

УДК 678.8

А.Г. Гуняева<sup>1</sup>, А.О. Курносов<sup>1</sup>, И.Н. Гуляев<sup>1</sup>**ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ, РАЗРАБОТАННЫЕ ВО ФГУП «ВИАМ», ДЛЯ АВИАЦИОННО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ: ПРОШЛОЕ, НАСТОЯЩЕЕ, БУДУЩЕЕ (обзор)**

DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-43-53

*Приведен обзор высокотемпературных полимерных композиционных материалов (ПКМ), разработанных во ФГУП «ВИАМ». Для создания новой авиационно-космической техники требуются расширение ассортимента и разработка передовых современных конструкционных ПКМ, обладающих высокой прочностью, пониженной пористостью и повышенной термоокислительной стабильностью в сочетании с высоким уровнем механических характеристик и их сохранением в наиболее широком температурном диапазоне. ФГУП «ВИАМ» имеет многолетний опыт по разработке этого класса материалов – первые работы по созданию ПКМ с рабочей температурой >250 °С проводились еще в 1960–1970-х гг. Данные исследования продолжаются и в настоящее время.*

**Ключевые слова:** высокотемпературные полимерные композиционные материалы, углепластик, стеклопластик, полимерное связующее, кремнийорганическое связующее, полиимид, циановый эфир, бисмалеимид, фталонитрил.

A.G. Gunyaeva<sup>1</sup>, A.O. Kurnosov<sup>1</sup>, I.N. Gulyaev<sup>1</sup>**HIGH-TEMPERATURE POLYMER COMPOSITE MATERIALS DEVELOPED FSUE «VIAM» FOR AEROSPACE ENGINEERING: PAST, PRESENT AND FUTURE (review)**

*The article provides an overview of high-temperature PCM developed at FSUE «VIAM». To create a new aerospace technology, it is necessary to expand the range and develop advanced modern structural PCM with high strength, reduced porosity and increased thermal-oxidative stability, combined with a high level of mechanical characteristics and their preservation in the widest temperature range. FSUE «VIAM» has many years of experience in the development of this class of PCM – the first work on the creation of PCM with an operating temperature of more than 250 °C was received in the 1970s and is currently ongoing.*

**Keywords:** high-temperature polymeric composite material, carbon composite, fibreglass composite, polymeric resin, silicon-organic resin, polyimide, cyanic esters, bismaleimides, phthalonitrile.

<sup>1</sup>Федеральное 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**

Комплексное научное направление 13. «Полимерные композиционные материалы» (ПКМ), определенное в «Стратегических направлениях развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года», раскрывает перед материаловедами задачи и цели по разработке и совершенствованию современных ПКМ [1, 2].

Полимерные композиционные материалы – достаточно новое в сравнении с ближайшими конкурентами – металлами, но прогрессивно развивающееся с начала 1960-х гг. направление отечественного материаловедения. Становление ПКМ для

летательных аппаратов началось еще во время Великой Отечественной войны [3]. В то время начальником ВИАМ был 30-летний генерал-майор А.Т. Туманов, который сразу увидел в новых, еще не изученных тогда материалах прообраз будущей авиационной техники, залог изменения баланса авиационного материаловедения и дал толчок развитию данного направления в институте и других учреждениях страны.

В 1967 г. в ВИАМ создается группа в составе начальника лаборатории стеклопластиков М.Ц. Сакаллы, его заместителя Г.М. Гуняева, инженеров В.А. Ярцева, М.А. Кузнецовой и техника В.В. Катюхиной для выполнения работ и исследований в области ПКМ. Уже в начале 1971 г. сотрудниками института разработаны и паспорттированы первые ПКМ: боропластик марки КМБ-1 и углепластик марки КМУ-1 [3, 4].

Первоначально большинство разработанных в институте эпоксидных ПКМ предназначалось для эксплуатации в диапазоне температур от  $-60$  до  $+150$  °С [5], что вполне оправдано основной областью их применения (детали и узлы механизации летательных аппаратов (ЛА)) [6]. Но уже в далекие 1970-е гг. было очевидно, что ПКМ, обладающие огромным потенциалом к реализации комплекса свойств (высокой прочности и пониженной пористости в сочетании с высоким уровнем механических характеристик, а также их сохранением в наиболее широком температурном диапазоне), займут свое место в авиационно-космической технике [7].

В настоящее время наблюдается общемировая тенденция расширения применения ПКМ в конструкции ЛА за счет изготовления из них теплонагруженных элементов планера (капотов двигателей, обтекателей теплообменников, панелей газогенераторов и пр.) [7, 8]. Таким образом, для авиационно-космической отрасли будущее, несомненно, видится за высокотемпературными ПКМ [8].

