

УДК 778.64

doi: 10.21685/2072-3059-2024-1-14

Оборудование и технология для обеспечения прочностных характеристик полимерных изделий при 3D-печати композитным филаментом

А. Е. Зверовщиков¹, И. В. Бантыш², В. З. Зверовщиков³

^{1,3}Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

²Производственное объединение «Старт» имени М. В. Протченко, Заречный, Пензенская область, Россия

¹azwer@mail.ru, ²Ilya.bantysh@gmail.com, ³wzzwer@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Полимерные изделия, полученные 3D-печатью, уступают по прочностным характеристикам литым деталям. Для увеличения прочностных характеристик, ударной вязкости и теплостойкости изделий создан композитный филамент, разработана технология его получения и применения. Цель исследования – отработка технологических режимов производства и применения композиционного филамента, оценка механических свойств изделий, полученных при послойном синтезе из предлагаемого композиционного материала на основе полиэфирэфиркетона. *Результаты.* Разработано оборудование для производства композиционного сырья для 3D-печати и изучено влияние технологических режимов на качество получаемого изделия. Представлены результаты оценки механических свойств изделий, полученных методом 3D-печати из композиционного сырья.

Ключевые слова: 3D-печать, композит, филамент, экструзия

Для цитирования: Зверовщиков А. Е., Бантыш И. В., Зверовщиков В. З. Оборудование и технология для обеспечения прочностных характеристик полимерных изделий при 3D-печати композитным филаментом // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2024. № 1. С. 163–176. doi: 10.21685/2072-3059-2024-1-14

Equipment and technology for ensuring the strength characteristics of polymer products in 3D printing with composite filament

A.E. Zverovshchikov¹, I.V. Bantysh², V.Z. Zverovshchikov³

^{1,3}Penza State University, Penza, Russia

² Start research and production enterprise named after M.V. Protsenko, Zarechny, Penza region, Russia

¹azwer@mail.ru, ²Ilya.bantysh@gmail.com, ³wzzwer@mail.ru

Abstract. *Background.* Polymer products produced by 3D printing are inferior in strength characteristics to cast parts. To increase the strength characteristics, impact strength and heat resistance of products, a composite filament was created, and a technology for its production and use was developed. The purpose of the study is to develop technological regimes for the production and use of composite filament, to evaluate the mechanical properties of products obtained through layer-by-layer synthesis from the proposed composite material based on polyetheretherketone. *Results.* Equipment for the production of compo-

site raw materials for 3D printing has been developed and the influence of technological modes on the quality of the resulting product has been studied. The results of assessing the mechanical properties of prototypes obtained by 3D printing from composite raw materials are presented.

Keywords: 3D printing, composite, filament, extrusion

For citation: Zverovshchikov A.E., Bantysh I.V., Zverovshchikov V.Z. Equipment and technology for ensuring the strength characteristics of polymer products in 3D printing with composite filament. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2024;(1):163–176. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2024-1-14

Введение

Благодаря легкой адаптируемости к различным задачам и возможности быстро производить изделия различной по сложности геометрии с минимальными материальными и экономическими затратами 3D-печать активно используется в различных отраслях производства и промышленности, а также с недавнего времени занимает центральное место в научных исследованиях по всему миру.

Наиболее распространенной и доступной как в материальном, так и в технологическом плане является технология 3D-печати методом наплавки полимерных нитей, или FDM [1, 2].

Пожалуй, самым перспективным материалом, используемым в технологиях FDM, является полиэфирэфиркетон (PEEK), который по прочностным характеристикам превосходит акрилонитрилбутадиенстирол (ABS), стирол-бутадиеновый сополимер (SBS), ударопрочный полистирол (HIPS), полилактид (PLA), полиэтилентерефталатгликоль (PETG) и другие, используемые в этом методе печати материалы [2–4].

Полиэфирэфиркетон обладает уникальным потенциалом для автомобильной, электронной, аэрокосмической промышленности, 3D-печати сверхпрочных, сверхлегких изделий из армированного материала, способных выдерживать циклические нагрузки, перепады температур и давления, имея при этом низкое водопоглощение, биосовместимость и высокий уровень радиационной устойчивости.

Для расширения производства мелких серий оборудования, деталей легких станков, медицинских, аэрокосмических изделий необходимы современные и инновационные решения, включающие внедрение композиционных материалов. В качестве компонентов композитной арматуры могут использоваться тальковая пудра, абразив, графен [4, 5]. Разработка таких композитов приводит к необходимости критического анализа производственных технологий 3D-печати и исследование процесса обработки подобных материалов. Формирование свойств композитных изделий зависит не только от строения материала, но и от технологических особенностей 3D-печати.

Технологические режимы формирования изделий в 3D-печати [6–9], имеющиеся к настоящему времени, обеспечивают свойства изделий из полимерных материалов, как правило, на порядок ниже свойств полимерных изделий, полученных традиционными методами изготовления, например технологией литья на термопластавтоматах (ТПА).

