

Научная статья

УДК 678.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-3-60-69

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ НА СВОЙСТВА КОНСОЛИДИРОВАННЫХ ПЛАСТИН УГЛЕПЛАСТИКА НА ОСНОВЕ ПОЛИЭФИРЭФИРКЕТОНА

М.С. Иванов¹, В.С. Морозова¹, Н.Г. Павлюкович¹

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

Аннотация. Исследована зависимость свойств консолидированных пластин термопластичного углепластика на основе полиэфирэфиркетона и тканого углеродного наполнителя от технологических параметров изготовления: давления и температуры прессования, показателя текучести расплава полиэфирэфиркетона при данной температуре, скорости охлаждения отформованного углепластика и температуры снятия нагрузки при охлаждении. Оценка влияния технологических параметров формования на уровень консолидации пластин углепластика осуществлена с применением неразрушающих методов контроля и путем определения механических свойств.

Ключевые слова: полиэфирэфиркетон, углепластик, температура прессования, давление прессования, показатель текучести расплава, прочность

Для цитирования: Иванов М.С., Морозова В.С., Павлюкович Н.Г. Влияние технологических режимов изготовления на свойства консолидированных пластин углепластика на основе полиэфирэфиркетона // Труды ВИАМ. 2025. № 3 (145). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-3-60-69.

Scientific article

INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL MODES OF MANUFACTURE ON PROPERTIES OF CONSOLIDATED PLATES OF CARBON FIBER REINFORCED THERMOPLASTIC BASED ON POLYETHERETHERKETONE

M.S. Ivanov¹, V.S. Morozova¹, 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. In the article has been studied dependence of properties of consolidated plates of carbon fiber reinforced thermoplastic based on polyetheretherketone and woven carbon filler on the technological parameters of manufacture: pressure and temperature of pressing, time and cooling rate under pressure, as well as the melt flow rate of polyetheretherketone at a given temperature. The influence of technological molding parameters on the level of consolidation of carbon fiber reinforced thermoplastic plates was assessed using non-destructive testing methods and by determination of their mechanical properties.

Keywords: polyetheretherketone, carbon fiber, pressing temperature, pressing pressure, melt flow rate, strength

For citation: Ivanov M.S., Morozova V.S., Pavlukovich N.G. Influence of technological modes of manufacture on properties of consolidated plates of carbon fiber reinforced thermoplastic based on polyetheretherketone. *Trudy VIAM*, 2025, no. 3 (145), paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-3-60-69.

Введение

На протяжении последних десятилетий в авиакосмической отрасли возрастает интерес к термопластичным полимерным композиционным материалам, в том числе армированным однонаправленными или ткаными углеродными наполнителями (углепластики) [1–6].

В настоящее время в аэрокосмической отрасли в качестве термопластичной матрицы для изготовления высокопрочных углепластиковых конструкций, которые можно долговременно эксплуатировать при повышенных температурах, наиболее широко применяется суперконструкционный термопласт – полиэфирэфиркетон (ПЭЭК) [7, 8]. Это пожаробезопасный полукристаллический полимер с температурой плавления ~ 340 °С и температурой стеклования ~ 143 °С, который обладает превосходными физико-механическими характеристиками – модулем упругости $\sim 3,2$ ГПа, низким влагопоглощением ($\leq 0,15$ %), стойкостью к атмосферным, температурным и механическим воздействиям, а также хорошими диэлектрическими свойствами [9–14] и может сохранять эксплуатационные характеристики вплоть до температур, близких к началу плавления полимерной матрицы (~ 300 °С).

Консолидированные пластины углепластика на основе ПЭЭК изготавливают по препреговой или беспрепреговой (из преформы) технологии с последующей консолидацией (уплотнением, удалением пор) по технологиям прямого прессования или автоклавного формования. Автоклавное формование является наиболее трудо-, материало- и энергоемким, а следовательно, дорогостоящим методом изготовления [15]. Успешность любого технологического процесса определяется его рентабельностью, т. е. снижением производственных издержек или улучшением качества продукции по отношению к альтернативному процессу [16]. В связи с этим отработка технологических режимов прессования крупногабаритных (размером не менее 800×600 мм) консолидированных пластин углепластика на основе ПЭЭК является актуальной задачей.

