются финансовые затраты на проектирование многоруцевой экструзионной оснастки.

- необходима ванна охлаждения для быстрого охлаждения получаемого филамента, так как ско-

рость производства филамента существенно возрастает;

- необходим накопитель филамента для смены катушки на узле смотки. Накопитель дает возможность сменить катушку с полученным филаментом без остановки линии;
- необходимо добавить узел перемотки филамента с большой катушки на маленькие, так как на промышленной линии целесообразно устанавливать узел смотки с большой бобиной.

В применении оборудования для 3D печати можно выделить следующие моменты:

- 3D принтер должен быть оборудован прямой (direct) системой подачи филамента в печатающую головку. Это обусловлено тем, что филамент из полиэтилена достаточно гибкий и по поведению подобен каучукообразным филаментам, например, TPU или SEBS. Пример такой печатающей головки приведен на рисунке 3.
- печатающая головка 3D принтера должна содержать полностью металлический термобарьер;
- 3D принтер должен обладать закрытой камерой, так как у полиэтилена плохая смачиваемость поверхности (краевой угол смачивания около 170°) и велика вероятность деламинации;
- при подготовке модели к печати необходимо ПО собственной разработки, так как печать филаментом, непрерывно армированным волокном, предполагает либо то, что печатающая головка не отрывается от детали, либо предусмотрен механизм резки филамента;
- необходим механизм резки филамента.

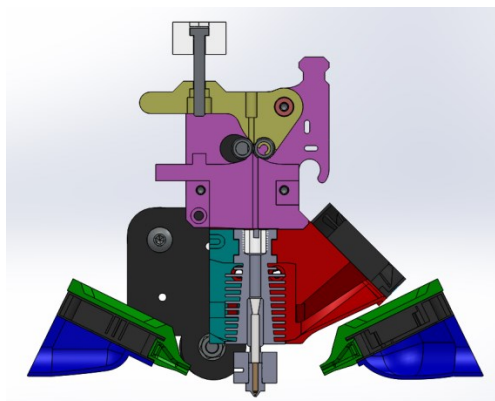


Рисунок 3 – Печатающая головка 3D принтера с прямой (direct) подачей филамента

Figure 3 – 3D Printer Print Head with Direct Filament Feed

На основании предложенных модификаций разработана модернизация принтера EPIT 5.1 Carbon, включающая: разработку новой печатающей головки (рисунок 4); разработку обрезного механизма (рисунок 5).

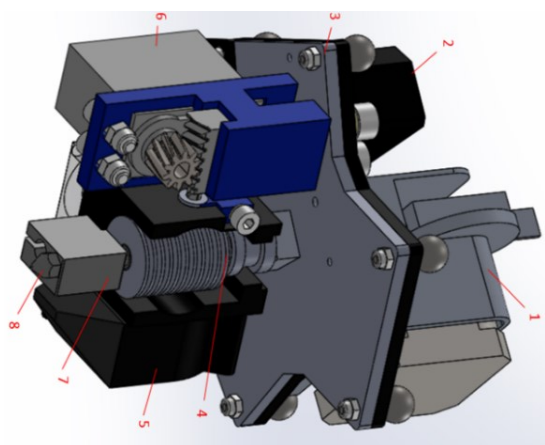


Рисунок 4 – Модернизированная печатающая головка для принтера EPIT 5.1 Carbon: 1 – экструдер подачи филамента; 2 – электро-контакт подключения головки; 3 – площадка печатающей головки; 4 – радиатор охлаждения филамента; 5 – вентилятор охлаждения расплава; 6 – механизм обрезки филамента; 7 – блок нагрева филамента; 8 – сопло

Figure 4 – Upgraded print head for EPIT 5.1 Carbon printer: 1 – filament feed extruder; 2 – head connection electrical contact; 3 – print head platform; 4 – filament cooling radiator; 5 – melt cooling fan; 6 – filament cutting mechanism; 7 – filament heating unit; 8 – nozzle

В результате проведенных модификаций выявлено, что поскольку филамент после обрезки проходит некоторое расстояние внутри печатающей головки, то данная дистанция должна учитываться при генерации g-кода печати модели. Для этого в слайсере введен дополнительный параметр печати «Дистанция отреза филамента», который учитывается при генерации g-кода, и устанавливает команду обрезки филамента за указанное количество миллиметров до конца рабочего хода печатающей головки.

