

УДК 678.7

Г.Н. Петрова¹, Э.Я Бейдер¹**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ АППРЕТИРУЮЩИХ СОСТАВОВ
ДЛЯ ТЕРМОПЛАСТИЧНЫХ УГЛЕПЛАСТИКОВ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-12-9-9

Представлены результаты исследований по разработке аппретирующего подслоя на углеродное волокно под термопластичную матрицу (полисульфон) с целью повышения характеристик самого волокна и улучшения физико-механических свойств углепластика на его основе.

Приведены свойства углепластиков на основе углеродных наполнителей – ЭЛУР, УКН-2500 и УКН-5000. Показано влияние аппретирования углеродных волокон на межслойную прочность и пористость углепластиков на основе полисульфонового связующего.

Дана оценка эффективности аппретирующих составов на основе полисульфона ПСФ-ТП, полистирола, бисмалеинимидов и олигоэфиракрилатов.

Показано, что для аппретирования углеродных волокон могут быть использованы как полимеры, так и олигомерные составы. Однако наибольший эффект проявляется при использовании олигомерных или мономерных аппретов, которые растворимы в воде, обладают повышенной термостойкостью и имеют в наличии функциональные группы.

Ключевые слова: наполнитель, матрица, термопласт, углеродное волокно, полисульфон, углепластик, аппрет, полимер, олигомер, свойства.

The results of research on development of finishing intermediate layer on carbon fiber under thermoflexible matrix (polysulphone) for the purpose of increase in characteristics of the fiber itself and improvement of physical-mechanical properties of carbon plastic on its basis are presented in the article.

Properties of carbon plastics on the basis of carbon reinforcements – ELUR, UKN-2500 and UKN-5000 are given. The Influence of finishing carbon fibers on interlaminar strength and porosity of carbon plastics on the basis of the polysulfonic binding is shown.

The assessment of efficiency of finishing compositions on the basis of polysulphone PSF-TP, polystyrene, bismaleinimides and oligoetherakrylates is given.

It is shown that for finishing carbon fibers both polymers and oligomeric structures can be used. However the greatest effect is shown when using oligomeric or monomeric finishing compositions which are water-soluble, possess the increased thermal stability and have functional groups available.

Keywords: filler, matrix, thermoplastic, carbon fiber, polysulphone, carbon plastic, finishing composition, polymer, oligomer, properties.

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

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) широко используются в специальных областях современной техники и в народном хозяйстве [1–15]. Без применения армированных пластиков на основе стеклянных, полимерных, углеродных и керамических волокон в настоящее время немислим прогресс в ракетостроении, авиации, освоении космического пространства. Все большее применение эти материалы находят и в автомобилестроении, судостроении, машиностроении, строительстве и т. д.

Армированные пластики обладают уникальным сочетанием таких свойств, как высокие прочность и жесткость, устойчивость к образованию трещин и низкая плотность, хорошие влаго- и химическая стойкость, коррозионная устойчивость.

Наиболее быстрыми темпами в последнее время развиваются научные исследования в области производства и применения углеродных волокон (УВ) и углепластиков на их основе, особенно после создания суперпрочных (5000–7000 МПа) углеродных волокон с высокими предельными удлинениями (1,5–2,0%) и большой энергией разрушения. Вносит свой вклад в развитие работ по углепластикам и прогресс в создании новых связующих на основе конструкционных термопластичных материалов с повышенной теплостойкостью [1–3, 16–21].

Однако область применения углепластиков на термопластичной матрице несколько ограничена из-за низкой прочности материалов при сдвиге, что связано с низкой адгезией связующего к поверхности углеродных волокон, обусловленной особенностями их строения, состоянием и свойствами поверхности, наличием дефектов [22–25]. Исследования показали, что на поверхности углеродных волокон имеются мелкие микрочешуйки, содержащие повышенное количество кристаллического графита, а также включения и микротрещины. Эти и другие факторы [26–30] оказывают влияние не только на величину адгезии, но и на характер взаимодействия углеродных волокон с матрицей.

Для увеличения прочности углепластика на сдвиг часто используют обработку поверхности углеродных волокон с помощью окисления. Благодаря окислению удаляется дефектный слабо связанный с поверхностью слой углерода толщиной 10–50 нм.

Помимо окисления используют обработку углеродных волокон аппретами, что делается для улучшения совместимости волокна со связующим.

