

Научная статья

УДК 678.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-10-45-62

ЭФФЕКТ ВЗАИМНОГО УПРОЧНЕНИЯ В ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТАХ НА ОСНОВЕ ПОЛИЭФИРЭФИРКЕТОНА И ТЕРМОТРОПНЫХ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПОЛИМЕРОВ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ 3D-ПЕЧАТИ

Д.А. Гуров¹, А.Н. Цапенко¹, Н.Г. Павлюкович¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Показаны зависимости механических и теплофизических характеристик в образцах с различным соотношением полиэфирэфиркетона (ПЭЭК) и жидкокристаллических полимеров (ЖКП), синтезированных методом послойного наплавления нити. Показано, что для определенных концентраций при добавлении ЖКП в состав ПЭЭК возможно увеличить механические характеристики по сравнению с материалом, синтезированным методом FDM из ненаполненного ПЭЭК. Показано наличие фибрилл и коаксиальных оболочек между слоями 3D-синтезированного органического композиционного пластика и внутри самих нитей. Предложена взаимосвязь между микроструктурой синтезированных методом FDM образцов и их механическими свойствами.

Ключевые слова: аддитивные технологии, послойная экструзия полимерной нити, полиэфирэфиркетон, полукристаллический полимер, термотропные жидкокристаллические полимеры, упрочнение вдоль оси Z

Для цитирования: Гуров Д.А., Цапенко А.Н., Павлюкович Н.Г. Эффект взаимного упрочнения в полимерных композитах на основе полиэфирэфиркетона и термотропных жидкокристаллических полимеров, полученных методом 3D-печати // Труды ВИАМ. 2024. № 10 (140). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-10-45-62.

Scientific article

EFFECT OF MUTUAL STRENGTHENING IN POLYMER COMPOSITES BASED ON POLYETHEREKETONE AND THERMOTROPIC LIQUID CRYSTAL POLYMERS OBTAINED BY 3D-PRINTING

D.A. Gurov¹, A.N. Tsapenko¹, N.G. Pavlukovich¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. The dependences of the mechanical and thermophysical characteristics in samples with different ratios of polyetheretherketone (PEEK) and liquid crystalline polymers (LCP), synthesized by layer-by-layer filament deposition, are shown. It has been shown for certain concentrations, adding LCP to PEEK can increase the mechanical characteristics compared to the material synthesized by FDM from unfilled PEEK. The presence of fibrils and coaxial shells between the layers of 3D-synthesized organic composite plastic and inside the threads themselves is shown. A relationship has been proposed between the microstructure of samples synthesized by FDM and their mechanical properties.

Keywords: additive technologies, fused deposition modeling, polyetheretherketone, semi-crystalline polymer, thermotropic liquid crystal polymers, Z-axis strengthening

For citation: Gurov D.A., Tsapenko A.N., Pavlukovich N.G. Effect of mutual strengthening in polymer composites based on polyetherketone and thermotropic liquid crystal polymers obtained by 3D-printing. *Trudy VIAM*, 2024, no. 10 (140), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-10-45-62.

Введение

В настоящее время 3D-печать полимерами существенно ограничена для применения из-за довольно узкого спектра механических характеристик получаемых деталей и температур эксплуатации. Для повышения уровня указанных характеристик применяются, например, наноразмерные углеродные наполнители [1, 2].

Для FDM-печати средненагруженных элементов конструкций, которые могут работать при повышенных температурах, применяются конструкционные терmostойкие термопласты, основными представителями которых являются полимеры из класса полиарилэфиркетонов (ПАЭК), обладающие высокими упруго-прочностными свойствами, высокими влаго- и химической стойкостью, а также возможностью их длительной эксплуатации [3–10].

Технология FDM, развивающаяся с 1989 г., в данное время применяется не только для изготовления прототипов, но и для печати полнофункциональных изделий в авиакосмической отрасли (SpaceX, Boeing, Airbus, Nasa), автомобилестроении (Mercedes-Benz, BMW, Audi AG, Lamborghini, Bentley Motors), медицине (UPSA), а также в военно-промышленном комплексе (Boeing, Northrop Corp.) [11–35].

Из полимера изготавливают филамент, который затем поступает в FDM-принтер. Например, филамент на основе полиэфиркетонкетона (ПЭКК) сертифицирован компанией Boeing для печати «готовых-к-полету» изделий [36–38]. Отметим, что в России в настоящее время промышленное производство филаментов на основе термопластов такого класса и качества отсутствует.

Несмотря на быстрое развитие авиационной техники и полимерного материаловедения, на данный момент не удается найти простое решение главной проблемы, заключающейся в анизотропии свойств получаемых методом FDM изделий, а именно – снижение упруго-прочностных характеристик вдоль оси Z , т.е. перпендикулярно слоям выкладки. Для решения проблемы межслоевой адгезии и увеличения физико-механических свойств FDM-изделий, в данной работе предлагается применить армирование ПЭКК-матрицы жидкокристаллическими полимерами (ЖКП) [39–41].

Термотропные ЖКП обладают уникальными свойствами жидких кристаллов, образованных из жестких органических молекул асимметричной вытянутой формы – мезогенов. При экструзии при температуре выше температуры жидкокристаллического (ЖК) перехода реализуются специфические термотропные свойства ЖК-систем – образуется система с явно выраженной анизотропией: мезогены выстраиваются по направлению приложенного сдвига, формируя жидкокристаллическую нематическую фазу из стержнеобразных молекул – каламитиков [42].

Материалы и методы

Для проведения физико-механических исследований методом FDM-печати изготовлены образцы лопаток (тип 5) различных составов полимерного композита для испытания на разрыв согласно ГОСТ 11262–2017, а также образцы брусков для испытания на изгиб согласно ГОСТ 4648–2014. При этом для оценки прочности вдоль оси Z образцы лопаток и брусков напечатаны в направлениях «плашмя» и «ребром».

Для печати образцов использованы полимерные композиционные филаменты состава 20%ЖКП + 80%ПЭКК, 60%ЖКП + 40%ПЭКК и 40%ЖКП + 60%ПЭКК (здесь и далее – % (по массе)).

Печать образцов «горизонтальных» лопаток (направление печати ХУ) для проведения испытаний на растяжение проводили при следующих параметрах печати:

Температура, °С:	
стола построения	150
камеры принтера	250
сопла принтера	440
Скорость печати, мм/с	15–45
Угол укладки нитей расплава, градус	±45
Диаметр сопла принтера, мм	0,6

Для оценки межслоевой адгезии в направлении печати ХZ изготовлены образцы лопаток (тип 5) двух составов 20%ЖКП + 80%ПЭЭК и 60%ЖКП + 40%ПЭЭК – печать «ребром» при следующих параметрах печати:

Температура, °С:	
стола построения	160
камеры принтера	265
сопла принтера	440
Скорость печати, мм/с	15
Направление однонаправленной укладки нитей, градус	0

В качестве образцов сравнения изготовлены лопатки из филамента состава 100%-ный ПЭЭК (печать «ребром») при параметрах печати, как для образцов двух предыдущих составов.

Для уменьшения коробления деталей в процессе печати, возникающего вследствие различия значений температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) силикатного стекла, из которого изготовлен стол построения печати, и полимером, применяли высокотемпературный клей для создания прочной адгезионной связи между стеклом и полимером, которая дает возможность полимеру усаживаться, не отклеиваясь при этом от стола построения. Все филаменты дополнительно высушивали перед печатью в вакуумном термошкафу при температуре 110 °С. Для исключения влияния фактора «неправильной» скорости охлаждения при кристаллизации дополнительно после печати все полученные образцы подвергали термической обработке – отжигу на воздухе при температуре 100 °С в течение 1 ч, далее при 200 °С дополнительно еще 1 ч, затем проводили естественное охлаждение в закрытом термошкафу.

Для проведения испытаний на изгиб напечатаны бруски размерами 5×10×80 мм и 5×10×50 мм из филаментов составов 100%-ный ПЭЭК (образцы сравнения) и 80%ЖКП + 20%ПЭЭК с параметрами печати, как для предыдущих двух составов.

Морфологические исследования сколов (торцов) образцов лопаток монослойных пленок, напечатанных из композиционного полимерного филамента, после их разрушения в процессе проведения испытаний физико-механических характеристик проводили методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ).

Методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) в режиме термосканирования в процессе нагрева со скоростью 10 °С/мин проведены исследования фрагментов испытанных на растяжение лопаток, напечатанных в направлениях «плашмя» и «ребром». Для исключения вклада ориентированности макромолекул, возникшей в результате деформации растяжения в образцах во время их испытаний, образцы для ДСК-анализа вырезали бокорезами из фрагмента образца лопатки, который помещается в зажимы разрывной машины, но при этом не на самих краях образца.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Результаты и обсуждение

На рис. 1 показаны образцы «горизонтальных» лопаток (направление печати XY) из полимерного композиционного филамента состава 20%ЖКП + 80%ПЭЭК. Все изготовленные образцы лопаток имели ровные края и четко выраженные грани с отсутствием наплывов и коробления. Наблюдаемая переэкструзия возникла вследствие избыточной подачи материала, которая намеренно сделана для увеличения прочности образца вследствие уменьшения воздушных промежутков между нитями расплава. Пленку печатали с однонаправленной укладкой нитей, при этом она частично расслоилась при съеме со стола построения.



Рис. 1. Образцы лопаток и пленки, полученные из филамента состава 20%ЖКП + 80%ПЭЭК

На рис. 2 показаны образцы «горизонтальных» лопаток (горизонтальное направление печати XY) из полимерного композиционного филамента состава 60%ЖКП + 40%ПЭЭК. Все изготовленные образцы лопаток имели ровный контур печати с отсутствием коробления, однако образовавшиеся пустоты на кромках лопаток свидетельствуют о высокой вязкости расплава и об ограниченной диффузии между нитями расплава вследствие этого.

На рис. 3 показаны образцы «горизонтальных» лопаток (направление печати XY) из полимерного композиционного филамента состава 40%ЖКП + 60%ПЭЭК. Все изготовленные образцы лопаток имели ровный контур печати, однако с ярко выраженными признаками коробления. На образцах также можно наблюдать выраженные следы наплывов. В отличие от филамента состава 60%ЖКП + 40%ПЭЭК пустоты на кромках лопаток отсутствовали, что свидетельствует о диффузии расплава нити в уже выложенный слой.

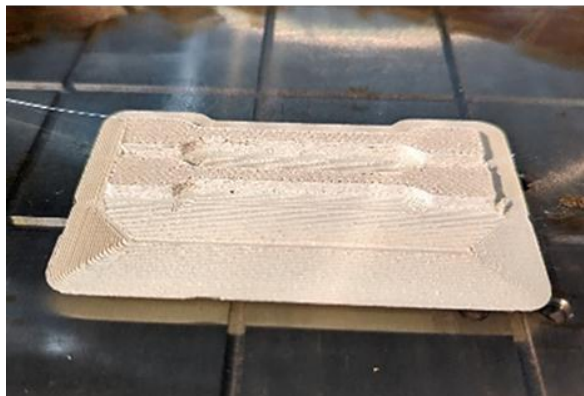


Рис. 2. Образцы лопаток и пленки, полученные из филамента состава 60%ЖКП + 40%ПЭЭК



Рис. 3. Образцы лопаток, полученные из филамента состава 40%ЖКП + 60%ПЭЭК

Образцы, полученные в результате печати «ребром» из филамента состава 60%ЖКП + 40%ПЭЭК в направлении печати XZ, представлены на рис. 4.

На рис. 5 показаны фотографии образцов лопаток из филамента состава 100%-ный ПЭЭК (печать «ребром»). Все изготовленные образцы лопаток имели ровные края и четко выраженные грани с отсутствием напылов и коробления.

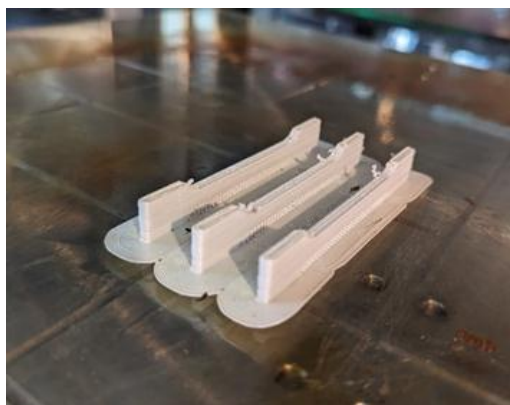


Рис. 4. Образцы лопаток, изготовленные из филамента состава 60%ЖКП + 40%ПЭЭК (печать «ребром»)



Рис. 5. Образцы лопаток, изготовленные из филамента состава 100%-ный ПЭЭК (печать «ребром»)

На рис. 6 показаны бруски (печать «ребром»), изготовленные из филамента состава 20%ЖКП + 80%ПЭЭК. Все изготовленные образцы лопаток имели ровные края и четко выраженные грани с отсутствием напылов и коробления.



Рис. 6. Образцы брусков, изготовленные из филамента состава 20%ЖКП + 80%ПЭЭК (печать «ребром»)

В процессе печати филаментом состава 40%ЖКП + 60%ПЭЭК возникли трудности: несмотря на то, что изготовление на экструзионном оборудовании филамента состава 60%ЖКП + 40%ПЭЭК было технологически существенно более сложным, чем филамента состава 40%ЖКП + 60%ПЭЭК, процесс печати образцов из него проходил намного стабильнее в части отсутствия трудностей с забиванием сопла принтера и образования наплывов на получаемых образцах. При некоторых режимах печати получение образцов из филамента состава 40%ЖКП + 60%ПЭЭК было фактически невозможно вследствие забивания сопла принтера и последующей остановки печати, поэтому данные по результатам исследований образцов на основе филамента данного состава представлены неполно.

В табл. 1 приведены результаты физико-механических испытаний при растяжении лопаток при направлении печати XY, температурах сопла и стола построения соответственно 440 и 150 °С, при различной скорости печати.

Таблица 1

Результаты физико-механических испытаний лопаток (направление печати XY)

Состав филамента, % (по массе)	Скорость печати, мм/с	Предел прочности при разрыве, МПа	Модуль упругости при растяжении, ГПа	Относительное удлинение, %
40%ЖКП + 60%ПЭЭК	45	28,79	2,1	2,2
		31,04	2,21	2,5
		26,33	2,14	2,1
	30	30,66	2,09	2,5
		24,41	2,12	1,6
60%ЖКП + 40%ПЭЭК	30	39,11	2,17	3,3
		41,61	2,13	3,6
	15	48,08	2,28	5,8
		50,10	2,4	5,2
20%ЖКП + 80%ПЭЭК	45	44,34	2,59	2,4
		50,96	2,68	2,8
		54,34	2,66	3,3
	15	63,61	2,60	3,8
	45	50,51	2,65	3,0
		63,10	2,55	3,8

На основании результатов физико-механических испытаний «горизонтальных» образцов лопаток, полученных методом FDM-печати, можно сделать следующие выводы. Как отмечалось ранее, наиболее стабильная печать осуществлена на двух составах композиционного филамента: 20%ЖКП + 80%ПЭЭК и 60%ЖКП + 40%ПЭЭК. Это коррелирует с полученными результатами физико-механических испытаний. Наилучшие результаты получены на составе 20%ЖКП + 80%ПЭЭК – прочность при разрыве

63 МПа, модуль упругости при растяжении 2,6 ГПа, относительное удлинение 3,8 %. При этом скорость печати существенно не влияла на физико-механические характеристики полученных образцов. Отметим, что, поскольку образцы во время испытаний на растяжение «работают» вдоль слоя выкладки при печати, вклад межслоевой адгезии по оси Z в результаты испытаний на растяжение минимален. Полученные результаты, скорее, можно отнести к величине диффузии между нитями расплава во время их выкладки в процессе формирования печатного слоя.

Таблица 2

**Результаты испытаний на растяжение лопаток
(печать «ребром» при скорости 15 мм/с и температуре сопла 440 °С)**

Состав филамента, % (по массе)	Температура стола построения, °С	Предел прочности при растяжении, МПа	Модуль упругости при растяжении, ГПа	Относительное удлинение, %
100%-ный ПЭЭК	160	79,06	2,29	4,8
		66,05	2,29	3,6
20%ЖКП + 80%ПЭЭК	160	92,78	2,87	6,5
		104,19	3,07	5,3
	160*	51,48	1,46	9,3
60%ЖКП + 40%ПЭЭК	160	70,25	2,31	4,9
	150	72,09	2,35	4,5
	150	73,17	2,42	4,1

* Испытание при температуре 150 °С.

По результатам испытаний при растяжении (табл. 2) лопаток, напечатанных «ребром», из двух составов 20%ЖКП + 80%ПЭЭК и 60%ЖКП + 40%ПЭЭК, а также состава 100%-ный ПЭЭК в качестве образцов сравнения можно сделать следующие выводы. Поскольку направление нитей расплава в процессе печати совпадает с направлением деформации в процессе испытаний, вклад в значения прочностных характеристик обеспечивает как прочность самой нити, так и прочность слоя, которая в данном случае в отличие от горизонтальной печати обеспечивается межслоевой адгезией вдоль оси Z. По результатам испытаний наилучший результат вновь показал состав 20%ЖКП + 80%ПЭЭК, при этом полученные результаты выше референсных (от 13 до 37 %) в части прочности при разрыве. При повышенной температуре испытаний (150 °С) при разрыве образцы сохранили более 50 % свойств в части прочности, что свидетельствует о хорошей межслоевой адгезии по оси Z.