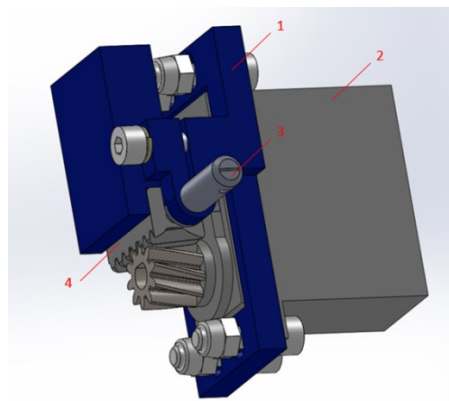


Рисунок 5 – Обрезной механизм: 1 – кронштейн; 2 – серводвигатель; 3 – направляющая; 4 – рейка

Figure 5 – Trimming mechanism: 1 – bracket; 2 – servo motor; 3 – guide; 4 – rack

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

3D печать непрерывно армированным филаментом является развивающимся направлением, в котором работает небольшое количество производителей материалов и оборудования. Система «Полиэтилен-базальтовое волокно» подходит для производства анизотропных композиционных изделий автомобильной промышленности, производства беспилотных летальных аппаратов в виду своей низкой стоимости, доступности большого марочного ассортимента полиэтилена в РФ и отечественного производителя базальтового волокна. Таким образом, для производства, непрерывно-армированного филамента «полиэтилен-базальтовое волокно» в РФ уже есть сырьевая база.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Полимерные композиционные материалы на термопластичной матрице / Е.Н. Каблов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Серия химия и химическая технология. 2016. Т. 59, № 10. С. 61–71. doi: 10.6060/tcct.20165910.536.
2. Синтез простых и сложных эфиров вицинальных триазолов / М.В. Казанцева [и др.] // Известия высших учебных заведений. Серия химия и химическая технология. 2016. Т. 59, № 10. С. 4–10. doi: 10.6060/tcct.20165910.5365.
3. Композиционный материал на основе полиолефинов и модифицированных растительных наполнителей/ А.В. Горбачев [и др.] // Пластические массы. 2023. № 1–2. С. 48–52. doi: 10.35164.0554-2901-2023-1-2-48-52.
4. Мусин И.Н., Файзуллин И.З., Вольфсон С.И. Влияние добавок на свойства древесно-полимерных композитов // Вестник Казанского технологического университета. 2012. Т. 15. № 24. С. 97–99.
5. Кириченко Н.Б. Автомобильные эксплуатационные материалы : учебник для студ. учреждений сред. проф. образования. 9-е изд., стер. Москва : Издательский центр «Академия», 2014. 208 с.
6. Материаловедение в машиностроении и промышленных технологиях: учеб.-справ. Руководство / В.А. Струк [и др.]. Долгопрудный : Издательский Дом «Интеллект», 2010. 536 с.
7. Васильева Л.С. Автомобильные эксплуатационные материалы : учебник для вузов. 2-е изд. Москва : Наука-Пресс, 2004. 421 с.
8. Максимов Н.М. Стратегия развития аддитивных технологий // Аддитивные технологии. 2021. № 4. С. 10.
9. Сацкая З.М. О развитии аддитивных технологий в России // Аддитивные технологии. 2021. № 3. С. 16–20.
10. Влияние технологических режимов FDM-печати и состава используемых материалов на физико-механические характеристики FDM-моделей (обзор) [Электронный ресурс] / С.В. Кондрашов [и др.] // Труды ВИАМ. 2019. № 10 (82). С. 34–49. URL: <http://www.viam-works.ru/> (дата обращения: 29.05 2025).
11. Балашов А.В., Маркова М.И. Исследование структуры и свойств изделий, полученных 3D-печатью [Электронный ресурс] // Инженер. вестн. Дона. 2019. № 1. URL: ivdon.ru/magazine/archive/nly2019/5618/ (дата обращения: 29.05 2025).