Применение термопластичного углепластика на основе ПЭЭК разработки НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ для изготовления таких деталей мотогондолы, как кронштейн реверсивного устройства, сектор спрямляющего аппарата, панель внутренняя с рабочей температурой до 150 °С перспективных авиационных двигателей, позволит снизить массу изделий не менее чем на 40 % по сравнению с алюминиевыми и титановыми сплавами.

На свойства консолидированных пластин и рентабельность процесса прессования оказывают комплексное влияние следующие технологические параметры: температура, вязкость связующего при данной температуре, продолжительность и давление консолидации, а также режим охлаждения углепластика (скорость охлаждения и температура снятия давления).

Технологический процесс переработки термопластов имеет преимущество по времени перед реактопластами благодаря отсутствию растворителя, необходимости продолжительного многоступенчатого отверждения и удаления продуктов реакции. Однако из-за высокой температуры плавления ПЭЭК (~ 340 °С) лимитирующим фактором изготовления углепластика выступает продолжительность нагрева и охлаждения.

Консолидация пластин углепластика методом прессования осуществляется при температуре выше температуры плавления ПЭЭК, при которой обеспечивается наименьшая вязкость связующего, не происходит его активной термодеструкции и при этом сокращается продолжительность нагрева и охлаждения плит пресса, поэтому вязкость связующего и температура прессования находятся в тесной взаимосвязи.

При нагревании заготовки углепластика, особенно выше температуры плавления термопластичного ПЭЭК-связующего, происходит его расширение в соответствии с температурным коэффициентом линейного расширения. При расплавлении на расширение термопластичной матрицы влияет также упругая энергия, накопленная в переплетениях волокна в тканом углеродном наполнителе. При этом толщина ламината увеличивается, появляются поры, поэтому охлаждать заготовку углепластика необходимо под нагрузкой до температуры, при которой возможно извлечь заготовку из оснастки без ее деконсолидации [16, 17].

ПЭЭК относится к хорошо перерабатываемым полимерам, так как имеет широкую температурно-временную область переработки $T_{\min} - T_{\max} \geq 50 \text{ }^\circ\text{C}$ [18] (рис. 1) благодаря высокой термостабильности в экструзионной камере без доступа кислорода (≥ 120 мин при температурах 360–380 $^\circ\text{C}$ [19]) и еще лучшей термостойкости, установленной методом термогравиметрического анализа (активная потеря массы начинается при температуре $\geq 550 \text{ }^\circ\text{C}$ [20]). Однако с доступом кислорода происходит термоокислительная деструкция, приводящая к образованию поперечных связей и, соответственно, повышению вязкости.

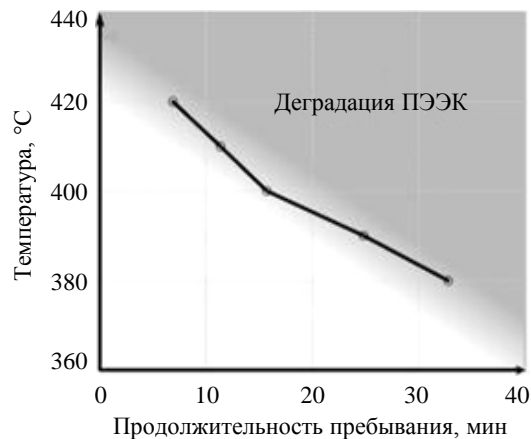


Рис. 1. Температурно-временная область переработки полиэфирэфиркетона (ПЭЭК) [17]

Поэтому для процесса формования необходимо установить минимальную температуру, при которой будет обеспечиваться эффективная пропитка, что определяется вязкостью связующего или ее обратной величиной — показателем текучести расплава (ПТР), а также удельным давлением прессования, обеспечивающим требуемую толщину монослоя и, соответственно, необходимое содержание связующего. Значимость комплексного исследования влияния данных параметров на деформационно-прочностные характеристики получаемых образцов термопластичных полимерных композиционных материалов (ТПКМ) очень высока.

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 13.2. «Конструкционные ПКМ» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года»).

Материалы и методы

В работе использовали:

– порошкообразный ПЭЭК марки ПЭЭК-50П производства АО «Институт пластмасс» (ТУ 20.16.40-565-00209349–2018);

– углеродную ткань саржевого плетения марки АСМ С200Т арт. Сва-12123 производства АО «Юматекс» (ТУ 29.99.14-108-61664530–2018).

