

ХИМИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

УДК 678.8

DOI: 10.35211/1990-5297-2025-12-307-69-75

Научная статья

Original article

*Е. С. Бочкарев, А. В. Дроботов, А. Н. Дынин, С. А. Кончарова
Г. В. Коробейников, А. Н. Гайдадин*

ВЛИЯНИЕ СТЕПЕНИ ЗАПОЛНЕНИЯ ОБРАЗЦОВ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТОВ С УГЛЕВОЛОКНОМ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ПО ТЕХНОЛОГИИ ПОСЛОЙНОГО НАПЛАВЛЕНИЯ

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

✉ Евгений Сергеевич Бочкарев, bochkarev_es@vstu.ru

Аннотация. Представлены результаты оценки влияния плотности заполнения композиционных материалов с непрерывным углеволокном, полученных в условиях FDM-печати, на прочность при растяжении и ударную вязкость по Шарпи. На примере гибкоцепного стирол-бутадиен-стирольного термопласта и жесткоцепного полиэтилентерефталатгликоля установлено влияние полимерного связующего на потребительские свойства материалов при разной степени заполнения и приложенной нагрузки. Показано, что в случае армирования композитов на основе выбранных термопластов непрерывным волокном прочность при растяжении увеличивается до 46,5 и 11,8 МПа, соответственно. Ударная вязкость армированных образцов, полученных по технологии печати методом послойного наплавления, увеличивается на 35,6 и 29,5 кДж/м² по сравнению с образцами-спутниками на основе неармированных термопластов соответственно.

Ключевые слова: FDM-печать, композиционные материалы, непрерывное углеволокно, адгезионное взаимодействие, полиэтилентерефталатгликоль (PETg), стирол-бутадиен-стирольный термоэластопласт (СБС), ударная вязкость, прочность при растяжении.

Благодарности: исследование выполнено с использованием установок центра коллективного пользования (ЦКП) ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет».

Финансирование: исследование выполнено при финансовой поддержке ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет» (из средств программы развития «Приоритет 2030» по соглашению № 075-15-2025-063) в рамках научного проекта № 1/656-24».

Для цитирования: Бочкарев Е. С., Дроботов А. В., Дынин А. Н., Кончарова С. А., Коробейников Г. В., Гайдадин А. Н. Влияние степени заполнения образцов на физико-механические свойства композитов с углеволокном, изготовленных по технологии послойного наплавления. Известия ВолгГТУ. 2025; 12(307): 69–75. DOI: 10.35211/1990-5297-2025-12-307-69-75.

Информация об авторах:

Евгений Сергеевич Бочкарев – канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры ТВБМ ВолгГТУ
e-mail: bochkarev_es@vstu.ru

Scopus Author ID 57222574440,

AuthorID: 1071215,

ORCID: 0000-0002-2343-1562

Алексей Владимирович Дроботов – канд. техн. наук, доцент кафедры АПП ВолгГТУ

e-mail: Alexey.Drobotov@gmail.com

AuthorID: 623235,

ORCID: 0000-0003-1148-0495

Алексей Николаевич Дынин – магистрант ВолгГТУ

e-mail: sobakafu@gmail.com

Софья Александровна Кончарова – студент ВолгГТУ

e-mail: Koncharovas07@gmail.com

Георгий Владимирович Коробейников – аспирант кафедры ХТПЭ ВолгГТУ

e-mail: georgii_kor@vstu.ru

Алексей Николаевич Гайдадин – канд. техн. наук, доцент кафедры ХТПЭ ВолгГТУ

e-mail: lit@vstu.ru

Вклад авторов:

Е. С. Бочкарев – концептуализация, исследование, обработка данных, написание оригинального текста статьи, привлечение финансирования.

А. С. Дроботов – концептуализация, исследование, обработка данных.

А. Н. Дынин – написание оригинального текста статьи, исследование, обработка данных.