При этом 3D-печать имеет большое количество вариантов корректировок технологии формирования детали. Алгоритм печати может существенно влиять на структуру, а также на физические и механические свойства материала [7–11]. Однако влияние технологических параметров 3D-печати термопластами на эксплуатационные свойства изделий изучено недостаточно, и большая часть опубликованных работ связана с изучением свойств простых термопластов по типу ABS и PLA. Слабо исследованы особенности использования высокотемпературных материалов и композитов в 3D-печати. Недостаточность исследований влияния режимов 3D-печати на прочностные характеристики высокотемпературной продукции из композитных материалов ограничивает использование аддитивных технологий в высокоразвитых наукоемких отраслях производства.

Таким образом, комплексное исследование параметров печати и основных свойств изделий из армированного полиэфирэфиркетона является важной и актуальной задачей.

Для проведения исследований был разработан опытный образец экструдера, включающий в себя возможность производства композиционных полимеров с разным уровнем наполнения (рис. 1).

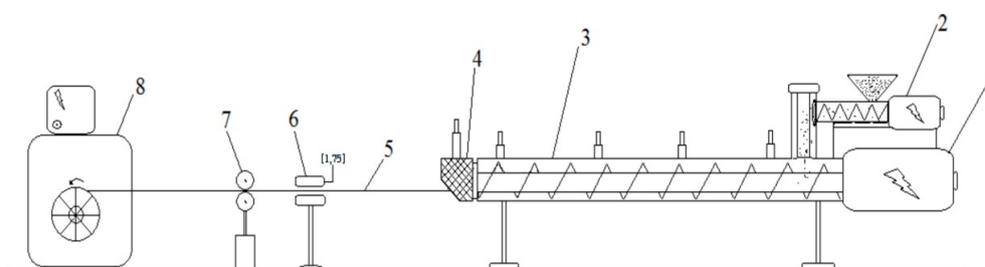


Рис. 1. Схема двухшнекового экструдера производства АО ФНПЦ «ПО «Старт» им М. В. Проценко»: 1 – двигатель привода основного шнека; 2 – дозатор армирующего компонента; 3 – цилиндр основного материала со шнеками; 4 – фильера; 5 – получаемый композитный филамент; 6 – конечный лазерный измеритель; 7 – узел протяжки; 8 – сборник филамента

Характеристики экструдера производства АО ФНПЦ «ПО «Старт» им. М. В. Проценко» представлены в табл. 1, контроль диаметра филамента осуществляется с помощью бесконтактного лазерного измерителя, установленного в конце экструзионной линии, что позволяет при помощи обратной связи через управляющий контроллер регулировать режимы экструдирования.

Таблица 1

Характеристики экструдера

Показатель	Характеристика
Размер экструдера	настольный
Тип экструдера	двухшнековый
Диаметр подающего шнека, мм	12
Диаметр смешивающих шнеков, мм	12 мм
Количество зон нагрева	5
Максимальная температура нагрева	450 °С
Контроль выходного диаметра филамента	Бесконтактный лазерный измеритель

Результаты исследования

Проведение экспериментальных исследований по получению композиционного материала позволило определить подходящие режимы формирования композиционной нити на основе РЕЕК. Температура смешивания полиэфирэфиркетонового композита с армирующим углеволокном составила $365\text{ }^{\circ}\text{C}$, частота вращения основного шнека находилась в диапазоне от 115 до 130 мин^{-1} , а частота вращения шнека подачи полимера не превышала $52\text{--}57\text{ мин}^{-1}$. Эти параметры были результатом экспериментальной оптимизации по симплекс-методу. Параметры факторного пространства – температура смеси, частоты вращения основного шнека подачи полимера и шнека подачи армирующего материала. Шаги (интервалы) варьирования симметричного симплекса составили соответственно: $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, 3 мин^{-1} , 5 мин^{-1} .

Известно, что при FDM-печати объект изготавливается послойно методом аппликации слоев, основные технологические режимы – температура и давление печатающей головки. Подача филамента производится протяжкой полимерной нити посредством двух роликов. Формирование 3D-модели печатного изделия происходит слой за слоем (рис. 2) [12, 13] до окончательной формы (рис. 3) [13–15].