Консолидированные пластины ТПКМ изготавливали по беспрепеговой технологии – электростатическое напыление порошка ПЭЭК с одновременной сборкой формовочного пакета и последующим прессованием при повышенных температурах.

Определение ПТР проводили по ГОСТ 11645–2021 (метод А; метод измерения массы) на приборе ПТР-ЛАБ-02 с использованием капилляра диаметром 2,095 мм и с выдержкой под нагрузкой 49,05 Н (5,0 кг) в течение 10 мин при температурах 360, 380 и 400 °С.

Температуру плавления образцов ПЭЭК определяли методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) по ГОСТ Р 55134–2012 (атмосфера – азот).

Степень кристалличности образцов ПЭЭК определяли как отношение энтальпии плавления исследуемого образца к энтальпии плавления образца со степенью кристалличности 100 %, равной 130 Дж/г (ГОСТ Р 56757–2015).

Температуру стеклования связующего в углепластике определяли методом динамического механического анализа образцов по ГОСТ Р 57739–2017. Для испытания образцов применяли держатель для трехточечного изгиба со свободной длиной образца 40 мм. Испытания проводили в диапазоне температур от 25 до 220 °С на воздухе при скорости нагрева 5 °С/мин, частоте 1 Гц и амплитуде 10 мкм.

Плотность ТПКМ определяли методом гидростатического взвешивания образцов по ГОСТ 15139–69, массовую долю полимерного связующего – по ГОСТ Р 56682–2015 (метод II).

Ультразвуковой контроль дефектности образцов ТПКМ проводили с использованием ручного дефектоскопа с фазированной решеткой с частотой 5 МГц.

Объемную долю пористости определяли методом рентгеновской компьютерной томографии [21].

Предел прочности образцов ТПКМ при межслойном сдвиге определяли методом испытания короткой балки по ГОСТ 32659–2014. Испытания проводили при температуре 23 °С и скорости нагружения 1 мм/мин.

Предел прочности при трехточечном изгибе оценивали по ГОСТ Р 56805–2014 (метод А). Испытания проводили при температуре 23 °С и скорости нагружения 2 мм/мин.

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

Результаты и обсуждение

Важнейшими технологическими параметрами изготовления ТПКМ являются давление, температура прессования и ПТР термопластичной матрицы при этой температуре. Согласно ТУ, температура плавления ПЭЭК марки ПЭЭК-50П превышает 340 °С, а значения ПТР при 380 °С должны находиться в интервале от 50 до 120 г/10 мин. В данной работе использовали два образца ПЭЭК-50П, ПТР которых при 380 °С составил 73 (образец 1) и 92 г/10 мин (образец 2).

Для образца 2 определена зависимость ПТР от температуры. На рис. 2 приведены значения ПТР связующего при температурах 360, 380 и 400 °С.

Наибольшее увеличение ПТР (на 25 %) наблюдается при температуре от 360 до 380 °С, а при повышении температуры до 400 °С зафиксировано увеличение только на 8 %. Следует отметить, что с точки зрения технологии изготовления углепластика любое повышение температуры влечет за собой увеличение продолжительности нагрева и последующего охлаждения.

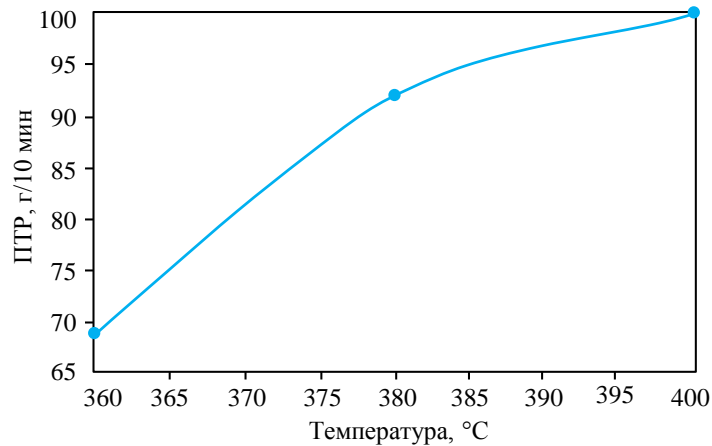


Рис. 2. Зависимость показателя текучести расплава (ПТР) полиэфирэфиркетона марки ПЭЭК-50П от температуры

Методом ДСК определено влияние скорости охлаждения расплава ПЭЭК (образец 2) 1,5; 10 и 50 °C/мин на температуру плавления и степень кристалличности (табл. 1).

