

УДК 678.8

А.Е. Сорокин¹, В.А. Сагомонова¹, А.П. Петрова¹, Л.В. Соловьянчик¹

ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ТЕРМОПЛАСТИЧНОЙ МАТРИЦЫ (обзор)

DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-3-78-86

Рассмотрены различные технологии получения препрегов на термопластичной матрице и композиционных материалов на их основе. Представлены их преимущества перед технологиями изготовления полимерных композиционных материалов на основе термореактивной матрицы. Показано, что применение расплавной технологии позволяет изготавливать стеклопластик с наиболее высоким уровнем прочностных характеристик. Описан алгоритм оценки остаточных напряжений в термопластичном композите для оптимизации технологического процесса получения сложнопрофильных изделий.

Ключевые слова: термопласты, композиционные материалы, термопластичная матрица, технология, препрег, пултрузия, расплавная технология, пленочная технология, волоконная технология.

A.E. Sorokin¹, V.A. Sagomonova¹, A.P. Petrova¹, L.V. Solovyanchik¹

MANUFACTURING TECHNOLOGIES OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS ON THERMOPLASTICS (review)

Various technologies for the production of prepregs based on a thermoplastic matrix and composite materials based on them are considered. Their advantages over the technologies of manufacturing polymer composite materials based on a thermosetting matrix are presented. It is shown that the use of melt technology allows the production of fiberglass with the highest level of strength characteristics. An algorithm for estimating residual stresses in a thermoplastic composite to optimize the technological process of producing complex products is described.

Keywords: thermoplastics, composite materials, thermoplastic matrix, technology, prepreg, pultrusion, melt technology, film technology, fiber technology.

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

Разработка длинноразмерных и сложнопрофильных конструкций из полимерных композиционных материалов (ПКМ) требует расширения номенклатуры материалов, обеспечивающих высокие характеристики изделий и упрощение технологического процесса их изготовления. Анализ данных научно-технической литературы подтверждает перспективность использования композиционных материалов на основе термопластичных матриц (КТМ) для решения данных задач [1]. В настоящее время на основе КТМ изготавливают каркасы для лобового остекления, элементы хвостового отсека и фюзеляжа, лобовики крыльев длиной до 12 м, а также зализы мотогондолы и стабилизатора авиалайнера Аэробус А380 [2, 3].

Использование термопластичных связующих при изготовлении изделий позволяет устранить ряд недостатков, присущих термореактивным связующим [4], а именно:

недостаточную устойчивость к ударным нагрузкам, пылевой и дождевой эрозии, токсичность и пожароопасность технологического процесса переработки из-за наличия в рецептуре терморезактивных связующих легколетучих компонентов и горючих растворителей, а также длительный цикл формования [5, 6]. Кроме того, термопласты известны своей хорошей свариваемостью, длительным сроком хранения, способностью к вторичной переработке и стойкостью к агрессивным средам [7, 8].

Однако, как известно, термопласты также обладают специфическими свойствами: более высокой вязкостью растворов и расплавов по сравнению с реактопластами, высокой температурой переработки [9, 10], низкой адгезионной способностью [11–14], а также плохой растворимостью, что требует разработки отличающихся от традиционных технологий получения препрегов и композиционных материалов на их основе.

Таким образом, крайне актуальной является задача выбора способов переработки термопластов для получения материалов с заданным уровнем свойств при минимальных затратах. Цель данной работы – анализ наиболее перспективных технологических схем, которые используются для получения препрегов на термопластичных матрицах, а также КТМ и изделий на их основе.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 13. «Полимерные композиционные материалы» («Стратегические направления материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [15–18].

Технологии совмещения армирующего наполнителя с термопластичной матрицей

Состав композиционных материалов на основе как термопластичной, так и терморезактивной матрицы по общим признакам одинаков: непрерывное армирующее волокно, аппретирующий слой и связующее. В составе КТМ используют различные волокнистые наполнители – углеродные, стеклянные и полимерные.