Высокотемпературные ПКМ – это перспективный, уже выделившийся в отдельное направление исследований класс материалов на основе армирующих угле- и стеклонаполнителей различных текстильных форм [9] и разных классов полимерных связующих [10] – полициануратных (цианэфирных) [11], бензоксазиновых [12], фенолформальдегидных, бисмалеимидных [13, 14], полиимидных [15], кремнийорганических [16] и фталонитрильных [17], работающих в диапазоне температур от  $-60$  до  $+400$  °С (рис. 1). Высокотемпературные ПКМ предназначены и находят применение в теплонагруженных деталях, а также в агрегатах высоко- и средненагруженных конструкций изделий авиационной техники.

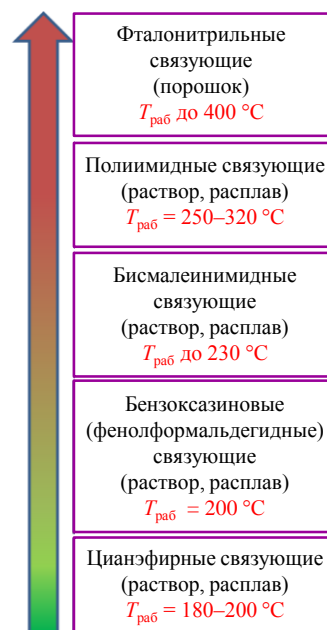


Рис. 1. Основные классы высокотемпературных полимерных связующих

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

### **Опыт и разработки ФГУП «ВИАМ» в области высокотемпературных ПКМ**

ФГУП «ВИАМ» имеет многолетний опыт по разработке высокотемпературных материалов – первые работы по созданию ПКМ с рабочей температурой  $>250$  °С получены еще в далеких 1970–1980-х гг. В то время основные исследования проводили на растворных кремнийорганических и полиимидных связующих. В настоящее время специалисты ФГУП «ВИАМ» продолжают разрабатывать новые составы (в том числе с применением отечественного сырья) и технологии получения ПКМ, не останавливаясь на достигнутом [18, 19].

В таблице приведены высокотемпературные ПКМ, разработанные во ФГУП «ВИАМ».

Как видно из данных таблицы, многие из разработанных материалов выполнены на основе отечественных наполнителей и связующих растворного типа. В настоящее время в рамках научно-исследовательских работ, проводимых в ВИАМ, разрабатываются материалы нового поколения на основе современных альтернативных углеродных и стеклянных наполнителей и полимерных связующих расплавленного типа с целью реализации лучших физико-механических характеристик в конечных изделиях и упрощения их переработки за счет уменьшения технологических операций.

Опыт в разработке такого рода материалов бесценен, однако не все из них нашли свое место в изделиях авиационной и космической техники [20]. Остановимся на некоторых материалах более подробно.

Углепластик марки КМУ-8 (1970-е гг.) [21, 22] выполнен на основе порошкового связующего ПАИС-104 и углеродной ленты ЭЛУР-П и предназначен для работы при температуре до 250 °С. Препрег получали по принципиально новой технологии для тех времен – методом электронно-ионной технологии, перерабатывали методом вакуумно-автоклавного формования при максимальной температуре 250 °С и давлении 7–10 ат (0,7–1 МПа). Фракция порошка связующего перед нанесением на углеродный наполнитель должна быть не более 315 мкм. Углепластик марки КМУ-8 при длительной эксплуатации при температуре 400 °С [22] снижает уровень физико-механических характеристик на 20–25%, обладает низкой пористостью, находящейся на уровне 0,5–2%. Несмотря на все преимущества данного материала, недостатком является высокая трудоемкость процесса получения мелкодисперсного порошка необходимой фракции для напыления в магнитном поле, что сказывается на себестоимости материала. Ограничение метода также состоит в том, что используются только электризуемые наполнители, на поверхности которых возможно создание электрического заряда. Углепластик марки КМУ-8 разработан и паспортизован специально для воздушно-космического самолета (ВКС) «Буран» – используется в секциях кромок крыла [23].

В середине 1980-х гг. во ФГУП «ВИАМ» на основе связующего марки СП-97с (разработка ОАО «Институт пластмасс») [24] разработан стеклопластик марки СП-97с, обладающий повышенной термостойкостью в сочетании с высокими механическими характеристиками. Материал огнестоек, практически не выделяет дыма при воздействии пламени, нетоксичен. Из него изготавливают защитные кожухи и экраны двигателей, отсеки двигателей силовых установок, бортовые и оконные панели самолета, детали интерьера, панели воздухозаборника и шумопоглощения, детали электрораспределительных устройств и т. п.