Весьма эффективным способом обработки углеродных волокон является комбинированная обработка, при которой последовательно осуществляется окисление или озонирование, а затем нанесение полимерного покрытия из блоксополимеров [29].

Имеются сведения [14, 29] об использовании для обработки мономеров, способных заполнять поры и микротрещины волокна с последующим отверждением в тонких слоях с образованием полимерной пленки. Образующаяся полимерная пленка обеспечивает «залечивание» микродефектов волокна, а появление на поверхности химически активных групп облегчает его смачивание и пропитку. При выборе полимера для обработки (аппретирования) углеродных волокон необходимо учитывать наличие в нем концевых реакционноспособных групп (аминных, эпоксидных и др.) [16].

Согласно опубликованным данным, широкое применение в качестве аппретов углеродных волокон нашли полиимиды [16–21]. В сочетании с полиимидными связующими такие аппреты обеспечивают работоспособность ПКМ при повышенных температурах. В случае эпоксидного связующего полиимидный аппрет способствует отверждению смолы в граничных слоях.

Для обработки волокон используют также растворы смесей мономеров в метаноле:

- 3,3,4,4-бензофенонтетракарбонowego диангирида (БФТД) и 4,4-диаминодифенилового эфира (ДДЭ);
- БФТД и μ -фенилендиамин;а;
- пиромеинового ангирида и ДДЭ.

В этом случае привес на углеродном волокне после обработки составляет 1,0–1,05%, что соответствует толщине полученной пленки ~30 нм.

В связи с использованием в качестве связующих термостойких термопластов проблема аппретирования углеродных волокон возникла вновь. Казалось бы, изменить поверхностную энергию волокна и уменьшить угол смачивания можно теми же способами, что и для его обработки под отверждающиеся связующие. Однако сведения о поверхностной обработке углеродных волокон под термопластичные матрицы крайне ограничены: отсутствуют конкретные данные о составах аппретирующих композиций и

условиях их нанесения. Составы и технологии аппретирования углеродных волокон под термопласты являются предметом ноу-хау разработчиков.

В данной статье представлены результаты по разработке аппретирующего подслоя на УВ под термопластичную матрицу с целью повышения характеристик самого волокна и улучшения физико-механических свойств углепластика на его основе.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 13.2. «Конструкционные ПКМ» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1, 2].

Материалы и методы

В качестве наполнителя использовали углеродные жгуты марки УКН различной толщины и однонаправленную ленту марки ЭЛУР (табл. 1).

Таблица 1

| Свойства | Свойства наполнителей | | |
|------------------------------|--|----------|------|
| | Значения свойств армирующего наполнителя марки | | |
| | УКН-5000 | УКН-2500 | ЭЛУР |
| Плотность, кг/м ³ | 1730 | 1730 | 1730 |
| Толщина нити, текс | 410 | 205 | 100 |

В качестве *связующего* использовали полисульфоновую экструзионную пленку ПСФ-Т1 (ТУ6365-008-076159-73–2012) с температурой стеклования 180°C.

Образцы для испытаний получали из листового углепластика на фрезерном станке [12].

Известно, что простейший способ аппретирования наполнителя – это погружение его в низкоконцентрированный раствор полимера той же природы, что и связующее. Поэтому для *аппретирования* наполнителя опробованы растворы:

- полисульфона ПСФ-ТП, обеспечивающего совместимость со связующим – пленкой ПСФ-Т1;
- полистирола, частично совместимого с полисульфоном;
- бисмалеинимидов, полученных на основе 4,4-бисмалеинимиддифенилметана и диамин – при температуре >150°C начинается процесс их взаимодействия, который завершается при 200°C (такие олигомеры при термическом иницировании способны образовывать полимер, при этом процесс пленкообразования не сопровождается выделением побочных продуктов);
- олигоэфиракрилатов, способных полимеризоваться с образованием полимера и хорошо смачивать УВ вследствие высокой полярности.

Наличие полиимида приводит также к увеличению числа функциональных групп на поверхности УВ, что повышает взаимодействие УВ с полисульфоном благодаря дополнительным физическим связям.

Обработку УВ осуществляли пропиткой жгутов и ленты раствором полистирола в бутилацетате, полисульфона – в метилхлориде. Пропитанную раствором полимера ленту (жгут) сушили сначала 1–2 ч на воздухе, затем – при 100°C в течение 30 мин.

