

УДК 691.175.5/8
DOI 10.47367/0021-3497_2023_6_71

**ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ МОНОНИТИ
НА ОСНОВЕ ПОЛИЭФИРКЕТОНКЕТОНА***

**STUDY OF THE PROPERTIES OF MONOFILAMENT
BASED ON POLYETHERKETONEKETONE**

*А.Л. СЛОНОВ^{1,2}, И.В. МУСОВ^{1,2}, А.А. ЖАНСИТОВ^{1,2}, Г.О. МОЛОКАНОВ²,
Е.В. РЖЕВСКАЯ², И.Н. ФОМИЧЕВА¹, С.Ю. ХАШИРОВА^{1,2}*

*A.L. SLONOV^{1,2}, I.V. MUSOV^{1,2}, A.A. ZHANSITOV^{1,2}, G.O. MOLOKANOV²,
E.V. RZHEVSKAYA², I.N. FOMICHEVA¹, S.Yu. KHASHIROVA^{1,2}*

¹Тульский государственный университет,

²Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова)

¹Tula state university,

²Kabardino-Balkarian state university named after H.M. Berbekov)

E-mail: azamatslonov@yandex.ru

Полиэфиркетонкетон (ПЭКК) благодаря высокой термостойкости и прочности является перспективным материалом для текстильных технологий. В статье приведены результаты исследования ПЭКК с соотно-

* Работа выполнена при финансовой поддержке Комитета по науке и инновациям Тульской области в рамках договора № 10 от 09.07.2022 «Разработка высокоэффективной импортозамещающей технологии производства высокотехнологичного полиэфиркетонкетона с длительным сроком службы».

шением терефталоил- и изофталоилхлорида 60/40. Изучены физико-механические свойства стандартных образцов и мононитей на основе ПЭКК. Выявлено, что повышение температуры испытания приводит к значительному снижению упруго-прочностных свойств и повышению относительного удлинения. Показано, что растяжение мононитей при различных температурах сопровождается пластической деформацией и ориентационным упрочнением. Установлено, что ориентация мононитей ПЭКК при температурах, близких к температуре стеклования, приводит к их кристаллизации.

Polyetherketoneketone (PEKK) is a promising material for textile technologies due to its high heat resistance and strength. The article presents the results of a study of polyetherketoneketone (PEKK) with a 60/40 ratio of terephthaloyl- and isophthaloyl chloride. The physical and mechanical properties of standard samples and monofilaments based on PEKK were studied. It was revealed that increasing the test temperature leads to a significant decrease in elastic-strength properties and an increase in elongation. It has been shown that stretching of monofilaments at different temperatures is accompanied by plastic deformation and orientational hardening. It has been established that the orientation of PEKK monofilaments at temperatures close to the glass transition temperature leads to their crystallization.

Ключевые слова: полиэфиркетонкетон, мононити, физико-механические свойства, теплофизические свойства.

Keywords: polyetherketoneketone, monofilament, mechanical properties, thermophysical properties.

Введение

В настоящее время суперконструкционные полимеры благодаря комплексу высоких механических и термических свойств находят широкое применение в различных отраслях промышленности [1]. Особый интерес среди суперконструкционных термопластов представляет класс полиарилэфиркетонов (ПАЭК), различающихся соотношением эфирных и кетонных групп в своей структуре. Наиболее широкое распространение среди них получили полиэфиркетон (ПЭК), полиэфирэфиркетон (ПЭЭК) и полиэфиркетонкетон (ПЭКК). Данные материалы и композиты на их основе широко используются в медицине [2-4] и авиакосмической отрасли [5-8].

Получение изделий из ПАЭК возможно всеми известными способами [9], включая 3D печать [10-12]. Также особый интерес представляет использование ПАЭК в виде нитей для текстильных технологий, а

именно технического плетения и 3D ткачества [13, 14].

На сегодняшний день среди ПАЭК для получения филаментов различного назначения наиболее широко используется ПЭЭК. В частности, нити из ПЭЭК выпускаются в виде моно- и мультифиламента, а также штапельного волокна. Благодаря химической и термической стойкости они применяются в композиционных материалах, кабельной промышленности и в медицинских изделиях [15]. Свойства нитей из ПЭЭК в значительной мере зависят от степени и температуры вытяжки. В частности, в работе [16] обнаружено, что с увеличением температуры вытяжки увеличивается степень кристалличности, а также прочность и модуль упругости мононити из ПЭЭК. Установлено, что оптимальная температура вытяжки 200 °С. В работе [17] сообщается, что существенное влияние на свойства волокон из ПЭЭК оказывает степень ориентации и кристалличность, при-

чем зачастую улучшения свойств не удается достичь только за счет отжига без ориентации [18]. Волокна ПЭЭК могут применяться для получения высокопрочных тканей. Сообщается, что они имеют более высокую прочность и термостабильность по сравнению с арамидными тканями [19].