Таблица 1

Зависимость температуры плавления и степени кристалличности от скорости охлаждения полиэфирэфиркетона

Характеристика	Значения характеристик при скорости охлаждения, °C/мин		
	1,5	10	50
Температура плавления, °C	347	345	343
Площадь пика плавления, Дж/г	47,18	44,26	42,85
Степень кристалличности, %	36,3	34,0	33,0

Снижение скорости охлаждения расплава до 1,5 °C/мин приводит к увеличению температуры плавления полимера и степени кристалличности.

С использованием двух образцов ПЭЭК при различных значениях температуры, давления прессования и температуры охлаждения под давлением изготовлены консолидированные пластины углепластика с укладкой [0]₆, из которых получены образцы с направлением вырезки [0]. Режимы изготовления приведены в табл. 2. Характеристики консолидированных пластин углепластика приведены в табл. 3.

Таблица 2

Технологические режимы изготовления консолидированных пластин углепластика на основе полиэфирэфиркетона (ПЭЭК)

Характеристика	Значения характеристик для пластин			
	КПУ-1	КПУ-2	КПУ-3	КПУ-4
Образец ПЭЭК	1	2		
Показатель текучести расплава ПЭЭК, г/10 мин	71	92	69	92
Температура прессования, °C	380	380	360	380
Давление прессования, МПа	1,0	1,0	1,0	0,2

Таблица 3

Свойства образцов консолидированных пластин углепластика

Характеристика	Значения характеристик для пластин			
	КПУ-1	КПУ-2	КПУ-3	КПУ-4
Толщина, мм	1,36	1,34	1,38	1,52
Толщина монослоя, мм	0,23	0,22	0,23	0,25
Плотность, г/см ³	1,51	1,53	1,48	1,48
Массовая доля связующего, %	41	41	41	47
Объемная доля связующего, %	50	49	51	55
Температура стеклования, °С	134	132	134	135
Предел прочности при изгибе, МПа	908	941	853	835
Предел прочности при межслойном сдвиге, МПа	73,7	75,9	63,6	78,1

Высокий уровень консолидации пластин углепластика подтвержден физическими свойствами (высокой плотностью и небольшой толщиной монослоя), а также результатами неразрушающего контроля (при проведении ультразвуковых исследований дефектов не обнаружено). Объемная доля пор, определенная методом рентгеновской компьютерной томографии, составляет $\leq 0,12$ %.

Пластины КПУ-2 и КПУ-3 изготовлены на основе образца 2, но при температурах прессования 360 и 380 °С, соответственно расплав ПЭЭК имел различный ПТР. Сравнение результатов испытаний показывает, что при более низкой вязкости связующего получают консолидированные пластины с меньшей толщиной монослоя, большей объемной плотностью и более высоким уровнем физико-механических характеристик. Пределы прочности при изгибе и межслойном сдвиге для консолидированных пластин, полученных при температуре 380 °С, больше на 10 и 16 % соответственно, чем для консолидированных пластин, изготовленных при температуре 360 °С. Полученные данные коррелируют со снижением ПТР на 25 % для образцов, изготовленных при температуре 360 °С, по сравнению с образцами, выработанными при 380 °С. Это подтверждает зависимость физических и механических свойств консолидированных пластин углепластика от вязкости связующего при температуре прессования.

Технологические режимы изготовления образцов КПУ-2 и КПУ-4 различаются давлением прессования при одинаковых значениях температуры и, соответственно, ПТР связующего. Анализ результатов, полученных для этих образцов консолидированных пластин углепластика, показывает, что снижение давления прессования заметно сказывается на толщине монослоя пластин и содержании связующего в них. Значения данных характеристик увеличиваются на 13–15 %.

Сравнение характеристик пластин КПУ-1, КПУ-2 и КПУ-3 позволяет выявить закономерность влияния ПТР связующего. Образцы изготовлены при одинаковом давлении, но при разной температуре и из разных образцов ПЭЭК-связующего. Однако все исследованные свойства находятся в четкой зависимости от величины ПТР. Чем выше текучесть расплава, тем меньше толщина, больше плотность и выше физико-механические показатели консолидированных пластин углепластика при изгибе и межслойном сдвиге.

