



УДК 678.073

**КОМПОЗИЦИОННЫЕ ТЕРМОПЛАСТИЧНЫЕ
МАТЕРИАЛЫ И ПЕНОПОЛИИМИДЫ**

Э.Я. Бейдер
кандидат технических наук

Г.Н. Петрова
кандидат технических наук

Т.Ф. Изотова

Е.В. Гуреева

Ноябрь 2013

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ) – крупнейшее российское государственное материаловедческое предприятие, на протяжении 80 лет разрабатывающее и производящее материалы, определяющие облик современной авиационно-космической техники. 1700 сотрудников ВИАМ трудятся в более чем тридцати научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в четырех филиалах института. ВИАМ выполняет заказы на разработку и поставку металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов защиты от коррозии, а также средств контроля исходных продуктов, полуфабрикатов и изделий на их основе. Работы ведутся как по государственным программам РФ, так и по заказам ведущих предприятий авиационно-космического комплекса России и мира.

В 1994 г. ВИАМ присвоен статус Государственного научного центра РФ, многократно затем им подтвержденный.

За разработку и создание материалов для авиационно-космической и других видов специальной техники 233 сотрудникам ВИАМ присуждены звания лауреатов различных государственных премий. Изобретения ВИАМ отмечены наградами на выставках и международных салонах в Женеве и Брюсселе. ВИАМ награжден 4 золотыми, 9 серебряными и 3 бронзовыми медалями, получено 15 дипломов.

Возглавляет институт лауреат государственных премий СССР и РФ, академик РАН, профессор Е.Н. Каблов.

Статья подготовлена для опубликования в журнале «Труды ВИАМ»,
№11, 2013 г.

Э.Я. Бейдер, Г.Н. Петрова, Т.Ф. Изотова, Е.В. Гуреева

КОМПОЗИЦИОННЫЕ ТЕРМОПЛАСТИЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ПЕНОПОЛИИМИДЫ

Приведены механические и технологические свойства композиционных материалов стекло-, угле- и органопластиков на основе термопластичных связующих (КТМ). Описаны способы переработки их в изделия методами прессования, штамповки, гибки и сварки. Рассмотрены свойства разработанных гибких и жестких пенопластов.

Ключевые слова: *композиционные полимерные материалы (ПКМ), термопластичные связующие, штамповка, прессование, сварка, эластичные и жесткие пенопласты.*

E.Ya. Beider, G.N. Petrova, T.F. Izotova, E.V. Gureeva

THERMOPLASTIC COMPOSITE MATERIALS AND PENOPOLIIMIDY

In the article the mechanical properties of composite glass, carbon and organic plastics based on thermoplastic binders are given (CTM). The methods of manufacturing details from CTM by hot pressing, stamping, bending and welding are described. Properties of the developed flexible and rigid foams are considered.

Keywords: *composite polymeric materials, thermoplastic binders, stamping, pressing, welding, flexible and rigid foams.*

Развитие различных отраслей промышленности и, прежде всего, авиа- и автомобилестроения, неразрывно связано с созданием новых конструкционных материалов. Существенный вклад в улучшение характеристик машин и конструкций вносят композиционные материалы с полимерной матрицей (ПКМ). Более 40 лет в качестве полимерной матрицы использовались термореактивные материалы. Однако многокомпонентность термореактивных связующих, их ограниченная жизнеспособность, большая длительность процесса отверждения, многооперационность процесса переработки, недостаточная воспроизводимость свойств материалов, сложности утилизации брака и от-

ходов переработки и создания безопасных для окружающей среды условий стимулировали поиски использования в качестве связующих термопластичных материалов [1–5].

Применение термопластичных матриц в составе композиционных термопластичных материалов (КТМ) обеспечивает ряд преимуществ: присутствие связующего с заданной молекулярной массой и завершенной химической структурой; неограниченный срок хранения полуфабриката (препрега, листа); отсутствие длительного процесса отверждения; способность к релаксации напряжений; возможность вторичной переработки; отсутствие выделения растворителей; взрывобезопасность, нетоксичность [4, 6, 7].

По уровню прочностных и упругих характеристик термопласты не уступают отвержденным полимерам, а по химической стойкости, тепло- и электроизоляционным характеристикам, герметичности в ряде случаев превосходят последние.