Для совмещения термопластичных связующих с волокнистыми наполнителями разработан ряд технологий, среди которых наиболее активно применяются следующие: растворная, расплавная, электронно-ионная, пленочная и волоконная [19–28].

Растворная технология считается одной из наиболее простых и заключается в пропитке армирующего наполнителя раствором полимера низкой вязкости [29]. Данная технология обеспечивает качественную пропитку волокна, однако имеет и ряд недостатков. В первую очередь, из-за наличия растворителя при переработке материал склонен к образованию пор и дефектов, что влечет за собой снижение механических характеристик изделия. Кроме того, данная технология требует применения габаритного и дорогостоящего рекуперационного оборудования, а также проведения операции пропитки в 2–3 этапа. Следует отметить, что не все термопласты можно растворить.

Пленочная технология заключается в послышной укладке наполнителя и связующего, предварительно изготовленного в виде пленки [30]. Связующее в виде пленки накладывается на аппретированную стеклоткань и закрепляется в отдельных точках с помощью нагретого до температуры 200 °С электропаяльника или аппарата горячего воздуха. Наиболее сложным в использовании пленочной технологии является изготовление пленки связующего необходимой толщины и размера – для этого требуются дорогостоящее оборудование и высокие энергозатраты. Однако данная технология обеспечивает наиболее равномерную пропитку наполнителя и, как следствие, высокие механические характеристики, аналогичные характеристикам литьевого материала с равномерным распределением свойств по его объему. Следует также отметить, что ввиду отсутствия отвердителя в составе пленочных связующих на основе термопластов они обладают более длительным сроком хранения, по сравнению со связующими на основе терморезактивной матрицы.

Суть волоконной технологии состоит в совмещении двух типов волокон: армирующих, выполняющих роль наполнителя, и термопластичных, выполняющих роль связующего [31]. Данная технология позволяет производить качественную пропитку наполнителя и изготавливать материалы с высокими механическими характеристиками. Однако поскольку не из всех термопластов можно получить волокна, применение этой технологии достаточно ограничено.

Электронно-ионная технология основывается на нанесении заряженного в электростатическом поле связующего в виде порошка на поверхности наполнителей за счет электростатического притяжения, а затем его оплавления. Схема данного процесса представлена на рис. 1 [32].

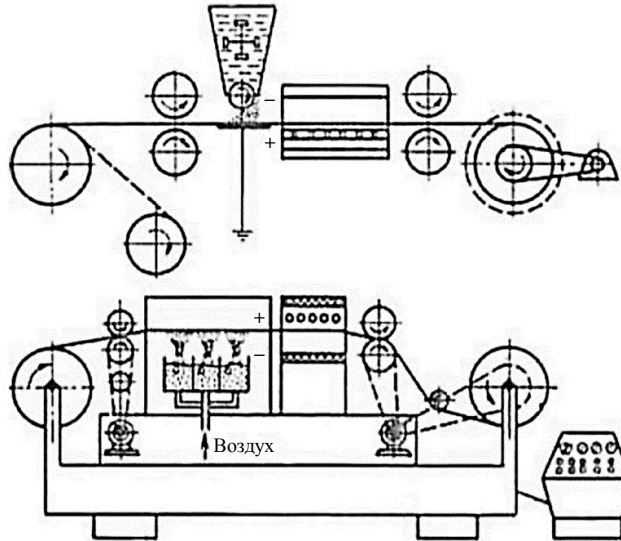


Рис. 1. Схема получения препрега по электронно-ионной технологии

Армирующий наполнитель через систему тянущих валков попадает в камеру, где связующее благодаря силам электростатического притяжения осаждается на наполнитель, а затем подается на приемную бобину через термокамеру (камеру оплавления) и калибрующие валки.

При расплавной технологии непрерывное волокно армирующего наполнителя протягивается через пропиточную зону, куда подается расплав полимера. Данный процесс является практически аналогичным технологии для термореактивного связующего (рис. 2) [33].