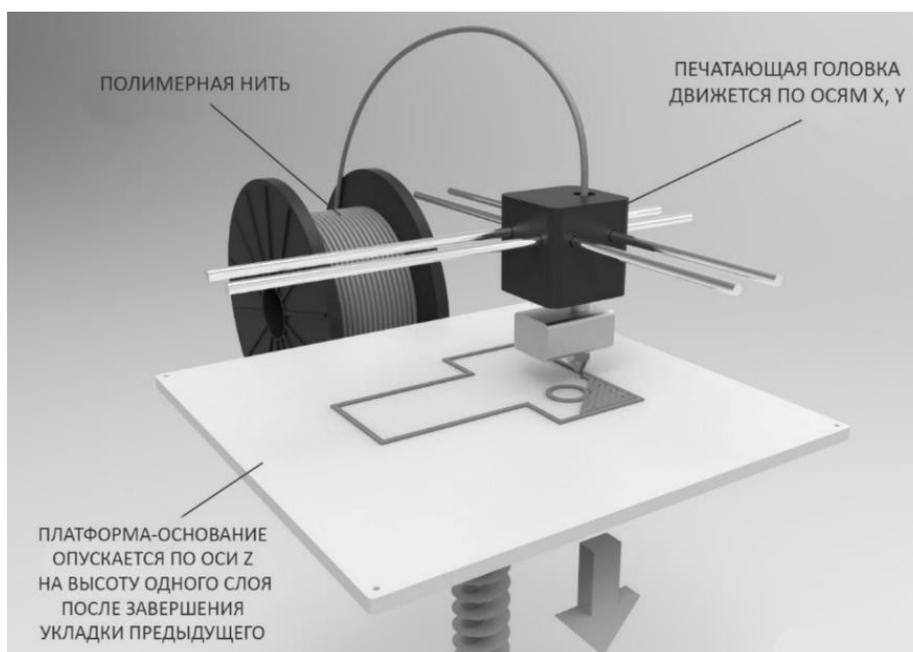


Рис. 2. Последовательность укладки слоев на установке 3D-печати методом FDM

В целях изучения основных показателей прочности изготовлены 3D-модели брусков и лопаток соответствующих размеров, указанных в ГОСТ 19109–84, 11262–80, 9550-в и 4648–2014, построение 3D-моделей выполнено на программном обеспечении «Компас3D V22» (рис. 4).

В качестве армирующего наполнителя последовательно использованы несколько материалов: тальк с основной фракцией 5–40 мкм, стекловолокно и углеволокно с максимальным размером волокон 50–60 мкм. Использован

принтер собственного производства АО ФНПЦ «ПО «Старт» им. М. В. Проценко» с модернизированным соплом уникальной конструкции.

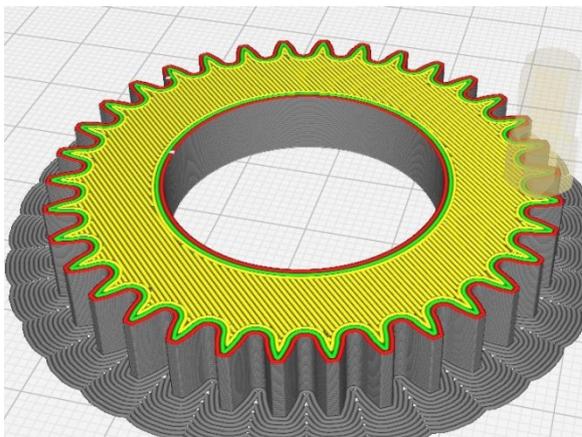


Рис. 3. Конфигурация окончательной формы изделия при печати методом FDM

Поскольку печатающая головка укладывает слои по определенной схеме, целью исследования было определение влияния следующих параметров печати на качество изделия (рис. 5).

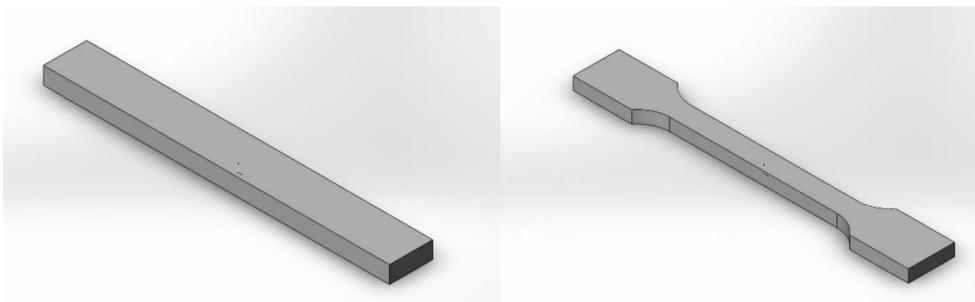


Рис. 4. Тестовые модели по ГОСТ19109–84

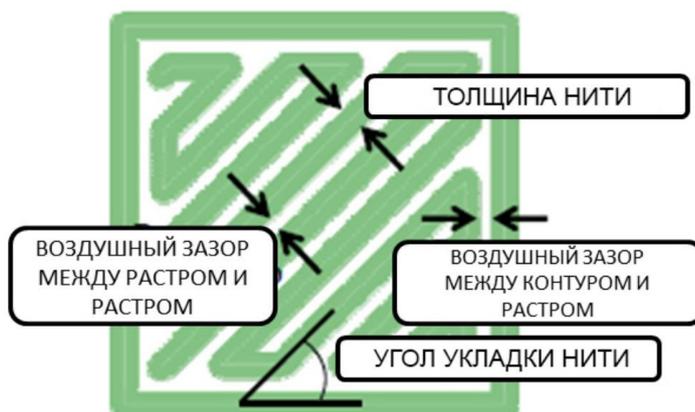


Рис. 5. Параметры печати, определяющие качество изделия и траектория укладки нити, задаваемые программой

Для печати тестовых образцов в экструдер было установлено разработанное для исследуемого композита сопло диаметром 0,4 мм, которое обеспечило при экономически приемлемых режимах печати среднюю высоту слоя 0,20 мм со статистически незначимыми по критерию Стьюдента отклонениями.

Количество слоев в печатаемых образцах: в бруске – 20, в лопатке – 16. В программе «Cura V5.2.0» для исследования влияния схемы укладки нити были реализованы нижеперечисленные схемы послойной укладки (далее – режимы).

Режим $+45/-45^\circ$ является базовым режимом, используемым по умолчанию в 3D-принтере Cura V5.2.0. В данном режиме слои чередуют под углом $+45/-45^\circ$ до окончания формирования изделия (рис. 6).

