

чении энергии удара зона чувствительности увеличивается. При этом регистрация ударного повреждения после ударного воздействия возможна лишь при условии, что волоконная брегговская решетка попадает в зону удара или в зоны расслоений, вызванных ударным воздействием.

Помимо авиационных конструкций интеллектуальные материалы могут быть с успехом применены в строительстве высотных сооружений, мостостроении, особенно в вантовых мостах. В этом случае силовые элементы моста или дополнительные накладки из адаптирующегося материала с требуемой ориентацией не только усиливают конструкцию, но и придают ей нужные демпфирующие свойства. Адаптирующиеся материалы могут быть внедрены при разработке широкоходных лопаток компрессоров газо- и нефтеперекачивающих станций, вентиляторов и винтов ветроэнергетических установок, в которых размеры лопастей достигают нескольких метров (3–10 м) и толщина обшивок в комлевой части: 15–30 мм. Они могут применяться в медицине при создании корсетов для исправления осанки. Такой заплечный корсет при сутулости, благодаря взаимосвязи деформации изгиба и кручения углепластиковых элементов корсета, будет вызывать необходимый умеренный болевой эффект.

Интеллектуальные материалы призваны определить технологии и материаловедение XXI века.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бирюк В.И., Голован В.И., Гуляев Г.М., Крючков Е.И. Применение композиционных материалов в концевой части крыла для снижения веса крыла в целом // В сб.: Прочность, колебания, ресурс авиационных конструкций и сооружений: Труды ЦАГИ. М.: ЦАГИ. 2002. Вып. 2658. С. 44–49.
2. Сиваков Д.В., Гуляев И.Н., Сорокин К.В., Федотов М.Ю., Гончаров В.А. Особенности создания полимерных композиционных материалов с интегрированной активной электромеханической актюаторной системой на основе пьезоэлектриков // Авиационные материалы и технологии. 2011. № 1. С. 31–34.
3. Гуляев Г.М., Машинская Г.П., Железина Г.Ф., Гуляев И.Н., Соловьева Н.А., Шалин Р.Е. Сенсоры для интеллектуальных и самоадаптирующихся композитов // В сб.: Авиационные материалы и технологии. Вып. Полимерные композиционные материалы. М.: ВИАМ. 2002. С. 45–49.
4. Гуляев И.Н., Железина Г.Ф. Металлоорганопластики для стопперов-индикаторов повреждений обшивок // В сб.: Авиационные материалы и технологии. М.: ВИАМ. 2002. Вып. 3. С. 37–43.

*И.Ф. ДАВЫДОВА, Н.С. КАВУН*

#### **СТЕКЛОПЛАСТИКИ – МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

Стеклопластики – первые высокопрочные композиционные материалы, широко используемые в различных отраслях техники и в быту. Объем потребления стеклопластиков различного назначения непрерывно увеличивается, несмотря на все возрастающее применение новых композиционных материалов на основе углеродных, органических и других волокон. Такое применение стеклопластиков прежде всего связано с универсаль-

ностью и возможностью регулирования в широких пределах их физико-механических и диэлектрических свойств, они могут быть компонентами гибридных и комбинированных слоистых материалов.

В настоящее время стеклопластики не только успешно конкурируют с металлами, но и позволяют получать в изделиях дополнительное сочетание ряда специфических свойств, таких как малая чувствительность к нарушениям поверхности, стойкость к вибрационным и знакопеременным нагрузкам, хорошие тепло- и электроизоляционные свойства, радиопрозрачность, стойкость к воздействию микроорганизмов, малая коррозионная активность при контакте с металлами и сплавами, химическая стойкость и, наконец, высокие значения удельной прочности.

Кроме того, применение стеклопластиков во многих случаях приводит не только к уменьшению массы конструкций, но и к снижению трудоемкости, стоимости материалов и затрат на производство, что дает значительный экономический эффект.

Стеклопластики, как и другие композиционные материалы, представляют собой многофазные гетерогенные системы, свойства которых зависят от свойств входящих компонентов и характера их взаимодействия.

Достижения в области создания композиционных материалов в значительной мере являются результатом проведенных в институте фундаментальных исследований в области разработки армирующих наполнителей, синтеза полимерных связующих, изучения межфазной границы.