12. Разработка методики испытаний материалов для FDM-печати, применяемых для изготовления автокомпонентов / Л.Н. Шафигуллин [и др.] // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. Казань. 2024. № 2. С. 119–124.
13. Шафигуллин Л.Н., Габдрахманов А.Т., Романова Н.В. Анализ материалов и технологий гранульной 3d печати для изготовления деталей автомобилей // Сборник статей всероссийской научно-практической конференции «Перспективные технологии реверс-инжиниринга и быстрого прототипирования». Севастополь. 2025. С. 61–66.
14. Рашевский Д.А. 3D-печать переработанным пластиком // Научный альманах ассоциации FRANCE-KAZAKHSTAN. 2024. № 2. С. 142–145.
15. Хаширов А.А. Влияние технологических режимов FDM-печати на свойства изделий из полифениленсульфона и его композита с дискретным углеродным волокном : дис. ... канд. тех. наук. Нальчик, 2019. 124 с.
16. ГОСТ Р 59100-2020. Пластмассы. Филаменты для аддитивных технологий. Общие технические требования: введ. 2021-07-01. Москва, 2020, 11 с.
17. ГОСТ Р 56679-2015. Композиты полимерные. Метод определения пустот: введ. 2017-01-01. Москва, 2016, 12 с.
18. ГОСТ Р 56796-2015. Композиты полимерные. Препреги. Метод определения содержания исходных компонентов в препреге : введ. 2017-01-01. Москва, 2016, 19 с.
19. ГОСТ Р 57800-2017. Композиты полимерные. Подготовка образцов для микроструктурных исследований : введ. 2018-06-01. Москва, 2017, 7 с.
20. ГОСТ 32666-2014 (ISO 11567:1995). Волокно углеродное. Определение диаметра и площади поперечного сечения элементарной нити: введ. 2015-09-01. Москва, 2014, 19 с.

Информация об авторах

Л. Н. Шафигуллин – кандидат технических наук, доцент кафедры «Материалы, технологии и качества» Набережночелнинского института КФУ.

Н. В. Романова – кандидат технических наук, доцент кафедры «Материалы, технологии и качества» Набережночелнинского института КФУ.

А. Т. Габдрахманов – кандидат технических наук, доцент кафедры «высокоэнергетических процессов и агрегатов» Набережночелнинского института КФУ.

Э. В. Панфилов – кандидат технических наук, доцент кафедры «Материалы, технологии и качества» Набережночелнинского института КФУ.

А. М. Сотников – аспирант Набережночелнинского института КФУ.

REFERENCES

1. Kablov, E.N., Semenova, L.V., Petrova, G.N., Larionov, S.A. & Perfilova, D.N. (2016). Polymer composite materials on a thermoplastic matrix. *News of higher educational institutions. Chemistry and chemical technology series*, Vol. 59, (10), 61-71. (In Russ.). doi 10.6060/tcct.20165910.536.
2. Kazantseva, M.V., Golobokova, T.V., Proiydakov, A.G., Vereshchagin, L.I. & Kizhnyayev, V.N. (2016). Synthesis of ethers and esters of vicinal triazoles. *News of higher educational institutions. Chemistry and chemical technology series*, Vol. 59, (10), 4-10. (In Russ.). doi 10.6060/tcct.20165910.5365.
3. Gorbachev, A.V., Faizullin, I.Z., Wolfson, S.I., Kanarsky, A.V., Zakharov, I.V. & Kazakov, Yu.M. (2023). Composite material based on polyolefins and modified plant fillers. *Plastics*, (1-2), 48-52. (In Russ.).
4. Musin, I.N., Faizullin, I.Z. & Wolfson, S.I. (2012). The influence of additives on the properties of wood-polymer composites. *Bulletin of Kazan Technological University*, Vol. 15, (24), 97-99. (In Russ.).
5. Kirichenko, N.B. (2014). *Automotive operating materials: textbook for students of secondary vocational education institutions*. 9th ed., reprinted. Moscow : Publishing center "Academy". (In Russ.). 208 p.
6. Struck, V.A., Pinchuk, L.S., Myshkin, N.K., Goldade, V.A. &

Knight. (2010). *Materials Science in Mechanical Engineering and Industrial Technologies: A Textbook and Reference Guide*. Dolgoprudny: Publishing House "Intellect". (In Russ.). 536 p.