В связи с кратковременностью нагрева заготовок процесс формования деталей из КТМ менее трудоемок, особенно в условиях крупномасштабного производства. Это упрощает получение деталей сложной конфигурации, повышает производительность оборудования, создавая предпосылки для его автоматизации. Применение КТМ в авиастроении способствует замене мелких деталей на более крупные, в 1,5 раза уменьшая их количество и сокращая объем сборочных операций.

Практически все промышленно выпускаемые термопласты могут служить матрицей для КТМ [6–9].

В последнее 15-летие тенденцией в развитии КТМ является использование высокотермостойких конструкционных термопластов, характеризующихся высокими упругопрочностными свойствами: полиарилсульфонов, полиэфирсульфонов, полиэфиримидов, полиэфиркетонов, полиимидов, полифениленсульфидов.

За рубежом организованы специализированные фирмы, которые занимаются выпуском термопластичных препрегов, листовых пластиков и изделий из них. Наиболее известны компании: Ten Cate (Phoenicx TPC, США), AFPT (Германия, Нидерланды), Fiber Forge (США), Automated Dynamics (США).

Компании Ten Cate и Fiber Forge для производства изделий из своих материалов применяют технологию горячего прессования. С помощью данной технологии можно производить изделия сложной геометрической формы и больших размеров. Для производства изделий проектируется и изготавливается форма, в ней выкладывается препрег, и под давлением проводится нагрев до температуры плавления связующего, затем выдержка под давлением и охлаждение до комнатной температуры.

Компании AFPT и Automated Dynamics для производства изделий из своих материалов применяют лазерную технологию формования. Лазерная технология позволяет использовать базовые технологии намотки и выкладки с уплотнением валиком. Плавление связующего происходит при помощи нагрева лазером в месте прикатки [3, 4, 9–11].

В России разработкой и выпуском КТМ занимаются только в ВИАМ (табл. 1) [4, 6, 7].

Таблица 1

Свойства отечественных композиционных термопластичных материалов (КТМ)

Марка КТМ	Состав КТМ		$\sigma_{\text{в}}$	E	$\sigma_{\text{в,сж}}$	$\sigma_{\text{в,и}}$	Режимы формования		
	Наполнитель	Связующее					$P_{\text{уд}}$	$T_{\text{пр}}$	$T_{\text{охл}}$
Стеклопластик КТМС-1	Стеклоткань T15(п)-76	Полисульфон ПСФ-150	410	16000	410	540	1,0–1,5	260	80
Стеклопластик КТМС-2	Стеклоткань T15(п)-76	Поликарбонат	400	17000	280	380	1,0–1,5	200	60
Органопластик КТМ-1-1	Ткань СВМ	Поликарбонат	650	30000	210	410			
Органопластик КТМ-1-2	Ткань СВМ (рогожка)	Полиамид ПА-6 (леска), пленка Ф-42Л	260–340	~18000	–	220–280	1,0	250	60
Стеклопластик КТМС-1П	Стеклоткань T15(п)-76	Пленка полисульфоно-вая	330	–	320	280	1,0–1,5	260	80
Стеклопластик ВПС-38Т	Стеклоткань T10(ВМП)-4С	Полиэфир-сульфон	565	24500	400	610	1,5	340	80–100
Углепластик КТМУ-1	Лента ЭЛУР-0,08П	Полисульфон ПСФ-150	1000	130000	850	–	1,5–2,0	300	100

На рис. 1 представлены области применения композиционных материалов в Аэробусах А-380.



Рисунок 1. Области применения композиционных термопластичных материалов (КТМ) в Аэробусах А-380

Формование и сборка деталей из КТМ методом сварки

Более широкому применению изделий из КТМ мешает то обстоятельство, что и за рубежом, и в России КТМ выпускаются в виде полуфабрикатов (листы, препреги) или в виде профилей различной конфигурации, использовать которые можно только при наличии надежного способа их соединения [12–14].

Применяемые для ПКМ на основе реактопластов клеевые соединения и механическое крепление для изделий из КТМ малопригодны.