Таблица 3

Результаты испытаний на изгиб лопаток (печать «ребром» при скорости 15 мм/с и температурах сопла 440 °С и стола построения 160 °С)

Состав филамента, % (по массе)	Предел прочности при изгибе, МПа
100%-ный ПЭЭК	138
	140
20%ЖКП + 80%ПЭЭК	150
	155

По результатам испытаний на изгиб (табл. 3) образцы, полученные из композиционного состава 20%ЖКП + 80%ПЭЭК, показали более высокие значения прочности с квотами превосходства по сравнению с образцами, изготовленными из 100%-ного ПЭЭК, – от 7 до 11 %.

Микрофотографии поверхности сколов торцов после растяжения образцов лопаток различных составов, полученные методом СЭМ, представлены на рис. 7–18.

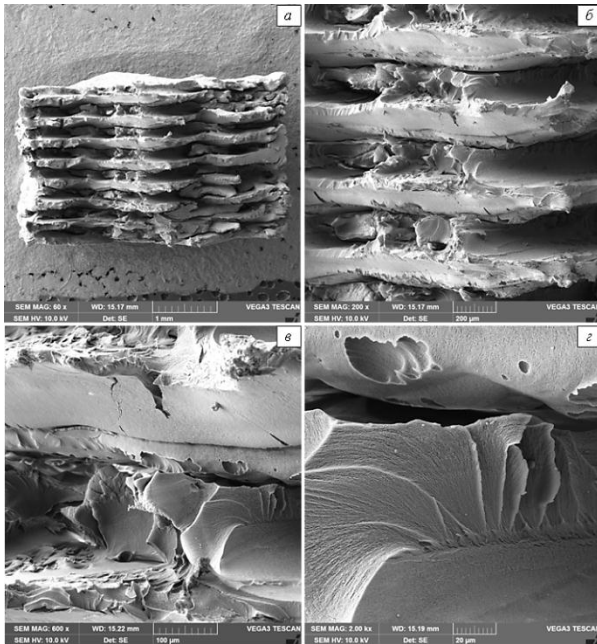


Рис. 7. Микроструктура зоны разрушения образца состава 100%-ный ПЭЭК (горизонтальная печать) после испытания: *а* – общий вид зоны разрушения; *б* – участок в зоне разрушения; *в* – граница между слоями; *г* – трещина между слоями

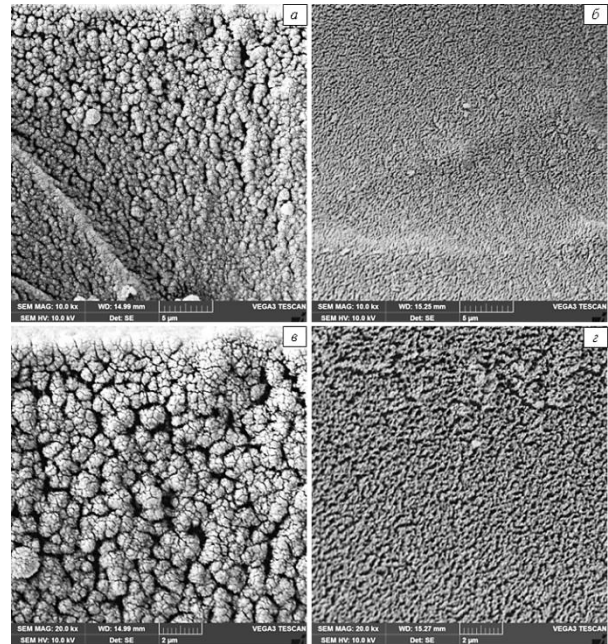


Рис. 8. Микроструктура зоны разрушения образца состава 100%-ный ПЭЭК (горизонтальная печать) после испытания – микрофазовая структура основной матрицы (*а, в*) и матрицы гребня (*б, г*)

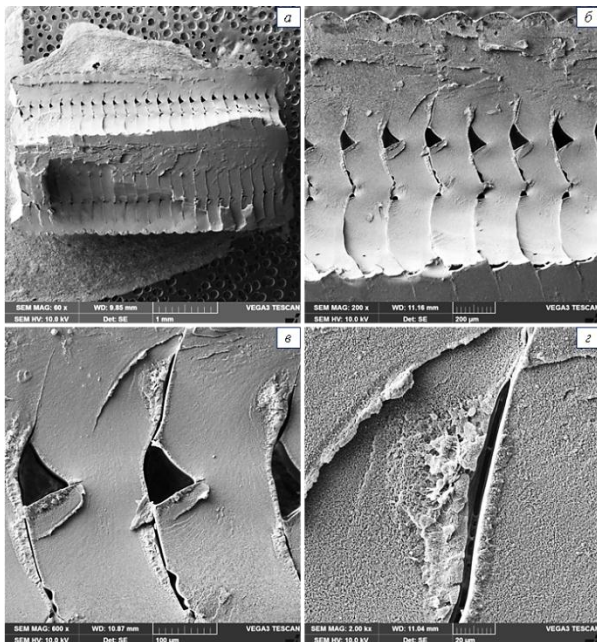


Рис. 9. Микроструктура зоны разрушения образца состава 100%-ный ПЭЭК (вертикальная печать) после испытания: *а* – общий вид зоны разрушения; *б* – участок в зоне разрушения; *в* – граница между слоями; *г* – трещина между слоями

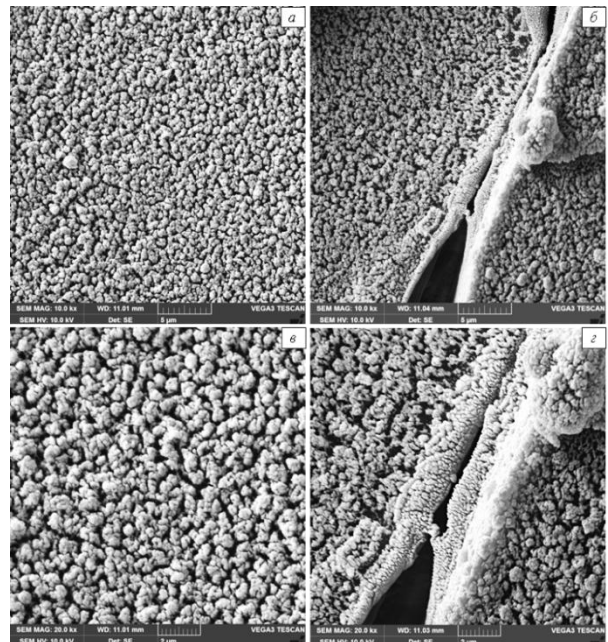


Рис. 10. Микроструктура зоны разрушения образца состава 100%-ный ПЭЭК (вертикальная печать) после испытания – микрофазовая структура матрицы (*а, в*), трещина между слоями (*б*) и берега трещины (*г*)

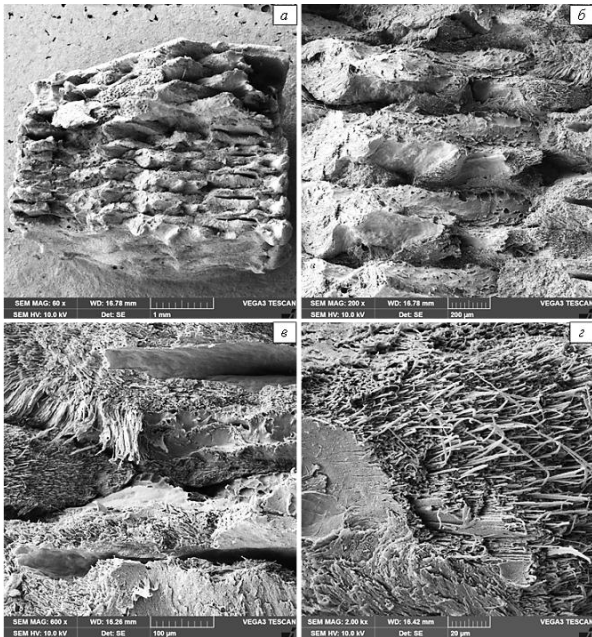


Рис. 11. Микроструктура зоны разрушения образца состава 20%ЖКП + 80%ПЭЭК (горизонтальная печать) после испытания: *а* – общий вид зоны разрушения; *б* – участок в зоне разрушения; *в* – граница между слоями; *г* – деформация матрицы