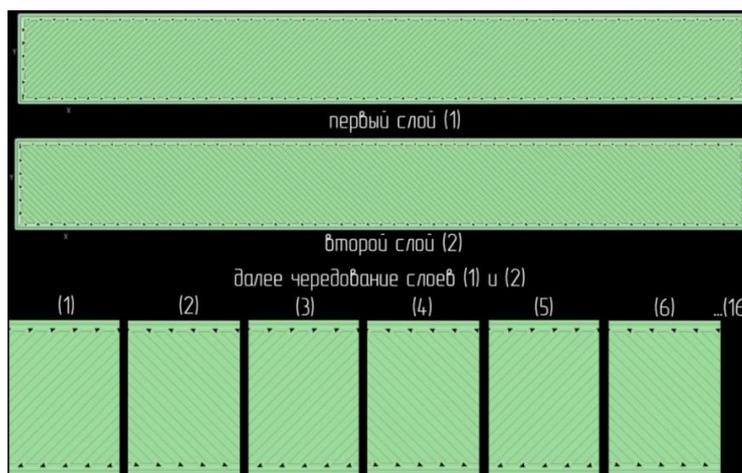


Рис. 6. Режим $+45/-45^\circ$

Далее опробован режим 0° , когда ориентация линий слоя происходит по направлению 0° . Все последующие слои накладываются на предыдущие без изменения угла нанесения слоя (рис. 7).

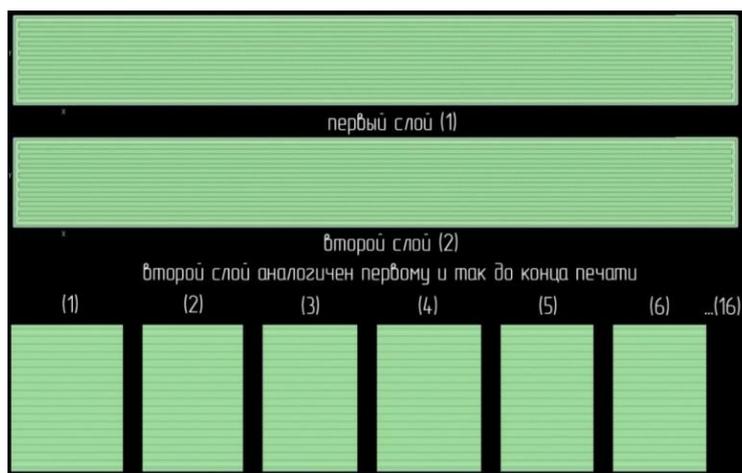


Рис. 7. Режим 0°

Отдельно опробован режим 0° со смещением линий растров – ориентация линий слоя происходит по направлению 0° . Все последующие слои накладываются на предыдущие со смещением на 50 % диаметра сопла для образования более плотной структуры (рис. 8).

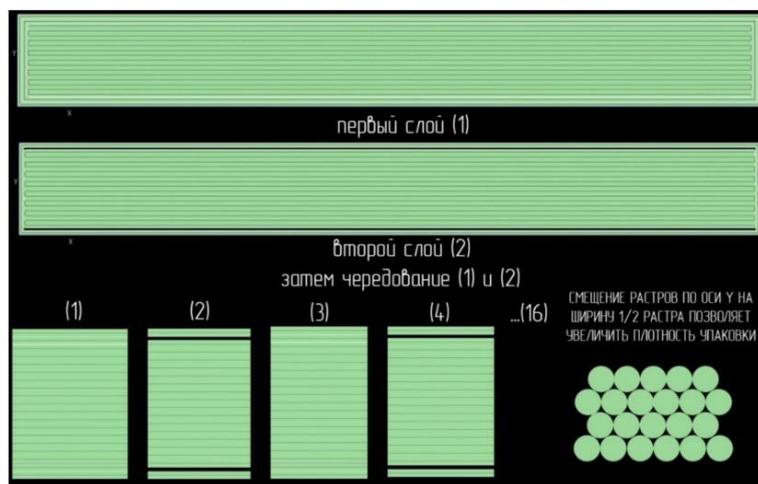


Рис. 8. Режим 0° со смещением линий растров на 50 % диаметра сопла

Результаты эксперимента

Использование талька и стекловолкна в качестве армирующего материала оказалось неэффективным. Ключевые физико-механические свойства образцов, изготовленных литьевым методом из чистого РЕЕК, и образцов из композитного филамента, изготовленного на экструдере (см. рис. 1) на основе РЕЕК+10% углеволокна (УВ), представлены в табл. 2.

Результаты исследований показывают, что углеродные волокна приводят к снижению ударной вязкости и уменьшению коэффициента относительного удлинения. При этом модуль упругости значительно повысился, как и модуль прочности при разрыве. Эти изменения характера ожидаемы и естественны при введении наполнителя из жесткого волокна. Тестирование образцов РЕЕК+10%УВ, выполненных в режиме 0° , показало небольшую разницу в сравнении с образцами из чистого РЕЕК, полученного литьем под давлением.