Наиболее предпочтительно соединять детали из КТМ с помощью сварки, как это делается в случае ненаполненных термопластов. Все особенности сварки ненаполненных термопластов можно в равной степени отнести и к сварке КТМ. Однако в связи с наличием в КТМ армирующих волокон они могут в значительной степени отличаться от ненаполненных термопластов по тангенсу угла диэлектрических потерь, диэлектрической проницаемости, модулю упругости, акустическим характеристикам и другим свойствам.

Для сварки КТМ можно использовать способы, применяемые для сварки термопластов. Предпочтительны следующие: термоконтактная сварка (закладным элементом заполнения), сварка индукционным нагревом, ультразвуком, ИК-излучением и вибротрением.

Преимущественная область применения каждого из этих способов четко не определена. Считается, что в случае термопластов ультразвуковая сварка особенно эффек-

тивна для соединения малогабаритных деталей из КТМ, причем детали под сварку должны иметь выступы для концентрации энергии; индукционная сварка осуществляется при частоте 2–10 МГц и предпочтительна для соединения вытянутых тонких деталей; сварка вибротрением при частоте вибрации 100–240 Гц и термоконтактная сварка закладным элементом могут использоваться для соединения деталей любой формы и конфигурации. Все эти способы сварки обеспечивают быстрое образование сварных соединений (СС). Прочность при сдвиге СС, полученных этими способами, выше прочности клеевых соединений.

Установлено, что сварка деталей из термопластичного углепластика вследствие электропроводности углеродных волокон может осуществляться по способу, аналогичному контактной сварке, применяемой для соединения металлов (сварка сопротивлением).

В России разработкой технологии сварки КТМ практически никто не занимается [6, 13]. Авторами была изучена свариваемость листовых КТМ на основе полиамида, поликарбоната и полисульфона. Сварку осуществляли одно- и двухсторонним контактным внешним нагревом, используя малоинерционные нагреватели (металлические ленты из стали Х18Н10Т).

Эксперименты по сварке термопластичного углепластика КТМУ-1 внешним контактным нагревом нахлесточных соединений показали следующее:

- для создания необходимого контакта в зоне соединения ширина нахлестки не должна превышать ширину нагревательной ленты;
- из-за коробления материала при нагреве продолжительность выдержки при температуре сварки следует ограничить;
- при двухстороннем нагреве материал КТМУ-1 толщиной 2 мм следует сваривать при температуре $>320^{\circ}\text{C}$;
- давление при сварке $P=0,2\text{--}0,4$ МПа;
- с уменьшением толщины материала на каждые 0,5 мм температура сварки должна смещаться на $10\text{--}15^{\circ}\text{C}$ в сторону снижения, но не ниже 290°C ;
- для нахлесточных СС из материала КТМУ-1 толщиной 2 мм оптимальная величина нахлестки составляет 30–45 мм;
- прочность СС из материала КТМУ-1 зависит от схемы укладки наполнителя (ленты ЭЛУР); максимальную прочность при сдвиге имеют СС с укладкой $[0^{\circ}/90^{\circ}]$ при сварке соединения вдоль нитей ленты в поверхностном слое при толщине полимера на свариваемой поверхности 30–40 мкм;

– сварку материала КТМУ-1 толщиной <1 мм можно производить не только нахлесточными соединениями, но также соединениями с одно- и двухсторонними накладками.

Для получения стыковых соединений, равнопрочных материалу, с двухсторонними накладками, ширина накладки должна быть не менее чем $1/2$ ширины нахлестки. Так, при толщине 1 мм ширина накладки должна составлять 10–15 мм, при толщине 0,5 мм: 7–8 мм.

Эксперименты по сварке термопластичного органопластика КТМУ-1 внешним контактным нагревом показали, что для этого материала оптимальным является следующий режим: $T_{\text{сварки}}=280^{\circ}\text{C}$, $\tau_{\text{св}}=60$ с, из которых 30 с – подъем температуры до сварочной и 30 с – выдержка при $T_{\text{сварки}}$ и давлении $P=0,3$ МПа. Величина термопластичного слоя на поверхности КТМУ-1 должна составлять 20–30 мкм. Прочность при сдвиге в этом случае составляет 16–19 МПа.