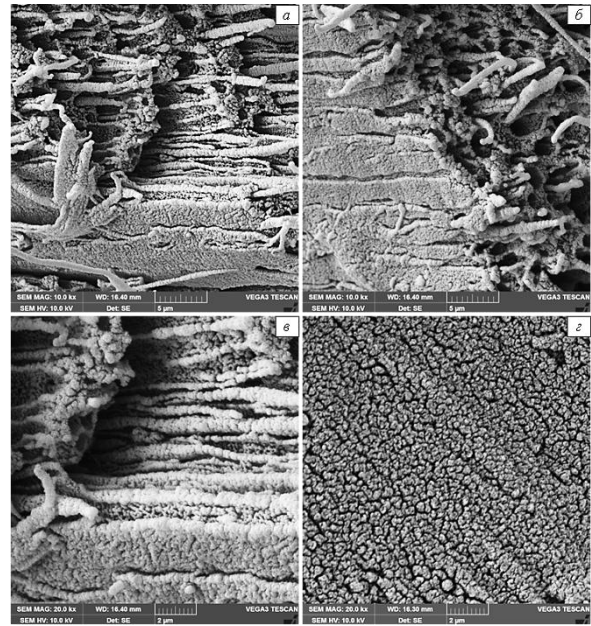


Рис. 12. Микроструктура зоны разрушения образца состава 20%ЖКП + 80%ПЭЭК (горизонтальная печать) после испытания: *а-в* – структура матрицы; *г* – микрофазовая структура матрицы

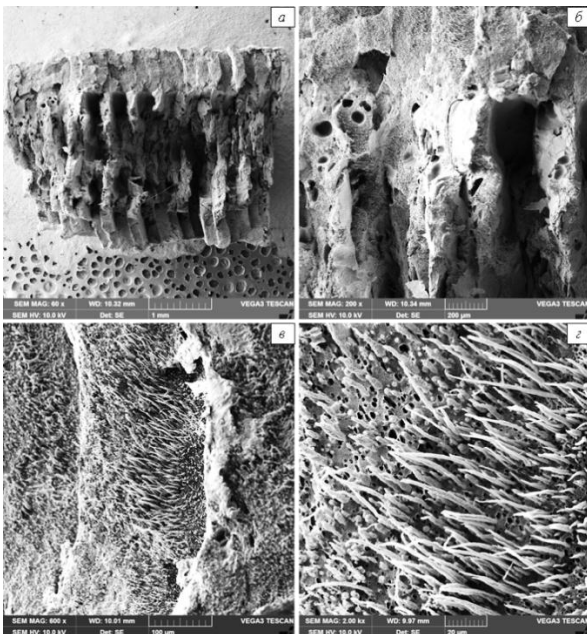


Рис. 13. Микроструктура зоны разрушения образца состава 20%ЖКП + 80%ПЭЭК (вертикальная печать) после испытания: *а* – общий вид зоны разрушения; *б* – участок в зоне разрушения; *в* – граница между слоями; *г* – деформация матрицы

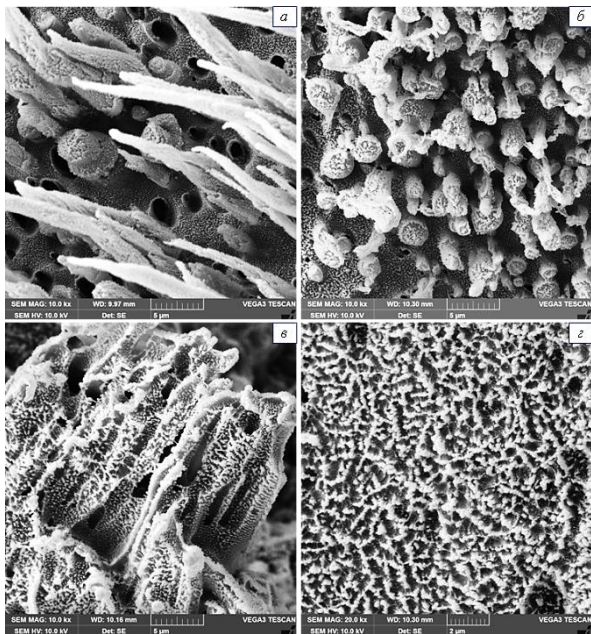


Рис. 14. Микроструктура зоны разрушения образца состава 20%ЖКП + 80%ПЭЭК (вертикальная печать) после испытания: *а-в* – деформация матрицы; *г* – микрофазовая структура матрицы

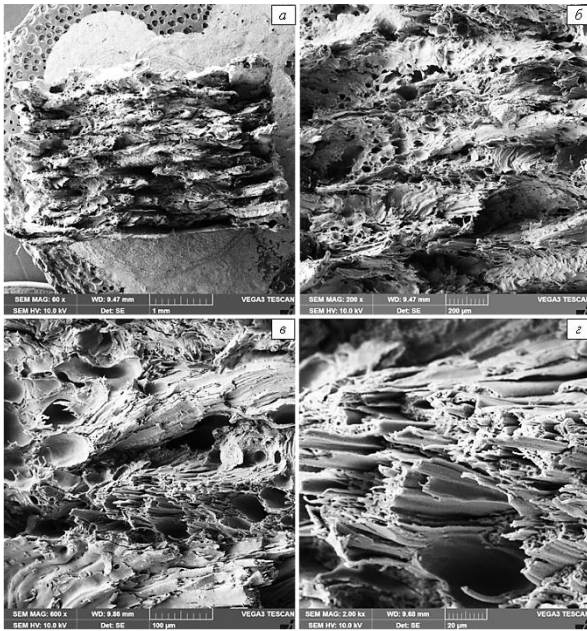


Рис. 15. Микроструктура зоны разрушения образца состава 40%ЖКП + 60%ПЭЭК (горизонтальная печать) после испытания: *а* – общий вид зоны разрушения; *б* – участок в зоне разрушения; *в* – граница между слоями; *г* – деформация матрицы

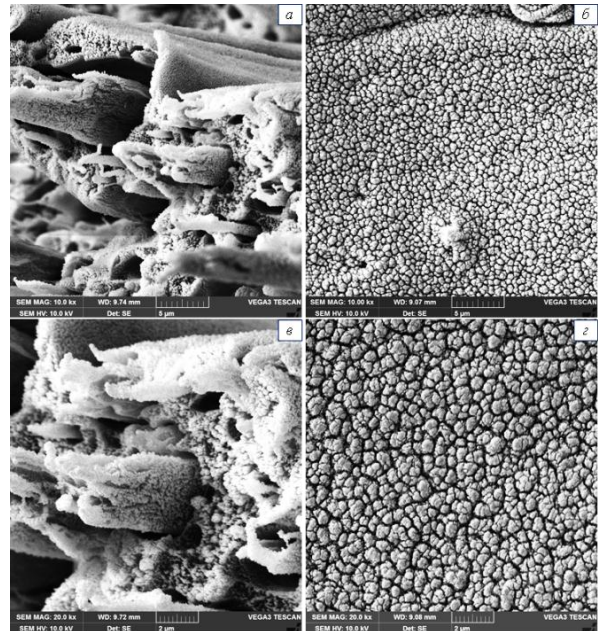


Рис. 16. Микроструктура зоны разрушения образца состава 40%ЖКП + 60%ПЭЭК (горизонтальная печать) после испытания: *а* – участок в зоне разрушения; *б, г* – микрофазовая структура матрицы; *в* – разрушенный участок

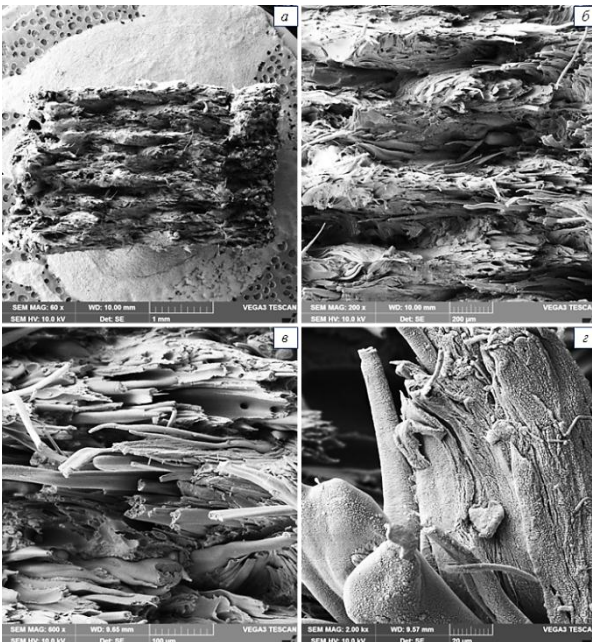


Рис. 17. Микроструктура зоны разрушения образца состава 60%ЖКП + 40%ПЭЭК (горизонтальная печать) после испытания: *а* – общий вид зоны разрушения; *б* – участок в зоне разрушения; *в* – граница между слоями; *г* – деформация матрицы