Для определения влияния режима охлаждения, а именно температуры снятия нагрузки при охлаждении углепластика, изучены свойства пластин, изготовленных из образца 1 при температуре 380 °С под давлением 1 МПа, охлажденных при этой же нагрузке, извлеченных из оснастки при достижении различной температуры (340, 310, 280 и 90 °С). Свойства полученных пластин углепластика представлены в табл. 4.

**Свойства консолидированных пластин углепластика,
извлеченных из оснастки при различной температуре**

Характеристика	Значения характеристик при температуре извлечения, °С			
	340	310	280	90
Температура стеклования, °С	144	146	138	135
Предел прочности при изгибе, МПа	600	610	978	1090
Предел прочности при межслойном сдвиге, МПа	25,0	36,0	79,1	84,7

Температура, при которой происходит снятие нагрузки (извлечение углепластика из оснастки), оказывает значительное влияние на деформационно-прочностные свойства консолидированных пластин углепластика. При снижении температуры извлечения с 340 до 280 °С пределы прочности при изгибе и межслойном сдвиге увеличиваются более чем в 1,5 и 3 раза соответственно. Дальнейшее снижение температуры извлечения оказывает существенно меньшее влияние: прочностные характеристики пластин углепластика, извлеченных при температурах 280 и 90 °С, изменяются в пределах 8–12 %. Таким образом, установлено, что для получения консолидированных пластин углепластика с высоким уровнем деформационно-прочностных свойств необходимо охлаждение под нагрузкой при температуре ≤ 280 °С.

Заключения

В результате проведенных исследований установлено, что для разработки наиболее рентабельного режима изготовления пластин углепластика необходим подбор минимальной температуры переработки ПЭЭК-связующего с оптимальным для пропитки тканого углеродного наполнителя ПТР на уровне ~ 70 г/10 мин.

Высокий уровень консолидации пластин углепластика при температуре 360 °С подтвержден неразрушающими методами контроля: объемная доля пор не превышает 0,12 %. При этом следует отметить, что сниженная вязкость ПЭЭК-связующего влияет на плотность и толщину монослоя, а также на пределы прочности при изгибе и межслойном сдвиге углепластика, которые снижаются на 10 и 16 % соответственно по сравнению с образцом, изготовленным при температуре 380 °С.

Снижение удельного давления прессования на 80 % значительно влияет на толщину монослоя и содержание связующего в образце углепластика. Обе характеристики увеличиваются на 13–15 %.

Все исследованные свойства находятся в четкой зависимости от величины ПТР. При повышении текучести расплава толщина консолидированных пластин углепластика уменьшается, а плотность и физико-механические показатели при изгибе и межслойном сдвиге увеличиваются.

Методом ДСК обнаружено, что снижение скорости охлаждения расплава до 1,5 °С/мин вызывает увеличение температуры плавления полимера и степени кристалличности.

Определена максимальная температура охлаждения (280 °С) под давлением для получения консолидированных пластин углепластика с высокими деформационно-прочностными свойствами.

Список источников

1. Славин А.В., Донецкий К.И., Хрульков А.В. Перспективы применения полимерных композиционных материалов в авиационных конструкциях в 2025–2035 гг. (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 11 (117). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 13.09.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-11-81-92.

