

УДК 678.073

Б.С. Кири¹, К.Р. Кузнецова¹, Г.Н. Петрова¹, А.Е. Сорокин¹

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СВОЙСТВ ПОЛИЭФИРЭФИРКЕТОНОВ ОТЕЧЕСТВЕННОГО И ЗАРУБЕЖНОГО ПРОИЗВОДСТВА

DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-5-34-43

Статья посвящена проблеме импортозамещения высокотемпературных конструкционных термопластов. Приведены результаты исследования свойств полиэфирэфиркетонотов отечественного (Институт пластмасс и Кабардино-Балкарский государственный университет) и зарубежного (фирм Zypex и Victrex) производства.

Установлено, что полиэфирэфиркетоноты отечественного производства в настоящее время не обладают необходимым уровнем свойств для обеспечения эффективного импортозамещения. Определены основные направления работ по улучшению их свойств.

Ключевые слова: термопласты, литье под давлением, экструзия, анализ, конструкционные термопласты, полиэфирэфиркетон, импортозамещение, аддитивные технологии.

B.S. Kirin¹, K.R. Kuznetsova¹, G.N. Petrova¹, A.E. Sorokin¹

COMPARATIVE ANALYSIS OF PROPERTIES OF POLYETHERETHERKETONES OF DOMESTIC AND FOREIGN PRODUCTION

Article is devoted to a problem of import substitution of high-temperature engineering thermoplastics. Results of a research of properties of polyetheretherketones domestic (Institute of Plastic and Kabardino-Balkarian State University) and foreign (Zypeek and Victrex) production are given.

It is established that polyetheretherketones of domestic production at the moment have no necessary level of properties for ensuring efficient import substitution, the main directions of works on improvement of their properties are defined.

Keywords: thermoplastics, injection molding, extrusion, analysis, engineering thermoplastics, polyetheretherketone, import substitution, additive manufacturing.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

До последнего времени в отечественном авиа- и ракетостроении применялись полимерные композиционные материалы (ПКМ) на основе термореактивных связующих – например, эпоксидные углепластики, стеклопластики и органопластики. На данные композиционные материалы приходилось до 30% массы боевых самолетов, до 55% массы вертолетов, до 80% массы стратегических ракет, до 20% массы космических аппаратов [1–14].

Однако данные материалы имеют ряд эксплуатационных и технологических недостатков: трудоемкость изготовления (длительность процесса отверждения), высокая

стоимость и продолжительное время изготовления деталей (многооперационность процесса переработки, плохая перерабатываемость), экологическая опасность производства (применение растворителей при изготовлении препрегов, сложность утилизации брака и отходов переработки), ограничения при формовании деталей сложной конфигурации [4–6].

В зарубежном авиастроении наряду с терморезистивными ПКМ все более широко используются ПКМ на основе термопластичных связующих (ТПКМ), что в ряде случаев позволяет добиться существенно лучших прочностных и технологических характеристик, а также снизить массу детали и упростить процесс ее изготовления [4, 15–29].

Из ТПКМ изготавливают такие детали, как элементы крыла, рули, элероны, киль, шпангоуты, элементы фюзеляжа, сотовые заполнители, обтекатели, створки люков, элементы и агрегаты мотогондолы двигателя: сектор спрямляющего аппарата, створки реверсивного устройства, стекатели, лемнискаты реверсивного устройства, корпус воздухозаборника, створки мотогондолы, корпус вентилятора, внутренний подвижный кожух реверсивного устройства, подвижный обтекатель и передний шпангоут реверсивного устройства, сопло наружное, корпус бустера и др. В качестве матриц для таких материалов используются в основном термопласты нового поколения с повышенными прочностными свойствами и термостойкостью – полифениленсульфиды, полиэфиримид, полиэфирэфиркетон, полисульфон и полиэфирсульфоны [4, 30–33].

Широкое применение находят также и ненаполненные термопласты с высокими деформационно-прочностными и теплофизическими свойствами. Так, из полиэфирэфиркетона (ПЭЭК) изготавливают кабельную изоляцию, трубки, профили, пленки, покрытия, детали приборов. Полифениленсульфид (ПФС) используют для изготовления деталей насосов, компрессоров (роторы, поршни, стартеры, запорная аппаратура, корпусные детали и др.). Полисульфоны (ПСФ) применяются в электронике – для изготовления электротехнических изделий для работы при высоких температурах, герметизации ядерных реакторов в зонах максимальной радиации и др. [4, 7, 34–40].