Олигомерные аппреты наносили из ацетоновых растворов различной концентрации с последующей сушкой на воздухе и при 100°C в течение 40 мин.

Прочность волокон при растяжении рассчитывали по формуле:

$$\sigma_b = \frac{P}{\pi \cdot d_{cp}^2 / 4},$$

где σ_b – прочность при растяжении; P – усилие; d_{cp} – средний диаметр волокна.

Толщину аппретирующего слоя определяли по повышению массы аппретированных УВ по формуле:

$$\delta_{a.c} = \frac{V_{a.c}}{F_{yB}},$$

где $\delta_{a.c}$ – толщина аппретирующего слоя; $V_{a.c}$ – объем аппретирующего слоя; F_{yB} – площадь аппретирующих волокон.

Объем аппретирующего слоя рассчитывали по формуле:

$$V_{a.c} = \frac{M_{a.c}}{\rho_{a.c}},$$

где $M_{a.c}$ – масса аппретирующего слоя; $\rho_{a.c}$ – плотность аппретирующего слоя.

Массу аппретирующего слоя вычисляли как разницу масс аппретированного и исходного УВ.

Прочность жгута определяли по известному методу: образцы размерами 25 мм в петле и по 25 мм для зажима помещали в зажимы разрывной машины и растягивали со скоростью 1 мм/мин. Среднее значение прочности в петле рассчитывали по формуле:

$$\delta_{cp} = \frac{\sum \delta_i}{n}.$$

Краевой угол смачивания для олигоэфиракрилата МГФ-9 и эпоксидной смолы ЭД-20 определяли, используя в качестве рабочей жидкости воду, олигоэфиракрилат МГФ-9 и эпоксидную смолу ЭД-20. Для уменьшения эффекта капиллярного затекания использовали жгуты с одинаковым натяжением волокон, достигаемым закруткой жгута с постоянным усилием.

Измерение прочности при межслойном сдвиге, плотности и пористости углеродного пластика проводили по стандартным методикам.

Результаты и обсуждение

Выбор аппрета оптимального варианта осуществляли по результатам испытаний прочности на сдвиг углеродных волокон, аппретированных полимерами и олигомерами различной природы и концентрации.

В табл. 2 показаны результаты исследований по влиянию концентрации растворов полимера (олигомера) на привес УВ различной толщины и структуры.

Таблица 2

Влияние концентрации растворов полимера (олигомера) на привес углеродных волокон различной толщины и структуры

| Основа аппрета | Углеродное волокно | Привес аппрета на волокне, %, в зависимости от концентрации раствора, % | | | | |
|-------------------|--------------------|---|------|------|------|------|
| | | 0,5 | 1 | 2 | 5 | 7 |
| Полистирол | ЭЛУР | 1,4 | 2,3 | 4,6 | 8,1 | – |
| | УКН 2500 | 0,46 | 0,79 | 2,76 | 2,76 | – |
| | УКН 5000 | – | 0,6 | 1,08 | 1,08 | – |
| Олигоэфиракрилат* | ЭЛУР | 1,07 | 1,53 | 2,1 | 6,12 | 7,3 |
| | УКН 2500 | 0,9 | 0,98 | 4,1 | 6,05 | – |
| Бисмалеинимид | ЭЛУР | – | 0,96 | 1,1 | 1,73 | 1,93 |
| | УКН 2500 | – | 0,71 | 0,8 | 1,09 | 1,86 |
| | УКН 5000 | – | – | 0,6 | 1,6 | 2,7 |

* Раствор в ацетоне.

Исследования показали, что величина наноса аппрета зависит от его концентрации в растворе и от структуры армирующего наполнителя: чем больше нанос протекторного слоя аппрета, тем больше его толщина (рис. 1). Влияние протекторного слоя (аппрета) на прочность элементарных волокон и жгута представлено в табл. 3.