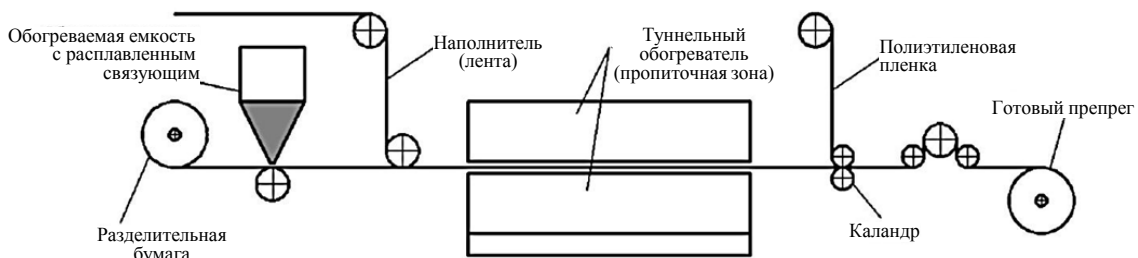


Рис. 2. Схема получения препрега по расплавной технологии

Расплавная технология обеспечивает достаточно быструю и качественную пропитку наполнителя и, как следствие, высокие физико-механические характеристики

КТМ. Однако из-за высокой вязкости расплава термопластов требуется применение сложного и дорогостоящего оборудования.

Из перечисленных способов совмещения волокнистого наполнителя с термопластичным связующим наиболее перспективными и менее энергоемкими считаются электронно-ионная и расплавная технологии, а пленочная и волоконная технологии обеспечивают наиболее равномерную пропитку наполнителя связующим и наиболее высокий уровень механических свойств материала.

Следует отметить, что от качества пропитки армирующего наполнителя напрямую зависят свойства КТМ, поскольку последующее формование практически не влияет на глубину пропитки волокна термопластичным связующим. В частности, для изготовления материала с характеристиками на уровне КТМ, полученного с применением растворной технологии, необходимы дополнительная стадия пропитки промежуточного слоя или использование аппретирующего состава [22, 23].

Особенности получения композиционных материалов на основе термопластичной матрицы

По рассматриваемым технологиям совмещения армирующего наполнителя с термопластичной матрицей изготавливают полуфабрикаты для получения КТМ – препреги. Технологии формования изделий с использованием препрегов обеспечивают точное соотношение «матрица–наполнитель», что напрямую влияет на равномерное распределение физико-механических характеристик материала. Одним из основных преимуществ изготовления КТМ из препрегов является также ускорение технологического цикла благодаря разделению на два самостоятельных процесса – изготовление препрега и формование изделия.

С использованием препрегов можно формировать детали по традиционным для ПКМ технологиям – например, по автоклавной технологии, намоткой, пултрузией и др. В частности, пултрузия с дальнейшей консолидацией лент или стренг (армирующего наполнителя, пропитанного расплавом термопласта) в отсутствие дополнительного нагрева материала позволяет получать изделия с высокими показателями прочности и жесткости, а также малой плотностью и низкой стоимостью [34]. Кроме того, данная технология считается экологически чистой благодаря возможности многократной переработки полученного материала.

Перерабатывать КТМ из препрегов наиболее целесообразно путем давления и прокатки, при этом можно применять металлургическое оборудование с высокой производительностью при достаточно коротком цикле формования (от 10 мин до 1 ч). Внедрение такого технологического процесса на серийных заводах проводят с использованием исходного материала в виде листов заданной толщины. Это избавляет от необходимости иметь на производстве участки для изготовления связующих и пропитки наполнителя, а также проводить прессование листов, чтобы получать материал требуемой для данного производства толщины. В работе [19] описаны способы изготовления изделий из КТМ путем штамповки и гибки.