В России в настоящее время нет промышленного производства отечественных конструкционных термостойких термопластов из-за отсутствия необходимой мономерной базы. В ряде организаций организовано малотоннажное производство экспериментальных и опытных партий полиэфирэфиркетонов (АО «Институт пластмасс» и ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет») и промышленных партий полисульфона (АО «Институт пластмасс»).

Однако как объемы производства, так и стабильность свойств и марочный ассортимент получаемых продуктов не позволяют в настоящее время говорить о возможности замещения импортных термопластов на отечественном рынке. В то же время санкционная политика ряда стран – производителей конструкционных термопластов – заставляет отечественные предприятия авиакосмической отрасли активно искать замену импортным материалам.

Таким образом, исследования, направленные на разработку отечественных марок термостойких конструкционных термопластов, способных по своим физико-механическим и теплофизическим характеристикам, себестоимости и стабильности свойств конкурировать с импортными аналогами, в настоящий момент являются актуальными.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 13. «Полимерные композиционные материалы» по комплексной проблеме 13.2. «Конструкционные ПКМ» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1–3, 41–43].

Материалы и методы

В данной статье представлены сравнительные результаты исследования свойств промышленных марок полиэфирэфиркетонов (ПЭЭК) зарубежного производства (Англии и Китая) и экспериментальных образцов отечественного производства – АО «Институт пластмасс» и ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет» (КБГУ).

Полиэфирэфиркетоны имеют уникальный комплекс эксплуатационных свойств (деформационная теплостойкость, термо- и огнестойкость, низкое водопоглощение, радиационная и химическая стойкость, хорошие диэлектрические и конструкционные свойства), что стимулировало их разработку и применение, несмотря на сложности переработки.

Полиэфирэфиркетоны представляют собой ароматические полимеры (полиарилены), молекулярные цепи которых построены из фениленовых циклов, карбоксильных групп и атомов кислорода. Синтезировано несколько типов ПЭЭК, свойства которых определяются содержанием кетонных групп. Концентрация кетонных групп в структуре ПЭЭК составляет 33%. Такие материалы имеют температуру плавления 335°C [4, 7].

В работе исследованы следующие марки ПЭЭК:

- Zureek 550UPF, Zureek 330UPF, Zureek 551G и Zureek 330G фирмы Zureek китайского производства;
- Victrex 90P и Victrex 150P фирмы Victrex (Англия);
- образец ПЭЭК, изготовленный АО «Институт пластмасс»;
- образец ПЭЭК из КБГУ.

Полиэфирэфиркетоны получены в виде порошков с размером частиц <500 мкм или гранул диаметром 2–3 мм.

Исследования свойств ПЭЭК проводили по стандартным методикам:

- показатель текучести расплава (г/10 мин) – по ГОСТ 11645–73;
- прочность при растяжении (МПа) – по ГОСТ 23206–78;
- температуры стеклования, кристаллизации и плавления (°C) – по ГОСТ Р 55134–2012;
- температура деструкции (°C) – по ГОСТ 29127–91.

Структуру порошка, его фракционный состав и морфологию частиц исследовали с помощью сканирующего электронного микроскопа Vega 3 XMU производства фирмы Tescan Orsay Holding. Обработку полученных фотографий проводили с помощью программного обеспечения ImageScore Color. Определение фракционного состава и морфологии частиц проводили путем измерения диаметра Фере среднего размера частиц порошка на изображениях, полученных методом сканирующей электронной микроскопии. Диаметр Фере – среднее значение длин проекций диаметра частицы на 64 оси, рассчитывали с помощью программного обеспечения типа ImageScore Color.

Результаты и обсуждение

Высокие значения температуры плавления и вязкости расплава делают переработку ПЭЭК достаточно сложной. Оптимальный уровень эксплуатационных свойств достигается только при такой организации процессов переработки, которые обеспечивают необходимую степень кристалличности ПЭЭК не менее 35–50% в зависимости от типа ПКМ.