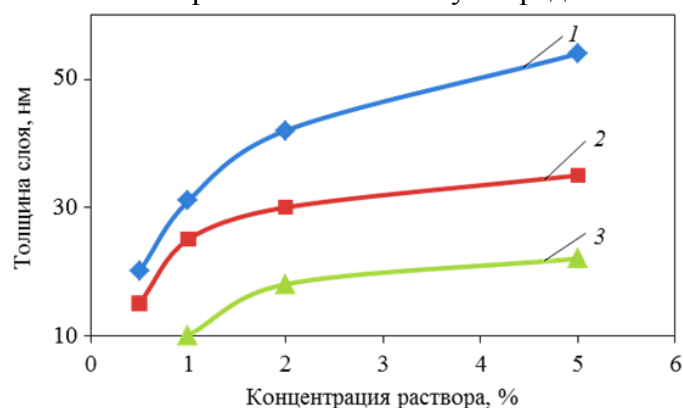


Рис. 1. Зависимость толщины слоя аппрета от концентрации раствора полистирола углепластика на основе ЭЛУР (1), УКН-2500 (2) и УКН-5000 (3)

Таблица 3

Влияние протекторного слоя на прочность элементарных волокон и жгута

| Основа аппрета | Армирующий наполнитель | Значение прочности* при концентрации аппрета, % | | | | |
|------------------|------------------------|---|-----------|-----------|------------|-----------|
| | | 0 | 1 | 2 | 5 | 7 |
| Полистирол | Элементарные волокна | 10–15 | 11,6–12,9 | 10,5–12,4 | 11,6–13,0 | – |
| | Жгут | 2,06 | 3,61 | 3,76 | 4,25 | – |
| Полисульфон | Элементарные волокна | – | – | 11,5–12,1 | – | – |
| Олигоэфиракрилат | Элементарные волокна | 10–15 | 10,3–11,7 | 12,7–13,4 | 12,8–16,4 | 11,6–12,3 |
| | Жгут | 2,06 | – | 2,87 | 4,64 | 4,53 |
| Бисмалеинимид | Элементарные волокна | 10–15 | 11,6–11,7 | 13,2–13,9 | 12,5–14,55 | 12,9–19 |
| | Жгут | 2,06 | 3,13 | 4,07 | 3,96 | 5,76 |

* Размерность для элементарных волокон – в [г], для жгутов (в петле) – в [кг].

Видно, что увеличение протекторного слоя приводит к повышению прочности на разрыв элементарных волокон и жгутов, что обусловлено тем, что образованная на поверхности УВ пленка заполняет микродефекты поверхности, поры и микротрещины.

Вместе с увеличением прочности волокон изменяется поверхностная энергия УВ (табл. 4).

Таблица 4

Влияние природы аппрета на поверхностную энергию углеродных волокон

| Основа аппрета | Смачивающая жидкость | Угол смачивания, град, при концентрации раствора аппрета, % | | | | |
|------------------|----------------------|---|------|------|------|------|
| | | 0 | 1 | 2 | 5 | 7 |
| Полистирол | Вода | 52 | 77 | 75 | 75 | – |
| | Олигоэфиракрилат | 42 | 50 | 43 | 40 | – |
| | Эпоксидная смола | 65 | 64,2 | 60 | 65 | – |
| Олигоэфиракрилат | Вода | 52 | – | 46 | 53 | 53 |
| | Олигоэфиракрилат | 43 | – | 35 | 31 | 28 |
| | Эпоксидная смола | 65 | – | 47 | 45,8 | 44 |
| Бисмалеинимид | Вода | 52 | 51 | 49,5 | 43,6 | 40,5 |
| | Олигоэфиракрилат | 42 | 39 | 26,5 | 24,5 | 24 |
| | Эпоксидная смола | 65 | 63 | 58 | 51 | 50 |

Поверхностная энергия УВ (табл. 4), обработанных полистиролом, ухудшается. Однако это не отражается на пористости (рис. 2, *а*) и прочности при сдвиге (рис. 2, *б*) полисульфонового углепластика. Из приведенных данных видно, что прочность при сдвиге увеличивается количественно для всех видов наполнителя. Увеличение прочности связано со структурой наполнителя: для ЭЛУР прочность увеличивается всего на 20%, для УКН-5000 – на 128%. Вероятно, это связано с заполнением межволоконного пространства жгута полимерным аппретом. Увеличение пористости полистирола с ростом концентрации аппретирующего раствора связано с его деструкцией при 300°C – температуре, при которой формируется углепластик.