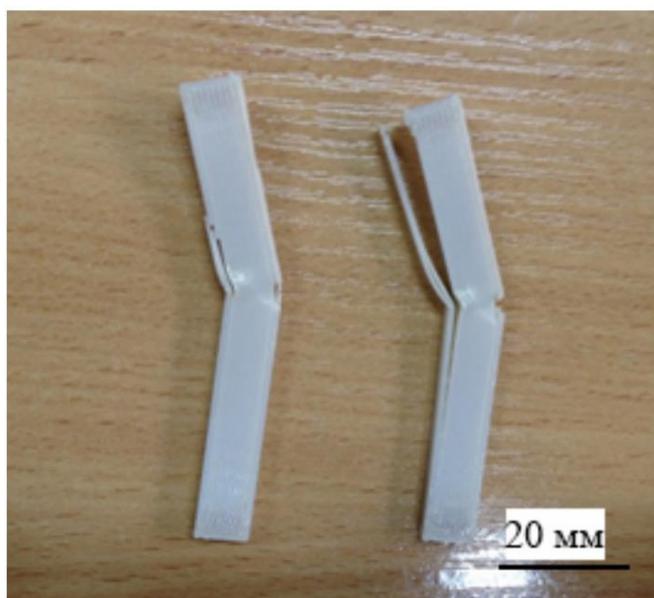
Ударная вязкость снижается, как и ожидалось, но все режимы показывают примерно одинаковые значения с небольшим предпочтением режима 0° . Наименьшее значение модуля упругости показывает тестовый образец, напечатанный в режиме $+45/-45^\circ$, как это было установлено и для тестовых образцов, полученных методом литья из РЕЕК, однако ориентация обеспечивает композиту наибольшую прочность при изгибах и растяжениях. Образцы с продольным ориентированием 0° демонстрируют несколько улучшенные физические и механические свойства в сравнении с напечатанными в режиме $+45/-45^\circ$. Образцы из чистого РЕЕК, отформованные на литьевой машине, обладают высокими упруго-прочностными свойствами и ударной вязкостью. Но разрушение этих образцов происходит одномоментно, т.е. образец ломается.

Таблица 2

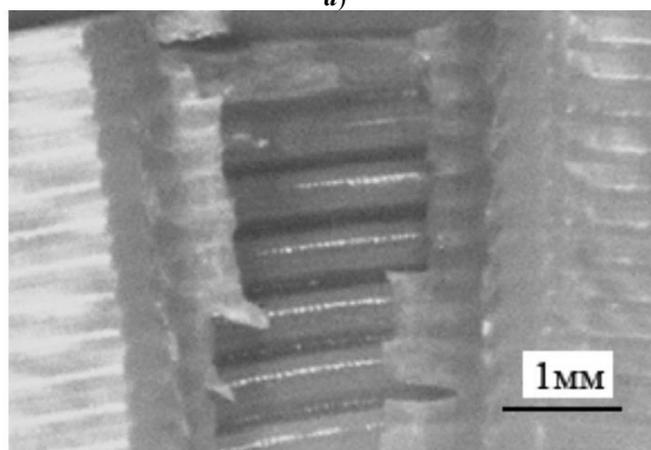
Механические свойства напечатанных тестовых образцов из РЕЕК и РЕЕК+10%УВ при различных режимах

Режим 3D-печати, ориентация [°]	Ударная вязкость по Изоду [кДж/м]	Модуль упругости при изгибе [МПа]	Прочность при изгибе [МПа]	Модуль упругости при растяжении [МПа]	Прочность при разрыве [МПа]	Предел текучести при растяжении [МПа]	Относительное удлинение [%]
Литьевые образцы							
Образец, изготовленный на ТПА из чистого РЕЕК	229,3/43,5	2400/4960	74,9/126	2152/3565	54/71	68,6/76,2	15/5
Композитные образцы							
1. Режим +45/-45°	188,1/39,5	2130/4100	87,6/113,0	2054/3010	28/31	-/-	4/4
2. Режим 0 со смещением растров	196,3/44,1	2450/4350	134/151,3	2152/3260	56/38	-/-	6,9/3,1
3. Режим 0	167,1/41,6	2350/4250	134/141	2250/3530	57/26	-/-	8/2,1

При использовании режима печати со смещением (алгоритм смещения на 50 % от диаметра сопла) тестовые образцы хуже работают на растяжение но показывают лучшую устойчивость к ударной нагрузке. При проведении испытаний наблюдается видимое пластическое деформирование образца, разрушение лишь внешних слоев образца (рис. 9).



a)



б)

Рис. 9. Образцы из полиэфирэфиркетона, напечатанные с 50 % сдвигом слоев и без него: *a* – после испытания; *б* – структура зоны разрушения образца.

Печать в этом режиме формирует более сложную структуру и плотную укладку слоя, в отличие от режима 0° без смещения, за счет переноса слоя при печати. Это позволяет отлично распределять и поглощать энергию ударных нагрузок, поскольку главный путь их распространения при таких исследованиях становится сложнее. Благодаря укладыванию растров со смещением образец не имеет воздушных пустот, и это не вызывает расслоения при

разрушении тестового образца. В результате проведенных исследований образцов, напечатанных из композиционных материалов РЕЕК+10%УВ, обнаружили особенность, которая отличает их от ненаполненных образцов наличием внутренних особенностей. При рассмотрении поверхности образцов композитных материалов (рис. 10) установлено, что даже если межрастровое смещение равно нулю, укладка слоев происходит плотно относительно друг друга.