Все технологические приемы переработки ненаполненных ПЭЭК включают операции, обеспечивающие оптимальные скорости охлаждения отформованных изделий и термообработку, при которых кристаллизация протекает наиболее быстро [4, 7].

При проведении исследований способность материалов к переработке предварительно оценивали по величине показателя текучести расплава (ПТР). Условия определения ПТР – нагрузка 5 кг, температура 360°C. Результаты испытаний приведены на рис. 1.

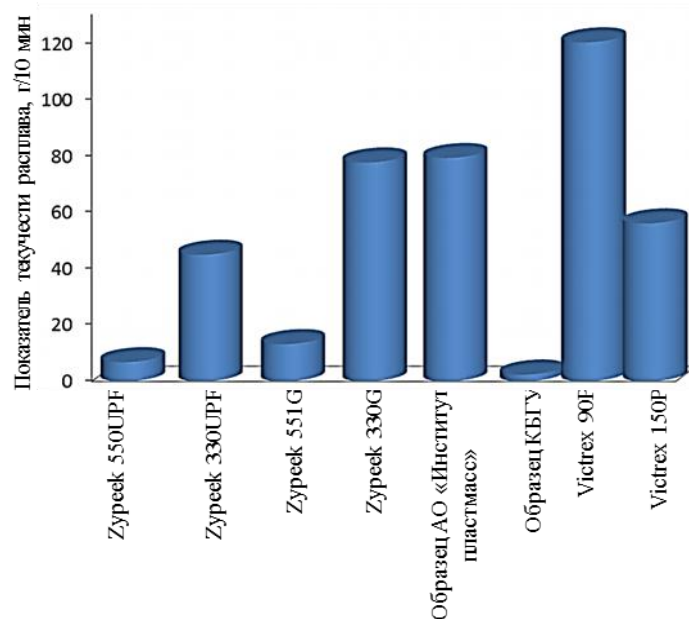


Рис. 1. Показатель текучести расплава полиэфирэфиркетонных различных марок

Из приведенных данных видно, что ПТР представленных на рынке марок ПЭЭК варьируется в чрезвычайно широких пределах: от 2 до 120 г/10 мин, что потенциально позволяет использовать широкий спектр методов переработки данных материалов – от литьевых до прессовочных.

В то же время это серьезно ограничивает возможности перехода на другие марки ПЭЭК в рамках одного метода переработки – взаимозаменяемы только марки, обладающие сходной текучестью. Так, образец полиэфирэфиркетона производства АО «Институт пластмасс» по данному показателю в целом соответствует образцам марок Zyrepek 330UPF и Victrex 150P. Порошок производства КБГУ обладает крайне низкой текучестью даже по сравнению с образцами марок Zyrepek 550UPF и Zyrepek 551G, которые превосходят его по этому показателю в 3 и более раз.

Результаты исследования физико-механических характеристик приведены в табл. 1. Из представленных данных видно, что прочность ПЭЭК находится приблизительно на одном уровне, в то время как удлинение при разрыве отличается более чем в 20 раз. Таким образом, не наблюдается прямой корреляции между прочностью образцов и их деформацией при разрушении, что, вероятно, объясняется различным содержанием кристаллической фазы в материале.

Таблица 1

Прочность и удлинение при разрыве различных марок полиэфирэфиркетонных

Полиэфирэфиркетон	Прочность при разрыве, МПа (ГОСТ 23206–78)	Удлинение при разрыве, % (ГОСТ 23206–78)
Zyrepek 550UPF	59	88,7
Zyrepek 330UPF	56,5	5,45
Zyrepek 551G	75	125
Zyrepek 330G	90	8,4
Образец АО «Институт пластмасс»	64,3	5,1
Образец КБГУ	103	67
Victrex 90P	105	20
Victrex 150P	100	15

Исследование температурных переходов материалов проводили методами дифференциально-сканирующей калориметрии (ДСК) и термогравиметрического анализа (ТГА). Результаты приведены в табл. 2. По результатам ТГА также сделан вывод о количестве содержащегося в отечественных порошках остаточного растворителя. Если в импортных марках не зафиксировано потерь массы вплоть до температуры деструкции, то в отечественных материалах при температурах ~310°C образец КБГУ теряет 1,5% (по массе), а образец АО «Институт пластмасс» 2% (по массе), что свидетельствует о существенном содержании в них остатков летучих веществ (растворителя).