При разработке стеклопластиков использовалась широкая гамма наполнителей на основе стеклянных волокон различного химического состава – нити, жгуты, холсты, ткани, трикотаж, трехмерноармированные многослойные и прошивные ткани.

Разнообразие видов стеклянных наполнителей, варьирование их характеристик путем изменения химического состава предопределило возможность создания стеклопластиков с самым широким диапазоном свойств. Например, использование наполнителей из стекла, содержащего оксиды свинца, позволило создать радиационностойкие защитные конструкции, а в результате применения стеклянных наполнителей магний-алюмосиликатного состава (с прочностью 5000 МПа) – материалы для высоконагруженных деталей, таких как лопасти винтов самолетов и вертолетов, баллоны с рабочим давлением 400 и более атмосфер (>40 МПа). Разработанные на основе кордных стеклотканей лонжероны лопастей вертолетов позволили повысить усталостную прочность, снизить массу лопасти и конструкции вертолета в целом, что, в свою очередь, снизило расход топлива и увеличило полетную нагрузку и ресурс работы техники. Преимущество таких лопастей особенно проявилось при создании скоростных машин, когда наиболее полно реализуется способность композиционных материалов выдерживать большие переменные нагрузки, а также боевых вертолетов, лопасти которых должны сохранять работоспособность несмотря на серьезные повреждения конструкции. Лопастей из композиционных материалов имеют ресурс в 2–3 раза больше металлических, а в перспективе возможно 5–10-кратное увеличение ресурса. Разработанные высокопрочные стеклопластики обеспечили создание самых больших в мире (1800 мм) лопастей винтовентиляторных двигателей перспективных самолетов Ан-70, Ан-140, Ил-114 и др.

В процессе разработки теплозащитных и радиопрозрачных материалов для авиационной и ракетно-космической техники, работающих в усло-

виях высоких температур 800–900°C и больших скоростных напоров, созданы материалы на основе цельнотканых однослойных и многослойных заготовок и чехлов из термостойких кремнеземных и кварцевых волокон. Использование этих материалов обеспечило создание совершенно новых и оригинальных конструкций головных частей межконтинентальных баллистических ракет. Стеклопластики на основе многослойных тканей нашли также широкое применение для внешней и внутренней теплозащиты двигателей и корпусов.

Разработка стеклопластиков для изделий авиационной и ракетной техники, работающих в экстремальных условиях, потребовала решения ряда взаимосвязанных научно-технических проблем, к числу которых относятся – наряду с исследованием и выбором стекловолоконистых наполнителей – синтез связующих, а также изучение характера взаимодействия между связующим и наполнителем. Научно обоснованный направленный синтез связующих для стеклопластиков возможен при знании основных закономерностей, определяющих наиболее полную реализацию физико-механических характеристик стеклопластиков, – это связь между составом, структурой полимера, его свойствами, химическим составом стеклонаполнителя и характером обработки его поверхности.

При синтезе связующих для стеклопластиков различного назначения задача сводилась к устранению недостатков, присущих отдельным полимерным связкам, путем их (связующих) модификации и к достижению оптимального сочетания физико-механических и технологических свойств стеклопластиков на их основе. При разработке стеклопластиков исследовалась рецептура связующего, изучались основные направления реакции отверждения как чистых связующих, так и препрегов и определялись основные технологические параметры переработки стеклопластиков.

В производстве стеклопластиков в качестве связующих наибольшее применение нашли ненасыщенные полиэфирные, фенолформальдегидные, эпоксидные и кремнийорганические смолы. Эти полимерные материалы благодаря наличию сырьевой базы, достаточно хорошим технологическим и физическим свойствам послужили основой для создания конструкционных, радиотехнических и теплозащитных стеклопластиков.

Из теоретического рассмотрения строения стеклопластиков следует, что прочность связи между полимерным связующим и наполнителем определяется адгезией связующего к наполнителю, усадкой полимерного связующего в процессе отверждения и соотношением температурных коэффициентов линейного расширения (ТКЛР) стеклянного волокна и связующего в широком интервале рабочих температур. Одновременность работы компонентов стеклопластика зависит также от когезионной прочности связующего и его деформационных характеристик. Естественно, что максимальная прочность связи между стеклянным волокном и связующим обеспечивается только при хорошей пропитке стекловолоконистого наполнителя связующим.