Высокотемпературные ПКМ, разработанные во ФГУП «ВИАМ»

Марка материала	Годы разработки	Рабочая температура, °С	Состав (связующее/наполнитель)	Область применения
ПКМ на основе полиимидных связующих				
Серия углепластиков ВКУ-27 (ВКУ-27Л и ВКУ-27ТР)	2011	До 170 при обеспечении защиты от влаги насыщения	Однонаправленная углеродная ткань плотностью ~130 г/м <sup>2</sup> и расплавленное полиимидуратное связующее марки ВСТ-1208	Для изготовления авиационных конструкций (в том числе высоконагруженных)
Углепластик ВКУ-42	2013	200	Углеродная равнопрочная ткань саржевого плетения (2×2) с поверхностной плотностью ~160 г/м <sup>2</sup> и полиимидуратное связующее марки ВСТ-32	Для изготовления деталей и агрегатов летательных аппаратов из гибридных угле-, органоластиков, в том числе элементов конструкции пылезащитного устройства и переходного канала вертолетного двигателя
Стеклопластик ВПС-41	2012	До 180	Стеклоткань марки Т-60/2(ВМТ)-4 и полиимидуратное связующее марки ВСЦ-14	Для изготовления деталей конструкционного и радиотехнического назначения перспективных самолетов во всеклиматических условиях
Стеклопластик ВПС-47/7781	2013	До 160, в том числе при 160 в течение 2000 ч	Равнопрочная стеклоткань сатинового плетения с поверхностной плотностью ~290 г/м <sup>2</sup> и расплавленное полиимидуратное связующее марки ВСТ-1208	Для изготовления слабо- и средненагруженных авиационных конструкций
Углепластик ВКУ-48	2015	200	Углеродная равнопрочная ткань саржевого плетения (2×2) с поверхностной плотностью ~200 г/м <sup>2</sup> и полиимидуратное связующее марки ВСТ-1210	Для изготовления деталей конструкционного назначения
Электропроводящие покрытия ВЭП-1 и ВЭП-2	2015	180	Углеродные ткани с поверхностной плотностью порядка 200 и 280 г/м <sup>2</sup> и полиимидуратное связующее марки ВСЦ-14	Для защиты от молниевых разрядов с параметрами $I=200$ кА, $Q>30$ Кл и накопления статического электричества обшивок деталей и агрегатов из углепластика, выходящих на внешний контур планера перспективных изделий АТ
ПКМ на основе полиимидных связующих				
Углепластик КМУ-8	1970–1980	До 250	Углеродная лента ЭЛУР-П и полтаминолиmidное связующее ПАИС-104	Для изготовления створок отсека полезного груза для большого транспортного самолета «Буран»
Серия углепластиков КМУ-2	1970–1980	250 (кратковременно – до 300)	Жгутковый и ленточные углеродные наполнители и полиимидное связующее серии СП-97	Для изготовления космических кораблей, планера самолета и высоконагруженных ГТД
СТП-97С	1970–1980	300	Стеклоткань марки Т-10-80 и полиимидное связующее марки СП-97с	Для изготовления деталей интерьера, бортовых и оконных панелей самолета, отсеков двигателей силовых установок, панелей воздухозаборника, защитных кожухов и экранов двигателей, деталей электрораспределительных устройств и т. п.
СТП-97К	1970–1980	300	Стеклоткань марки Т-10-80 и полиимидное связующее марки СП-97К	

Окончание таблицы

Марка материала	Годы разработки	Рабочая температура, °С	Состав (связующее/наполнитель)	Область применения
Углепластик ВКУ-14	2006	370 (кратковременно – до 400)	Однонаправленная углеродная лента и макрогетеродисперсионное связующее марки ИП-5	Для изготовления как в сочетании со стеклотекстолитом марки ВПС-36, так и без него термонагруженных изделий конструкционного назначения, в том числе ширококордных рабочих, стационарных лопаток и других конструктивных элементов газотурбинных двигателей
Углепластик ВКУ-21	2011	300	Углеродная равнопрочная ткань с поверхностной плотностью ~400 г/м <sup>2</sup> и полиимидное связующее марки СП-97к	Для изготовления термонагруженных деталей планера сверхзвуковых самолетов, подвергающихся нагреву от набегающего потока воздуха и от работы двигателя
Углепластик ВКУ-61	2020	До 320	Углеродная равнопрочная ткань марки ВКУ-2.200 с поверхностной плотностью ~200 г/м <sup>2</sup> и полиимидное связующее марки ВС-51	Для изготовления термонагруженных деталей конструкционного назначения (панели газогенератора)
Стеклопластик ВПС-72	2020	До 320	Стеклоткань марки Т-10 и полиимидное связующее марки ВС-51	
ПКМ на основе фталонитрильного связующего				
Серия углепластиков ВКУ-38	2013–2014, 2018	300 (кратковременно – до 330)	Жгуты, ленточный, тканый углеродные наполнители, тканая преформа и фталонитрильное связующее марки ВСН-31	Для изготовления термонагруженных деталей и агрегатов в высоко- и средненагруженных авиационных конструкциях (корпусные детали двигателя, спрямляющие лопатки, входной направляющий аппарат ГТД, панели шумоглушения и т. д.).
Стеклопластики на основе кремнийорганических связующих				
СК-9ФА	1965–1975	300 в течение 2000 ч, 350 в течение 1000 ч, 600 в течение 10 мин	Стеклоткань марки ТС-8/3-250 и кремнийорганическое связующее марки К-9ФА	Для изготовления деталей радиотехнического назначения (радиопрозрачные носовые обтекатели ракетной техники, люки, вставки и т. п.).
СК-9ХХ	1965–1975	300 в течение 2000 ч, 350 в течение 250 ч	Стеклоткань марки КТ-11-С8/3-ТО и кремнийорганическое связующее марки К-9Х	
СК-101	1965–1975	350 в течение 5 ч, 400 в течение 2 ч	Стеклоткань марки КТ-11 и кремнийорганическое связующее марки К-101	
ВПС-52	2013	300 в течение 1000 ч	Стеклоткань марки ТС-8/3-К-ТО и кремнийорганическое связующее марки К-9-70С	