С. А. Кончарова – исследование, обработка данных.

Г. В. Коробейников – определение ударной вязкости и физико-механических свойств.

А. Н. Гайдадин – рецензирование и редактирование статьи, администрирование проекта.

Введение

Стремительное расширение спектра полимерных материалов, получаемых аддитивными методами, привело к систематизации технологических приемов и правил изготовления изделий. Одновременно сформировалась тенденция получения технологией печати не только тестовых образцов, но и готовых к эксплуатации изделий. В действующей практике наибольшее распространение получили методы послойного наплавления полимеров или композитов на их основе, что обоснованно обеспечило формирование пула технологических приемов [1] изготовления изделий. Наглядным результатом указанной выше технологии являются готовые изделия, удовлетворяющие требованиям [2] машиностроения, химической индустрии и даже авиационной техники. Однако постоянный рост требований к качеству изделий с учетом условий их применения выявил недостаточные возможности полимеров и обозначил необходимость применения армированных полимерных композитов. С учетом направленности нагрузок, свойственной изделиям при эксплуатации, оптимальными усиливающими наполнителями для полимерных композиций являются непрерывные волокна органической и неорганической природы. При этом качество изделий обоснованно зависит от ориентации образца на опорном столе принтера [3], ориентации и параметров сопла [4] печатающей головы принтера, толщины дорожек при печати [5] и параметров [6] армирующих полимерную композицию волокон. Анализ технических характеристик, получаемых в ходе печати изделий, позволяет выявить оптимальные типы волокон [7] для заполнения полимерного композита. С учетом значительной зависимости характеристик филамента для печати методом послойного наплавления от природы волокна и полимерного связующего можно предположить формирование полного набора технологических признаков процесса, включающих указанные [3–7] факторы. Однако дальнейшее развитие методологии печати выявило фактор, оказывающий ключевое воздействие на характеристики готовых из-

делий, связанный с соотношением показателей прочности и плотности. На практике попытка получения изделия с меньшей массой при сохранении прочностных показателей из полимерного композита одного состава, как правило, обречена на неудачу. Однако специфика изготовления изделий методом послойного наплавления позволила решить указанное противоречие за счет варьирования степени заполнения матрицы образца. Выявленный прием позволил снизить трудоемкость разработки композиционных изделий с применением технологии армирования непрерывным углеволокном методом FDM-печати, но потребовал применения новых подходов для выбора, последующего анализа характеристик и расчета состава материалов [8–10]. В этом случае ключевым параметром при изготовлении изделий является плотность заполнения образца [11], варьирование которого позволяет изменять прочностные характеристики в широком интервале значений. Как следствие, применение метода послойного наплавления потенциально обеспечило изготовление армированных полимерных композитных материалов (АрПКМ) с необходимыми значениями плотности и прочности для создания легких и прочных изделий.

Определяющими параметрами качества готового изделия являются структура укладки волокна и тип полимерного связующего, выполняющего роль пропитки. Основным критерием качества следует принять адгезию между фазами полимерного связующего и волокном [12], а также площадь контакта между ними. В работе [13] нами было уже показано влияние «коэффициента компенсации потока материала» и укладки волокна при FDM-печати АрПКМ на упруго-прочностные свойства. Однако следует отметить недостаточность работ, посвященных оценке влияния степени заполнения АрПКМ, полученных методами 3D-печати, на их физико-механические свойства.

На основании вышеизложенного, цель данной работы заключается в исследовании влияния степени заполнения АрПКМ на основе филаментов из полиэтилентерефталатгликоля

(PETg) и стирол-бутадиен-стирольного термоэластопласта (СБС), полученных в условиях FDM-печати, на физико-механические свойства изделий.