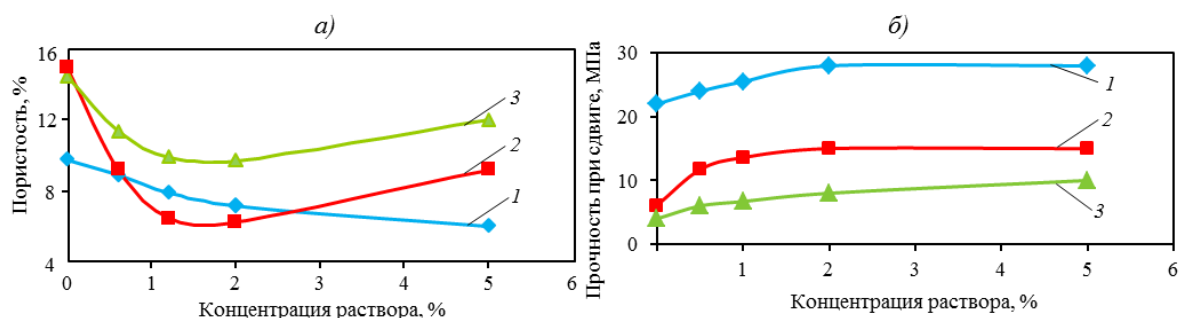


Рис. 2. Влияние концентраций растворов полисульфона (аппрета) на пористость (*а*) и полисульфона марки ПСФ-ТП на прочность при сдвиге (*б*) углепластика на основе ЭЛУР (1), УКН-2500 (2) и УКН-5000 (3)

После обработки олигомером поверхностная энергия углеродного волокна также изменяется (табл. 4). Уменьшение угла смачивания свидетельствует об увеличении поверхностной энергии УВ, что положительно сказывается на смачивании поверхности расплавом полисульфона, и, следовательно, проявляется в уменьшении пористости углепластика и увеличении его плотности и прочности при сдвиге.

Таблица 5

Зависимость прочности при сдвиге ($\tau_{сдв}$) и пористости углепластика от концентрации олигомерного аппрета для ЭЛУР и УКН-2500

| Армирующий наполнитель | Свойства | Значения свойств при концентрации олигомерного аппрета, % | | | | | |
|------------------------|--------------------|---|------|-----|-----|-----|-----|
| | | 0 | 0,5 | 1 | 2 | 5 | 7 |
| ЭЛУР | Пористость, % | 11 | 9 | 8,5 | 7,5 | 7 | 6,5 |
| | $\tau_{сдв}$, МПа | 25 | – | 30 | 32 | 35 | 30 |
| УКН-2500 | Пористость, % | 15 | 12,5 | 11 | 7,5 | 5,5 | 4,5 |
| | $\tau_{сдв}$, МПа | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |

Из данных табл. 5 видно, что при использовании акриловых олигомеров пористость углепластика уменьшается более чем на 50%, что связано с увеличением поверхностной энергии УВ и благоприятными условиями растекания расплава полисульфона. Кроме того, наличие сложноэфирных сильно полярных групп на поверхности УВ способствует образованию дополнительных физических связей между полисульфоном и слоем аппрета, что сказывается на увеличении прочности при сдвиге углепластика.

Олигомер бисмалеинимида хорошо смачивает поверхность УВ (табл. 4), образуя тонкую пленку полимера после термообработки. При этом увеличивается прочность элементарного волокна и жгута (табл. 3). Бисмалеинимидные олигомеры также хорошо смачивают поверхность УВ, образуя тонкую пленку полимера после термообработки.

Использование бисмалеинимидных олигомеров приводит к увеличению межслойной прочности при сдвиге (рис. 3, *а*). Однако межслойная прочность при сдвиге зависит

от типа наполнителя и повышается для УКН-5000 в 3 раза (с 5 до 15,4 МПа), для ЭЛУР – на 84% (с 23,6 до 40 МПа). При этом уменьшается пористость углепластика (рис. 3, б). Увеличение прочности при сдвиге связано с образованием на поверхности УВ реакционноспособных групп, способных взаимодействовать с полисульфоном.