Таблица 2

Температурные переходы различных марок полиэфирэфиркетонов

Полиэфирэфиркетон	Температура, °С		
	кристаллизации	плавления	деструкции
Zyreek 550UPF	287,7	339,3	578,5
Zyreek 330UPF	278,9	342,4	589,7
Zyreek 551G	295,9	340,6	577,2
Zyreek 330G	300,5	342,8	580,2
Образец АО «Институт пластмасс»	307,8	342,5	568,8
Образец КБГУ	293,5	339,4	567,3
Victrex 90P	303,3	342,5	582,6
Victrex 150P	–	–	586,6

Следует отметить, что исследуемые ПЭЭК предназначены в основном для переработки высокопроизводительными способами – литьем под давлением или экструзией. Однако в последние годы при производстве новых изделий в авиастроении, машино- и приборостроении наряду с традиционными методами переработки термопластов, такими как литье под давлением и экструзия, быстрыми темпами развиваются аддитивные технологии переработки [5, 6].

Согласно аналитическим исследованиям, темпы роста аддитивных технологий за последние 10 лет составили ~3,7% в год и в ближайшие 5 лет прогнозируется значительное увеличение объема рынка продукции, изготовленной по данным технологиям.

Основные тенденции развития аддитивных технологий направлены на адаптацию технологических процессов и разработку новых материалов для изготовления функциональных изделий, внедрение аддитивных технологий в уже существующие технологические процессы с целью оптимизации производительности труда и повышения коэффициента использования материалов, сокращения времени запуска в производство новой продукции.

При аддитивной переработке термопластичных материалов наиболее распространенными являются два метода: послойная укладка расплавленной полимерной нити (Fused Deposition Modeling – FDM) и селективное лазерное спекание (Selective Laser Sintering – SLS) порошковых композиций [44–48].

Так, FDM-метод основан на том, что термопластичная полимерная нить подается в экструзионную головку 3D-принтера, в которой нагревается до вязкотекучего состояния и выдавливается через сопло диаметром 0,1–0,3 мм на неподвижное основание по заданной траектории. Последующие слои укладываются на предыдущие и затвердевают по мере охлаждения.

Ярко выраженная слоистость поверхности и необходимость в подпорках для нависающих поверхностей требует введения дополнительной ручной стадии постобработки деталей, что ведет к увеличению продолжительности технологического цикла и

таким образом ограничивает применение данного метода для изготовления функциональных деталей.

В процессе селективного лазерного спекания (СЛС) тонкий слой порошка равномерно распределяется по поверхности основания камеры, где поддерживается инертная газовая атмосфера, которая предотвращает окисление порошка при нагреве. Под действием лазерного излучения частицы порошка плавятся, образуя монолитный слой. После формирования слоя основание камеры опускается на величину, соответствующую толщине слоя. Процесс многократно повторяется до завершения сплавления всех слоев согласно компьютерной модели. После сплавления последнего слоя блок медленно охлаждают. Применение порошковых композиций с размером частиц от 20 до 90 мкм и отсутствие необходимости в поддерживающих структурах позволяют получать точные детали без дополнительных операций постобработки.

Следует также отметить, что в настоящее время на территории РФ практически не представлены качественные отечественные полимерные материалы и оборудование для аддитивного производства. Почти 100% материалов и оборудования поставляются зарубежными компаниями. Основные проблемы, ограничивающие развитие отечественных аддитивных материалов, связаны со следующими факторами: отсутствие отечественного сырья надлежащего качества, ограничения по использованию материалов на зарубежных 3D-принтерах, высокая стоимость оборудования, санкционная политика стран – мировых лидеров по производству оборудования и материалов для 3D-печати.

На отечественном рынке представлен широкий ассортимент импортных материалов на основе полимеров общего назначения: полилактид, поливиниловый спирт, поливинилацетат, АВС-пластик и т. п. – в виде порошковых композиций и полимерных филаментов. Такие материалы поставляют в РФ фирмы EOS, REC, SEM, Best Filament, PP3DR, ESUN, Advanced 3D materials GmbH, Human Farsoon High-tech Co. и т. п.