Основными недостатками стеклопластика марки СП-97с являются низкие показатели экологической безопасности в процессе его переработки, повышенная пористость, а также высокая температура формования (350 °С). Конденсационный характер отверждения связующего марки СП-97с является причиной выделения значительного количества летучих продуктов. Высокая температура переработки [24] из-за отсутствия оборудования или его недешевой стоимости препятствует широкому использованию связующего при изготовлении конструкций. В частности, это относится к крупногабаритным конструкциям, выполненным, как правило, методами прессового или автоклавного формования.

Стремление уменьшить температуру отверждения без существенного понижения механической прочности, теплостойкости и огнестойкости послужило стимулом для исследования по модификации полиимидного связующего марки СП-97с. В результате разработано связующее марки СП-97К [24] с конечной температурой отверждения 170 °С. На основе данного связующего во ФГУП «ВИАМ» разработан стеклопластик марки СП-97К [25]. В качестве армирующего наполнителя использовали стеклоткань марки Т-10-80 из стекла алюмоборосиликатного состава.

Стеклопластики на основе полиимидных связующих марок СП-97с и СП-97К нашли применение при изготовлении таких изделий, как панели воздухозаборника и шумопоглощения, отсеки двигателей силовых установок, экраны двигателей и защитные кожухи, детали электрораспределительных устройств и т. п. [25].

В конце 1970-х гг. разработан углепластик марки КМУ-2лп на основе растворного полиимидного связующего марки СП-97с и углеродной ленты ЛУ-П, предназначенный для работы при температуре 250 °С (кратковременно – до 300 °С). Формование углепластика проводили при температуре 200 °С и давлении ~10 ат (~1 МПа) в прессе с дальнейшей термообработкой в свободном состоянии в диапазоне температур от 250 до 400 °С. Пористость данного углепластика составляет 15%, в результате чего углепластик обладает низким уровнем механических характеристик, особенно при сдвиге, сжатии и малоцикловой усталости.

На основе макрогетероциклического связующего марки ИП-5 и однонаправленной углеродной ленты разработан углепластик марки ВКУ-14 для работы при температуре до 370 °С (кратковременно – до 400 °С), а также технология изготовления из него широкохордной лопатки вентилятора авиационного двигателя [22]. Порошкообразное связующее наносится на наполнитель в среде электростатического поля. Получение углепластика проводится методом прессового или автоклавного формования с дополнительной термообработкой при температуре 350 °С. Температура стеклования углепластика составляет не менее 400 °С. Углепластик марки ВКУ-14 обладает высокой механической прочностью и сохраняет ее на достаточном уровне (не менее 60%) при кратковременном и длительном воздействии температур при всех видах нагружения.

В стеклопластиках [26], работоспособных при температурах до 400 °С, применяют термостойкие связующие на основе кремнийорганических соединений [16], содержащие элементоорганические фрагменты, линейные или сетчатые карбо- и гетероциклические ароматические системы. Интерес к кремнийорганическим связующим обусловлен их высокой термоокислительной устойчивостью, хорошими диэлектрическими свойствами и пожаробезопасностью. При изготовлении высокотемпературных изделий на основе кремнийорганических связующих используют методы прямого прессования и пропитки под давлением в жестких формах, позволяющие обходиться без дополнительной механической обработки и обеспечивающие высокую стабильность геометрических размеров и свойств материала.