Экспериментальная часть

Печать образцов проводили на пятиосевом 3D-принтере модели Fiber 530 v. 5.2 (ООО «Стереотек», РФ). Для печати АрПКМ были выбраны филаменты на основе полиэтилентерефталатгликоля и стирол-бутадиен-стирольного термоэластопласта производства компании «BestFilament». Для армирования изделий применяли углеродный ровинг марки «Togaу T700SC» с пропиточным составом композицией на осно-

ве стирол-бутадиен-стирольного термопласта и нефтеполимерной смолы марки «Nikorez T-3100», полученным по технологии вакуумной пропитки [14].

Физико-механические характеристики АрПКМ определяли на разрывной машине марки ТРМ-П Tochline (ООО «Зип», РФ) с максимальной предельной нагрузкой 10 кН (ГОСТ 32656–2017, скорость нагружения образца 2 мм/мин). Ударную вязкость проводили по ГОСТ 4647-2015 (Шарпи без надреза) на приборе GOTECH GT-7045-HML.

Основные технологические параметры печати образцов представлены в таблице.

Параметры получения образцов методом послойного наплавления

Материал филамента	Температура, °С		Количество линий стенки, шт.	Количество витков УВ, шт.	Заполнение, %	Обдув, %
	сопла	стола				
Стирол-бутадиен-стирол (СБС)	240	90	2	2	40	Без обдува
					80	Без обдува
					100	Без обдува
Полиэтилентерефталат-гликоль (PETg)	225	75	2	2	40	15
					80	15
					100	15

Из таблицы видно, что основным варьируемым параметром при изготовлении образцов является их степень заполнения, в значительной степени оказывающий влияние на вес конечного изделия и его прочностные характеристики. Для оценки влияния препрега углеволокна, предварительно аппретированного композицией на основе стирол-бутадиен-стирольного термопласта и нефтеполимерной смолы, на свойства АрПКМ, были изготовлены образцы-спутники с различным заполнением полимерным филаментом без укладки препрега. Выбор в качестве связующего термопласта полиэтилентерефталатгликоля, обладающего хорошей атмосферостойкостью и близкими по значению параметрами растворимости с SBS, способен обеспечить хорошую технологическую и термодинамическую совместимость полимерных фаз. Подтверждением высказанного предположения являются термодинамические константы полимеров, рассчитанных методом Гильденбранда–Смолла. Так, для PETg и СБС значения параметров растворимости равны 17,12 и 19,91 калл^{1/2}·см^{-2/3} соответственно, а их разница позволяет предположить термодина-

мическую и, как следствие, технологическую совместимость полимерных фаз.

Значения упруго-прочностных характеристик АрПКМ и образцов-спутников, полученных в интервале варьирования степени заполнения, представлены на рис. 1.

По данным рис. 1 видно, что образцы АрПКМ на основе полимера СБС, демонстрируют увеличение прочности при растяжении в 3,2 раза по сравнению с образцом-спутником. При снижении заполнения образца происходит снижение прочности при растяжении. Особенно значительно данный параметр для СБС и АрПКМ на его основе изменяется при снижении заполнения от 100 до 80 % и в меньшей степени от 80 до 40 %, что связано со снижением поверхностного контакта напечатанной матрицы с армирующим ее углеволокном. Однако, сравнивая отношение армированных материалов с образцами спутниками, отмечена тенденция к увеличению упрочнения в 3.2...4.3 раз для заполнения 100, 80 и 40 %, соответственно. Можно предположить, что это связано со снижением вклада полимерной матрицы по отношению к углеволокну в общую прочность изделия.