Несмотря на достоинства ПЭЭК, в последнее время все большую популярность в различных областях производства завоевывает ПЭКК благодаря возможности варьирования его свойств с помощью изменения соотношения сомономеров – терефталоилхлорида (ТФХ) и изофталоилхлорида (ИФХ). В зависимости от содержания последнего значительно снижаются температуры плавления и кристаллизации, а также скорость кристаллизации, что повышает технологичность материала. Указанные свойства особенно востребованы в аддитивных технологиях, так как пониженные температуры переработки и меньшая скорость кристаллизации позволяют повысить качество печати. В частности, марки с соотношением ТФХ и ИФХ 60/40 используются для изготовления филаментов для 3D печати [20-22]. Также ПЭКК широко применяется в качестве связующего для композитных материалов с углеродными и стеклянными волокнами [23-26].

Существует ряд патентов, описывающих получение волокон из расплава [27] и раствора ПЭКК [28], а также композитных волокон с минеральными нанотрубками [29]. Однако в отличие от ПЭЭК нити на основе ПЭКК недостаточно изучены и освещены в литературе несмотря на их перспективность не только для 3D печати, но и для текстильных технологий, в частности для 3D ткачества. В связи с этим представляет интерес исследование механических свойств мононитей из ПЭКК и выявление особенностей их деформации и ориентации при различных температурах.

Материалы и методы исследования

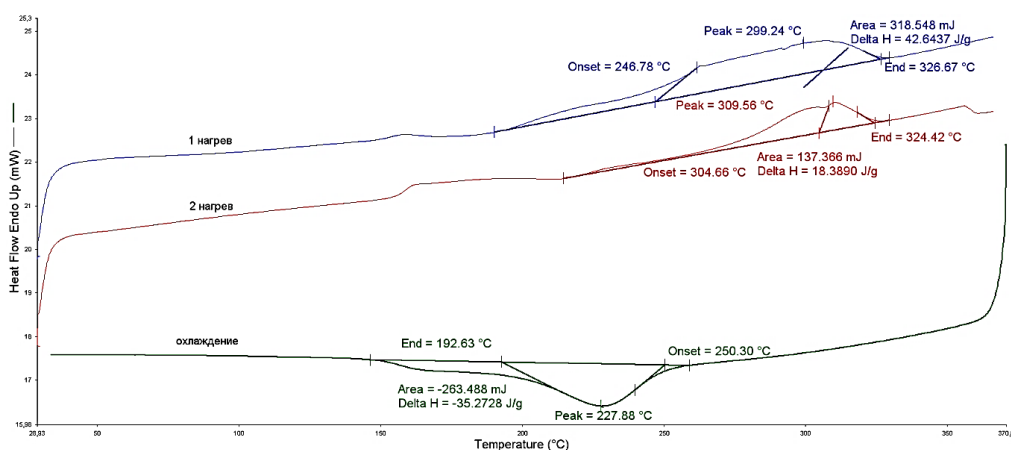
В качестве объекта исследования взят ПЭКК с соотношением ТФХ и ИФХ 60/40 марки СС-5801 (Китай). Мононить со средним диаметром 450-550 мкм получена методом экструзии на двухшнековом микроэкструдере Twin Screw 10 (L/D = 20)

фирмы Twin Tech (Великобритания) при максимальной температуре экструзии 360 °С. Стандартные образцы для испытаний в виде лопаток получены методом литья под давлением на термопластавтомате SZS-20 компании Haitai Machinery (Китай) при температуре материального цилиндра 350-360 °С и температуре формы 180 °С. Механические испытания на одноосное растяжение выполнены на универсальной испытательной машине Gotech Testing Machine AI-7000-LU (Тайвань). Температуры плавления и кристаллизации определялись методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) на приборе DSC 4000 фирмы PerkinElmer (США) в атмосфере азота при скорости нагрева и охлаждения 10 °С/мин.

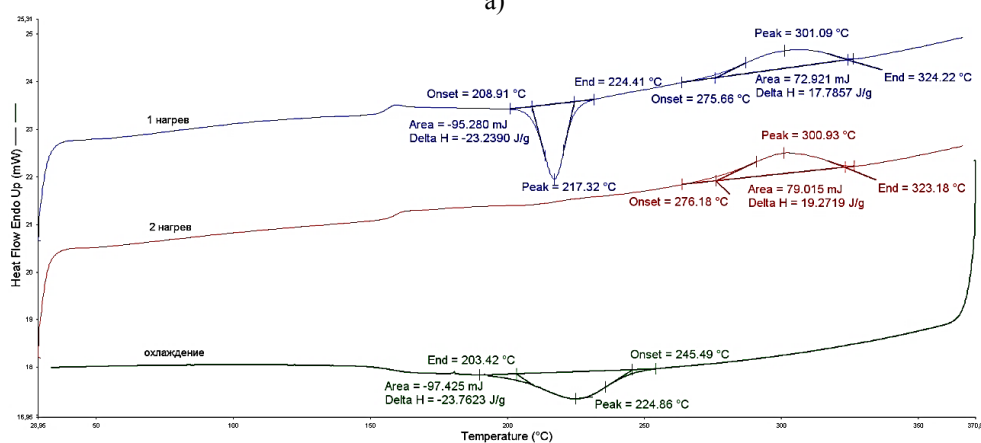
Результаты и их обсуждение

Исследования методом ДСК показали, что промышленный порошок ПЭКК не имеет теплового эффекта холодной кристаллизации, что говорит о его преимущественно кристаллической структуре (рис. 1, а).