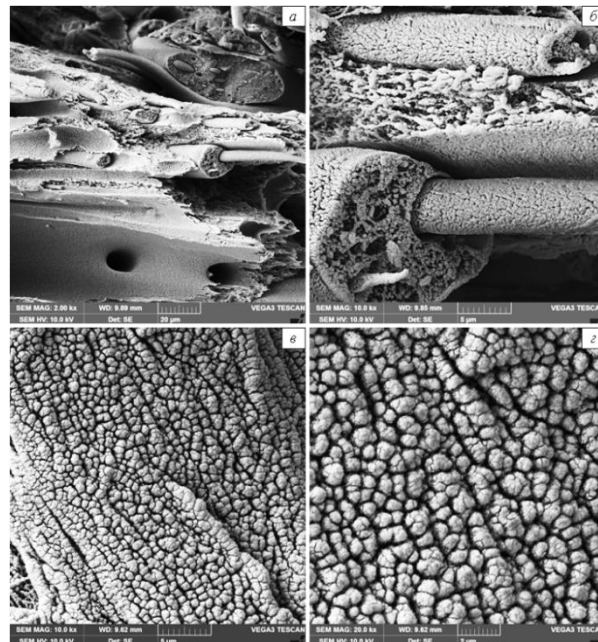


Рис. 18. Микроструктура зоны разрушения образца состава 60%ЖКП + 40%ПЭЭК (горизонтальная печать) после испытания: *а, б* – участок в зоне разрушения; *в, г* – микрофазовая структура матрицы

На микрофотографиях сколов образцов, напечатанных вертикально и горизонтально из композиционных филаментов составов 20%ЖКП + 80%ПЭЭК, 40%ЖКП + 60%ПЭЭК, 60%ЖКП + 40%ПЭЭК можно наблюдать фибриллярную структуру, которая отсутствует на образце 100%-ного ПЭЭК. Это доказывает, что в процессе изготовления филаментов мезофаза сохраняется при печати. При этом диаметр и количество фибрилл прямо пропорциональны концентрации ЖКП. При концентрации 20 % (по массе) ЖК-фибриллы равномерно расположены по объему слоя, при больших концентрациях из них образуются жгуты. На самих фибриллах при этом можно наблюдать фазу ПЭЭК, которая при концентрации 20 % (по массе) ЖКП «обволакивает» фибриллы тонким слоем, а при концентрации 60 % (по массе) ЖКП покрывает фибриллы толстым слоем, образуя коаксиальную структуру.

Как видно из приведенных данных, морфология излома лопаток существенно различается. Морфологически нить расплава образца, полученного способом горизонтальной печати, имеет коаксиальное строение, неоднородна по диаметру, имеет четко выраженную границу между внутренним и внешним слоями. Нить расплава детали, изготовленной способом вертикальной печати, является более однородной по диаметру. Изменение характера излома наблюдается лишь в узком интервале вблизи границы нитей. Наблюдаемые различия в морфологии излома образцов можно связать с различием структур полимерной матрицы для образцов, полученных разными способами. Из приведенных результатов видно, что микроструктура полимерной матрицы в центральной части нити в обоих вариантах печати отличается от структуры слоя на границах нитей. В приграничном слое матрица становится более плотной. Размер областей с низким межмолекулярным взаимодействием, которые поддаются ионному травлению в первую очередь (темные области микрофотографии), уменьшается. При этом размер измененной зоны для случая вертикальной печати оказывается намного меньше по сравнению со способом горизонтальной печати.

На основании данных микроскопического исследования можно предположить, что охлажденная нить расплава ПЭЭК, полученная в ходе изготовления, а также FDM-процесса, имеет коаксиальное строение. При этом внутренний и внешний слои имеют различную микроструктуру, а следовательно, различные свойства: внешний слой является более плотным и, вероятно, более жестким по сравнению с внутренним слоем. Расстекловывание аморфной части ПЭЭК незначительно влияет на вязкоупругие свойства нити материала, экструдированного и остывшего в процессе печати. Данный результат можно объяснить, если предположить, что упругие свойства внешнего слоя выше, чем у внутреннего, а его расстекловывание происходит при более высокой температуре (вероятно, в температурном диапазоне 300–350 °С). При добавлении ЖК-полимера в концентрации 20 % (по массе) низкотемпературный релаксационный переход имеет наиболее выраженный характер, что может свидетельствовать об изменении структуры наружного слоя охлажденной нити расплава в присутствии молекул ЖКП, которые, как следует из анализа микрофотографий, в нем локализованы (рис. 13 и 14, рис. 19, *д-ж*). Дальнейшее увеличение доли ЖКП в композиции приводит к полному изменению коаксиальной структуры охлажденной нити, что позволяет предположить протекание процесса инверсии фаз ПЭЭК и ЖКП, что, однако, негативно сказывается на прочностных характеристиках получаемых образцов из филаментов с высоким содержанием ЖКП-фазы, по-видимому, из-за низкой межслоевой адгезии и когезии ориентированных фибриллярных структур.

На рис. 19 приведены термограммы фрагментов образцов лопаток при горизонтальной печати и напечатанных «ребром», изготовленных из филаментов различных составов: 100%-ный ПЭЭК, 20%ЖКП + 80%ПЭЭК, 40%ЖКП + 60%ПЭЭК и 60%ЖКП + 40%ПЭЭК.

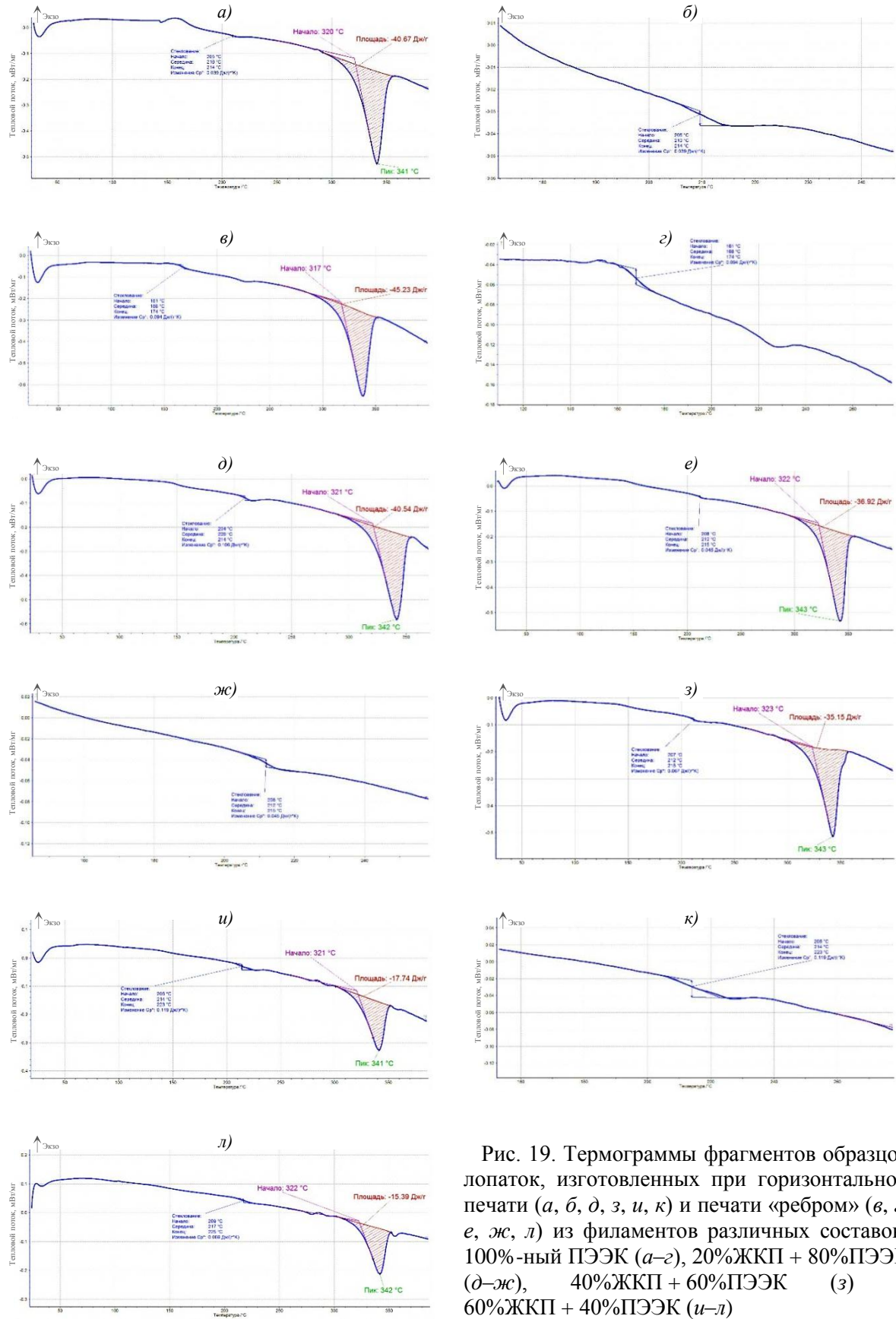


Рис. 19. Термограммы фрагментов образцов лопаток, изготовленных при горизонтальной печати (а, б, д, з, и, к) и печати «ребром» (в, г, е, ж, л) из филаментов различных составов: 100%-ный ПЭЭК (а–г), 20%ЖКП + 80%ПЭЭК (д–ж), 40%ЖКП + 60%ПЭЭК (з) и 60%ЖКП + 40%ПЭЭК (и–л)

На основе полученных термограмм фрагментов лопаток, напечатанных «ребром» и вертикально, можно сделать следующие выводы. В образцах, напечатанных из филамента состава 100%-ный ПЭЭК, степень кристалличности больше в образцах, напечатанных вертикально. В образцах, содержащих ЖКП, корреляция обратная, т. е. степень кристалличности меньше в образцах, напечатанных «ребром». При этом с увеличением концентрации ЖК-полимера, степень кристалличности снижалась с 31 % при 20 % (по массе) ЖКП до 13 % при 60 % (по массе) ЖКП.