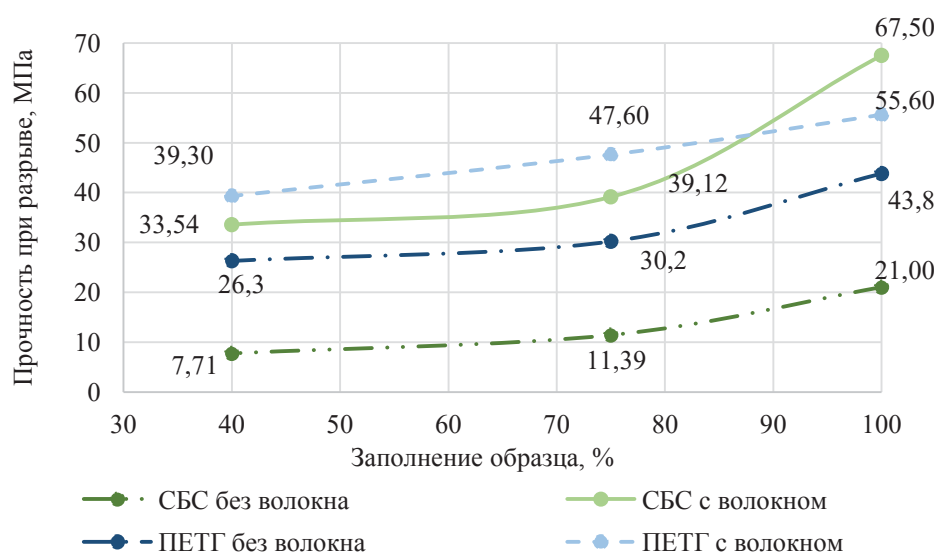


Рис. 1. Влияние заполнения образца на прочность при растяжении (а) и относительное удлинение в точке разрыва (б)

Возможность использования PETg в качестве полимерного связующего армированного композита также определяется его совместимостью с пропиточным составом на основе стирол-бутадиен-стирольного термопласта и нефтеполимерной смолы. Так, увеличение прочности при растяжении для данного композита при 100 % заполнении составило в 1,3 раза. Снижение заполнения до 80 и 40 % продемонстриро-

вало идентичное значение упрочнения, которое выше в 1,5 раза по сравнению с образцами-спутниками.

Отметим, что в случае мало заполненных образцов АрПКМ в процессе испытаний изменялся тип разрушения. Например, образцы на основе СБС в ряде случаев при статическом одноосном растяжении склонны к расслоению (рис. 2).



Рис. 2. Разрушение АрПКМ образца на основе СБС с заполнением 40 %

Из рис. 2 видно, что в случае образцов с малым заполнением наблюдается вырыв армирующего волокна из матрицы композита при его нагружении. Это, в свою очередь, может свидетельствовать о переходе процесса деформирования из режима одноосного нагружения в сложно-нагруженное состояние. Как следствие, требуется проведение математического моделирования данного состояния с учетом формы проектируемого изделия.

В ходе исследований выявлено влияние степени заполнения образца на величину ударной вязкости (рис. 3). Из данных рисунка хорошо

видно уменьшение ударной вязкости в зависимости от снижения заполнения образцов. Подобная тенденция может быть связана со снижением площади поверхности образца, формируемой армирующим углеволокном и полимерным связующим. В результате уменьшения площади, пропорциональной степени заполнения, вполне ожидаемым является отмеченная на рис. 3 тенденция снижения ударной вязкости. Как следствие, при планировании степени заполнения целесообразно проводить оптимизацию по обобщенному критерию «плотность-степень заполнения» для проектируемого типа изделия.