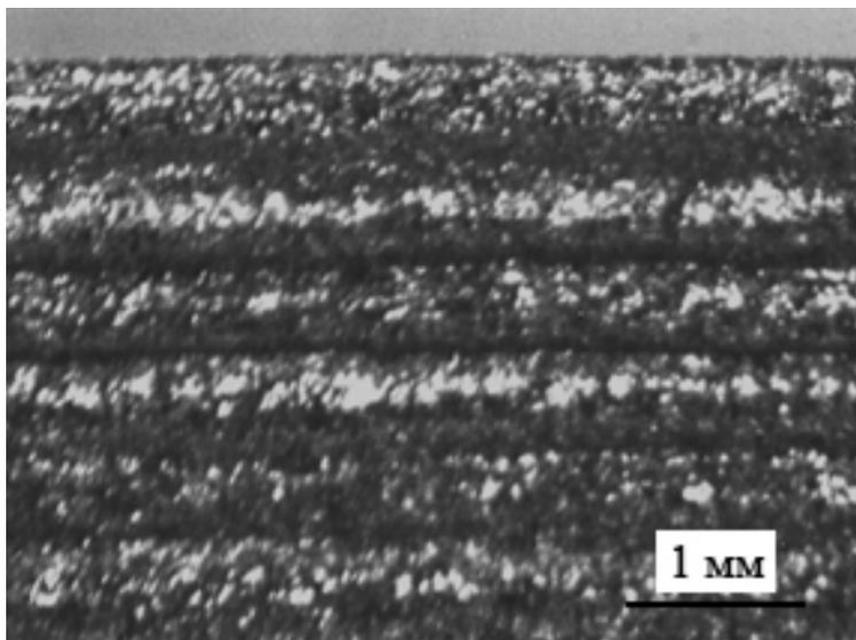


Рис. 10. Структура наружной поверхности образцов, напечатанных из РЕЕК+10%УВ

Однако при ближайшем рассмотрении поверхности композитных образцов не видно слоистой структуры внутри образца: полное спекание растворов друг с другом образует сплошной пласт материала (рис. 11). Такое положение материала в процессе печати обусловлено смешиванием материалов соседних слоев и взаимодействием соседних дорожек из-за наличия выступающих за поверхность слоев жестких углеродных волокон. Это явление совершенно нетипично для изделий, изготовленных методом 3D-печати из номатериалов и большинства композитов.

Изучение текучести расплавов применяемых материалов показало, что этот эффект не связан с изменением вязкости расплава композитного филамента. Наоборот, измеренные показатели индекса вязкости расплава свидетельствуют, что введение 10 % УВ приводит к снижению его значения с 26,5 г / 10 мин для чистого РЕЕК до 19 г / 10 мин для РЕЕК+10%УВ, т.е. на 27 %.

Метод капиллярной реометрии также показывает увеличение вязкости расплава филамента при введении углеволокна (рис. 12). Была выдвинута гипотеза, объясняющая явление смешением материала слоев в структуре композиционного материала, что связано с их увеличением в размерах после нанесения. Косвенно это подтверждалось тем, что плотность материала пе-

чатных композитных образцов, несмотря на свою прочность, снижалась на 7–11 % относительно образцов исходного филамента.

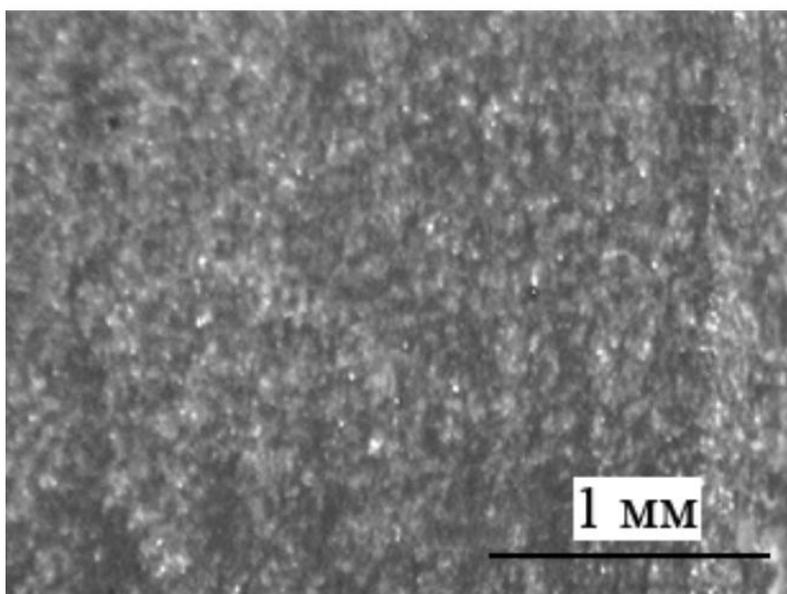


Рис. 11. Структура на поперечном срезе образца из РЕЕК+10%УВ, напечатанного в режиме 0°

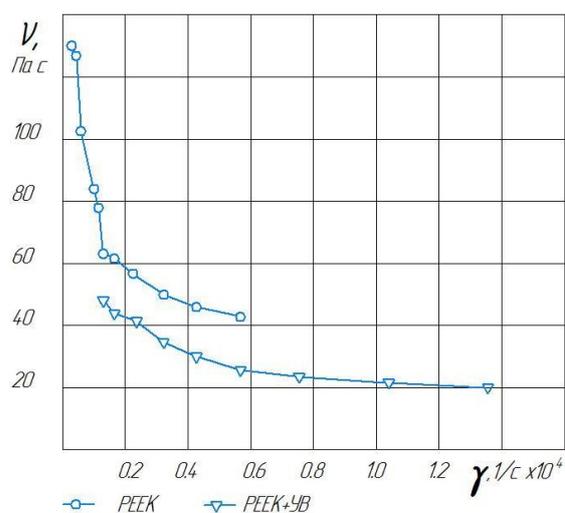


Рис. 12. Данные по капиллярной реометрии для РЕЕК и РЕЕК+УВ

Заключение

По результатам исследования можно сделать несколько выводов.