При замене в конструкциях композиционных материалов на основе термореактивного связующего на КТМ следует учитывать особенности технологического процесса переработки, который проходит при высоких температурах и требует или модернизации традиционного для ПКМ оборудования, или разработки нового. Специальное оборудование для получения и переработки КТМ за рубежом разрабатывают и поставляют известные компании – ICI (Великобритания), Bayer (Германия) и др. Выпускаемое этими фирмами оборудование позволяет проводить такие операции, как предварительный прогрев препрега для его размягчения и приварка слоев при сборке

пакета (в случае необходимости), обеспечивает высокие температуры (200–450 °С) и давление (100–400 МПа) при формовании, а также позволяет охлаждать отформованную деталь (заготовку) под давлением с определенной скоростью [19].

Выбор состава и способа формования изделий из КТМ определяется большим количеством факторов. В частности, в первую очередь к ним относятся технологические возможности переработки выбранного термопластичного полимера, технические требования к изделиям, их конструктивные особенности и условия эксплуатации, а также объемы выпуска и экономические аспекты производства (затраты на приобретение оснастки и оборудования, включая их производительность и срок эксплуатации, трудоемкость, квалификация специалистов и др.).

В качестве связующих для КТМ могут быть использованы любые термопласты, допускающие технологическую возможность их переработки для изготовления препрегов и формования изделий. Наиболее широко применяются полиэтилен, полипропилен, полистирол, полиэтилентерефталат, а в материалах конструкционного назначения наиболее активно используются полиамиды, полиарилаты, полиимиды, полисульфоны [20].

Например, при изготовлении труб массовое применение находят КТМ из теплоустойчивого полиэтилена PERT (сополимер этилена с октенем-1), наполненного базальтом и стекловолокном. Армирующие наполнители используют в виде дискретных волокон (длина отрезка от 3 до 6 мм) при наполнении связующего от 15 до 30% (по массе) [35, 36]. Отмечается, что армирующие наполнители влияют на реологические свойства связующих: наполненные базальтовыми волокнами связующие имеют более низкую вязкость, чем наполненные стеклянными волокнами, благодаря чему они лучше смачивают поверхность волокон и обеспечивают более высокие адгезионные свойства.

При температуре >232 °С наблюдается увеличение вязкости ненаполненного полиэтилена PERT, по сравнению с образцом, наполненным базальтом. При температуре >262 °С характер кривой вновь меняется – отмечено монотонное снижение вязкости [37]. Наблюдаемая особенность поведения полиэтилена PERT в процессе изотермического нагревания, вероятно, связана с теплопроводностью системы.

В последнее время за рубежом в рецептурах КТМ применяют так называемые «суперконструкционные» термопласты: полиэфирсульфид (PES) [38], полиэфиримиды (PEI) [39], кардовые полиариленэфиркетоны [40], жидкокристаллические термопласты и др.

Свойства термопластичного стеклопластика на основе препрегов, полученных с применением стеклоткани Т-15(п)-76 и отечественного полисульфона ПСФ-150 при различных технологиях изготовления, приведены в таблице.

Свойства термопластичного стеклопластика на основе препрегов, полученных с применением стеклоткани Т-15(п)-76 и полисульфона ПСФ-150 при различных технологиях изготовления ($T_{прес}=280\pm 5$ °С; $P_{уд.мах}=0,5-1,5$ МПа)

Технология изготовления препрега	Степень наполнения, %	$\sigma_{в.сж}$	$\sigma_{в.и}$
		МПа	
Расплавная	56	390	450
	60	435	450
	62	420	445
Электронно-ионная	55	–	370
	49	310	–
Пленочная	59,6	212	374
	60,2	253	392
	60,5	273	427

Установлено, что наиболее высокие прочностные характеристики имеет стеклопластик на основе препрега, полученного с применением расплавной технологии. Повышение степени наполнения пластика приводит к увеличению его прочности.

Использование термопластичного связующего в виде пленки позволяет формировать детали из КТМ методом горячего прессования, минуя операцию получения препрега. Горячим прессованием можно формовать изделия сложной геометрической формы и больших размеров.