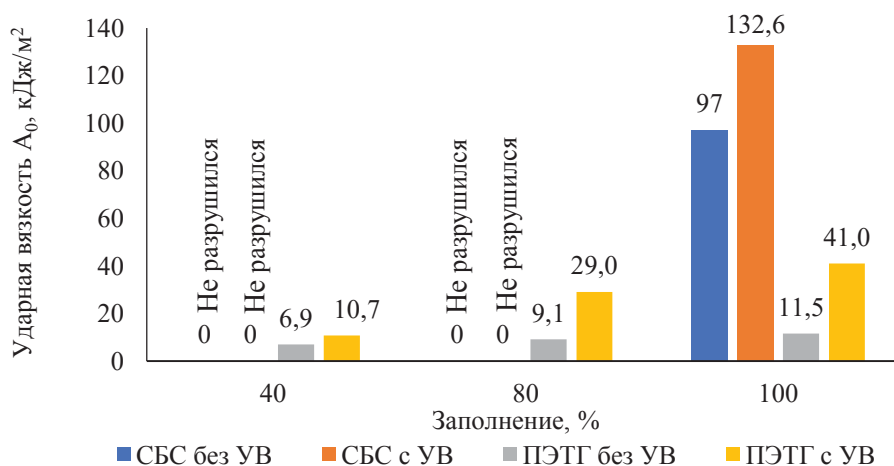


Рис. 3. Ударная вязкость АрПКМ и образцов-спутников по Шарпи без надреза

Результаты испытаний, представленные на рис. 3, позволяют оценить природу используемого в роли полимерного связующего термопласта. Так, применение эластичного сополимера СБС не приводит к разрушению образцов при определении их ударной вязкости. Частичное разрушение этих композитов может быть достигнуто только при полной степени заполнения образца (100 %). Снижение степени заполнения обеспечивает сохранность образцов под воздействием ударной нагрузки маятника установки.

Дополнительное армирование матрицы образца двумя витками углеродного волокна увеличивает ударную вязкость в 1,3 раза.

В случае применения термопласта PETg в качестве полимерного связующего матрицы образца, ударная вязкость увеличивалась в 3,6 раза. При этом армированные образцы демонстрировали частичное разрушение в отличие от образцов-спутников, которые разрушались полностью. Такое увеличение ударной вязкости, вероятно, связано с большей твердостью и конструкционной жесткостью термопласта, как армированного углеволоконным ровингом, так и без него. При снижении заполнения АрПКМ на основе термопласта PETg от 100 до 80 и 40 % упрочнение снижалось от 3,6 до 3,2 и 1,5 раз, соответственно. При этом армированные материалы даже при заполнении 40 % разрушались частично. Анализ такого поведения напечатанных АрПКМ в сравнении с поведением образцов-спутников при различных видах механических воздействий указывает на важность вклада армирующих нитей и параметра совместимости полимера пропитки с филаментом.

Выводы

Полученные данные изменения физико-механических свойств АрПКМ на основе филаментов из полиэтилентерефталатгликоля и стирол-бутадиен-стирольного термопласта в зависимости от степени их заполнения демонстрируют возможность создания облегченных конструкций с повышенной прочностью. В ходе исследований выявлено, что при действии статических растягивающих нагрузок определяющим параметром является площадь контакта, армирующего ровинга с филаментом и наличие адгезионного взаимодействия на межфазной границе. При воздействии ударных нагрузок стойкость напечатанных АрПКМ в значительной степени определяется общей жесткостью конструкции, и, как следствие, конструкционной жесткостью полимера. Отмечено, что при снижении заполнения армированных изделий на основе PETg филамента до 40 % прочность при растяжении увеличивается в 1,5 раз в сравнении с образцами при 100% заполнении. Для последних данный параметр увеличивается в 1,3 раза. Вместе с тем, для образцов со 100 % заполнением фиксируется прирост значений ударной вязкости на 30 кДж/м².

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

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. – С. 34–49. DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-10-34-49.
2. Петрова, Г. Н. Термопластичные материалы нового поколения для авиации / Г. Н. Петрова, С. А. Ларионов, М. М. Платонов, Д. Н. Перфилова // Авиационные материалы и технологии. – 2017. – № 5. – С. 420–436. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-420-436.

3. Cantrell, J. T., Rohde S., Damiani D. et al. Experimental characterization of the mechanical properties of 3D-printed ABS and polycarbonate parts // *Rapid Prototyping Journal*. – 2017. – Vol. 23. – No. 4. – P. 811–824.

4. Ning, F., Cong W., Qiu J. et al. Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling // *Composites Part B: Engineering*. – 2015. – Vol. 80. – P. 369–378.