В случае мононити наблюдается пик холодной кристаллизации при температуре 217 °С, указывающий на аморфную структуру получаемого монофиламента (рис. 1, б). Широкие пики плавления и кристаллизации порошка ПЭКК свидетельствуют о наличии большого числа кристаллитов различной степени совершенства. Данный факт в первую очередь обусловлен химической структурой ПЭКК, содержание в которой большого количества изофталевого компонента приводит к затруднению кристаллизационных процессов и образованию низкоплавких кристаллитов. Также на это может влиять способ высаживания порошка, его термическая предыстория и молекулярно-массовое распределение. У мононити тепловые эффекты плавления и кристаллизации более узкие, что, по-видимому, связано с хорошей гомогенизацией материала в процессе экструзии и равномерным охлаждением. В остальном порошок и мононить имеют близкие значения теплофизических свойств (табл. 1).



а)



б)

Рис. 1

Т а б л и ц а 1

ПЭКК	T _c , °C		T _{кр} , °C		T _{пл} , °C		ΔH _{пл} , Дж/г	
			холод.	из расплава	1 круг	2 круг	1 круг	2 круг
	1 круг	2 круг						
Порошок	154,3	158,9	-	227,9	299,2	309,6	42,6	18,4
Мононить	156,2	159,4	217,3	225,2	301,1	300,9	17,8	19,3

Исследование механических свойств стандартных образцов ПЭКК проводилось при температурах 22, 120 и 180 °C. Указанные температуры выбраны исходя из термических свойств ПЭКК: интерес представля-

ли испытания при комнатной температуре и температурах незначительно ниже и выше его температуры стеклования. Полученные показатели свойств представлены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Температура испытания, °C	Модуль упругости при растяжении, МПа	Предел текучести при растяжении, МПа	Прочность при разрыве, МПа	Удлинение, %
22	2050	85,8	60,0	68,2
120	1620	18,0	15,9	207,5
180	639	0,25	0,12	343,3

Испытания при комнатных температурах показали, что ПЭКК обладает высокой прочностью и относительной деформацией.

Повышение температуры испытания до 120 °C приводит лишь к незначительному снижению модуля упругости при растяже-

нии (примерно на 26 %), что, очевидно, связано с пребыванием материала по-прежнему в стеклообразном состоянии. Вместе с этим наблюдается критическое падение предела текучести и прочности при разрыве (примерно на 75 %). По-видимому, в пределах обратимых деформаций ПЭКК сохраняет способность выдерживать достаточно большие нагрузки, чем обусловлен высокий модуль упругости, тогда как за пределами упругих деформаций ослабление межмолекулярных связей в результате повышения температуры приводит к значительному снижению нагрузки для начала пластического течения. Дальнейшее увеличение температуры выше T_c (до 180 °С) также сопровождается снижением модуля упругости (в 2,5 раза), предела текучести и прочности, которые доходят до очень низких значений. При этом видно, что относительная деформация закономерно увеличивается.

Помимо стандартных образцов испытаны мононити ПЭКК со средним диаметром 450-550 мкм. В качестве основных механических свойств определялись относительное удлинение и разрывная нагрузка, на основе которой рассчитывалось условное и истинное разрывное напряжение. Возникающий при испытаниях пластичных материалов процесс холодного течения сопровождается образованием шейки и уменьшением исходного диаметра нити. Таким образом, условное напряжение рассчитывалось как отношение нагрузки к исходной площади поперечного сечения мононити, а для истинного напряжения учитывалась текущая площадь сечения образца в момент разрыва. Также исследовалось значение отпуска материала, для чего мононить была выдержана при температуре выше T_c (при 180 °С) в течение 2 часов с целью снижения внутренних напряжений. Полученные результаты приведены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3

Температура испытания, °С	Разрывная нагрузка, Н	Условное разрывное напряжение, МПа	Истинное разрывное напряжение, МПа	Удлинение, %
22	25,3	107,2	330,7	315,2
22 (отпуск при 180 °С)	21,5	131,5	386,5	329,0
120	16,1*	81,1	298,6	448,1
180	9,6*	42,5	177,2	456,4

Из табл. 3 видно, что мононить ПЭКК, испытанная при 22 °С, обладает достаточно высокой прочностью и относительным удлинением, при этом истинное напряжение в 3 раза превосходит условное напряжение при разрыве. Отпуск мононити при 180 °С приводит к повышению прочности, однако его влияние не столь существенно. Повышение температуры испытания до 120 °С и выше сопровождается значительным увеличением относительного удлинения без разрушения образца (до 450 %, что соответствует максимально возможному перемещению зажимов разрывной машины), в результате чего не представляется возможным определить разрывную нагрузку. В связи с этим для данных образцов в табл. 3 приведены значения максимальной нагрузки, на основе которых рассчитывалось максимальное условное

напряжение и максимальное истинное напряжение. Видно, что повышение температуры до 180 °С приводит к снижению указанных свойств.