Конструкционные полуфабрикаты для аддитивных технологий и установки для изготовления из них продукции в Россию сейчас не поставляются [44–48].

Полиэфирэфиркетоны являются наиболее популярными материалами для указанных аддитивных технологий. Эти материалы применяются как для создания макетов и масштабных копий, так и функциональных моделей, т. е. моделей, способных выполнить свою функцию в качестве деталей машин или устройств, в том числе способных работать при повышенных температурах.

Для переработки аддитивными методами одним из наиболее важных показателей является фракционный состав порошка полимера, наряду с сыпучестью, плотностью и другими свойствами порошков. Так, весьма жесткие требования по размеру и форме частиц предъявляются к порошкам для СЛС. Поэтому проведены исследования, направленные на установление фракционного состава порошкообразных марок ПЭЭК.

Проведены исследования порошков полиэфирэфиркетонов производства фирмы Zureek (Китай) марок 550UPF и 330UPF, порошков производства КБГУ и АО «Институт пластмасс», а также гранул производства компании Victrex (Англия) марки 90P.

Фракционный состав различных марок полиэфирэфиркетонов предварительно оценивали методом просеивания порошков через набор сит с размером ячеек 500, 200, 100, 71 и 40 мкм на просеивающей машине типа AS 300. Установлено, что отечественные образцы ПЭЭК характеризуются существенно большей полидисперсностью, чем промышленные марки импортного производства. Так, ~90% частиц в порошках китайского производства имеют размер в пределах от 100 до 200 мкм; 80% частиц порошков производства КБГУ имеет размер от 40 до 200 мкм, а производства АО «Институт пластмасс» – до 100 мкм (табл. 3).

Исследование свойств полимерных композиций для СЛС технологии

Свойства	Значения свойств для порошков ПЭЭК				
	Victrix 90P (Англия)	Zyreek 330UPF (Китай)	Zyreek 550UPF (Китай)	КБГУ (Россия)	АО «Институт пластмасс» (Россия)
Фракционный состав частиц порошка, мкм (не менее 80%)	40–100	100–200	100–200	40–200	0–100
Содержание фракции, %	90	90	86	80	80

Анализ полученных результатов оценки фракционного состава частиц порошка показывает, что промышленные марки ПЭЭК китайского производства не могут быть переработаны методом СЛС без предварительной подготовки из-за большого размера частиц порошков. Эти материалы требуют предварительного измельчения в дробилке до фракции <100 мкм, что является трудоемким процессом из-за высоких физико-механических характеристик ПЭЭК, или отсева крупных фракций, что ведет к резкому (более чем в 5 раз) возрастанию расхода материалов. Для измельчения гранул марки Victrix 90P потребовалось отработать режим двухстадийного измельчения материала в планетарной мельнице и дробилке роторного типа.

Исследования микроструктуры измельченных порошков ПЭЭК (рис. 2) показывают, что в результате измельчения достигнут требуемый для переработки методом СЛС уровень свойств. Частицы порошка имеют преимущественно эллиптическую форму, а значения среднего диаметра отличаются практически в 2 раза.