Следует отметить, что на всех напечатанных образцах присутствует переход в области температуры 210 °С. Низкотемпературный релаксационный переход при этом у модифицированных ЖК-образцов не изменяется и находится в области температуры 150 °С, в то время как у образца на основе 100%-ного ПЭЭК он смещается в область более высоких температур – до 168 °С.

Заключения

Наиболее стабильная печать наблюдалась на двух составах композиционного филамента: 20%ЖКП + 80%ПЭЭК и 60%ЖКП + 40%ПЭЭК.

Наилучшие результаты физико-механических испытаний «горизонтальных» образцов лопаток получены на составе 20%ЖКП + 80%ПЭЭК – прочность при разрыве 63 МПа, модуль упругости при растяжении 2,6 ГПа, относительное удлинение 3,8 %.

Наибольшую прочность межслоевой адгезии вдоль оси Z (по результатам испытаний лопаток, напечатанных «ребром») показал состав 20%ЖКП + 80%ПЭЭК. Полученные результаты выше референсных (от 13 до 37 %) в части прочности при разрыве. При повышенной температуре испытаний 150 °С на разрыв образцы сохранили >50 % свойств в части прочности.

Образцы, полученные из композиционного состава 20%ЖКП + 80%ПЭЭК, показали более высокие значения прочности на изгиб с квотами превосходства по сравнению с образцами, изготовленными из 100%-ного ПЭЭК, – от 7 до 11 %.

Полученные органические композиционные филаменты имеют различную степень межслоевой адгезии и когезии при печати расплавом нити. Это подтверждается механическими свойствами полученных образцов-свидетелей. По-видимому, механические показатели (особенно для испытаний при изгибе образцов, напечатанных «ребром») коррелируют с низко- и среднетемпературными релаксационными переходами, которые, в свою очередь, определяют межслоевое взаимодействие между нитью расплава и уже отвержденным («напечатанным») слоем.

Благодарности

Авторы выражают благодарность сотрудникам НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ Е.В. Куршеву, С.Л. Лонскому, Г.Б. Эльдяевой, А.Г. Загоре, за проведенные микроструктурные и теплофизические исследования.

Работа выполнена при поддержке РФФИ соглашение № 22-23-01167 от 11.01.2022.

Список источников

1. Каблов Е.Н., Кондрашов С.В., Мельников А.А., Павленко С.А., Гусева М.А., Пыхтин А.А., Ларионов С.А. Исследование влияния теплового режима FDM-печати на структурирование и коробление образцов полиэтилена // Труды ВИАМ. 2021. № 7 (101). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 18.08.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-7-48-58.

2. Пыхтин А.А., Сорокин А.Е., Ларионов С.А., Лонский С.Л. Исследование влияния нековалентных модификаторов на структуру и свойства полимерных филаментов для FDM-печати на основе АБС-пластика и углеродных наночастиц // Труды ВИАМ. 2021. № 10 (104). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 18.08.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-10-36-44.
3. Кирин Б.С., Лонский С.Л., Петрова Г.Н., Сорокин А.Е. Материалы для 3D-печати на основе полиэфирэфиркетонов // Труды ВИАМ. 2019. № 4 (76). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 18.08.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-4-21-29.
4. Кирин Б.С., Кузнецова К.Р., Петрова Г.Н., Сорокин А.Е. Сравнительный анализ свойств полиэфирэфиркетонов отечественного и зарубежного производства // Труды ВИАМ. 2018. № 5 (65). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 18.08.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-5-34-43.
5. Sikder P., Challa B.T., Gummadi S.K. A comprehensive analysis on the processing-structure-property relationships of FDM-based 3-D printed polyetheretherketone (PEEK) structures // *Materialia*. 2022. Vol. 22. P. 101427.
6. Dua R., Rashad Z., Spears J., Dunn G., Maxwell M. Applications of 3D-Printed PEEK via Fused Filament Fabrication: A Systematic Review // *Polymers*. 2021. Vol. 13. P. 4046.
7. Rinaldi M., Cecchini F., Pigliaru L. et al. Additive Manufacturing of Polyether Ether Ketone (PEEK) for Space Applications: A Nanosat Polymeric Structure // *Polymers*. 2021. Vol. 13. P. 11.
8. Rinaldi M., Ghidini T., Cecchini F. et al. Additive layer manufacturing of poly (ether ether ketone) via FDM // *Composites Part B*. 2018. Vol. 145. P. 162–172.
9. Li Y., Lou Y. Tensile and Bending Strength Improvements in PEEK Parts Using Fused Deposition Modelling 3D Printing Considering Multi-Factor Coupling // *Polymers*. 2020. Vol.12 (11). P. 2497.
10. Gonçalves J., Lima P., Krause B. et al. Electrically conductive polyetheretherketone nanocomposite filaments: From production to fused deposition modeling // *Polymers*. 2018. Vol. 10. P. 925.
11. Aysha M. A futuristic reality: 3D printed SpaceX helmets // *3DNatives*. URL: <https://www.3dnatives.com/en/3d-printed-spacex-helmets-090620206/> (дата обращения: 18.08.2023).
12. Steers S. 3D printing: The future of space construction? // *Construction Digital*. URL: <https://constructiondigital.com/epc/3d-printing-future-space-construction> (дата обращения: 18.08.2023).
13. Reuters T. Boeing's new spacecraft to use more than 600 3D-printed parts // *CBC News*. URL: <https://www.cbc.ca/news/science/boeing-new-spacecraft-3d-parts-1.3966358> (дата обращения: 18.08.2023).
14. Pearson A. Stratasys additive manufacturing chosen by Airbus to produce 3D printed flight parts // *Stratasys Blog*. March 24 2020. URL: <https://www.stratasys.com/en/resources/blog/airbus-3d-printing/> (дата обращения: 18.08.2023).
15. Tyrer-Jones A. Finnair upgrades its Airbus A320 fleet with new 3D printed components // *3D printing industry*. URL: <https://3dprintingindustry.com/news/finnair-upgrades-its-airbus-a320-fleet-with-new-3d-printed-components-230516/> (дата обращения: 18.08.2023).
16. Materialise. Why Airbus Qualified A New 3D Printing Material In 2021: Flame-Retardant PA // *Aviation Week*. URL: <https://aviationweek.com/mro/why-airbus-qualified-new-3d-printing-material-2021-flame-retardant-pa> (дата обращения: 18.08.2023).
17. Case study. Airbus Gets on Board with 3D Printing // *Materialise*. URL: <https://www.materialise.com/en/inspiration/cases/airbus-3d-printing> (дата обращения: 18.08.2023).
18. Davies S. Boeing qualifies Stratasys Antero 800NA 3D printing thermoplastic material // *TCT Magazine*. 29 October 2020. URL: <https://www.tctmagazine.com/additive-manufacturing-3d-printing-news/boeing-qualifies-stratasys-antero-800na-3d-printing-material/> (дата обращения: 18.08.2023).
19. Autonomous Manufacturing. Application Spotlight: 3D Printing for Aircraft Cabins // *AMFG*. URL: <https://amfg.ai/2020/07/27/application-spotlight-3d-printing-for-aircraft-cabins/> (дата обращения: 18.08.2023).