Из рис. 2 видно, что характер деформационных кривых мононитей ПЭКК, испытанных при различных температурах, аналогичен: при достижении определенного напряжения происходит его резкое снижение вследствие начала развития необратимых деформаций; после области холодного течения, которая характеризуется увеличением деформации при постоянном напряжении, следует равномерное возрастание нагрузки, которое связано с ориентацией макромолекул. При испытании выше T_c (при 180 °С) наблюдается значительное снижение напряжения, что связано с переходом материала в высокоэластичное состояние.

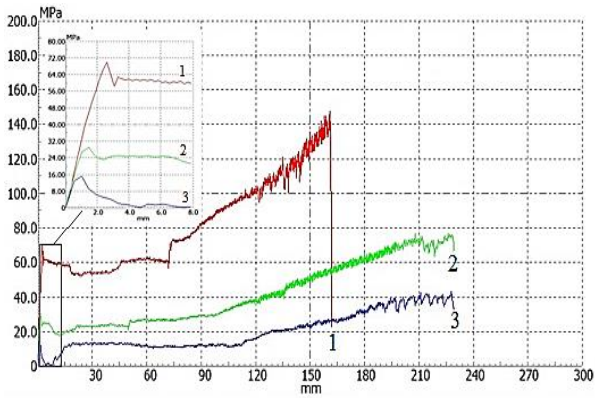


Рис. 2

Исследование методом микроскопии растянутых нитей показывает, что с повышением температуры испытания образцы становятся все более непрозрачными (рис. 3: исходная мононить (а) и испытанная при 22 °С (б); 22 °С (после отжига при 180 °С) (в); 120 °С (г); 180 °С (д)). Данный эффект может быть обусловлен образованием микродефектов при растяжении, которые препятствуют прохождению света, а также кристаллизацией нитей вследствие ориентации макромолекул.

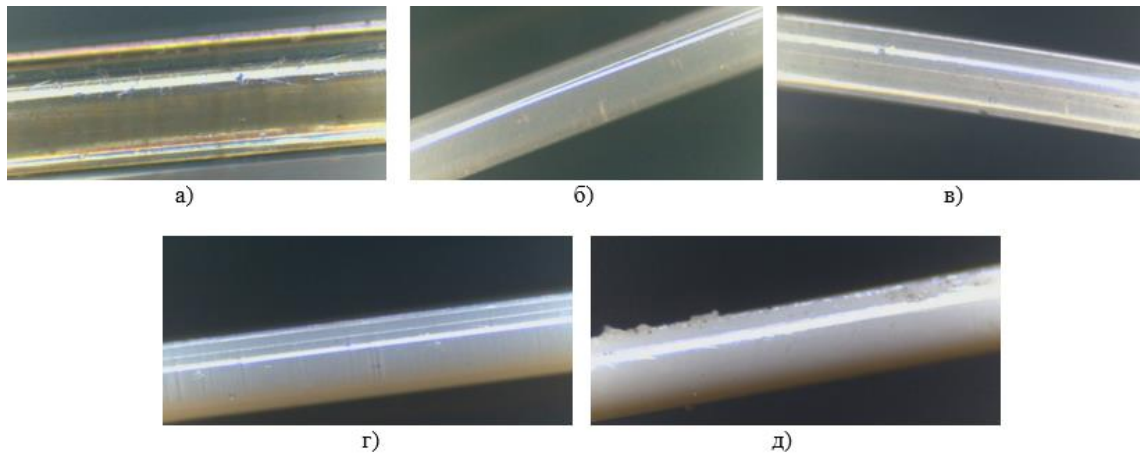


Рис. 3

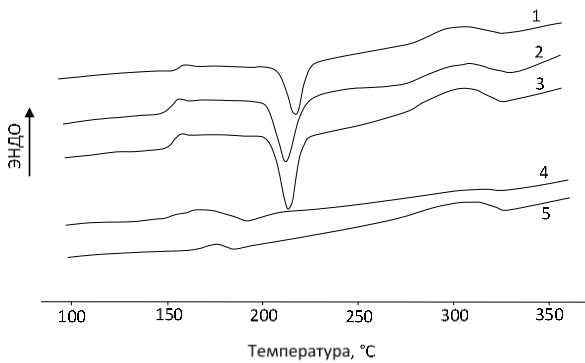


Рис. 4

Исследования методом ДСК показали, что мононити, испытанные при 22 °С, проявляют пик холодной кристаллизации, что

указывает на их аморфное состояние (рис. 4: 1-3), следовательно, причиной их помутнения после растяжения являются преимущественно микропоры. При этом мононити, испытанные при 120 и 180 °С, не имеют экзотермического теплового эффекта, что говорит об их кристаллической структуре (рис. 4: 4-5).