Композиционные термопластичные материалы на основе стеклоткани и полисульфона (КТМС-1, КТМС-1П, ВПС-38Т) можно сваривать при тех же режимах, что и материал КТМУ-1, с небольшими коррективами в отношении увеличения $T_{\text{сварки}}$ и $\tau_{\text{св}}$. Прочность нахлесточных СС из этих материалов при сдвиге зависит от расположения сварного шва. Эти материалы целесообразно сваривать в долевом направлении при сочетании свариваемых поверхностей «лицевая поверхность–лицевая поверхность». Прочность при сдвиге в этом случае составляет 17–20 МПа.

Сварка КТМ с помощью растворителя

Сварку КТМ растворителем можно выполнять с помощью:

- чистого растворителя;
- лаковой композиции, представляющей собой раствор полимера (материала связующего) в органическом растворителе;
- мономера или раствора полимера в мономере. Возможно применение полимеризующихся композиций.

Для полисульфона и полиэфирсульфона в качестве растворителей (после анализа литературных данных) остановили свой выбор на хлорсодержащих углеводородах – хлороформе и метиленхлориде. Оба растворителя отличаются высокой скоростью сорбции в глубь полиарилсульфонов и временным характером пластифицирующего действия на полимер, т. е. растворитель может быстро диффундировать в периферийные участки зоны шва и способствовать быстрому затвердеванию материала шва. Хо-

рошо растворяющие полиарилсульфоны: диметилформамид и диметилацетамид – труднее удаляются из сварного шва и более токсичны, поэтому для сварки КТМ на полисульфоновых связующих малопригодны.

Установлено, что оптимальным содержанием полимера в составе присадочного материала является 23%. Прочность при сдвиге сваренных растворителем композиционных термопластичность материалов: КТМС-1, КТМС-1П, ВПС-38Т и КТМУ-1 – составляет 1000–1200 Н/см². Характер разрушения образцов одинаков – отрыв матрицы от наполнителя. На рис. 2 показаны детали из КТМ, полученные с применением сварки.



Рисунок 2. Трехслойная панель из стеклопластика СП-38Т и детали приборов из КТМУ-1, полученные сваркой растворителем (а) и тепловой сваркой (б)

Пенополиимиды

Полиимиды относятся к классу полимерных материалов, обладающих комплексом уникальных эксплуатационных свойств: диапазоном рабочих температур – от -196 до +250–350°C, пожаробезопасностью, коррозионной инертностью и грибстойкостью, устойчивостью к радиационному воздействию и УФ лучам, прекрасными диэлектрическими свойствами, низкой газопроницаемостью и т. д. [15].

Пеноматериалами на основе полиимидов стали широко заниматься 40–50 лет назад и в настоящее время за рубежом они нашли широкое применение в авиакосмической и атомной промышленности. Мировыми лидерами в поставках широкого ассортимента жестких листовых полиимидных пеноматериалов конструкционного и радиотехнического назначения является фирма Evonik (ФРГ), гибких (эластичных) полиимидных пеноматериалов – фирма Jenier (США).

Гибкие (эластичные) ПМИ-пенопласты

В настоящее время в отечественной авиакосмической технике для теплоизоляции пассажирских салонов, пневмо-, масло- и гидросистем применяются материалы типа АТМ (авиационные теплоизоляционные материалы), представляющие собой рубленое стекловолокно, упакованное в мешки-пакеты из тканепленочного полотна.

Теплоизоляционные материалы АТМ не соответствуют современным требованиям по звукоизоляции, плотности, теплопроводности ($>0,06$ Вт/(м·К)), толщине (≥ 10 мм) и технологичности.

Эластичные пенополиимиды (ЭППИ) являются уникальным материалом, отличающимся низкими плотностью и теплопроводностью, высоким звукопоглощением, огнестойкостью, широким диапазоном рабочих температур, эластичностью, химической стойкостью.

На основе ЭППИ за рубежом выпускается теплоизоляционный материал, который состоит из листового гибкого вспененного полиимида марки «Солиמיד» (фирма Jenier, США), облицованного с одной стороны полиимидной пленкой. По технологичности (гибкий), плотности ($<0,2$ кг/м³), теплопроводности ($0,05$ Вт/(м·К)) и толщине материал «Солиמיד» не имеет отечественных аналогов.