20. Torke N. Materialise to Deliver 3D-Printed, Flight-Ready Plastic Parts for Airbus // Materialise. URL: <https://www.materialise.com/en/news/press-releases/3d-printed-flight-ready-plastic-parts-for-airbus> (дата обращения: 18.08.2023).
21. Gardner J.M., Stelter C.J., Yashin E.A., Siochi E.J. High Temperature Thermoplastic Additive Manufacturing Using Low-Cost, OpenSource Hardware // NASA Report № NASA-TM-2016-219344. 2016. URL: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20170000214/downloads/20170000214.pdf> (дата обращения: 18.08.2023).
22. Prater T.J., Bean Q.A., Beshears R.D., Rolin T.D., Werkheiser N.J., Ordonez E.A., Ryan R.M., Ledbetter III F.E. Summary Report on Phase I Results From the 3D Printing in Zero-G Technology Demonstration Mission, Volume I // NASA Report № NASA/TP—2016—219101. 2016. URL: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20160008972/downloads/20160008972.pdf> (дата обращения: 18.08.2023).
23. Gaskill M. Solving the Challenges of Long Duration Space Flight with 3D Printing // NASA website. URL: <https://www.nasa.gov/missions/station/solving-the-challenges-of-long-duration-space-flight-with-3d-printing/> (дата обращения: 18.08.2023).
24. Caliendo H. Mercedes-Benz Turns to 3D Printing for Plastic Spare Parts // Additive Manufacturing. URL: [https://www.additivemanufacturing.media/articles/mercedes-benz-turns-to-3d-printing-for-plastic-spare-parts-\(2\)](https://www.additivemanufacturing.media/articles/mercedes-benz-turns-to-3d-printing-for-plastic-spare-parts-(2)) (дата обращения: 18.08.2023).
25. Griffiths L. Audi Sport reduces design time by 90% with automation of 3D printed jigs and fixtures // TCT Magazine. URL: <https://www.tctmagazine.com/additive-manufacturing-3d-printing-news/software-and-simulation-news/audi-sport-reduces-design-time-by-90-with-automated-design-o/> (дата обращения: 18.08.2023).
26. Camillo J. Bentley Motors Drives its Future Car Design With 3D Printing // Assembly Magazine. URL: <https://www.assemblymag.com/articles/95439-bentley-motors-drives-its-future-car-design-with-3d-printing> (дата обращения: 18.08.2023).
27. Farish M. Bentley increases use of additive manufacturing // AMS magazines. URL: <https://www.automotivemanufacturingsolutions.com/oems/bentley-increases-use-of-additive-manufacturing/43137.article> (дата обращения: 18.08.2023).
28. Lamborghini и Stratasys: история любви на высокой скорости // Новости 3D Today. URL: <https://3dtoday.ru/blogs/news3dtoday/lamborghini-and-stratasys-a-love-story-at-high-speed> (дата обращения: 18.08.2023).
29. Five Ways 3D Printing Is Transforming the Automotive Industry // Stratasys. URL: https://www.stratasys.com/contentassets/e85c0f5f58be4be1a4e12ceac237e026/wp_fdm_fivewaysauto_a4_0516-web.pdf?v=48fd7e (дата обращения: 18.08.2023).
30. Lamborghini Accelerates and Perfects Automotive Engineering with Stratasys 3D Printed Prototypes and Track-Ready Parts // Stratasys corporate blog. URL: <http://blog.stratasys.com/> (дата обращения: 18.08.2023).
31. 3D Printed Lamborghini: Next-Gen Innovations In Automotive Design // Petropoulos G. URL: <https://www.inorigin.eu/3d-printed-lamborghini/> (дата обращения: 18.08.2023).
32. Stratasys. UPSA spurs pharmaceutical manufacturing innovation with 3D printing // Stratasys Case Study. URL: <https://www.stratasys.com/en/resources/case-studies/upsa/> (дата обращения: 18.08.2023).
33. How UPSA realizes its return on investment by integrating 3D printing // 3D Adept Media. URL: <https://3dadept.com/stratasys-upsa-3d-printing/> (дата обращения: 18.08.2023).
34. Stratasys to test 3D printed materials on the moon // The Engineer. URL: <https://www.theengineer.co.uk/content/news/stratasys-to-test-3d-printed-materials-on-the-moon/> (дата обращения: 18.08.2023).
35. Boissonneault T. Marshall Aerospace and Defence using FDM 3D printing for flight-ready parts // Voxel Matters. URL: <https://www.voxelmatters.com/marshall-aerospace-defence-fdm-3d-printing/> (дата обращения: 18.08.2023).
36. Sevcik S. The Install Ready (FORM 1) Approach - AM Part Qual in Aviation, Part 1 // Aerospace & Defense | Technology, Strategy, Additive Manufacturing. URL: <https://www.linkedin.com/pulse/install-ready-form-1-approach-am-part-qual-aviation-scott-sevcik-k6pmc> (дата обращения: 18.08.2023).

37. De Zeeuw E. Breaking the certification barrier in aerospace AM // *Aerospace Manufacturing and Design*. URL: <https://www.aerospacemanufacturinganddesign.com/article/breaking-the-certification-barrier-in-aerospace-am/> (дата обращения: 18.08.2023).
38. Stratasys. A Path to Certification // White paper. URL: <https://www.padtinc.com/blog2/wp-content/uploads/2019/12/Path-to-Certification-EN-A4-FDM-White-Paper.pdf> (дата обращения: 18.08.2023).
39. Banerjee S., Kar K.K. Introduction to Liquid Crystalline Polymers // *Polymers and Polymeric Composites: A Reference Series*. 2020. P. 1–26.
40. Wang X.-J., Zhou Q.-F. Liquid Crystalline Polymers. World Scientific Publishing Company, 2004. 388 p.
41. Thakur V.K., Kessler M.R. Liquid Crystalline Polymers. Springer, 2016. Vol. 1: Structure and Chemistry. 626 p.
42. Дебердеев Т.Р., Ахметшина А.И., Каримова Л.К., Игнатъева Э.К., Дебердеев Р.Я., Берлин А.А. Термостойкие полимерные материалы на основе жидкокристаллических соединений // *Высокомолекулярные соединения. Сер.: С*. 2020. Т. 62. № 2. С. 145–165. DOI: 10.31857/S230811472002003X.

References

1. Kablov E.N., Kondrashov S.V., Melnikov A.A., Pavlenko S.A., Guseva M.A., Pykhtin A.A., Larionov S.A. Investigation of the influence of the thermal regime of FDM printing on the structuring and warping of polyethylene samples. *Trudy VIAM*, 2021, no. 7 (101), paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 18, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-7-48-58.
2. Pykhtin A.A., Sorokin A.E., Larionov S.A., Lonskii S.L. Study of the influence of non-covalent modifiers on the structure and properties of polymer filaments for FDM-printing based on ABS-plastic and carbon nanoparticles. *Trudy VIAM*, 2021, no. 10 (104), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 18, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-10-36-44.
3. Kirin B.S., Lonskii S.L., Petrova G.N., Sorokin A.E. Materials for the 3D-printing on the basis of polyetheretherketones. *Trudy VIAM*, 2019, no. 4 (76), paper no. 03. Available at: <http://viam-works.ru> (accessed: August 18, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-4-21-29.
4. Kirin B.S., Kuznetsova K.R., Petrova G.N., Sorokin A.E. Comparative analysis of properties of polyetheretherketones of domestic and foreign production. *Trudy VIAM*, 2018, no. 5 (65), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 18, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-5-34-43.
5. Sikder P., Challa B.T., Gummadi S.K. A comprehensive analysis on the processing-structure-property relationships of FDM-based 3-D printed polyetheretherketone (PEEK) structures. *Materialia*. 2022, vol. 22, p. 101427.
6. Dua R., Rashad Z., Spears J., Dunn G., Maxwell M. Applications of 3D-Printed PEEK via Fused Filament Fabrication: A Systematic Review. *Polymers*, 2021, vol. 13, p. 4046.
7. Rinaldi M., Cecchini F., Pigliaru L., Ghidini T., Lumaca F., Nanni F. Additive Manufacturing of Polyether Ether Ketone (PEEK) for Space Applications: A Nanosat Polymeric Structure. *Polymers*, 2021, vol. 13, p. 11.
8. Rinaldi M., Ghidini T., Cecchini F., Brandao A., Nanni F. Additive layer manufacturing of poly(ether ether ketone) via FDM. *Composites Part B*. 2018, vol. 145, pp. 162–172.
9. Li Y., Lou Y. Tensile and Bending Strength Improvements in PEEK Parts Using Fused Deposition Modelling 3D Printing Considering Multi-Factor Coupling. *Polymers*, 2020, vol. 12 (11), p. 2497.
10. Gonçalves J., Lima P., Krause B. et al. Electrically conductive polyetheretherketone nanocomposite filaments: From production to fused deposition modeling. *Polymers*, 2018, vol. 10, p. 925.
11. Aysha M. A futuristic reality: 3D printed SpaceX helmets. 3DNatives. Available at: <https://www.3dnatives.com/en/3d-printed-spacex-helmets-090620206/> (accessed: August 18, 2023).
12. Steers S. 3D printing: The future of space construction? *Construction Digital*. Available at: <https://constructiondigital.com/epc/3d-printing-future-space-construction> (accessed: August 18, 2023).