С применением кремнийорганических связующих [27] разработан ряд высокотемпературных стеклопластиков [16], рекомендованных для изготовления деталей радиотехнического назначения (радиопрозрачные носовые обтекатели ракетной техники, люки, вставки и т. п.). К числу недостатков, присущих данному классу материалов, относятся сравнительно невысокая прочность, особенно межслоевая, и высокие температуры переработки (250 °С и более).

Стеклопластики на основе органических и элементоорганических матриц могут длительно эксплуатироваться при температурах до 400 °С. Для создания более термостойких стеклопластиков применяются матрицы на основе неорганических связующих. Стеклопластики данного типа получают методом горячего прессования стеклянных наполнителей, пропитанных модифицированной композицией на основе алюмофосфатного или алюмохромфосфатного связующего с различными порошкообразными наполнителями – плавленным кварцем, оксидом алюминия и др. По своей природе и устойчивости к длительному воздействию высоких температур стеклопластики данного типа больше соответствуют керамическому материалу. В то же время их производят по технологии, принятой для изготовления композиционных материалов, без высокотемпературного обжига. Эти материалы обладают сравнительно невысокой механической прочностью, однако выдерживают воздействие температур до 1100 °С.

Особое место в истории развития ПКМ занимает еще один класс конструкционных материалов – углерод-углеродные композиционные материалы (УУКМ) [22], которые предназначены для изготовления теплонагруженных деталей планера гиперзвуковых и воздушно-космических летательных аппаратов, деталей сопловых блоков ракет, газотурбинных двигателей, тормозов самолетов, оснастки для металлургической промышленности и др. В 1980-х гг. в лаборатории «Полимерные композиционные материалы» ФГУП «ВИАМ» разработаны и паспортизованы такие уникальные в своем роде УУКМ «Гравимол» и «Гравимол-В», которые нашли применение специально для изготовления носового кока и секций носка крыла воздушно-космического самолета (ВКС) «Буран» [22].

В начале 2000-х гг. появились разработки материалов на основе полициануратных связующих [28], обладающих ценным комплексом свойств для получения ПКМ с температурой эксплуатации до 200 °С и перерабатываемых по большей части получившими в то время распространение методами вакуумной инфузии или пропитки под давлением (RTM-технологии). Полицианураты обладают высокой температурой стеклования, низким значением диэлектрической проницаемости и высокими упругопрочностными характеристиками. Однако в процессе исследований установлено, что ПКМ на основе полициануратных связующих имеют пониженную климатическую стойкость (впитывают влагу) [29], что ухудшает их физико-механические характеристики после воздействия климатических фактов и, как следствие, существенно ограничивает область их применения.

В 2013–2014 гг. разработаны состав и технология получения фталонитрильного связующего марки ВСН-31 и углепластиков серии ВКУ-38 [30] на его основе с применением равнопрочного тканого, жгутового, а также однонаправленного ленточного углеродных наполнителей с рабочими температурами до 300 °С (кратковременно – до 350 °С) [31]. Кроме того, разработана технология изготовления кольцевого элемента и лопатки для рабочего колеса центробежного компрессора (РКЦК) из указанных углепластиков (рис. 2). Температура плавления порошкового фталонитрильного связующего составила 180–190 °С, конечная температура формования углепластика на его основе 300 °С, температура дополнительной термообработки 350–375 °С, а температура стеклования углепластика >420 °С.