5. Equbal, A., Equbal M. A., Sood A. K. et al. A Review and Reflection on Part Quality Improvement of Fused Deposition Modelled Parts // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2018. – Vol. 455. – P. 012072.

6. Tekinalp, H. L., Kunc V., Velez-Garcia G. M. et al. Highly oriented carbon fiber–polymer composites via additive manufacturing // *Composites Science and Technology*. – 2014. – Vol. 105. – P. 144–150.

7. Zhong, W., Li F., Zhang Z. et al. Short fiber reinforced composites for fused deposition modeling // *Materials Science and Engineering: A*. – 2001. – Vol. 301. – No. 2. – P. 125–130.

8. Власов, Д. Д. Определение механических упругих характеристик полимерных композитов, изготовленных методами 3D печати / Д. Д. Власов, Н. А. Татусь, А. Э. Поляков // *Живучесть и конструкционное материаловедение: Сборник трудов конференции. Москва, 29–31 октября 2024 года*. – М.: Институт машиноведения им. А. А. Благонравова Российской академии наук, 2024. – С. 19–23.

9. Торубаров, И. С. Исследование адгезии между матрицей и армированием из непрерывного углеволокна в аддитивной технологии послойного наплавления материала / И. С. Торубаров, А. В. Дроботов, А. Л. Плотноков // *СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2024*. – 674 с.

10. Власов, Д. Д. Об эффективных упругих характеристиках полимерных композитов, изготовленных с помощью аддитивных технологий / Д. Д. Власов, А. Э. Поляков, Н. А. Татусь // XXXVI Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов по современным проблемам машиноведения (МИКМУС – 2024): Сборник трудов конференции. Москва, 04–06 декабря 2024 года. – М.: Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, 2024. – С. 55–61.

11. Karad, A. S., Sonawwanay P. D., Naik M., Thakur D. G. Experimental study of effect of infill density on tensile and flexural strength of 3D printed parts // *Journal of Engineering and Applied Science*. – 2023. – Vol. 70, No. 1. – P. 104. DOI: 10.1186/s44147-023-00273-x.

12. Поляков, А. Э. Эффекты при испытаниях новых композитов, изготовленных с помощью аддитивных технологий / А. Э. Поляков, Т. П. Плугатарь, Н. А. Татусь, Д. Д. Власов // XXXV Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов (МИКМУС – 2023): Сборник трудов конференции. Москва, 13–14 ноября 2023 года. – М.: Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, 2023. – С. 177–184.

13. Бочкарев, Е. С. Армированные углеволокном композиционные материалы, полученные по технологии FDM / Е. С. Бочкарев, А. В. Дроботов, И. С. Торубаров // *Пластические массы*. – 2025. – № 2. – С. 16–19. DOI: 10.35164/0554-2901-2025-02-16-19.

14. Бочкарев, Е. С. Влияние олигомеров на качество пропитки непрерывного углеволокна ровинга / Е. С. Бочкарев, В. В. Климов, Ю. Д. Григорьева и др. // *Известия ВолГГТУ: научный журнал № 12(295) / ВолГГТУ*. – Волгоград, 2024. – С. 125–136. DOI 10.35211/1990-5297-2024-12-295-125-136.

REFERENCES

1. Kondrashov, S. V., Py'xtin A. A., Larionov S. A., Sorokin A. E. Vliyanie tekhnologicheskix rezhimov FDM-pec-hati i sostava ispol'zuemy'x materialov na fiziko-mexanicheskie xarakteristiki FDM-modelej (obzor) // *Trudy VIAM*. 2019. № 10. S. 34–49. DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-10-34-49.

2. Petrova, G. N., Larionov S. A., Platonov M. M., Perfilova D. N. Termoplastichny'e materialy' novogo pokoleniya dlya aviatsii // *Aviacionny'e materialy' i tekhnologii*. 2017. № S. S. 420–436. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-420-436.