Для получения изделия сначала проектируют и изготавливают форму, в которой послойно выкладывают армирующий наполнитель и пленочное связующее. Затем под давлением производят нагрев формы с помещенной в нее заготовкой изделия до температуры плавления связующего, далее материал выдерживают при этой температуре под давлением, а затем охлаждают до комнатной температуры [41].

В работах [24, 41] рассмотрен технологический процесс изготовления КТМ сложной конструкции. Сложность данного процесса состоит в том, что во время фазового перехода связующего возможны коробление и деформация КТМ, а также зарождение в его структуре дефектов. Оптимизация технологического процесса проведена с учетом перехода связующего в вязкое и близкое к жидкому состояние, а также с учетом изменения свойств и усадки материала. В зависимости от фазового состояния полимера выделяют следующие основные требования к построению модели:

- повышение кристалличности;
- изменение характеристик жесткости;
- изменение температурных свойств;
- изменение прочностных показателей материала.

Описанное в работе [41] моделирование оценки величин остаточных напряжений и прочностных характеристик термопластичного композита позволяет рассматривать термопластичное связующее отдельно от него, что дает возможность пересчитывать макросвойства композита в зависимости от изменения свойств матрицы. Алгоритм рассматриваемого подхода показан на рис. 3.



Рис. 3. Алгоритм оценки остаточных напряжений в термопластичном композиционном материале

Упругая жесткость термопластичного композиционного материала зависит от кристалличности его структуры. Это связано с постепенным ростом кристаллических цепочек в полимере, которые с увеличением их количества начинают сопротивляться деформированию материала. При нагревании термопластичный материал расплавляется и при определенной вязкости начинает пропитывать тканый наполнитель. При формировании КТМ в них могут образовываться остаточные напряжения, что можно объяснить неравномерным изменением температуры по толщине слоев КТМ. Особенность поведения термопластичного материала заключается в изменении температурного коэффициента линейного расширения при фазовом переходе, а также в связанной с этим переходом усадке связующего, которая в свою очередь пропорциональна степени кристалличности полимера. Таким образом, остаточные напряжения в КТМ возникают от градиента температур, приводящего к изменениям степени кристалличности термопластичного связующего при нагревании.

Заключения

На основании проведенного в работе анализа существующих технологий совмещения волокнистого наполнителя с термопластичной матрицей показано, что наиболее перспективными и менее энергоемкими являются электронно-ионная и расплавная технологии. Для наиболее качественной пропитки наполнителя связующим, а также обеспечения наиболее равномерного и высокого уровня механических характеристик материала целесообразно использовать пленочную и волоконную технологии.

Несмотря на разнообразные технологические способы изготовления, связанные с вязкостью расплавов и растворов, а также с повышенными температурами переработки, препреги на основе термопластичных связующих имеют более длительный период хранения, по сравнению с препрегами, полученными на основе термореактивных связующих.

Благодаря более короткому процессу отверждения, технологии изготовления КТМ характеризуются меньшей продолжительностью по сравнению с технологиями получения ПКМ на основе термореактивных матриц, что позволяет сократить технологический процесс изготовления длинногабаритных и сложнопрофильных конструкций. Кроме того, в случае получения некачественных материалов после проведения дополнительной переработки их можно использовать повторно.

Библиографический список

1. Донецкий К.И., Быстрикова Д.В., Караваев Р.Ю., Тимошков П.Н. Полимерные композиционные материалы для создания элементов трансмиссий авиационной техники (обзор) // Труды ВИАМ. 2020. №3 (87). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 28.02.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-3-82-93.
2. Петрова Г.Н., Бейдер Э.Я. Конструкционные материалы на основе армированных термопластов // Российский химический журнал. 2010. Т. 54. №1. С. 30–40.
3. Петрова Г.Н., Бейдер Э.Я. Литые термопластичные материалы авиакосмического назначения // Российский химический журнал. 2010. Т. 54. №1. С. 41–45.
4. Мухаметов Р.Р., Петрова А.П. Термореактивные связующие для полимерных композиционных материалов (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2019. №3 (56). С. 48–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-48-58.
5. 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.
6. Бондалетова Л.И., Бондалетов В.Г. Полимерные композиционные материалы: учеб. пособие. Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2013. 118 с.