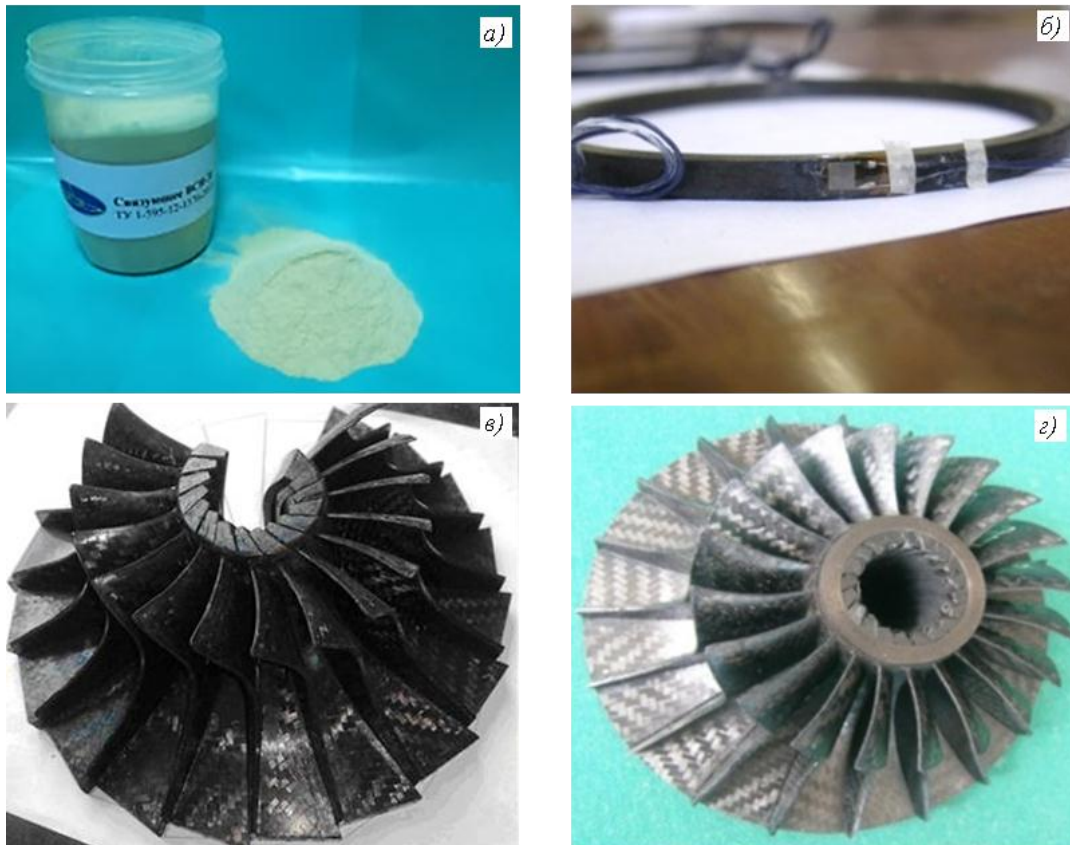


Рис. 2. Термостойкие материалы на основе связующего марки ВСН-31 (а): кольцевой элемент (б) и лопатки (в) рабочего колеса центробежного компрессора из углепластика (г)

В 2015 г. завершены работы по совершенствованию технологии изготовления РКЦК на основе термостойкого фталонитрильного связующего марки ВСН-31: разработана технология получения лопаточного элемента из объемно-армированной тканой преформы взамен тканого наполнителя, что позволит упростить технологический цикл изготовления изделия.

В 2017 г. разработано новое полиимидное связующее полимеризационного типа марки ВС-51 [32], позволяющее получить угле- и стеклопластики с рабочей температурой до 320 °С. Связующее предназначено для получения препрегов ПКМ как из раствора, так и с использованием расплавного метода. Температура стеклования углепластика на основе углеродной ткани марки ВТкУ-2.200, определенная методом динамического механического анализа, составляет 360–370 °С [33]. В настоящее время проводится разработка и в 2021 г. будет завершена паспортизация комплекса материалов (угле- и стеклопластиков) на основе связующего марки ВС-51 с рабочей температурой до 320 °С в интересах АО «ОДК-Авиадвигатель» – с целью внедрения данных материалов в перспективный двигатель ПД-35 [34].

В рамках работ по направлению высокотемпературных углепластиков продолжается разработка новых связующих, а также угле- и стеклопластиков на их основе: полиимидного связующего марки ВС-54 с рабочей температурой 250 °С для получения углепластиков по препреговой технологии; фенолтриазинового связующего марки ВС-55 с рабочей температурой 250 °С для получения углепластиков по безавтоклавной технологии (вакуумная инфузия, RTM); бисмалеимидных связующих для получения углепластиков с широким диапазоном рабочих температур.

### Заключения

Прошлое, настоящее и будущее в материаловедении – это непрерывное развитие и усовершенствование материалов, способов их переработки, а также получение качественных и монолитных изделий на их основе [35]. Увеличение доли ПКМ в конструкциях перспективных изделий аэрокосмической техники является современным трендом, борьбу за который ведут как зарубежные, так и отечественные компании.

Для внедрения материалов нового поколения в теплонагруженные элементы конструкций и, соответственно, увеличения доли ПКМ в новой авиационно-космической технике необходимо расширение температурного диапазона и повышение эксплуатационных характеристик этого класса материалов, что возможно реализовать путем разработки связующих различных классов [36], модификации их составов [37], подбора более термостойких армирующих наполнителей, а также повышения эксплуатационной надежности за счет снижения пористости и степени влагопоглощения ПКМ. Все эти задачи решают материаловеды по всему миру.

С начала 1970-х гг. и по настоящее время во ФГУП «ВИАМ» сформирован огромный научно-технический задел и разработана достаточно объемная номенклатура высокотемпературных ПКМ, которые позволяют применять различные технологии переработки и реализовывать широкий спектр свойств материалов в конечных изделиях [38].