Таким образом, непрозрачность и белизна мононитей, помимо микродефектов, обусловлены кристаллизацией вследствие ориентации при повышенных температурах. Примечательно, что образец, растянутый при 180 °С, имеет значительно более высокую температуру стеклования (табл. 4).

Т а б л и ц а 4

Температура испытания, °С	Разрывная нагрузка, Н	Условное разрывное напряжение, МПа	Истинное разрывное напряжение, МПа	Удлинение, %
22	25,3	107,2	330,7	315,2
22 (отпуск при 180 °С)	21,5	131,5	386,5	329,0
120	16,1*	81,1	298,6	448,1
180	9,6*	42,5	177,2	456,4

Растянутые при различных температурах нити были испытаны повторно при 22°C с целью изучения влияния условий ориентации на конечные механические свойства. На рис. 5 (1 – 22 °C; 2 – 22 °C (после отжига при 180 °C); 3 – 120 °C; 4 – 180 °C) видно, что испытанные образцы имеют близкие значения предела прочности и аналогичный характер большинства деформационных кривых: на первом этапе наблюдается линейный участок деформации, за которым следует предел текучести, где происходит уменьшение угла наклона кривой, далее наблюдается возрастание напряжения. Отсутствие плато холодного течения после предела текучести свидетельствует о хорошей степени ориентации [30]. Примечательно, что предварительно растянутый при 180 °C образец имеет значительно большее удлинение, тогда как остальные характеризуются близкими значениями предельной деформации. Повидимому, ориентация при 180 °C позволяет получить мононить с меньшими внутренними напряжениями, что повышает ее деформативность.

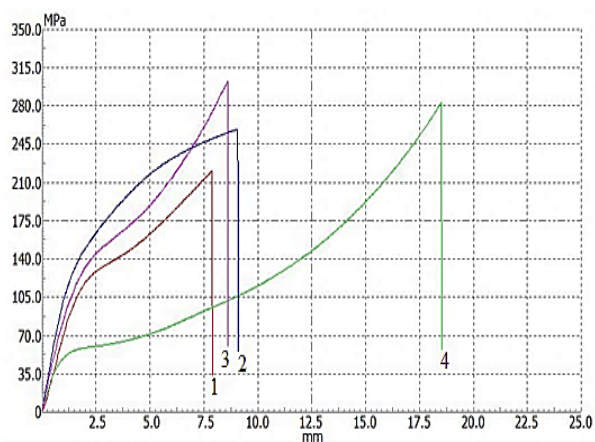


Рис. 5

ВЫВОДЫ

Таким образом, проведенные исследования показали, что прочность ПЭКК по сравнению с модулем упругости в большей степени зависит от температуры испытания. Мононити, полученные методом экструзии, имеют преимущественно аморфную структуру и характеризуются высокой пластичностью и высоким раз-

рывным напряжением. Повышение температуры испытания приводит к значительному возрастанию удлинения и ориентации волокон. Ориентированные при повышенных температурах (120 и 180 °C) мононити кристаллизуются, что приводит к их побелению. Ориентированная при 180 °C мононить имеет более высокие температуру стеклования и относительное удлинение при разрыве.

Полученные данные позволяют конкретизировать особенности влияния температуры на свойства мононитей из ПЭКК и показывают возможность направленного воздействия на характеристики моноволокон. Дальнейшие исследования в этом направлении послужат основой для разработки технологии изготовления мононитей на основе суперконструкционных полимеров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Михайлин Ю.А. Термоустойчивые полимеры и полимерные материалы. СПб.: Профессия, 2006. 624 с.
2. Alqurash, H., Khurshid, Z., Syed A.U.Y., Rashid Habib S., Rokaya D., Zafar M.S. Polyetherketoneketone (PEKK): An Emerging Biomaterial for Oral Implants and Dental Prostheses // Journal of Advanced Research. 2021, 28. P. 87...95.
3. Dua R., Sharufa O., Terry J., Dunn W., Khurana I., Vadivel J., Zhang Y., Donahue H.J. Surface modification of Polyether-ether-ketone for enhanced cell response: a chemical etching approach // Frontiers in Bioengineering and Biotechnology. 2023, 11, 1202499. – DOI: 10.3389/fbioe.2023.1202499.
4. Lommen J., Schorn L., Sproll C., Haussmann J., Kubler N. R., Budach W., Rana M., Tamaskovics B. Reduction of CT Artifacts Using Polyetheretherketone (PEEK), Polyetherketoneketone (PEKK), Polyphenylsulfone (PPSU), and Polyethylene (PE) Reconstruction Plates in Oral Oncology // Journal of Oral and Maxillofacial Surgery. 2022, 80. P. 1272...1283. – DOI: 10.1016/j.joms.2022.03.004.
5. Zhansitov A.A., Slonov A.L., Shetov R.A., Baikaziev A.E., Shakhmurzova K.T., Kurdanova Zh.I., Khashirova S.Yu. Synthesis and properties of polyetheretherketones for 3D printing // Fibre Chemistry. 2018, 49 (6). P. 414...419. – DOI: 10.1007/s10692-018-9911-5.
6. Ling X., Jing X., Zhang Ch., Chen S. Polyether Ether Ketone (PEEK) Properties and Its Application Status 2020 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 453 012080.
7. Kalra S., Munjal B. S., Singh V. R. et al. Investigations on the suitability of PEEK material under