На основе более 30 рецептур полимерных связующих и различных по структуре армирующих наполнителей в ВИАМ разработано более 100 марок стеклопластиков конструкционного, радио- и электротехнического, теплозащитного и теплоизоляционного назначения, которые нашли применение в различных отраслях промышленности. Объем их применения

исчисляется тысячами тонн. В табл. 1 приведены свойства некоторых стеклопластиков на основе эпоксидных связующих.

Создание высокопрочных стеклопластиков, сохраняющих удовлетворительную прочность в условиях средних и высоких температур, позволило расширить область их применения и увеличить надежность и качество изделий.

Таблица 1

Свойства стеклопластиков на основе эпоксидных связующих

Свойства	Значения свойств стеклопластика			
	ВПС-5	СТ-69Н	ВПС-30к	СТ-2227
Предел прочности, МПа:				
при растяжении	560	630	1050	560
при сжатии	440	550	570	550
при изгибе	570	900	1070	970
Модуль упругости при растяжении, ГПа	27	29	51	28
Диэлектрическая проницаемость при $10^6$ Гц	5,44	4,58	4,38	4,88
Тангенс угла диэлектрических потерь при $10^6$ Гц	0,012	0,016	0,034	0,014

Разработка стеклопластиков как многофункциональных композиционных материалов развивалась и по другим важнейшим направлениям. Так, в ВИАМ был разработан целый ряд термостойких стеклопластиков на основе фенольных, кремнийорганических, полиимидных и неорганических связующих. Эти материалы, длительно работающие при  $300-350^\circ\text{C}$  и кратковременно – до  $800^\circ\text{C}$ , нашли широкое применение в авиационной, ракетно-космической и других отраслях техники.

Основой термостойких матриц являются кремнийорганические и полиимидные полимеры, содержащие элементоорганические фрагменты, линейные или сетчатые карбо- и гетероциклические ароматические системы.

Интерес к кремнийорганическим связующим был обусловлен их высокой термоокислительной устойчивостью и хорошими электрическими свойствами. Ряд кремнийорганических полимеров обладают малой усадкой, хорошей адгезией к стеклянному волокну и значительной термической размероизменяемостью. Малая усадка кремнийорганических смол присуща только некоторым из них и связана с тем, что процесс отверждения смол идет в значительной степени за счет раскрытия циклов, хорошая адгезия объясняется наличием этокси- и гидроксильных групп в полимере, в результате чего могут возникать прочные ван-дер-ваальсовы силы, водородные и химические связи, а также вследствие однородности основной структуры кремнийорганического полимера и стекла. Большая размероизменяемость и малая прочность кремнийорганического полимера связаны со значительной его полидисперсностью, малой частотой сшивки и слабыми силами меж- и внутримолекулярного взаимодействия.

Исследования подтвердили, что модификацией полимеров на межмолекулярном уровне можно в широких пределах изменять их свойства,

влияя таким образом на исходные характеристики связующих. Например, модификация указанных смол поверхностно-активными веществами, снижающими поверхностное натяжение, позволяет заметно улучшить смачивание. Модификация высокомолекулярными соединениями, содержащими гидроксильные и этоксигруппы, существенно влияет на адгезию, термическую размероизменяемость и механические свойства полимеров.

К числу недостатков, присущих данному классу связующих, относятся сравнительно невысокая прочность стеклопластиков на их основе и высокие температуры переработки (250°C и выше).

При использовании специальных отвердителей удалось создать кремнийорганическое связующее К-9Х, на основе которого можно изготавливать стеклопластик при температуре до 150°C. Проводятся исследования по созданию композиционных материалов – керамопластов – на рабочую температуру >1000°C. Образцы таких материалов получены при высокотемпературной обработке пластиков на основе полиорганосилоксанов при отсутствии кислорода. С применением в качестве активного растворителя олигомера кремнийорганической смолы К-9-0 разработано кремнийорганическое связующее К-9-70, позволяющее изготавливать изделия методом пропитки под давлением. В табл. 2 приведены основные свойства кремнийорганических стеклопластиков.