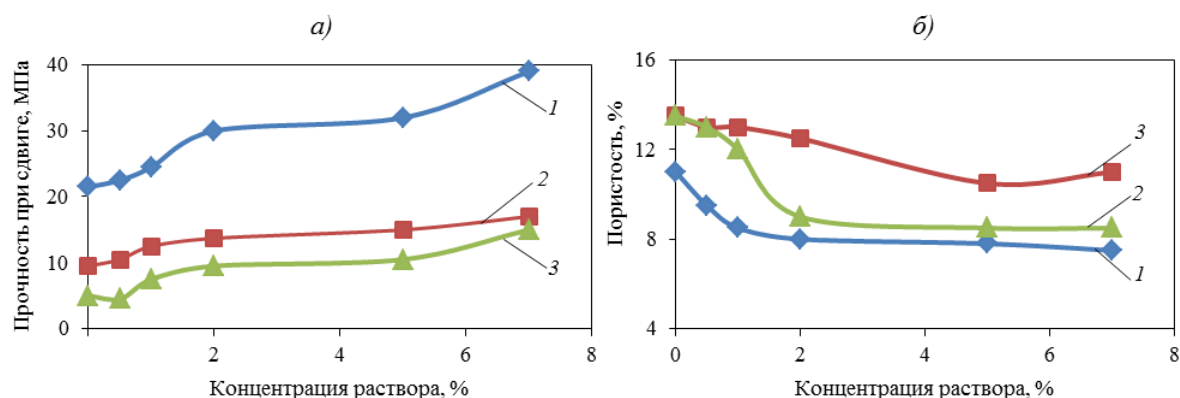


Рис. 3. Зависимости прочности при сдвиге (а) и пористости (б) углепластика от концентрации раствора бисмалеинимидного аппрету для ЭЛУР (1), УКН-2500 (2) и УКН-5000 (3)

Анализ научно-технической литературы и опыт исследований в области термопластичных углепластиков позволили сформулировать требования к аппрету под полисульфоновою матрицу [31–34].

Аппрет должен обеспечивать:

- растворение в воде или органических растворителях с малой токсичностью и высокими значениями предельно-допустимой концентрации;
- хорошую смачиваемость связующим углеродного жгута;
- образование отвержденной пленки на поверхности волокна;
- повышение прочности элементарных волокон и жгутов;
- проникновение связующего в сердцевину жгута;
- совместимость УВ с полисульфоном;
- повышение прочности при сдвиге ПКМ;
- снижение напряжения в зоне контакта «связующее–углеродное волокно».

Заключения

Изучено влияние аппретирования углеродных волокон на межслойную прочность и пористость углепластиков на основе полисульфонового связующего.

Для аппретирования наполнителя опробованы растворы на основе:

- полисульфона ПСФ-ТП, обеспечивающего совместимость со связующим – пленкой ПСФ-Т1;
- полистирола, частично совместимого с полисульфоном;
- бисмалеинимидов – олигомеров, способных при термическом иницировании образовывать полимер без выделения побочных продуктов;
- олигоэфиракрилатов, полимеризующихся с образованием полимера и смачивающих УВ благодаря высокой полярности.

Результаты исследований показали, что для аппретирования УВ могут быть использованы как полимеры, так и олигомерные составы. Однако наибольший эффект проявляется при использовании олигомерных или мономерных аппретов, которые должны быть растворимыми в воде, обладать повышенной термостойкостью и иметь функциональные группы.