Однако следует отметить, что у столь перспективно класса материалов есть один очень серьезный недостаток: для их переработки в изделия необходимо дорогостоящее оборудование и вспомогательные материалы [39], которыми обладают не все производственные площадки на территории РФ. Этот фактор является в настоящий момент сдерживающим для более активного продвижения высокотемпературных ПКМ на отечественный рынок и внедрения материалов в перспективные изделия авиационной техники.

В заключение также следует отметить, что, несмотря на достигнутые успехи, существует необходимость дальнейшего развития химической промышленности на территории Российской Федерации, а именно химической компонентной базы (отвердителей, мономеров, олигомеров и других химпродуктов) для производства, а также разработки новых отечественных высокотемпературных связующих и ПКМ на их основе для возможности реализации полной независимости от импорта.

### Благодарности

Авторы выражают благодарность сотрудникам ФГУП «ВИАМ» – ведущему инженеру-технологу И.В. Зелениной, начальнику сектора М.И. Валуевой, начальнику лаборатории Р.Р. Мухаметову и ведущему инженеру М.А. Жаринову за вклад при разработке указанных в статье материалов.

### Библиографический список

1. 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.
2. Каблов Е.Н. Композиты: сегодня и завтра // Металлы Евразии. 2015. №1. С. 36–39.
3. Гуняев Г.М. Конструирование высокомодульных полимерных композитов. М.: Машиностроение, 1977. 160 с.
4. Гуняев Г.М. Структура и свойства полимерных волокнистых композитов. М.: Химия, 1981. 232 с.
5. Гуняева А.Г., Сидорина А.И., Курносов А.О., Клименко О.Н. Полимерные композиционные материалы нового поколения на основе связующего ВСЭ-1212 и наполнителей, альтернативных наполнителям фирм Porcher Ind. и Toho Tenax // Авиационные материалы и технологии. 2018. №3 (52). С. 18–26. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-18-26.

6. Молчанов Б.И., Гудимов М.М. Свойства углепластиков и области их применения // *Авиационная промышленность*. 1997. №3–4. С. 58–60.
7. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // *Интеллект и технологии*. 2016. №2 (14). С. 16–21.
8. Каблов Е.Н. Конструкционные и функциональные материалы – основа экономического и научно-технического развития России // *Вопросы материаловедения*. 2006. №1. С. 64–67.
9. Сидорина А.И., Гуняева А.Г. Тканые армирующие углеродные наполнители для полимерных композиционных материалов (обзор) // *Химические волокна*. 2017. №2. С. 20–23.
10. Валуева М.И., Зеленина И.В., Жаринов М.А., Ахмадиева К.Р. Мировой рынок высокотемпературных полиимидных углепластиков (обзор) // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн.* 2019. №12 (84). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.10.2020). DOI:10.15577/2307-6046-2019-0-12-67-79.
11. Вавилова М.И., Кавун Н.С. Стеклопластики на основе цианэфирных связующих // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №S2. С. 19–23. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s2-19-23.
12. Хмельницкий В.В., Шимкин А.А. Высокомолекулярные бензоксазины – новый тип высокотемпературных полимерных связующих (обзор) // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн.* 2019. №2 (74). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.10.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-2-43-57.
13. Связующие для ПКМ // ОНПП «Технология» имени А.Г. Ромашина: офиц. сайт. URL: <https://technologiya.ru/files/1154/%D0%A1%D0%B2%D1%8F%D0%B7%D1%83%D1%8E%D1%89%D0%B8%D0%B5%20%D0%B4%D0%BB%D1%8F%20%D0%9F%D0%9A%D0%9C.pdf> (дата обращения: 12.10.2020).
14. Бисмалеимидные связующие // АО «ИНУМиТ»: офиц. сайт. URL: <https://inunit.ru/rus/produkcija-i-uslugi/ugleplastiki/Resins/bismaleimides> (дата обращения: 12.10.2020).
15. Курносов А.О., Раскутин А.Е., Мухаметов Р.Р., Мельников Д.А. Полимерные композиционные материалы на основе термореактивных полиимидных связующих // *Вопросы материаловедения*. 2016. №4. С. 50–62.
16. Давыдова И.Ф., Кавун Н.С. Пленочные кремнийорганические связующие для стеклопластиков // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №S2. С. 15–18. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s2-15-18.
17. Продукция // ИТЕКМА.ru: офиц. сайт. URL: <https://itecma.ru/products> (дата обращения: 12.10.2020).
18. Валуева М.И., Зеленина И.В., Ахмадиева К.Р., Жаринов М.А., Хасков М.А. Разработки ФГУП «ВИАМ» в области высокотемпературных углепластиков: направления и перспективы // *Материалы IV Всерос. конф. «Роль фундаментальных исследований при реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года»* (г. Москва, 28 июня 2018 г.). М.: ВИАМ, 2018. С. 71–76. 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
19. Каблов Е.Н. Материалы и технологии ВИАМ для «Авиадвигателя» // *Пермские авиационные двигатели*. 2014. №31. С. 43–47.
20. Каблов Е.Н. Роль химии в создании материалов нового поколения для сложных технических систем // *Тез. докл. XX Менделеевского съезда по общей и прикладной химии*. Екатеринбург: УрО РАН, 2016. С. 25–26.
21. Гуляев И.Н., Власенко Ф.С., Зеленина И.В., Раскутин А.Е. Направления развития термостойких углепластиков на основе полиимидных и гетероциклических полимеров // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн.* 2014. №1. Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 14.10.2020). DOI:10.15577/2307-6046-2014-0-1-4-4.
22. Раскутин А.Е. Термостойкие углепластики для конструкций авиационной техники, эксплуатирующихся при температурах до 400 °С: дис. ... канд. техн. наук. М., 2007. 166 с.
23. Гуняев Г.М., Раскутин А.Е., Гуняева А.Г. Полимерные композиционные материалы в конструкциях ВСК «Буран» // *Сборник тезисов докладов XX Междунар. науч.-техн. конф. «Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов»* (г. Обнинск, 2013 г.). М.: ОНПП «Технология», 2013. С. 65–67.