За рубежом теплоизоляционные материалы на основе пенополиимида «Солиמיד» используются практически во всех самолетах фирмы Boeing, начато его применение в аэробусах фирмы «Аэрбас», также предусмотрено применение для теплоизоляции системы кондиционирования воздуха в самолете RRJ-100 (Россия).

Разработка теплоизоляции на основе эластичного трудносгорающего пенополиимида предусматривает ее широкое применение при создании различных конструкций современной и перспективной авиационной техники, проектировании надводных и подводных кораблей, тепловых и атомных электростанций.

В России (ФГУП «ВИАМ») ПМИ-пенопластами занимаются с 2009 года, когда в качестве полуфабриката был выбран порошковый полиимидный форполимер, разработанный в ИВС РАН. В настоящее время разработана экспериментальная технология получения трудносгорающего эластичного пенополиимида марки ВПП-1 (табл. 2).

Таблица 2

Сравнительные свойства гибких полиимидных пенопластов

Свойства	Значения свойств пенопластов		
	ПУ-107	«Солиimid»	ВПП-1
Плотность, кг/м ³	19–21	7–10	7–10
Теплопроводность, Вт/(м·К), при °С: 20 150	– 0,057	0,046 0,072	0,043 0,051
Диапазон рабочих температур, °С	-60÷+200	-190÷+200	-60÷+250
Время остаточного горения, с	14	0	0
Категория горючести	Самозатухающий	Трудногоряющий	
Эластичность	Жесткий	Эластичный	

Из данных табл. 2 видно, что трудногоряющий эластичный ВПП-1 не уступает по физико-механическим и пожаробезопасным свойствам зарубежному аналогу марки «Солиimid» (США). Материал паспортизован и рекомендован для теплоизоляции пневмо-, гидро- и маслосистем авиакосмической техники, в том числе трубопроводов сложной конфигурации, элементов системы кондиционирования воздуха (СКВ) летательных аппаратов.

Жесткие листовые ПМИ-пенопласты

Фирма Evonik разработала более 10 марок полиимидных пенопластов (ПМИ-пены) под общей маркой Rohacell. Марки пены отличаются друг от друга технологическими параметрами вспенивания, температурой формования сэндвич-панелей, структурой пены, механическими свойствами.

В авиационной технике больше всего используются ПМИ-пены конструкционных марок Rohacell WF и Rohacell WF-НТ, для изготовления антенн и обтекателей – марки Rohacell А, Rohacell НТ. Основные свойства ПМИ-пен марок Rohacell и Rohacell WF представлены в табл. 3.

В настоящее время силовые профили с наполнителем из пенопласта Rohacell успешно используются в конструкциях летательных аппаратов. Один из самых известных примеров его применения – в панелях воздухозаборного канала хвостового двигателя самолета Boeing MD11 (рис. 3).

Свойства ПМИ-пенопластов марки Rohacell

Свойства	Показатели свойств материалов марок			
	А		WF	
	31	110	51	300
Предел прочности при сжатии, МПа	0,4	3,0	0,8	15,7
Предел прочности при изгибе, МПа	0,8	4,5	1,6	–
Предел прочности при сдвиге, МПа	0,4	2,4	0,8	7,8
Модуль упругости при сдвиге, МПа	13	50	24	293
Температура формоустойчивости, °С	180	180	205	190
Диэлектрическая постоянная при частоте 10^{10} Гц	1,05	1,12	1,07	1,16
Тангенс угла диэлектрических потерь при частоте 10^{10} Гц	0,0017	0,0046	0,0035	0,0056



Рисунок 3. Трапецидальные стрингеры в панелях воздухозаборного канала в хвостовом двигателе самолета Boeing MD11: полые (а) и заполненные ПМИ-пенопластом (б)

Заполненные ПМИ-пенопластом стрингер-профили используются при создании заднего гермошпангоута Аэробусов А340 и А3400-600. Данная конструкция была принята также для заднего гермошпангоута самолета А380. Для этой модели концерну Airbus уже поставлено свыше 200 готовых к использованию заполненных пенопластом Rohacell 71 WF-НТ стрингер-профилей, имеющих длину до 2,5 м, сложной формы. Кроме того, были успешно изготовлены с высоким качеством крупногабаритные переборки.