13. Reuters T. Boeing's new spacecraft to use more than 600 3D-printed parts. CBC News. Available at: <https://www.cbc.ca/news/science/boeing-new-spacecraft-3d-parts-1.3966358> (accessed: August 18, 2023).
14. Pearson A. Stratasys additive manufacturing chosen by Airbus to produce 3D printed flight parts. Stratasys Blog. Available at: <https://www.stratasys.com/en/resources/blog/airbus-3d-printing/> (accessed: August 18, 2023).
15. Tyrer-Jones A. Finnair upgrades its Airbus A320 fleet with new 3D printed components. 3D printing industry. Available at: <https://3dprintingindustry.com/news/finnair-upgrades-its-airbus-a320-fleet-with-new-3d-printed-components-230516/> (accessed: August 18, 2023).
16. Materialise. Why Airbus Qualified A New 3D Printing Material In 2021: Flame-Retardant PA. Aviation Week. Available at: <https://aviationweek.com/mro/why-airbus-qualified-new-3d-printing-material-2021-flame-retardant-pa> (accessed: August 18, 2023).
17. Case study. Airbus Gets on Board with 3D Printing. Materialise. Available at: <https://www.materialise.com/en/inspiration/cases/airbus-3d-printing> (accessed: August 18, 2023).
18. Davies S. Boeing qualifies Stratasys Antero 800NA 3D printing thermoplastic material. TCT Magazine. Available at: <https://www.tctmagazine.com/additive-manufacturing-3d-printing-news/boeing-qualifies-stratasys-antero-800na-3d-printing-material/> (accessed: August 18, 2023).
19. Autonomous Manufacturing. Application Spotlight: 3D Printing for Aircraft Cabins. AMFG. Available at: <https://amfg.ai/2020/07/27/application-spotlight-3d-printing-for-aircraft-cabins/> (accessed: August 18, 2023).
20. Torke N. Materialise to Deliver 3D-Printed, Flight-Ready Plastic Parts for Airbus. Materialise. Available at: <https://www.materialise.com/en/news/press-releases/3d-printed-flight-ready-plastic-parts-for-airbus> (accessed: August 18, 2023).
21. Gardner J.M., Stelter C.J., Yashin E.A., Siochi E.J. High Temperature Thermoplastic Additive Manufacturing Using Low-Cost, OpenSource Hardware. NASA Report № NASA-TM-2016-219344. Available at: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20170000214/downloads/20170000214.pdf> (accessed: August 18, 2023).
22. Prater T.J., Bean Q.A., Beshears R.D. et al. Summary Report on Phase I Results From the 3D Printing in Zero-G Technology Demonstration Mission, Volume I // NASA Report № NASA/TP—2016—219101. Available at: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20160008972/downloads/20160008972.pdf> (accessed: August 18, 2023).
23. Gaskill M. Solving the Challenges of Long Duration Space Flight with 3D Printing. NASA website. Available at: <https://www.nasa.gov/missions/station/solving-the-challenges-of-long-duration-space-flight-with-3d-printing/> (accessed: August 18, 2023).
24. Caliendo H. Mercedes-Benz Turns to 3D Printing for Plastic Spare Parts. Additive Manufacturing. Available at: [https://www.additivemanufacturing.media/articles/mercedes-benz-turns-to-3d-printing-for-plastic-spare-parts-\(2\)](https://www.additivemanufacturing.media/articles/mercedes-benz-turns-to-3d-printing-for-plastic-spare-parts-(2)) (accessed: August 18, 2023).
25. Griffiths L. Audi Sport reduces design time by 90% with automation of 3D printed jigs and fixtures. TCT Magazine. Available at: <https://www.tctmagazine.com/additive-manufacturing-3d-printing-news/software-and-simulation-news/audi-sport-reduces-design-time-by-90-with-automated-design-o/> (accessed: August 18, 2023).
26. Camillo J. Bentley Motors Drives its Future Car Design With 3D Printing. Assembly Magazine. Available at: <https://www.assemblymag.com/articles/95439-bentley-motors-drives-its-future-car-design-with-3d-printing> (accessed: August 18, 2023).
27. Farish M. Bentley increases use of additive manufacturing. AMS magazines. Available at: <https://www.automotivemanufacturingsolutions.com/oems/bentley-increases-use-of-additive-manufacturing/43137.article> (accessed: August 18, 2023).
28. Lamborghini и Stratasys: история любви на высокой скорости. Новости 3D Today. Available at: <https://3dtoday.ru/blogs/news3dtoday/lamborghini-and-stratasys-a-love-story-at-high-speed> (accessed: August 18, 2023).
29. Five Ways 3D Printing Is Transforming the Automotive Industry. Stratasys. Available at: https://www.stratasys.com/contentassets/e85c0f5f58be4be1a4e12ceac237e026/wp_fdm_fivewaysa_uto_a4_0516-web.pdf?v=48fd7e (accessed: August 18, 2023).

30. Lamborghini Accelerates and Perfects Automotive Engineering with Stratasys 3D Printed Prototypes and Track-Ready Parts. Statasys corporate blog. Available at: <http://blog.stratasys.com/> (accessed: August 18, 2023).
31. 3D Printed Lamborghini: Next-Gen Innovations In Automotive Design. Petropoulos G. Available at: <https://www.inorigin.eu/3d-printed-lamborghini/> (accessed: August 18, 2023).
32. Stratasys. UPSA spurs pharmaceutical manufacturing innovation with 3D printing. Stratasys Case Study. Available at: <https://www.stratasys.com/en/resources/case-studies/upsa/> (accessed: August 18, 2023).
33. How UPSA realizes its return on investment by integrating 3D printing. 3D Adept Media. Available at: <https://3dadept.com/stratasys-upsa-3d-printing/> (accessed: August 18, 2023).
34. Stratasys to test 3D printed materials on the moon. The Engineer. Available at: <https://www.theengineer.co.uk/content/news/stratasys-to-test-3d-printed-materials-on-the-moon/> (accessed: August 18, 2023).
35. Boissonneault T. Marshall Aerospace and Defence using FDM 3D printing for flight-ready parts. Voxel Matters. Available at: <https://www.voxelmatters.com/marshall-aerospace-defence-fdm-3d-printing/> (accessed: August 18, 2023).
36. Sevcik S. The Install Ready (FORM 1) Approach - AM Part Qual in Aviation, Part 1. Aerospace & Defense | Technology, Strategy, Additive Manufacturing. Available at: <https://www.linkedin.com/pulse/install-ready-form-1-approach-am-part-qual-aviation-scott-sevcik-k6pmc> (accessed: August 18, 2023).
37. De Zeeuw E. Breaking the certification barrier in aerospace AM. Aerospace Manufacturing and Design. Available at: <https://www.aerospacemanufacturinganddesign.com/article/breaking-the-certification-barrier-in-aerospace-am/> (accessed: August 18, 2023).
38. Stratasys. A Path to Certification. White paper, 2019, pp. 1–9. Available at: <https://www.padtinc.com/blog2/wp-content/uploads/2019/12/Path-to-Certification-EN-A4-FDM-White-Paper.pdf> (accessed: August 18, 2023).
39. Banerjee S., Kar K.K. Introduction to Liquid Crystalline Polymers. *Polymers and Polymeric Composites: A Reference Series*, 2020, pp. 1–26.
40. Wang X.-J., Zhou Q.-F. *Liquid Crystalline Polymers*. World Scientific Publishing Company, 2004, 388 p.
41. Thakur V.K., Kessler M.R. *Liquid Crystalline Polymers*. Springer, 2016, vol. 1: Structure and Chemistry, 626 p.
42. Deberdeev T.R., Akhmetshina A.I., Karimova L.K. et al. Heat-resistant polymer materials based on liquid crystalline compounds. *Vysokomolekulyarnyye soyedineniya. Ser.: C*, 2020, vol. 62, no. 2, pp. 145–165. DOI: 10.31857/S230811472002003X.

Информация об авторах

Гуров Дмитрий Александрович, заместитель начальника лаборатории по науке, к.ф.-м.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Цапенко Андрей Николаевич, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Павлюкович Надежда Геннадьевна, ведущий научный сотрудник, к.х.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Dmitry A. Gurov, Deputy Head of Laboratory of Science, Candidate of Sciences (Phys. & Math.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Andrey N. Tsapenko, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Nadezhda G. Pavlukovich, Leading Researcher, Candidate of Sciences (Chem.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 01.12.2023; одобрена и принята к публикации после рецензирования 07.12.2023.
The article was submitted 01.12.2023; approved and accepted for publication after reviewing 07.12.2023.