Впервые изучены и выявлены особенности влияния описанных выше технологических режимов 3D-печати угленаполненным композитом на основе полиэфирэфиркетона методом FDM.

Продемонстрировано, что методом FDM при введении армирующей составляющей в филамент можно производить изделия, которые сопостави-

мы с литыми образцами из чистого материала по таким физическо-механическим свойствам, как прочность на разрыв и при изгибе.

Установлено, что лучшими физико-механическими свойствами обладают образцы, напечатанные с продольным направлением нитей (при расположении под углом 0°), за ними следует группа образцов ($+45/-45^\circ$).

Явление, наблюдаемое при 3D-печати композитов с волокном, требует дальнейшего изучения. Возможное влияние природы носителя и формы волокон варьируется, может быть существеннее и разнообразнее, не ограничиваясь примерами, приведенными в работе.

Полученные в процессе работы экспериментальные материалы могут быть использованы в качестве основы для усовершенствования формирования изделий из полимерного материала, полученного технологией 3D-печати, а также построения теоретической базы для прогнозирования качественных свойств.

Список литературы

1. Зленко М. А., Попович А. А., Мутьлина И. Н. Аддитивные технологии в машиностроении. СПб. : Изд-во политех. ун-та, 2013. 222 с.
2. Чабаненко А. В., Назаревич С. А., Щеников Я. А., Гулевитский А. Ю. Технология аддитивного производства, моделирование и управление качеством процесса послойного синтеза. СПб. : ГУАП, 2018. 137 с.
3. Седунин В. А., Марченко Ю. Г., Калинин И. А. Прототипирование центробежных микрокомпрессоров методами аддитивных технологий // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. 2021. № 27. С. 27–34.
4. Ермакова В. А., Гасперович Е. В., Ермаков А. И., Литвяк В. В. Исследование прочностных характеристик изделий, полученных методом 3D-печати из PLA // Наука и техника. 2022. № 2. С. 107–113. doi: 10.21122/2227-1031-2022-21-2-107-113
5. Зверовщиков А. Е., Шелахаев Д. А., Нестеров С. А. Исследование точности размеров, обеспечиваемых технологией 3D-печати // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2019. № 1. С. 66–78. doi: 10.21685/2072-3059-2019-1-6
6. Зленко М. А., Попович А. А., Мутьлина И. Н. Аддитивные технологии в машиностроении : учеб. пособие. СПб., 2013. 223 с.
7. Адерица В. Н., Краснов А. П., Шаповалов В. А. Влияние температурного режима экструзионного компаундирования на структуру и механические свойства композита полиамида 6 и терморасширенного графита // Полимерные материалы и технологии. 2016. Т. 2, № 1. С. 54–60.
8. Витренко В. А., Сыровой Г. В., Афошин А. А. Исследование прочности и характера разрушений моделей, получаемых при изменении положения в 3D-печати // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития : материалы Второй Междунар. науч.-техн. конф. / отв. за выпуск О. А. Белов. Петропавловск-Камчатский, 2020. С. 137–140.
9. Zsombor-Murray P. J. Descriptive Geometric Kinematic Analysis of Clavel's "Delta" Robot // Journal of Geometry. 2010. № 108 (1). P. 149–169.
10. Зленко М. А., Забеднов П. В. Аддитивные технологии в опытно-литейном производстве. Технологии литья металлов и пластмасс с использованием синтез-моделей и синтез-форм // Металлургия машиностроения. 2013. № 3. С. 043–048.
11. Савченя А. А., Ермаков А. И. Исследование влияния технологических параметров 3D-печати ABS-пластиком на механические характеристики изделий // Мирская

- экономика и бизнес-администрирование малых и средних предприятий : материалы 16-го Междунар. науч. семинара, проводимого в рамках 18-й Междунар. науч.-техн. конф. «Наука-образованию, производству, экономике», 26 марта 2020 г. Минск : Право и экономика, 2020. С. 231–232.
12. Kalsoom U., Nesterenko P. N., Paull B. Recent developments in 3D printable composite materials // RSC advances. 2016. Vol. 6, № 65. P. 60355–60371. doi: 10.1039/c6ra11334f
 13. Gardan J. Additive manufacturing technologies: state of the art and trends // International Journal of Production Research. 2016. Vol. 54, № 10. P. 3118–3132.
 14. Gibson I., Rosen D., Stucker B. Additive Manufacturing Technologies. New York : Springer, 2015. 498 p.
 15. Chua K. K., Leong K. F. 3D printing and additive manufacturing: principles and applications. Singapore : World Scientific, 2014. 456 p.