Ключом к успешному внедрению конструкции заполненного ПМИ-пенопластом трапецидального стрингера стала простота механической обработки и термоформования материала Rohacell. Показано, что заполненный ПМИ-пенопластом трапецидальный профиль вносит свой вклад в увеличение устойчивости тонкостенных конструкций из углепластика и их сопротивления продольному изгибу и осевой нагрузке. Применение материала Rohacell в качестве элемента жесткости позволяет толщину стенок кон-

струкции ограничить одним-двумя слоями углепластика и таким образом получить выигрыш в массе.

Широко используются ПМИ-пены и в вертолетостроении. В 90-е годы прошлого века была начата программа по разработке высокотехнологичных вертолетных лопастей с сердцевинной из пены марки Rohacell. Целью этой программы стало получение более прочных лопастей с лучшими эксплуатационными качествами, увеличенным сроком службы и меньшими затратами на производство.

Российский аналог пены марки Rohacell – листовой пеноакрилимид ВПП-3 – предназначен для замены стеклотканых сот при изготовлении сэндвич-панелей декоративного, конструкционного и радиотехнического назначения.

По предварительным данным замена стандартных сот на листовой пеноакрилимид при изготовлении сэндвич-панелей позволяет сократить на 20% трудоемкость и стоимость их изготовления.

В настоящее время проводятся исследования по отработке технологии получения пожаробезопасного листового пеноакрилимидом толщиной от 5 до 40 мм, плотностью от 50 до 200 кг/м³, прочностью при сжатии до 4,5 МПа и радиотехническими свойствами при частоте 10¹⁰ Гц: $\text{tg } \delta \leq 1,8 \cdot 10^{-3}$ и $\epsilon \leq 1,14$.

По предварительным данным изделия, в составе которых находятся полиимидные пенопласты, могут использоваться в жилых помещениях и салонах транспортных средств, так как полностью отвечают по токсичности требованиям АИТМ 3.005.

В ближайшее время намечено провести расширенные испытания полиимидного пенопласта и отработать опытные технологии получения сэндвич-панелей, в том числе с использованием клеевых препрегов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 7–17.
2. Гращенко Д.В., Чурсова Л.В. Стратегия развития композиционных и функциональных материалов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 231–242.
3. Петрова Г.Н., Барботько С.Л., Болотина Л.М., Чеботарев В.П. и др. Пожаробезопасные свойства полисульфонов //Пластические массы. 2005. №1. С. 46–48.

4. Петрова Г.Н., Бейдер Э.Я. Конструкционные материалы на основе армированных термопластов //Российский химический журнал. 2010. Т. LIV. №1. С. 30–40.
5. Мухаметов Р.Р., Ахмадиева К.Р. и др. Новые полимерные связующие для перспективных методов изготовления конструкционных волокнистых ПКМ //Авиационные материалы и технологии. 2011. №2. С. 38–42.
6. Бейдер Э.Я., Петрова Г.Н., Изотова Т.Ф., Барботько С.Л. Стеклопластики на термопластичной матрице //Труды ВИАМ. 2013. №7. (электронный журнал).
7. Петрова Г.Н. Направленная модификация полисульфонов и создание на их основе литьевых и композиционных материалов: Автореф. дис. к.т.н. М.: ВИАМ. 2011. С. 10–27.
8. Комаров Г.А. Состояние, перспективы и проблемы применения ПКМ в технике //Полимерные материалы. 2009. №2. С. 5–9.
9. Petrova G.N., Beider E.Ya. Construction materials based on reinforced thermoplastics Chemistry and Materials Science //Russian Journal of General Chemistry. 2011. V. 81. №5. P. 1001–1007.
10. Кербер М.Л., Виноградов В.М., Головкин Г.С. и др. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология. СПб.: Профессия. 2011. С. 32–33
11. Петрова Г.Н., Бейдер Э.Я., Чеботарев В.П. и др. Регулирование свойств полисульфонов за счет модификации //Пластические массы. 2010. №12. С. 23–27.
12. Донецкий К.И., Хрульков А.В. и др. Применение объемно-армирующих преформ для изготовления изделий из ПКМ //Авиационные материалы и технологии. 2013. №1. С. 35–39.
13. Комаров Г.В. Соединение деталей из полимерных материалов: Учеб. пособ. СПб.: Профессия. 2006. С. 337–443.
14. Михайлин Ю.А. Термоустойчивые полимеры и полимерные материалы. СПб.: Профессия. 2006. С. 240–347.
15. Бейдер Э.Я., Гуреева Е.В., Петрова Г.Н. Пенополиимиды //Все материалы. Энциклопедический справочник. 2012. №6. С. 2–8.