7. Johnson R.O., Teutsch E.O. Thermoplastic aromatic polymer composites // *Polymer composites*. 1983. Vol. 4. No. 3. P. 162–166.
8. Johnston N.J., Clair T.L.St., Baucom R.M., Towell T.W. Polyimide Matrix Composites: Polyimidesulfone/LARC-TPI (1:1) Blend // *Tomorrow's Materials*. 1989. Vol. 34. P. 976–987.
9. Котомин С.В., Баранкова Т.И., Плотникова Е.Л., Филиппова Т.Н. Получение и свойства микропластиков с полисульфоном и монтморилонитом // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2016. №2. С. 2–9.
10. Котомин С.В., Иванова Р.С., Конкин А.А., Молчанов Б.И. Кинетика пропитки углеродных волокон расплавами термопластов // *Химические волокна*. 1981. №6. С. 29–31.
11. Котомин С.В., Авдеев Н.Н. Смачивание химических волокон расплавами термопластов // *Коллоидный журнал*. 1999. Т. 61. №3. С. 336–343.
12. Баранцева Т.Е., Горбаткина Ю.А., Кравченко Т.П., Кербер М.Л. Адгезионная прочность при взаимодействии полиамидов с арамидными волокнами // *Химические волокна*. 1997. №5. С. 51–55.
13. Болотина Л.М., Горбаткина Ю.А., Иванова-Мумжиева В.Г., Корнеева Н.В. Влияние молекулярной массы полисульфонов на их адгезию к волокнам // *Высокомолекулярные соединения. Серия Б*. 2002. Т. 44. №8. С. 433–444.
14. Корнеева Н.В., Горбаткина Ю.А., Иванова-Мумжиева В.Г., Неделькин В.И., Болотина Л.М. Адгезия термопластичных матриц с различной молекулярной массой к волокнам // *Механика композитных материалов*. 2002. Т. 38. №4. С. 433–444.
15. 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.
16. Каблов Е.Н. Авиакосмическое материаловедение // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2008. №3. С. 2–14.
17. Каблов Е.Н. Химия в авиационном материаловедении // *Российский химический журнал*. 2010. Т. 54. №1. С. 3–4.
18. Каблов Е.Н., Семенова Л.В., Петрова Г.Н., Ларионов С.А., Перфилова Д.Н. Полимерные композиционные материалы на термопластичной матрице // *Известия высших учебных заведений. Сер.: Химия и химическая технология*. 2016. Т. 59. №10. С. 61–71.
19. Петрова Г.Н., Бейдер Э.Я., Изотова Т.Ф., Мальшенков С.В. Композиционные термопластичные материалы – способы получения и переработки // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2013. №10. С. 10–17.
20. Ткачук А.И., Гребенева Т.А., Чурсова Л.В., Панина Н.Н. Термопластичные связующие. Настоящее и будущее // *Труды ВИАМ*. 2013. №11. Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 14.01.2021).
21. Агафонова А.С., Кондрашов С.В. Особенности технологии изготовления монолитного стеклопластика радиотехнического назначения (МСРТ) // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №1. С. 30–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-1-30-33.
22. Бейдер Э.Я., Петрова Г.Н., Изотова Т.Ф. Влияние аппретов на свойства термопластичных стеклопластиков // *Труды ВИАМ*. 2014. №9. Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 14.01.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-9-7-7.
23. Бейдер Э.Я., Петрова Г.Н., Дыкун М.И. Аппретирование углеродных волокон-наполнителей термопластичных карбопластиков // *Труды ВИАМ*. 2014. №10. Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 14.01.2021) DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-10-3-3.
24. Заборская Л.В., Юркевич О.Р., Довгяло В.А., Писанова Е.В. Исследование закономерностей совмещения дисперсного полисульфона с армирующими волокнами при получении композитных материалов // *Механика композитных материалов*. 1991. №3. С. 403–407.
25. Устинов В.А., Бейдер Э.Я. Применение композиционных материалов с термопластичной матрицей // *Конструкции из композиционных материалов*. 1991. №1. С. 21–28.
26. Петрова Г.Н., Перфилова Д.Н., Грязнов В.И., Бейдер Э.Я. Термопластичные эластомеры для замены резин // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №S. С. 302–308.