Таблица 2

Свойства стеклопластиков на основе кремнийорганических связующих

Свойства	Значения свойств стеклопластика			
	СК-9ФА	СК-9ХК	СК-101	СК-9-70К
Предел прочности, МПа:				
при растяжении	380	270	140	350
при сжатии	115	100	80	140
при изгибе	200	200	135	275
Модуль упругости при растяжении, ГПа	26	24,7	14,6	27
Диэлектрическая проницаемость при 10 <sup>6</sup> Гц	4,66	3,53	3,70	3,13
Тангенс угла диэлектрических потерь при 10 <sup>6</sup> Гц	0,0026	0,0047	0,015	0,0046

Особую важность в производстве высокотемпературных стеклопластиков приобрели полиимидные связующие. Они не горючи, обладают высокой термостабильностью, радиационной стойкостью, грибостойкостью, стойкостью к коррозии и сохраняют свои физико-механические характеристики при повышенных температурах на достаточно высоком уровне.

Наибольшее применение при изготовлении стеклопластиков нашли полиимидные связующие СП-97с и СП-ЦМ. К числу недостатков указанных связующих относятся высокая температура их переработки (300–350°C) и повышенная пористость стеклопластиков на их основе.

С целью улучшения технологических свойств, уменьшения пористости полиимидных стеклопластиков без существенного снижения механи-

ческой прочности, теплостойкости и огнестойкости проведены исследования по модификации полиимидных связующих. Был разработан стеклопластик марки СТП-97К с температурой переработки 170°C без потери механической прочности, огнестойкости и дымовыделения.

Повышению теплостойкости стеклопластиков на основе полиимидных связующих способствует введение в структуру полиимида карбоновых групп. Стеклопластики с пониженной пористостью (СТМ-Ф) и более высокими механическими свойствами получены на основе олигоимидов ПАИС-104 и ПИК-250 с рабочей температурой 250°C. Свойства стеклопластиков на основе полиимидных связующих приведены в табл. 3.

Таблица 3

## Свойства стеклопластиков на основе полиимидных связующих

Свойства	Значения свойств стеклопластика			
	СТП-97с	СТП-97К	СТП-ЦМ	СТМ-Ф
Предел прочности, МПа:				
при растяжении	500	490	650	475
при сжатии	350	400	–	640
при изгибе	640	400	900	700
Модуль упругости при растяжении, ГПа	34,2	30	–	33
Диэлектрическая проницаемость при 10 <sup>6</sup> Гц	4,71	4,57	4,1	4,54
Тангенс угла диэлектрических потерь при 10 <sup>6</sup> Гц	0,012	0,0081	0,01	0,006

Стеклопластики на основе органических и элементоорганических матриц могут длительно эксплуатироваться только при температурах до 400°C. Однако в различных отраслях техники существует потребность в более термостойких материалах. Для создания таких стеклопластиков применяются матрицы на основе неорганических связующих (алюмофосфатных, алюмохромфосфатных). На основе алюмофосфатного связующего САФС был разработан ряд стеклопластиков: СТАФ-1, СТАФ-2, СТАФ-0 на основе стеклотканей КТ-11-ТО-ОП1 со специальным покрытием; АФКкв, в котором в качестве наполнителя использовалась кварцевая стеклоткань. По своей природе и устойчивости к длительному воздействию высоких температур стеклотекстолиты типа СТАФ больше соответствуют керамическому материалу. В то же время они изготавливаются по стандартной технологии, принятой для изготовления композиционных материалов, без высокотемпературного обжига. Неорганический стеклотекстолит в отличие от хрупкой керамики может подвергаться всем видам механической обработки алмазным и твердосплавным инструментом. Эти материалы обладают сравнительно невысокой механической прочностью, однако они выдерживают воздействие температур до 1100°C. Из него могут быть изготовлены изделия сложной конфигурации.

Свойства стеклопластиков на основе алюмофосфатного связующего приведены в табл. 4.

Таблица 4

## Свойства стеклопластиков на основе неорганических связующих

Свойства	Значения свойств стеклопластика			
	СТАФ-2		АФКкв	
	при температуре, °С			
	20	800	20	1100
Предел прочности, МПа:				
при растяжении	30	55	60	50
при сжатии	75	80	75	60
при изгибе	80	100	85	50
Диэлектрическая проницаемость при $10^6$ Гц	3,4	3,43	3,53	3,58
Тангенс угла диэлектрических потерь при $10^6$ Гц	0,015	0,023	0,008	0,02

В настоящее время термостойкие стеклопластики являются основными материалами для изготовления обтекателей антенн радиолокационных станций высокоскоростных ракет, из полиимидных стеклопластиков изготавливают большую номенклатуру деталей интерьера и различных теплоизолирующих конструкций.