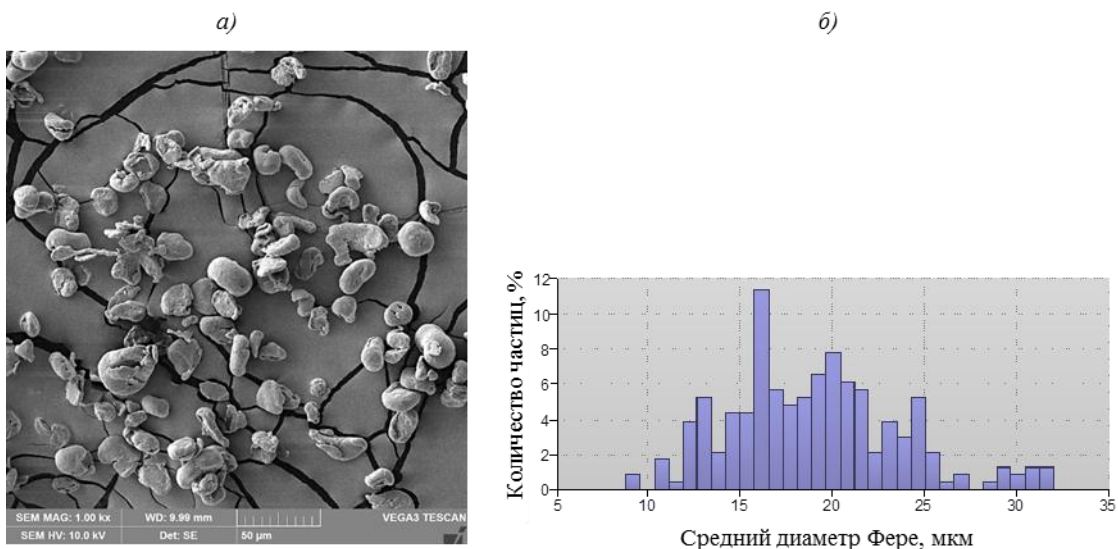


Рис. 2. Микроструктура (а) и гистограмма (б) распределения по размерам частиц порошка полиэфирэфиркетона марки Zyreek 330UPF (производитель Китай) со средним диаметром Фере 19,1 мкм

Важной стадией подготовки материала к переработке методом СЛС является сушка. Как показали проведенные исследования, в обычных условиях ПЭЭК поглощает не более 0,2% (по массе) влаги, что не представляет проблем для его переработки, но снижает качество получаемых образцов. Сушка в течение 3–5 ч при температурах 120–140°C позволяет снизить содержание влаги до 0,05% (по массе). Существенно более сложной задачей является удаление из материала остатков растворителей, используемых на стадии синтеза, что особенно актуально для экспериментальных материалов

отечественного производства. Как показывают результаты термогравиметрического анализа (ТГА), активное удаление растворителя из порошка начинается при температурах $\sim 320^{\circ}\text{C}$, при этом содержание растворителя может достигать 2% (по массе).

Заключения

Проведена сравнительная оценка прочностных и теплофизических свойств ПЭЭК отечественного и зарубежного производства, исследованы их фракционный состав и текучесть.

Исследования показали, что отечественные порошкообразные ПЭЭК по сравнению с импортными обладают рядом существенных недостатков: более высокая полидисперсность порошков, недостаточная стабильность свойств, недостаточно широкий ассортимент материалов, наличие в частицах порошка остатков растворителя. При этом текучесть ПЭЭК производства КБГУ находится на столь низком уровне, что не позволяет использовать его в важнейшей в настоящее время сфере производства ТПКМ.

Анализ результатов исследований ПЭЭК импортного производства показывает, что промышленные марки материала не могут быть переработаны методом СЛС без предварительной подготовки из-за большого размера частиц порошков. Эти материалы требуют предварительного измельчения в дробилке до фракции <100 мкм.

Таким образом, для решения задач импортозамещения в области производства ПЭЭК необходимо:

- доведение отечественных термопластичных связующих до уровня промышленных марок с требуемыми физико-механическими и эксплуатационными свойствами;
- обеспечение стабильности свойств данных материалов и расширение их ассортимента;
- решить проблему удаления из порошков материалов остатков растворителей.

Благодарности

Авторы выражают благодарность сотруднику ФГУП «ВИАМ» С.А. Ларионову за помощь в работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Тенденции и ориентиры инновационного развития России: сб. науч.-информ. материалов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: ВИАМ, 2015. 720 с.
2. Каблов Е.Н. Тенденции и ориентиры инновационного развития России: сб. науч.-информ. материалов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: ВИАМ, 2013. 543 с.
3. Каблов Е. Н. Роль химии в создании материалов нового поколения для сложных технических систем // XX Менделеевский съезд по общей и прикладной химии: тез. докл. в 5 т. УрО РАН, 2016. С. 25–26.
4. Николаев А.Ф. Термостойкие полимеры. Л.: ЛТИ им. Ленсовета, 1988. С. 3–11.
5. Кербер М.Л., Виноградов В.М., Головкин Г.С. и др. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология. СПб.: Профессия, 2011. С. 32–33.
6. Гуняев Г.М., Чурсова Л.В., Комарова О.А., Гуняева А.Г. Конструкционные углепластики, модифицированные наночастицами // Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 277–286.
7. Михайлин Ю.А. Конструкционные полимерные композиционные материалы. СПб.: Научные основы и технологии, 2008. 822 с.
8. Multilayer and composition gradient structures with improved damping properties: pat. 8796164 US; publ. 28.06.12.
9. Structural composite material with improved acoustic and vibrational damping properties: pat. 8450225 US; publ. 28.05.13.
10. Polymer composites possessing improved vibration damping: appl. 2012/0313307 US; publ. 13.12.12.
11. Composite components and heat-curing resins and elastomers: appl. 2012/0034833 US; publ. 09.02.12.