Авторы статьи выражают благодарность за помощь в работе профессору, д.т.н. С.В. Бухарову.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. 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.
3. Каблов Е.Н. Авиационное материаловедение: итоги и перспективы // *Вестник Российской академии наук*. 2002. Т. 72. №1. С. 3–12.
4. Комаров Г.А. Состояние, перспективы и проблемы применения ПКМ в технике // *Полимерные материалы*. 2009. №2. С. 5–9.
5. Петрова Г.Н., Румянцева Т.В., Перфилова Д.Н. и др. Термоэластопласты – новый класс полимерных материалов // *Авиационные материалы и технологии*. 2010. №4. С. 20–25.
6. Петрова Г.Н. Направленная модификация полисульфононов и создание на их основе литьевых и композиционных материалов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: ВИАМ, 2011. С. 10–27.
7. Михайлин Ю.А. Термоустойчивые полимеры и полимерные материалы на их основе // *Полимерные материалы*. 2005. №4. С. 29–32.
8. Грязнов В.И., Петрова Г.Н., Юрков Г.Ю., Бузник В.М. Смесевые термоэластопласты со специальными свойствами // *Авиационные материалы и технологии* 2014. №1. С. 25–29. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-1-25-29.
9. Михайлин Ю.А. Термоустойчивые полимеры и полимерные материалы. СПб.: Профессия, 2006. С. 29–30.
10. Петрова Г.Н., Бейдер Э.Я., Старостина И.В. Литьевые термопласты для изделий авиационной техники // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2016. №7. С. 21–29.
11. Полимерные композиционные материалы. Свойства. Структура. Технологии / под ред. А.А. Берлина. СПб.: Профессия, 2009. 560 с.
12. Petrova G.N., Beider E.Ya. Construction materials based on reinforced thermoplastics *Chemistry and Materials Science // Russian Journal of General Chemistry*. 2011. Vol. 81. No. 5. P. 1001–1007.
13. Ричардсон М. Промышленные полимерные композиционные материалы. М.: Химия, 1980. 472 с.
14. Брандштеттер Ф. Тенденции и перспективы развития полимерных материалов // *Полимерные материалы: изделия, оборудование, технологии*. 2005. №5. С. 2–4.
15. Термопласты конструкционного назначения / под ред. Е.Б. Тростянской. М.: Химия, 1975. 240 с.
16. Берлин А.А., Пахомова Л.К. Полимерные матрицы для высокопрочных армированных композитов. Обзор // *Высокомолекулярные соединения*. 1990. Т. (А) 32. №7. С. 1354–1370.
17. Кербер М.Л., Виноградов В.М., Головкин Г.С. и др. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология. СПб.: Профессия, 2011. С. 32–33.
18. Михайлин Ю.А. Конструкционные полимерные композиционные материалы. СПб.: Научные основы и технологии, 2010. 822 с.
19. Перепелкин К.Е. Армирующие волокна и волокнистые полимерные композиты. М.: Научные основы и технологии, 2009. 658 с.
20. Берлин А.А., Вольфсон С.А., Ошмян В.Г., Ениколопов Н.С. Принципы создания композиционных полимерных материалов. М: Химия, 1990. 238 с.
21. Михайлин Ю.А., Кербер М.Л., Горбунова И.Ю. Связующие для полимерных композиционных материалов // *Пластические массы*. 2002. №2. С. 14–21.
22. Гуняев Г.М. Структура и свойства полимерных волокнистых композитов. М.: Химия, 1981. 232 с.
23. Варшавский В.А. Углеродные волокна. М.: ВНИИТИ, 2005. 498 с.
24. Фитцер Э., Дифендорф Р. и др. Углеродные волокна и углекомпозиаты. Пер. с англ. М.: Мир, 1988. 336 с.
25. Гуняев Г.М., Гофин М.Я. Углерод-углеродные композиционные материалы // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. №S1. С. 62–90.

26. Dai Z., Zhang B., Shi F., Li M., Zhang Z., Gu Y. Chemical interaction between carbon fibers and surface sizing // *Journal of Applied Polymer Science*. 2012. Vol. 124. P. 2127–2132.
27. Лазарева Т.К., Ермакин С.Н., Костягина В.А. Проблемы создания композиционных материалов на основе конструкционных термопластов // *Успехи в химии и химической технологии*. 2010. Т. 24. №4. С. 58–63.
28. Довгяло В.А., Зиновьев С.Н., Померанцева К.П., Юркевич О.Р. О влиянии технологии препрегов на конструкционные свойства углепластиков // *Доклады АН БССР*. 1986. Т. 30. №3. С. 237–239.
29. Зеленский Э.С., Куперман А.М., Лебедева О.В. Армированные пластики на основе термопластичных связующих // *Технология*. Сер.: Конструкции из композиционных материалов. 1991. Вып. 1. С. 10–21.
30. Peng Q., Xiaodong A. Chemically and uniformly grafting carbon nanotubes onto carbon fibers by poly(amidoamine) for enhancing interfacial strength in carbon fiber composites // *Journal of Material Chemistry*. 2012. Vol. 22. P. 5928–5931.
31. Бейдер Э.Я., Петрова Г.Н., Дыкун М.И. Аппретирование углеродных волокон-наполнителей термопластичных карбопластиков // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн*. 2014. №10. Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.05.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-10-3-3.
32. Бейдер Э.Я., Малышенко С.В., Петрова Г.Н. Композиционные термопластичные материалы – свойства и способы переработки // *Пластические массы*. 2013. №7. С. 56–60.
33. Петрова Г.Н., Бейдер Э.Я. Конструкционные материалы на основе армированных термопластов // *Российский химический журнал*. 2010. Т. LIV. №1. С. 30–40.
34. Бейдер Э.Я., Петрова Г.Н., Изотова Т.Ф., Гуреева Е.В. Композиционные термопластичные материалы и пенополиимиды // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн*. 2013. №11. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 16.06.2016).