7. Vasilyeva, L.S. (2004). *Automotive operating materials: textbook for universities*. 2nd ed. Moscow: Nauka-Press. (In Russ.). 421 p.

8. Maksimov, N.M. (2021). Strategy for the development of additive technologies. *Additive technologies*, (4), 10. (In Russ.).

9. Satskaya, Z.M. (2021). On the development of additive technologies in Russia. *Additive technologies*, (3), 16-20. (In Russ.).

10. Kondrashov, S.V., Pykhtin, A.A., Larionov, S.A. & Sorokin, A.E. (2019). The influence of FDM printing process modes and the composition of the materials used on the physical and mechanical characteristics of FDM models (review) [Electronic resource]. *Proceedings of VIAM*. Vol. 10, (82). 34-49. URL: <http://www.viam-works.ru/> (date accessed: 05.29.2025). (In Russ.).

11. Balashov, A.V. & Markova, M.I. (2019). Study of the structure and properties of products obtained by 3D printing [Electronic resource]. *Engineering Bulletin of the Don*. (1). URL: ivdon.ru/magazine/archive/nly2019/5618/ (date of access: 05.29.2025). (In Russ.).

12. Shafigullin, L.N., Gabdrakhmanov, A.T., Romanova, N.V., Nasyrov, I.A., Salin, V.S. & Sotnikov, A.M. (2024). Development of a methodology for testing materials for FDM printing used for the manufacture of automotive components. *Bulletin of the Kazan State Technical University named after A.N. Tupolev*, (2), 119-124. (In Russ.).

13. Shafigullin, L.N., Gabdrakhmanov, A.T. & Romanova, N.V. (2025). Analysis of materials and technologies of granular 3D printing for the manufacture of car parts. *Collection of articles of the All-Russian scientific and practical conference "Advanced technologies of reverse engineering and rapid prototyping"*. Sevastopol. 61-66. (In Russ.).

14. Rashevsky, D.A. (2024). 3D printing with recycled plastic. *Scientific almanac of the FRANCE-KAZAKHSTAN association*, (2). 142-145. (In Russ.).

15. Khashirov, A.A. (2019). Influence of FDM printing process modes on the properties of products made of polyphenylene sulfone and its composite with discrete carbon fiber. Dissertation of candidate of technical sciences. Nalchik. (In Russ.).

16. National standard of the Russian Federation. (2020). Plastics. Filaments for additive technologies. General technical requirements (HOST R 59100-2020). Retrieved from: <https://docs.cntd.ru/document/566108864>.

17. National standard of the Russian Federation. (2016). Polymer composites. Method for determination of voids. (HOST R 56679-2015). Retrieved from: <https://docs.cntd.ru/search?q=56679%20%82%80%93%202015>.

18. National standard of the Russian Federation. (2016). Polymer composites. Prepregs. Method for determination of constituent content of prepreg. (HOST R 56796-2015). Retrieved from: <https://docs.cntd.ru/document/1200129500>.

19. National standard of the Russian Federation. (2017). Polymer composites. Preparation of samples for microstructure research. (HOST R 57800-2017). Retrieved from: <https://docs.cntd.ru/document/1200157294>.

20. Interstate standard. (2014). Carbon fibre. Determination filament's diameter and cross-sectional area. (HOST 32666-2014 (ISO 11567:1995)) Retrieved from: <https://docs.cntd.ru/document/1200111132>.

Information about the authors

L.N. Shafigullin - candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Materials, Technologies and Quality of the Naberezhnye Chelny Institute of KFU.

N.V. Romanova - candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Materials, Technologies and Quality of the Naberezhnye Chelny Institute of KFU.

A.T. Gabdrakhmanov - candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of High-Energy Processes and Units of the Naberezhnye Chelny Institute of KFU.

E.V. Panfilov - candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Materials, Technologies and Quality of the Naberezhnye Chelny Institute of KFU.

A.M. Sotnikov - postgraduate Student of the Naberezhnye Chelny Institute of KFU.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 17 декабря 2025; одобрена после рецензирования 24 апреля 2026; принята к публикации 18 мая 2026.

The article was received by the editorial board on 17 Dec 2025; approved after editing on 24 Apr 2026; accepted for publication on 18 May 2026.