12. Carbon-fiber reinforced plastic composite having improved vibration damping ability: appl. 20120023948 KR; publ. 14.03.12.
13. Nagasankar S., Balasivanandha P., Velmurugan R. Influence of the Different Fiber lay-ups on the Damping Characteristics of the Polymer Matrix // *Journal of Applied Sciences*. 2012. Vol. 12 (10). P. 1071–1074.
14. Rao M.D. Recent applications of viscoelastic damping for noise control in automobiles and commercial airplanes // *Journal of Sound and Vibration*. 2003. Vol. 262. P. 457–473.
15. Mazumdar S.K. *Composites Manufacturing (materials, product and process engineering)* N.Y., 2001. 400 p.
16. Петрова Г.Н., Ларионов С.А., Платонов М.М., Перфилова Д.Н. Термопластичные материалы нового поколения для авиации // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №S. С. 420–436. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-420-436.
17. Деев И.С., Каблов Е.Н., Кобец Л.П., Чурсова Л.В. Исследование методом сканирующей электронной микроскопии деформации микрофазовой структуры полимерных матриц при механическом нагружении // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн*. 2014. №7. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 14.05.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-7-6-6.
18. Михайлин Ю.А. *Термоустойчивые полимеры и полимерные материалы на их основе*. СПб.: Профессия, 2006. 346 с.
19. Каблов Е.Н., Семенова Л.В., Петрова Г.Н., Ларионов С.А., Перфилова Д.Н. Полимерные композиционные материалы на термопластичной матрице // *Известия вузов. Сер.: Химия и химическая технология*. 2016. Т. 59. №10. С. 61–71.
20. Крыжановский В.К., Бурлов В.В., Паниматченко А.Д., Крыжановская Ю.В. *Технические свойства полимерных материалов*. СПб.: Профессия, 2005. 240 с.
21. Кондрашов С.В., Шашкеев К.А., Петрова Г.Н., Мекалина И.В. Полимерные композиционные материалы конструкционного назначения с функциональными свойствами // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №S. С. 405–419. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-405-419.
22. Петрова Г.Н., Бейдер Э.Я., Старостина И.В. Литьевые термопласты для изделий авиационной техники // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2016. №6. С. 10–15.
23. Кирин Б.С., Тихонов Н.Н., Чалых А.Б., Шнипов А.В. Регулирование деформационно-прочностных и эксплуатационных свойств ПВХ-материалов продуктами модификации низкомолекулярного олигобутадиена // *Пластические массы*. 2007. №5. С. 7–9.
24. Постнов В.И., Плетинь И.И., Вешкин Е.А., Старостина И.В., Стрельников С.В. Технологические особенности производства тонколистовых обшивок лопастей вертолета из конструкционного стеклопластика ВПС-53К // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2016. Т. 18. №4 (3). С. 619–627.
25. Кирин Б.С., Тихонов Н.Н., Осипчик В.С. Регулирование реологических и абразивных свойств ПВХ-материалов с целью снижения износа формующей оснастки экструзионного оборудования // *Энциклопедия инженера-химика*. 2010. №10. С. 33–38.
26. Петрова Г.Н., Старостина И.В., Румянцева Т.В., Сапего Ю.А. Эффективность повышения качества изделий из поликарбоната термообработкой // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн*. 2017. №9 (57). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 14.05.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-9-6-6.
27. Кирин Б.С., Тихонов Н.Н., Егоров В.Н. Исследования особенностей модификации поливинилхлорида продуктами малеинизации полибутадиена // *Пластические массы*. 2010. №10. С. 24–28.
28. Комаров Г.А. Состояние, перспективы и проблемы применения ПКМ в технике // *Полимерные материалы*. 2009. №2. С. 5–9.
29. Li J., Kim J.K., Sham M.L., Marom G. Morphology and properties of UV/ozone treated graphite nanoplatelet/epoxy nanocomposites // *Composites Science and Technology*. 2007. Vol. 67. P. 296–305.