3. Cantrell, J. T., Rohde S., Damiani D. et al. Experimental characterization of the mechanical properties of 3D-printed ABS and polycarbonate parts // *Rapid Prototyping Journal*. 2017. Vol. 23. No. 4. P. 811–824.

4. Ning, F., Cong W., Qiu J. et al. Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling // *Composites Part B: Engineering*. 2015. Vol. 80. P. 369–378.

5. Equbal, A., Equbal M. A., Sood A. K. et al. A Review and Reflection on Part Quality Improvement of Fused Deposition Modelled Parts // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 455. P. 012072.

6. Tekinalp, H. L., Kunc V., Velez-Garcia G. M. et al. Highly oriented carbon fiber–polymer composites via additive manufacturing // *Composites Science and Technology*. 2014. Vol. 105. P. 144–150.

7. Zhong, W., Li F., Zhang Z. et al. Short fiber reinforced composites for fused deposition modeling // *Materials Science and Engineering: A*. 2001. Vol. 301. No. 2. P. 125–130.

8. Vlasov, D. D., Tatus' N. A., Polyakov A. E'. Opredelenie mexanicheskix uprugix xarakteristik polimerny'x kompozitov, izgotovlenny'x metodami 3D pechati // *Zhivuchest' i konstrukcionnoe materialovedenie: Sbornik trudov konferencii. Moskva, 29–31 oktyabrya 2024 goda*. – Moskva: Institut mashinovedeniya im. A. A. Blagonravova Rossijskoj akademii nauk, 2024. – S. 19–23.

9. Torubarov, I. S., Drobotov A. V., Plotnikov A. L. Issledovanie adgezii mezhdu matricej i armirovaniem iz nepre-r'vnogo uglevolokna v additivnoj tekhnologii poslojnogo nap-lavljeniya materiala // *SPb.: POLITEX-PRESS, 2024*. – 674 s.

10. Vlasov, D. D., Polyakov A. E', Tatus' N. A. Ob e'f-fektivny'x uprugix xarakteristikax polimerny'x kompozitov, izgotovlenny'x s pomoshh'yu additivny'x tekhnologij // XXXVI Mezhdunarodnaya innovacionnaya konferenciya molody'x ucheny'x i studentov po sovremenny'm problemam mashinovedeniya (MIKMUS – 2024): Sbornik trudov konferencii. Moskva, 04–06 dekabrya 2024 goda. – Moskva: Institut mashinovedeniya im. A. A. Blagonravova RAN, 2024. – S. 55–61.

11. Karad, A. S., Sonawwanay P. D., Naik M., Thakur D. G. Experimental study of effect of infill density on tensile and flexural strength of 3D printed parts // *Journal of Engineering and Applied Science*. 2023. Vol. 70, No. 1. P. 104. DOI: 10.1186/s44147-023-00273-x.

12. Polyakov, A. E', Plugatar' T. P., Tatus' N. A., Vlasov D. D. E'f'ekty' pri ispy'taniyax novy'x kompozitov, izgotovlenny'x s pomoshh'yu additivny'x tekhnologij // XXXV Mezhdunarodnaya innovacionnaya konferenciya molody'x ucheny'x i studentov (MIKMUS – 2023): Sbornik trudov konferencii. Moskva, 13–14 noyabrya 2023 goda. – Moskva: Institut mashinovedeniya im. A. A. Blagonravova RAN, 2023. – S. 177–184.

13. Bochkarev, E. S., Drobotov A. V., Torubarov I. S. Armirovanny'e uglevoloknom kompozicionny'e materialy',

poluchenny'e po texnologii FDM // Plasticheskie massy'. 2025. № 2. S. 16–19. DOI: 10.35164/0554-2901-2025-02-16-19.

14. *Bochkarev, E. S., Klimov V. V., Grigor'eva Yu. D. i*

dr. Vliyanie oligomerov na kachestvo propitki nepreryvnogo uglevolokonnogo rovinga // Izvestiya VSTU. – 2024. – № 12(295). S. 125-136. DOI 10.35211/1990-5297-2024-12-295-125-136.