space environment conditions and its application in a parabolic space antenna // *Advances in Space Research*. 2019, 63(12). P. 4039-4045. – doi.org/10.1016/j.asr.2019.03.006.

8. Nassir A., Birch R.S., Haldar A. Parametric Study of PEKK Based Fiber Metal Laminates Used in Aerospace Applications // *Engineering and Technology Journal*. 2023, 41(6). P. 1...14. – DOI: 10.30684/etj.2023.139472.1431.

9. Шахмурзова К.Т., Курданова Ж.И., Хаширова С.Ю., Беев А.А., Лигидов М.Х., Пахомов С.И., Мукитаев А.К. Полиэфиркетоны. Получение, свойства и применение // *Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология*. 2015. № 3 (58). С. 3...11.

10. Yi N., Davies R., Chaplin A., McCutcheon P., Ghita O. Slow and fast crystallising poly aryl ether ketones (PAEKs) in 3D printing: Crystallisation kinetics, morphology, and mechanical properties // *Additive Manufacturing*. 2021, 39, 101843. – doi.org/10.1016/j.addma.2021.101843.

11. Chen B., Wang Y., Berretta S., Ghita O. Poly Aryl Ether Ketones (PAEKs) and carbon-reinforced PAEK powders for laser sintering // *Journal of Materials Science*. 2017, 52. P. 6004...6019. – DOI 10.1007/s10853-017-0840-0.

12. Benedetti L., Brulé B., Decraemer N., Evans K.E., Ghita O. Evolution of PEKK crystallization measured in laser sintering // *Frontiers in Manufacturing Technology*. 2022, 2, 964450. – DOI: 10.3389/fmtec.2022.964450.

13. Корнилова Н.Л., Мирошниченко Д.А., Карева Т.Ю., Мусов И.В., Слонов А.Л., Хаширова С.Ю. Мононити из суперконструкционных термопластичных полимеров для переработки методами плетения и ткачества // *Пластические массы*. 2022, 9-10. С. 50...52. – <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2022-9-10-50-52>.

14. Мирошниченко Д.А., Корнилова Н.Л., Мусов И.В., Слонов А.Л., Хаширова С.Ю. Исследование упругодеформационных характеристик мононитей из суперконструкционных полимеров // *Известия вузов. Технология текстильной промышленности*. 2022. № 5 (401). С. 65...71.

15. <https://swift-fiber.com/news/peek-monofilament-multifilament-and-peek-staple-fiber/>

16. Shekar R.I., Kotresh T.M., Damodhara Rao P.M., Kumar K. Properties of high modulus PEEK yarns for aerospace applications // *Journal of Applied Polymer Science*. 2009, 112. P. 2497...2510. – DOI 10.1002/app.29765.

17. Guo Zh., Xie J., Zhang Ch., Zheng Y., Jin L., Yang J., Zhao P. Large-scale control of morphology and tensile strength enhancement of PEEK fibers after post-treatment // *Journal of Materials Research and Technology*. 2023, 24. P. 2416...2427. – <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.03.142>.

18. Ouellette E.S., Gilbert J.L. Production and characterization of melt-spun Poly (Ether Ether Ketone) fibers for biomedical applications // *Polymer*. 2015, 63. P. 10...18.

19. Wang Ch., Luan J., Xu Zh., Zhao W., Zhang M. Preparation and properties of a novel, high-performance polyether ether ketone fabric // *High Performance Polymers*. 2017, 30(7). P. 1...9. – DOI: 10.1177/0954008317731135

20. <https://www.kimya.fr/en/product/filament-3d-peek-a/>

21. <https://www.3dxtech.com/products/peek/>

22. Paszkiewicz S., Lesiak P., Walkowiak K., Irska I., Miadlicki K., Królikowski M., Piesowicz E., Figiel P. The Mechanical, Thermal, and Biological Properties of Materials Intended for Dental Implants: A Comparison of Three Types of Poly(aryl-ether-ketones) (PEEK and PEKK) // *Polymers*. 2023, 15, 3706. – doi.org/10.3390/polym15183706.