30. Croccolo D., De Agostinis M., Olmi G. Experimental characterization and analytical modelling of the mechanical behavior of fused deposition processed parts made of ABS-M30 // *Computational Materials Science*. 2013. Vol. 79. P. 506–518. DOI: 10.1016/j.commatsci.2013.06.041.
31. Мажирин П.Ю. Полифениленсульфид в авиастроении // *Полимерные материалы*. 2003. №2. С. 22–24.
32. Михайлин Ю.А. Термоустойчивые полимеры и полимерные материалы на их основе // *Полимерные материалы*. 2005. №4. С. 29–32.
33. Куперман А.М., Лебедева О.В., Пучков Л.В., Зеленский Э.С., Горбаткина Ю.А., Берлин А.А. Армированные пластики на основе термопластичных связующих // *Пластические массы*. 1992. №5. С. 9–10.
34. Комаров Г.А. Соединение деталей из полимерных материалов: учеб. пособие. СПб.: Профессия, 2006. С. 337–443.
35. Тростянская Е.Б., Степанова М.И., Рассохин Г.И. Теплостойкие линейные полимеры. Ростов н/Д: РГАСХМ, 2002. С. 3–22.
36. Головкин Г.С. Технологические свойства термопластичных связующих для армированных пластиков // *Пластические массы*. 2005. №1. С. 35–40.
37. Lužanin O., Movrin D., Plančak M. Experimental investigation of extrusion speed and temperature effects on arithmetic mean surface roughness in FDM built spectmens // *Journal for Technology of Plasticity*. 2013. Vol. 38 (2013). No. 2. P. 179–191.
38. Сорокин А.Е., Бейдер Э.Я., Перфилова Д.Н. Влияние климатических факторов на свойства углепластика на полифениленсульфидном связующем // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2015. №1. Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 14.05.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-1-10-10.
39. Сорокин А.Е., Бейдер Э.Я., Изотова Т.Ф., Николаев Е.В., Шведкова А.К. Исследование свойств углепластика на полифениленсульфидном связующем после ускоренных и натуральных климатических испытаний // *Авиационные материалы и технологии*. 2016. №3 (42). С. 66–72. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-3-66-72.
40. Головкин Г.С. Регулирование механических свойств ПКМ методами целенаправленного формирования межфазной зоны // *Полимерные материалы*. 2009. №11. С. 26–28.
41. Каблов Е.Н. России нужны материалы нового поколения // *Редкие земли*. 2014. №3. С. 8–13.
42. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №S. С. 7–17.
43. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
44. Bikas H., Stavropoulos P., Chryssolouris G. Additive manufacturing methods and modeling approaches: a critical review // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016. Vol. 83. P. 389–405. DOI: 10.1007/s00170-015-7576-2.
45. Novakova-Marcincinova L., Kuric I. Basic and Advanced Materials for Fused Deposition Modeling Rapid Prototyping Technology // *Manufacturing and Industrial Engineering*. 2012. Vol. 11 (1). P. 24–27.
46. Hill N., Naghi M. Deposition direction-dependent failure criteria for fused deposition modeling polycarbonate // *Rapid Prototyping Journal*. 2014. Vol. 20. No. 3. P. 221–227. DOI: 10.1108/RPJ-04-2013-0039.
47. Goodridge R.D., Tuck C.J., Hague R.J.M. Laser sintering of polyamides and other polymers // *Progress in Materials Science*. 2012. Vol. 57. P. 229–267. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2011.04.001.
48. Kruth J.-P., Levy G., Klocke F., Childs T.H.C. Consolidation phenomena in laser and powder-bed based layered manufacturing // *Annals of the CIRP*. 2007. Vol. 56. No. 2. P. 730–759. DOI: 10.1016/j.cirp.2007.10.004.