Если в некоторых изделиях вместо стеклопластиков могут использоваться другие полимерные материалы или металлы, то в радиотехнических конструкциях они просто незаменимы. Тактико-технические характеристики авиационной техники, надежность и безопасность пассажирских перевозок во многом определяются качеством и надежностью в эксплуатации радиотехнических материалов, из которых изготавливаются радиопрозрачные антенные обтекатели. Кроме защиты антенны от внешнего воздействия материалы должны обеспечивать минимальные потери и искажения электромагнитной волны при прохождении через стенку обтекателя.

Сотрудниками ВИАМ на основе различных связующих и наполнителей создана серия радиопрозрачных материалов, нашедших широкое применение в антенных обтекателях сотовой, сетчатой и монолитной конструкций. Использование в составе стеклопластиков капиллярных (полых), кварцевых волокон и микросфер позволило получить материалы с уникальными диэлектрическими характеристиками. В результате внедрения радиопрозрачных стеклопластиков на основе этих наполнителей удалось достичь снижения массы конструкции обтекателей на 15–20% и повысить их тактико-технические характеристики. Институт в течение многих лет обеспечивает новые разработки в области высококачественных радиотехнических материалов и является ведущей организацией в этой области.

Следует отметить большой вклад ВИАМ в разработку новых технологических процессов изготовления крупногабаритных изделий из стеклопластика. Одним из примеров является изготовление конструкционных, радиотехнических и теплозащитных деталей методом пропитки под давлением. Внедрение этого метода на серийных заводах позволило изготавливать изделия высочайшего качества со стабильными физико-механическими

кими и радиотехническими характеристиками, а также полностью исключить контакт работающих с токсичными связующими.

Наряду с изготовлением головных частей и антенных обтекателей пропиткой под давлением на основе полимеризационных связующих (эпоксидных, полиэфирных) в институте впервые в мире была разработана и внедрена технология изготовления крупногабаритных (до 2 м) изделий с использованием высокотемпературных поликонденсационных связующих (фенольных, кремнийорганических, полиимидных).

Большой комплекс работ выполнен по созданию пожаробезопасных стеклопластиков и трехслойных конструкций для интерьеров внутренней отделки салонов пассажирских самолетов, отвечающих современным требованиям. Эта задача была поставлена в связи с созданием в нашей стране широкофюзеляжных пассажирских самолетов, способных перевозить 350 и более пассажиров. После длительных исследований из легких полимеров был создан интерьер для первого российского аэробуса Ил-86, отвечающий требованиям прочности и пожаробезопасности.

В последние годы, благодаря усилиям сотрудников института, созданы новые материалы с улучшенными по всем показателям (прочности, горючести, технологичности и внешнему виду) характеристиками, что позволило рекомендовать их не только для интерьеров самолетов, но и для отделки салонов различных транспортных средств, а также в строительстве.

По своим свойствам разработанные в ВИАМ стеклопластики находятся на уровне зарубежных аналогов, а стеклопластики на основе полых волокон – высокотермостойкие микросферотекстолиты – не имеют аналогов за рубежом. Применение таких материалов позволило обеспечить требуемые характеристики изделий авиационной и ракетно-космической техники.

Хотя в последнее время широко ведутся работы по созданию и применению композиционных материалов на других наполнителях (углеродных, органических), еще многие годы стеклопластики благодаря своей низкой стоимости и широкой сырьевой и производственной базе будут занимать ведущее место по объему применения в промышленности среди композиционных материалов. Стеклопластики также широко используются в составе гибридных композиционных материалов в сочетании с углеродными органоэластиками.

*Р.Р. МУХАМЕТОВ, К.Р. АХМАДИЕВА,  
М.А. КИМ, А.Н. БАБИН*

### **РАСПЛАВНЫЕ СВЯЗУЮЩИЕ ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ МЕТОДОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПКМ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ**

Производство высококачественных деталей из композитов конструкционного назначения включает в себя автоклавное прессование – дорогостоящий и трудоемкий технологический процесс. Для снижения затрат проводится поиск альтернативных технологий, обеспечивающих получение композитов с высокими удельными характеристиками [1]. Использование безавтоклавных технологий позволяет повысить технологичность и исключить большинство вспомогательных операций. К числу приоритетных альтернативных технологий, с помощью которых можно получить композиты с высоким уровнем упруго-прочностных