2. Ерасов В.С., Сibaев И.Г. Схема разработки и оценки свойств конструкционных авиационных композиционных материалов // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 1 (70). Ст. 05. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 13.09.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-61-81.
3. Старцев В.О., Антипов В.В., Славин А.В., Горбовец М.А. Современные отечественные полимерные композиционные материалы для авиастроения (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 2 (71). Ст. 10. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 13.09.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
4. Гуняев Г.М., Каблов Е.Н. Конструкционные углепластики на рубеже веков // *Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2002*. М.: ВИАМ, 2002. С. 242–247.
5. Каблов Е.Н. Тенденции и ориентиры инновационного развития России: сб. науч.-информ. материалов. 3-е изд. М.: ВИАМ, 2015. 720 с.
6. Каблов Е.Н. Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки – основа инноваций // *Крылья Родины*. 2016. № 5. С. 8–18.
7. Сорокин А.Е., Иванов М.С., Сагомонова В.А. Термопластичные полимерные композиционные материалы на основе полиэфирэфиркетонов различных производителей // *Авиационные материалы и технологии*. 2022. № 1 (66). Ст. 04. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 02.10.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-41-50.
8. Иванов М.С., Сорокин А.Е. Листовой термопластичный углепластик на основе полиэфирэфиркетона для изготовления деталей мотогондолы авиационного двигателя методом термоформования // *Материалы V Всерос. науч.-техн. конф. «Полимерные композиционные материалы и производственные технологии нового поколения»*. М.: НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, 2021. Ст. 03.
9. Беев А.А., Хаширова С.Ю., Беева Д.А., Шокумова М.У. Порошкообразные ароматические полиэфирэфиркетоны и сополиэфирэфиркетоны // *Пластические массы*. 2022. № 7–8. С. 6–9. DOI: 10.35164/0554-2901-2022-7-8-6-9.
10. Микитаев А.К., Саламов А.Х., Беев А.А., Беева Д.А. Наполнение полиэфирэфиркетонов (ПЭЭК) как способ получения композитов с высокими эксплуатационными свойствами // *Пластические массы*. 2017. № 5–6. С. 6–9. DOI: 10.35164/0554-2901-2017-5-6-6-9.
11. Ляшенко Е.Ю., Яковлева К.А., Андреева Т.И. и др. Композиционные материалы на основе полиэфирэфиркетона // *Пластические массы*. 2023. № 1–2. С. 11–13. DOI: 10.35164/0554-2901-2023-1-2-11-13.
12. Хараев А.М., Бажева Р.Ч. Полиэфирэфиркетоны: синтез, свойства, применение (обзор) // *Пластические массы*. 2018. № 7–8. С. 15–23. DOI: 10.35164/0554-2901-2018-7-8-15-23.
13. May R. Polyetheretherketones // *Encyclopedia of Polymer Science and Technology*. Wiley, 2008. P. 1–9. DOI: 10.1002/0471440264.pst266.
14. Способ получения полиэфирэфиркетона: пат. 2673242 Рос. Федерация; заявл. 27.06.18; опубл. 23.11.18.
15. Колпачков Е.Д., Петрова А.П., Курносоев А.О., Соколов И.И. Методы формования изделий авиационного назначения из ПКМ (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2019. № 11 (83). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 13.09.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-11-22-36.
16. Иллиг А., Швацман П. Термоформование: практическое руководство. СПб.: Профессия, 2007. 288 с.
17. Wilkinson S.L. Optimisation of the stamp forming process for thermoplastic composites. University of Bristol, 2021. 167 p.
18. De Almeida O., Bessard E., Bernhart G. Influence of processing parameters and semi-finished product on consolidation of carbon/PEEK laminates // *15th European Conference on Composite Materials*. 2012. URL: <https://www.researchgate.net/publication/287042143> (дата обращения: 13.09.2024).
19. Павлюкович Н.Г., Иванов М.С., Морозова В.С., Донских И.Н. Исследование термостабильности расплава полиэфирэфиркетона марки ПЭЭК-50П и углепластика на его основе // *Авиационные материалы и технологии*. 2024. № 2 (75). Ст. 07. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 13.09.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-2-90-98.

20. Vasconcelos G.C., Mazur R.L., Ribeiro B., Botelho E. Evaluation of Decomposition Kinetics of Poly (Ether-Ether-Ketone) by Thermogravimetric Analysis // *Materials Research*. 2014. Vol. 17 (1). P. 227–235.
21. Демидов А.А., Крупнина О.А., Михайлова Н.А., Косарина Е.И. Исследование образцов из полимерных композиционных материалов методом рентгеновской компьютерной томографии и обработка томограмм с изображением объемной доли пористости // *Труды ВИАМ*. 2021. № 5 (99). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 13.09.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-5-105-113.