27. Петрова Г.Н., Румянцева Т.В., Перфилова Д.Н., Бейдер Э.Я., Грязнов В.И. Термоэластопласты – новый класс полимерных материалов // *Авиационные материалы и технологии*. 2010. №4. С. 20–25.
28. Крыжановский В.К., Бурлов В.В., Паняматченко А.Д., Крыжановская Ю.В. Технические свойства полимерных материалов: учеб.-справ. пособие. СПб.: Профессия, 2007. 240 с.
29. Thermoplastic compositions: pat. US 3785916; filed 11.12.70; publ. 15.01.74.
30. Treatment of carbon fibre: pat. US 4269876; filed 10.04.77; publ. 26.05.81.
31. Zaixia F., Zhangyu, Yanmo Ch., Hairu L. Tensile Properties of Glass Fiber Knitted Fabric Reinforced Polypropylene Composite Made from GF/PP Commingled Yarn Affected by Prestretching // *Journal of reinforced plastics and composites*. 2006. Vol. 25. P. 553–560.
32. Шалин Р.Е., Зиновьев С.Н., Померанцева К.П. и др. Термостойкий углепластик КМУ-8 // *Авиационная промышленность*. 1987. №5. С. 10–19.
33. Нелюб В.А. Технологии получения препрегов // *Все материалы*. 2013. №3. С. 12–17.
34. Наркевич А.Л., Ставров В.П. Оптимизация режимов получения профилей из армированных термопластов // *Материалы. Технологии. Инструменты*. 2003. Т. 8. №4. С. 75–79.
35. Яковлев Ю.Ю., Хасянов Р.Ш., Галигузов А.А. и др. Особенности текучести расплавов PERT-полиэтилена, наполненного базальтами и стеклянными волокнами // *Пластичные массы*. 2018. №9–10. С. 49–51.
36. Гайтукиева З.Х., Ахриев А.С., Кунижев Б.И., Тхакахов Р.Б. Диэлектрическая проницаемость и плотность полимерных композитов на основе синтетического изопренового каучука и полиэтилена, содержащих наночастицы сажи и алюминия // *Пластические массы*. 2018. №9–10. С. 47–49.
37. Зимин Д.Е. Армированный базальтовыми волокнами полимерный композиционный материал с повышенной тепло- и химической стойкостью: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Бийск: ИПХТ СО РАН, 2009. 24 с.
38. Евразийский химический рынок. Новые полимеры: полифениленсульфид // *Международный деловой журнал*. 2008. Т. 39. №3. С. 14–21.
39. Бородулин А.С., Калинин А.Н., Музыка С.С., Терешков А.Г. Полиэфиримиды для создания теплостойких полимерных композиционных материалов с высокими физико-механическими свойствами // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2019. №11. С. 94–100.
40. Рябев А.Н., Донецкий К.И., Шапошникова В.В. и др. Гомо- и сополиариленаэфиркетоны с боковыми гидроксильными группами // *Высокомолекулярные соединения. Серия Б*. 2009. Т. 51. №2. С. 315–321.
41. Федулов Б.Н., Сафронов А.А., Кантор М.М., Ломов С.В. Моделирование отверждения термопластических композитов и оценка величин остаточных напряжений // *Композиты и наноструктуры*. 2017. Т. 9. №2 (34). С. 102–122.