23. Zhang M., Qian X., Ma K., Ma H., Zhang Y. Enhanced Interfacial Properties of High-Modulus Carbon Fiber Reinforced PEKK Composites by a Two-Step Surface Treatment: Electrochemical Oxidation Followed by Thermoplastic Sizing // *Applied Composite Materials*. 2022, 29. P. 745...764. – DOI: 10.1007/s10443-021-09995-8.

24. Alexandre M.A., Dantras E., Lacabanne C., Perez E., Franceschi S., Coudeyre D. Effect of PEKK oligomers sizing on the dynamic mechanical behavior of poly (ether ketone ketone)/carbon fiber composites // *Journal Applied Polymer Science*. 2020, 137, 48818. – DOI: 10.1002/APP.48818.

25. Irfan M.Sh., Alia R.A., Khan T., Cantwell W.J., Umer R. Time-temperature superposition of flexural creep response of carbon fiber PEKK composites manufactured using different prepreg stacking sequence // *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. 2021, 36(3), 089270572110517. – DOI: 10.1177/08927057211051773.

26. Nassir A., Birch R., Guan Zh. Manufacturing Process of S-Glass Fiber Reinforced PEKK Prepregs // *International Journal of Aerospace and Mechanical Engineering*. 2018, 12 (10). P. 943...947.

27. Patent US20120015577A1. Polyetherketone-eketone nonwoven mats.

28. Patent WO2018087121A1 Process for the manufacture of polyetherketoneketone fiber.

29. Patent WO2010022796A1 High performance fibers.

30. Mai F., Tu W., Bilotti E. Peijs T. The Influence of Solid-State Drawing on Mechanical Properties and Hydrolytic Degradation of Melt-Spun Poly(Lactic Acid) (PLA) Tapes // *Fibers*. 2015, 3. P. 523...538. – doi:10.3390/fib3040523.

REFERENCES

1. Mikhailin Y.A. Heat-Resistant Polymers and Polymeric Materials // *Professiya: St. Petersburg, Russia*, 2006. 624 p.

2. Alqurash, H., Khurshid, Z., Syed A.U.Y., Rashid Habib S., Rokaya D., Zafar M.S. Polyetherketone-eketone (PEKK): An Emerging Biomaterial for Oral Implants and Dental Prostheses // *Journal of Advanced Research*. 2021, 28. P. 87...95.