*E. S. Bochkarev, A. V. Drobotov, A. N. Dynin
S. A. Koncharova, G. V. Korobeynikov, A. N. Gaidadin*

**INFLUENCE OF FILLING DENSITY OF SAMPLES ON THE PHYSICAL
AND MECHANICAL PROPERTIES OF CARBON FIBER COMPOSITES
MANUFACTURED USING FUSED DEPOSITION MODELING TECHNOLOGY**

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

✉ Evgeny S. Bochkarev, bochkarev_es@vstu.ru

Abstract. The results of evaluating the influence of filling density on the tensile strength and Charpy impact toughness of composite materials with continuous carbon fibers (CCF) produced under FDM printing conditions are presented. Using flexible chain styrene-butadiene-styrene thermoplastic and rigid chain polyethylene terephthalate glycol, the effect of the polymer binder on the consumer properties of the materials at different fill densities and applied loads is established. It is shown that in the case of reinforcing composites based on the selected thermoplastics with continuous fibers, the tensile strength increases to 46,5 and 11,8 MPa, respectively. The impact toughness of the reinforced samples produced by the layer-by-layer deposition printing method increases by 35,6 and 29,5 kJ/m² compared to the unreinforced thermoplastic-based reference samples, respectively.

Keywords: FDM printing, composite materials, continuous carbon fiber, adhesive interaction, polyethylene terephthalate glycol (PETG), styrene-butadiene-styrene thermoplastic elastomer (SBS), impact toughness, tensile strength

Acknowledgments: This study was conducted using facilities at the Volgograd State Technical University's shared use center.

Funding: The study was carried out with the financial support of the Volgograd State Technical University (from the funds of the Priority 2030 development program under agreement No. 075-15-2025-063) within the framework of scientific project No. 1/656-24.

For citation: Bochkarev E. S., Drobotov A. V., Dynin A. N., Koncharova S. A., Korobeynikov G. V., Gaidadin A. N. Influence of filling density of samples on the physical and mechanical properties of carbon fiber composites manufactured using fused deposition modeling technology. *Izvestiya VSTU*. 2025; 12(307): 69–75. DOI: 10.35211/1990-5297-2025-12-307-69-75.

Information about the authors:

Evgeny S. Bochkarev – PhD in Technical Sciences, Senior Lecturer of the Department of TVMM VSTU

e-mail: bochkarev_es@vstu.ru

Scopus Author ID: 57222574440

Author ID: 1071215

ORCID: 0000-0002-2343-1562

Alexey V. Drobotov – PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of APP VSTU

e-mail: Alexey.Drobotov@gmail.com

Author ID: 623235

ORCID: 0000-0003-1148-0495

Alexey N. Dynin – Master's student VSTU

e-mail: sobakafu@gmail.com

Sofia A. Koncharova – Student VSTU

e-mail: Koncharovas07@gmail.com

Georgy V. Korobeynikov – PhD student of the Department of KHTPE VSTU

e-mail: georgii_kor@vstu.ru

Alexey N. Gaidadin – PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of KHTPE VSTU

e-mail: lit@vstu.ru

Contribution of the authors:

Evgeny S. Bochkarev – Conceptualization, research, data processing, writing the original text of the article, securing funding.

Alexey S. Drobotov – Conceptualization, research, data processing.

Alexey N. Dynin – Writing the original text of the article, research, data processing.

Sofia A. Koncharova – Research, data processing.

Georgy V. Korobeynikov – investigation of impact and physical-mechanical property.

Alexey N. Gaidadin – Reviewing and editing the article, project administration.

Статья поступила в редакцию 25.10.2025, доработана 10.11.2025, подписана в печать 03.12.2025

The article was submitted 25.10.2025, revised 10.11.2025, accepted for publication 03.12.2025