References

1. Zlenko M.A., Popovich A.A., Mutylina I.N. *Additivnye tekhnologii v mashinostroenii = Additive technologies in mechanical engineering*. Saint Petersburg: Izd-vo politekh. unta, 2013:222. (In Russ.)
2. Chabanenko A.V., Nazarevich S.A., Shchenikov Ya.A., Gulevitskiy A.Yu. *Tekhnologiya additivnogo proizvodstva, modelirovanie i upravlenie kachestvom protsessa posloynogo sinteza = Additive manufacturing technology, modeling and quality control of the layer-by-layer synthesis process*. Saint Petersburg: GUAP, 2018:137. (In Russ.)
3. Sedunin V.A., Marchenko Yu.G., Kalinin I.A. Prototyping of centrifugal microcompressors using additive technologies. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika = Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Aerospace engineering*. 2021;(27):27–34. (In Russ.)
4. Ermakova V.A., Gasperovich E.V., Ermakov A.I., Litvyak V.V. Studying the strength characteristics of products produced by 3D printing from PLA. *Nauka i tekhnika = Science and technology*. 2022;(2):107–113. (In Russ.). doi: 10.21122/2227-1031-2022-21-2-107-113
5. Zverovshchikov A.E., Shelakhaev D.A., Nesterov S.A. Studying the dimensional accuracy provided by 3D printing technology. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2019;(1):66–78. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2019-1-6
6. Zlenko M.A., Popovich A.A., Mutylina I.N. *Additivnye tekhnologii v mashinostroenii: ucheb. posobie = Additive technologies in mechanical engineering: textbook*. Saint Petersburg, 2013:223. (In Russ.)
7. Aderikha V.N., Krasnov A.P., Shapovalov V.A. The influence of the temperature regime of extrusion compounding on the structure and mechanical properties of a composite of polyamide 6 and thermally expanded graphite. *Polimernye materialy i tekhnologii = Polymer materials and technologies*. 2016;2(1):54–60. (In Russ.)
8. Vitrenko V.A., Syrovoy G.V., Afoshin A.A. Studying the strength and nature of destruction of models obtained when changing position in 3D printing. *Tekhnicheskaya ekspluatatsiya vodnogo transporta: problemy i puti razvitiya: materialy Vtoroy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. = Technical operation of water transport: problems and ways of development: proceedings of the 2nd International scientific and engineering conference*. Petropavlovsk-Kamchatskiy, 2020:137–140. (In Russ.)
9. Zsombor-Murray P.J. Descriptive Geometric Kinematic Analysis of Clavel's "Delta" Robot. *Journal of Geometry*. 2010;(108):149–169.
10. Zlenko M.A., Zabednov P.V. Additive technologies in pilot foundry production. Technologies for casting metals and plastics using synthesis models and synthesis molds. *Metallurgiya mashinostroeniya = Metallurgy mechanical engineering*. 2013;(3):043–048.

11. Savchenya A.A., Ermakov A.I. Studying the influence of technological parameters of 3D printing with ABS plastic on the mechanical characteristics of products. *Mirovaya ekonomika i biznes-administririvanie mal'kikh i srednikh predpriyatiy: materialy 16-go Mezhdunar. nauch. seminara, provodimogo v ramkakh 18-y Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. «Nauka-obrazovaniyu, proizvodstvu, ekonomike», 26 marta 2020 g. = World economy and business administration of small and medium-sized enterprises: proceedings of the 16th International seminar held within the 18th International scientific and engineering conference “Science to education, production, economics”*. Minsk: Pravo i ekonomika, 2020:231–232. (In Russ.)
12. Kalsoom U., Nesterenko P.N., Paul B. Recent developments in 3D printable composite materials. *RSC advances*. 2016;6(65):60355–60371. doi: 10.1039/c6ra11334f
13. Gardan J. Additive manufacturing technologies: state of the art and trends. *International Journal of Production Research*. 2016;54(10):3118–3132.
14. Gibson I., Rosen D., Stucker B. *Additive Manufacturing Technologies*. New York: Springer, 2015:498.
15. Chua K.K., Leong K.F. *3D printing and additive manufacturing: principles and applications*. Singapore: World Scientific, 2014:456.

Информация об авторах / Information about the authors

Александр Евгеньевич Зверовщиков

доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой технологии
и оборудования машиностроения,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: azwer@mail.ru

Aleksandr E. Zverovshchikov

Doctor of engineering sciences, associate
professor, head of the sub-department
of technologies and equipment
of mechanical engineering, Penza
State University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

Илья Васильевич Бантыш

инженер-технолог, Производственное
объединение «Старт» имени
М. В. Проценко (Россия, Пензенская
область, г. Заречный, пр-т Мира, 1)

E-mail: Ilya.bantysh@gmail.com

Ilya V. Bantysh

Process engineer, Start research
and production enterprise named after
M.V. Protsenko (1 Mira avenue, Zarechny,
Penza region, Russia)

Владимир Зиновьевич Зверовщиков

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры технологии
и оборудования машиностроения,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: azwer@mail.ru

Vladimir Z. Zverovshchikov

Doctor of engineering sciences, professor,
professor of the sub-department
of technologies and equipment
of mechanical engineering, Penza State
University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 20.06.2023

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 17.11.2023

Принята к публикации / Accepted 26.01.2024