References

1. Slavin A.V., Donetskiy K.I., Khrulkov A.V. Prospects for the use of polymer composite materials in aircraft structures in 2025–2035 (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 11 (117), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 13, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-11-81-92.
2. Erasov V.S., Sibayev I.G. Scheme for the development and evaluation of properties of structural aviation composite materials. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 1 (70), paper no. 05. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: September 13, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-61-81.
3. Startsev V.O., Antipov V.V., Slavin A.V., Gorbovets M.A. Modern domestic polymer composite materials for aviation industry (review). *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 2 (71), paper no. 10. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: 13.09.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
4. Gunyaev G.M., Kablov E.N. Structural carbon fiber reinforced plastics at the turn of the century. *Aviation materials. Selected works of «VIAM» 1932–2002*. Moscow: VIAM, 2002, pp. 242–247.
5. Kablov E.N. *Trends and guidelines for innovative development of Russia: collection of scientific and information materials*. 3rd ed. Moscow: VIAM, 2015, 720 p.
6. Kablov E.N. What to make the future of? New generation materials, technologies for their creation and processing – the basis of innovations. *Krylya Rodiny*, 2016, no. 5, pp. 8–18.
7. Sorokin A.E., Ivanov M.S., Sagomonova V.A. Thermoplastic polymer composite materials based on polyetheretherketones of various manufacturers. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 1 (66), paper no. 04. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: October 02, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-41-50.
8. Ivanov M.S., Sorokin A.E. Sheet thermoplastic carbon fiber based on polyetheretherketone for the manufacture of aircraft engine nacelle parts by thermoforming. *Proc. V All-Rus. scientific-technical conf. «Polymer composite materials and production technologies of the new generation»*. Moscow: NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, 2021, art. 03.
9. Beev A.A., Khashirova S.Yu., Beeva D.A., Shokumova M.U. Powdered aromatic polyetheretherketones and copolyetheretherketones. *Plasticheskie massy*, 2022, no. 7–8, pp. 6–9. DOI: 10.35164/0554-2901-2022-7-8-6-9.
10. Mikitaev A.K., Salamov A.Kh., Beev A.A., Beeva D.A. Filling of polyetheretherketones (PEEK) as a method for producing composites with high performance properties. *Plasticheskie massy*, 2017, no. 5–6, pp. 6–9. DOI: 10.35164/0554-2901-2017-5-6-6-9.
11. Lyashenko E.Yu., Yakovleva K.A., Andreeva T.I. et al. Composite materials based on polyetheretherketone. *Plasticheskie massy*, 2023, no. 1–2, pp. 11–13. DOI: 10.35164/0554-2901-2023-1-2-11-13.
12. Kharaev A.M., Bazheva R.Ch. Polyetheretherketones: synthesis, properties, application (review). *Plasticheskie massy*, 2018, no. 7–8, pp. 15–23. DOI: 10.35164/0554-2901-2018-7-8-15-23.
13. May R. Polyetheretherketones. *Encyclopedia of Polymer Science and Technology*. Wiley, 2008, pp. 1–9. DOI: 10.1002/0471440264.pst266.
14. *Method for producing polyetheretherketone*: pat. 2673242 Rus. Federation; appl. 27.06.18; publ. 23.11.18.
15. Kolpachkov E.D., Petrova A.P., Kurnosov A.O., Sokolov I.I. Methods of molding aviation products from PCM (review). *Trudy VIAM*, 2019, no. 11 (83), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 13, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-11-22-36.

16. Illig A., Shvatsman P. *Thermoforming: A Practical Guide*. St. Petersburg: Profession, 2007, 288 p.
17. Wilkinson S.L. *Optimisation of the stamp forming process for thermoplastic composites*. University of Bristol, 2021, 167 p.
18. De Almeida O., Bessard E., Bernhart G. Influence of processing parameters and semi-finished product on consolidation of carbon/PEEK laminates. *15th European Conference on Composite Materials*. 2012. URL: <https://www.researchgate.net/publication/287042143> (accessed: September 13, 2024).
19. Pavlukovich N.G., Ivanov M.S., Morozova V.S., Donskih I.N. Investigation of the thermal stability of the melt polyetheretherketone PEEK-50P and carbon fiber based on it. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 2 (75), paper no. 07. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: September 13, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-2-90-98.
20. Vasconcelos G.C., Mazur R.L., Ribeiro B., Botelho E. Evaluation of Decomposition Kinetics of Poly (Ether-Ether-Ketone) by Thermogravimetric Analysis. *Materials Research*, 2014, vol. 17 (1), pp. 227–235.
21. Demidov A.A., Krupnina O.A., Mikhaylova N.A., Kosarina E.I. Investigation of polymer composite material samples by x-ray computed tomography and processing of tomograms with the image of the volume fraction of porosity. *Trudy VIAM*, 2021, no. 5 (99), paper no. 11. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 13, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-5-105-113.

Информация об авторах

Иванов Михаил Сергеевич, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Морозова Вероника Сергеевна, 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

Mikhail S. Ivanov, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Veronika S. Morozova, 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 21.10.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 24.10.2024.
The article was submitted 21.10.2024; approved and accepted for publication after reviewing 24.10.2024.