24. Продукция // АО «Институт пластмасс имени Г.С. Петрова»: офиц. сайт. URL: <https://www.instplast.ru> (дата обращения: 12.10.2020).
25. Давыдова И.Ф., Кавун Н.С. Полиимидный стеклотекстолит с пониженной температурой отверждения // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2015. №2. Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.10.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-2-9-9.
26. Курносое А.О., Вавилова М.И., Мельников Д.А. Технологии производства стеклянных наполнителей и исследование влияния аппретирующего вещества на физико-механические характеристики стеклопластиков // Авиационные материалы и технологии. 2018. №1 (50). С. 64–70. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-64-70.
27. Краев И.Д., Попков О.В., Шульдешов Е.М., Сорокин А.Е., Юрков Г.Ю. Перспективы использования кремнийорганических полимеров при создании современных материалов и покрытий различных назначений // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2017. №12 (60). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.10.2020). DOI: 10.15577/2307-6046-2017-0-12-5-5.
28. Гусева М.А. Циановые эфиры – перспективные терморективные связующие (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2015. №2 (35). С. 45–50. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-45-50.
29. Мишуров К.С., Павловский К.А., Имамединов Э.Ш. Влияние внешней среды на свойства углепластика ВКУ-27Л // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2018. №3 (63). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 09.10.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-3-60-67.
30. Зеленина И.В., Гуляев И.Н., Кучеровский А.И., Мухаметов Р.Р. Термостойкие углепластики для рабочего колеса центробежного компрессора // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2016. №2 (38). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.10.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-2-8-8.
31. Раскутин А.Е. Российские полимерные композиционные материалы нового поколения, их освоение и внедрение в перспективных разрабатываемых конструкциях // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 349–367. DOI 10.18577/2071-9140-2017-0-S-349-367.
32. Способ получения расплавных полиимидных связующих полимеризационного типа: пат. 2666734 Рос. Федерация. №2017135540; заявл. 05.10.17; опубл. 12.09.18.
33. Жаринов М.А., Шимкин А.А., Ахмадиева К.Р., Зеленина И.В. Особенности и свойства расплавного полиимидного связующего полимеризационного типа // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2018. №12 (72). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.10.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-12-46-53.
34. Колпачков Е.Д., Вавилова М.И., Курносое А.О., Гуняева А.Г. Стеклопластики на основе терморективных полиимидных связующих // Полимерные композиционные материалы нового поколения для гражданских отраслей промышленности: материалы Всерос. науч.-техн. конф. (г. Москва, 23 октября 2020 г.). М.: ВИАМ, 2020. С. 31–41.
35. Скудра А.М., Булаве Ф.Я. Прочность армированных пластиков. М.: Химия, 1982. 216 с.
36. Кузнецов А.А., Семенова Г.К. Перспективные высокотемпературные терморективные связующие для полимерных композиционных материалов // Российский химический журнал. 2010. Т. 53. №4. С. 86–96.
37. Ваганов Г.В., Юдин В.Е., Елоховский В.Ю., Мягкова Л.А., Светличный В.М., Иванькова Е.М. Углепластики на основе порошковых полиимидных связующих, модифицированных углеродными наноконусами // Полимерные материалы и технологии. 2015. Т. 1. №1. С. 38–44.
38. Михайлин Ю.А. Термоустойчивые полимеры и полимерные материалы. СПб.: Профессия, 2006. 624 с.
39. Каблов Е.Н. России нужны материалы нового поколения // Редкие земли. 2014. №3. С. 8–13.