3. Dua R., Sharufa O., Terry J., Dunn W., Khurana I., Vadivel J., Zhang Y., Donahue H.J. Surface modification of Polyether-ether-ketone for enhanced cell response: a chemical etching approach // *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2023, 11, 1202499. – DOI: 10.3389/fbioe.2023.1202499.
4. Lommen J., Schorn L., Sproll C., Hausmann J., Kubler N. R., Budach W., Rana M., Tamaskovics B. Reduction of CT Artifacts Using Polyetheretherketone (PEEK), Polyetherketoneketone (PEKK), Polyphenylsulfone (PPSU), and Polyethylene (PE) Reconstruction Plates in Oral Oncology // *Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*. 2022, 80. P. 1272...1283. – DOI: 10.1016/j.joms.2022.03.004.
5. Zhansitov A. A., Slonov A. L., Shetov R. A., Baikaziev A. E., Shakhmurzova K. T., Kurdanova Zh. I., Khashirova S. Yu. Synthesis and properties of polyetheretherketones for 3D printing // *Fibre Chemistry*. 2018, 49 (6). P. 414...419. – DOI: 10.1007/s10692-018-9911-5.
6. Ling X., Jing X., Zhang Ch., Chen S. Polyether Ether Ketone (PEEK) Properties and Its Application Status 2020 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 453 012080.
7. Kalra S., Munjal B. S., Singh V. R. et al. Investigations on the suitability of PEEK material under space environment conditions and its application in a parabolic space antenna // *Advances in Space Research*. 2019, 63(12). P. 4039...4045. – doi.org/10.1016/j.asr.2019.03.006.
8. Nassir A., Birch R.S., Haldar A. Parametric Study of PEKK Based Fiber Metal Laminates Used in Aerospace Applications // *Engineering and Technology Journal*. 2023, 41(6). P. 1...14. – DOI: 10.30684/etj.2023.139472.1431.
9. Shakhmurzova K.T., Kurdanova Zh.I., Khashirova S.Yu., Beev A.A., Ligidov M.Kh., Pakhomov S.I., Mikitaev A.K. Polyetherketones. Obtaining, properties and application // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii Khimiya i Khimicheskaya Tekhnologiya*. 2015. № 3 (58). C. 3...11.
10. Yi N., Davies R., Chaplin A., McCutcheon P., Ghita O. Slow and fast crystallising poly aryl ether ketones (PAEKs) in 3D printing: Crystallisation kinetics, morphology, and mechanical properties // *Additive Manufacturing*. 2021, 39, 101843. – doi.org/10.1016/j.addma.2021.101843.
11. Chen B., Wang Y., Berretta S., Ghita O. Poly Aryl Ether Ketones (PAEKs) and carbon-reinforced PAEK powders for laser sintering // *Journal of Materials Science*. 2017, 52. P. 6004...6019. – DOI 10.1007/s10853-017-0840-0.
12. Benedetti L., Brulé B., Decraemer N., Evans K.E., Ghita O. Evolution of PEKK crystallization measured in laser sintering // *Frontiers in Manufacturing Technology*. 2022, 2, 964450. – DOI:10.3389/fmtec.2022.964450.
13. Kornilova N.L., Miroshnichenko D.A., Kareva T.Yu., Musov I.V., Slonov A.L., Khashirova S.Yu. Monofilament from high performance hot-melt polymers for processing by weaving methods // *Plasticheskie massy*. 2022, 9-10. P. 50...52. – <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2022-9-10-50-52>.
14. Miroshnichenko D.A., Kornilova N.L., Musov I.V., Slonov A.L., Khashirova S.Yu. Investigation of elastic-deformation characteristics of monofilaments from of superstructural polymers // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. 2022, 5 (401). P. 65...71.
15. <https://swift-fiber.com/news/peek-monofilament-multifilament-and-peek-staple-fiber/>
16. Shekar R.I., Kotresh T.M., Damodhara Rao P.M., Kumar K. Properties of high modulus PEEK yarns for aerospace applications // *Journal of Applied Polymer Science*. 2009, 112. P. 2497...2510. – DOI 10.1002/app.29765.
17. Guo Zh., Xie J., Zhang Ch., Zheng Y., Jin L., Yang J., Zhao P. Large-scale control of morphology and tensile strength enhancement of PEEK fibers after post-treatment // *Journal of Materials Research and Technology*. 2023, 24. P. 2416...2427. – <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.03.142>.
18. Ouellette E.S., Gilbert J.L. Production and characterization of melt-spun Poly (Ether Ether Ketone) fibers for biomedical applications // *Polymer*. 2015, 63. P. 10...18.
19. Wang Ch., Luan J., Xu Zh., Zhao W., Zhang M. Preparation and properties of a novel, high-performance polyether ether ketone fabric // *High Performance Polymers*. 2017, 30(7). P. 1...9. – DOI: 10.1177/0954008317731135
20. <https://www.kimya.fr/en/product/filament-3d-pekk-a/>
21. <https://www.3dxtech.com/products/pekk/>
22. Paszkiewicz S., Lesiak P., Walkowiak K., Irska I., Miadlicki K., Królikowski M., Piesowicz E., Figiel P. The Mechanical, Thermal, and Biological Properties of Materials Intended for Dental Implants: A Comparison of Three Types of Poly(aryl-ether-ketones) (PEEK and PEKK) // *Polymers*. 2023, 15, 3706. – doi.org/10.3390/polym15183706.
23. Zhang M., Qian X., Ma K., Ma H., Zhang Y. Enhanced Interfacial Properties of High- Modulus Carbon Fiber Reinforced PEKK Composites by a Two- Step Surface Treatment: Electrochemical Oxidation Followed by Thermoplastic Sizing // *Applied Composite Materials*. 2022, 29. P. 745...764. – DOI: 10.1007/s10443-021-09995-8.
24. Alexandre M.A., Dantras E., Lacabanne C., Perez E., Franceschi S., Coudeyre D. Effect of PEKK oligomers sizing on the dynamic mechanical behavior of poly (ether ketone ketone)/carbon fiber composites // *Journal Applied Polymer Science*. 2020, 137, 48818. – DOI: 10.1002/APP.48818.
25. Irfan M.Sh., Alia R.A., Khan T., Cantwell W.J., Umer R. Time-temperature superposition of flexural creep response of carbon fiber PEKK composites manufactured using different prepreg stacking sequence // *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. 2021, 36(3), 089270572110517. – DOI: 10.1177/08927057211051773.

26. *Nassir A., Birch R., Guan Zh.* Manufacturing Process of S-Glass Fiber Reinforced PEKK Prepregs // International Journal of Aerospace and Mechanical Engineering. 2018, 12 (10). P. 943...947.

27. Patent US20120015577A1. Polyetherketoneketone nonwoven mats.

28. Patent WO2018087121A1. Process for the manufacture of polyetherketoneketone fiber.

29. Patent WO2010022796A1. High performance fibers.

30. *Mai F., Tu W., Bilotti E. Peijs T.* The Influence of Solid-State Drawing on Mechanical Properties and Hydrolytic Degradation of Melt-Spun Poly(Lactic Acid) (PLA) Tapes // Fibers. 2015, 3. P. 523...538. – doi:10.3390/fib3040523.

Рекомендована лабораторией технологии полимерных материалов и композитов Тульского государственного университета. Поступила 27.09.23.