Reference list

1. Kablov E.N. Strategicheskie napravleniya razvitiya materialov i tehnologiy ih pererabotki na period do 2030 goda [Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030] //Aviatsionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 7–17.
2. Graschenkov D.V., Chursova L.V. Strategiya razvitiya kompozitsionnyh i funktsional'nyh materialov [Development strategy of composite and functional materials] //Aviatsionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 231–242.
3. Petrova G.N., Barbot'ko S.L., Bolotina L.M., Chebotarev V.P. i dr. Pozharobezopasnye svoystva polisul'fonov [Fire-safe properties of polysulfones] //Plasticheskie massy. 2005. №1. S. 46–48.
4. Petrova G.N., Beyder E.Ya. Konstruktsionnye materialy na osnove armirovannyh termoplastov [Structural materials based on reinforced thermoplastics] //Rossiyskiy himicheskiy zhurnal. 2010. T. LIV. №1. S. 30–40.
5. Muhametov R.R., Ahmadieva K.R. i dr. Novye polimernye svyazuyushchie dlya perspektivnyh metodov izgotovleniya konstruktsionnyh voloknistykh PKM [Novel polymer binders for advanced production methods of structural fibrous polymer composites] //Aviatsionnye materialy i tehnologii. 2011. №2. S. 38–42.
6. Beyder E.Ya., Petrova G.N., Izotova T.F., Barbot'ko S.L. Stekloplastiki na termoplastichnoy matritse [Thermoplastic-matrix fiber-glass plastics] //Trudy VIAM. 2013. №7. (elektronnyj zhurnal).
7. Petrova G.N. Napravlennaya modifikatsiya polisul'fonov i sozdanie na ih osnove lit'evykh i kompozitsionnyh materialov [Directed modification of polysulfones and creation of molding and composite materials on their basis]: Avtoref. dis. k.t.n. M.: VIAM. 2011. S. 10–27.
8. Komarov G.A. Sostoyanie, perspektivy i problemy primeneniya PKM v tehnike [Use of PCM in engineering. Current state, aspects and concerns] //Polimernye materialy. 2009. №2. S. 5–9.
9. Petrova G.N., Beider E.Ya. Construction materials based on reinforced thermoplastics Chemistry and Materials Science [Construction materials based on reinforced thermoplastics Chemistry and Materials Science] //Russian Journal of General Chemistry. 2011. V. 81. №5. P. 1001–1007.

10. Kerber M.L., Vinogradov V.M., Golovkin G.S. i dr. Polimernye kompozitsionnye materialy: struktura, svoystva, tehnologiya [Polymer composite materials: structure, properties, technology]. SPb.: Professiya. 2011. S. 32–33
11. Petrova G.N., Beyder E.Ya., Chebotarev V.P. i dr. Regulirovanie svoystv polisul'fonov za schet modifikatsii [Polysulfones properties control through modification] //Plasticheskie massy. 2010. №12. S. 23–27.
12. Donetskiy K.I., Hrul'kov A.V. i dr. Primenenie obemno-armiruyuschih preform dlya izgotovleniya izdeliy iz PKM [Usage of Three-Dimensional Reinforcing Preforms for Production of Polymer Composite Articles] //Aviatsionnye materialy i tehnologii. 2013. №1. S. 35–39.
13. Komarov G.V. Soedinenie detaley iz polimernyh materialov [Assembly of parts made of polymer materials]: Ucheb. posob. SPb.: Professiya. 2006. S. 337–443.
14. Mihaylin Yu.A. Termoustoychivye polimery i polimernye materialy [Thermally stable polymers and polymer materials]. SPb.: Professiya. 2006. S. 240–347.
15. Beyder E.Ya., Gureeva E.V., Petrova G.N. Penopoliimidy [Foamed polyimides] //Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik. 2012. №6. S. 2–8.