

Стеклотекстолит и трехслойная сотовая панель, изготовленные методом прессового формования по ускоренному режиму, по физико-механическим показателям и степени отверждения не уступают материалу, изготовленному методом прессового формования по обычному режиму (табл. 6).

Трехслойная сотовая панель на основе связующего ВСФ-16М, изготовленная по «crush core» технологии, удовлетворяет требования АП-25 по пожаробезопасности (трудногорающая, слабодымящая) и имеет тепловыделение ( $21 \text{ кВт/м}^2/5 \text{ кВт} \cdot \text{мин/м}^2$ ) на уровне мировых аналогов (связующие HexPly M25 и HexPly M41 фирмы Hexcel) (табл. 7).

Таким образом, применение низкомолекулярных высокорекреационно-способных фенолформальдегидных олигомеров предоставляет широкие возможности для разработки связующих с заданными комплексом технологических характеристик, температурно-временными параметрами процесса переработки и, в конечном итоге, для получения функциональных материалов с требуемым комплексом эксплуатационных свойств.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Cytac Engineered Materials Inc. Selector Guide. 1995. 37 p.
2. Bakelite AG. Resin systems for fibre composites. 2004. P. 56–57.
3. Hexcel Composites Publication FTA 131a. 2002 (электронная версия).
4. Ciba Polymers. Structural Adhesives. Ciba-Geigy Corp. 1994 (рекламный проспект).
5. Advanced materials for aircraft interiors // High Performance Composites. 2006 (электронная версия).

Г.Ф. ЖЕЛЕЗИНА

#### ОСОБЕННОСТИ РАЗРУШЕНИЯ ОРГАНОПЛАСТИКОВ ПРИ УДАРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Известно, что арамидные органопластики как конструкционные материалы отличаются высокой стойкостью к ударным воздействиям, которые в процессе эксплуатации авиационной техники могут быть различных типов и степени интенсивности: от соударения с мелкими камнями и птицами при взлете и посадке до поражения осколками разрушенных механизмов и взрывных устройств в нештатной ситуации.

Требования к ударной стойкости элементов авиационных конструкций постоянно повышаются. Корпус газотурбинного двигателя согласно требованиям АП-23 должен удерживать лопатку вентилятора в случае ее разрушения в корневом сечении (ранее сертификационные испытания предусматривали отрыв надпочечной части лопатки). Перегородка кабины экипажа самолета в соответствии с АП-25 должна препятствовать проникновению пуль легкого ручного оружия и осколков взрывных устройств.

Для *конструкционных органопластиков*, используемых для изготовления легких прочных обшивок вертолетов, стойкость к ударным воздействиям является одной из наиболее важных характеристик в связи с необходимостью эксплуатации вертолетов в различных природных и техногенных условиях.

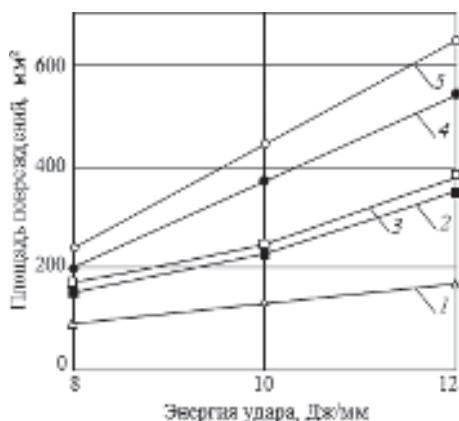


Рис. 1. Зависимость площади повреждения органопластиков на основе различных полимерных матриц от кинетической энергии удара:

1 – ВКО-19ТЛ на основе ткани Русар и эпоксисульфонового связующего ВК-36; 2 – Органит 11ТЛ на основе ткани СВМ и эпоксисульфонового связующего ВК-36; 3 – Органит 6НТ на основе ткани СВМ и эпоксидного связующего ЭДТ-10; 4 – Органит 7Т на основе ткани СВМ и эпокси-фенольного связующего 5-211-БН; 5 – опытный органопластик на основе ткани СВМ и полиимидного связующего СП-97

мого в настоящее время для изготовления обшивок хвостовых секций несущего винта вертолетов Ми-28Н и Ми-38. Помимо высокой ударной стойкости, органопластик ВКО-19ТЛ превосходит Органит 11ТЛ по устойчивости к поглощению влаги, герметичности, прочности и т.д. (табл. 1). Материал изготавливается по экологически безопасной технологии, включающей безрастворное совмещение армирующей ткани Русар со связующим ВК-36 (из расплава или в виде клеевой пленки) и формование органо-пластика прессовым или автоклавным способом. Применение органо-пластика ВКО-19ТЛ в конструкциях вертолетов позволит увеличить эксплуатационную надежность полимерных композиционных обшивок, в том числе в условиях теплого влажного климата.

Требование к увеличению баллистической стойкости органопластиков продиктовано необходимостью обеспечения защиты экипажа самолета от пуль легкого ручного оружия и осколков взрывных устройств при возникновении внештатной ситуации.

Создание *баллистически стойкого органопластика* ВКО-2ТБ потребовало разработки новых принципов построения структуры композита, таких как увеличение степени армирования до 80–85%, неравномерное распределение полимерной матрицы в объеме композита (преимущественно между слоями армирующего наполнителя), чередование слоев с различной степенью монолитности. Для формирования такой структуры органопластика использовали арамидную ткань в сочетании с фенолокаучуковым связующим, которое не проникает в межволоконное про-

На рис. 1 показана повреждаемость конструктивных органо-пластиков различного состава в зависимости от интенсивности ударного воздействия. Удар наносили падающим индентором, площадь повреждения определяли ультразвуковым теневым методом. При ударе с кинетической энергией от 8 до 12 Дж/мм<sup>2</sup> конструктивные органопластики имеют несквозные повреждения (трещины, расслоения), величина которых зависит от типа полимерной матрицы в составе композита.

Наибольшую устойчивость к низкоскоростному удару имеют органо-пластики Органит 11ТЛ и ВКО-19ТЛ на основе эпоксисульфонового связующего ВК-36, их повреждаемость при ударе существенно ниже, чем у конструктивных органопластиков на основе «хрупких» связующих: эпокси-фенольного и полиимидного.

Органопластик ВКО-19ТЛ разработан в 2011 году взамен органо-пластика Органит 11ТЛ, применя-

Таблица 1

## Свойства конструкционных органопластиков

Свойства	Значения свойств органопластиков	
	Органит 11ТЛ	ВКО-19ТЛ
Толщина монослоя, мм	0,11	0,11
Влагопоглощение за 90 сут, %	3,1	1,63
Предел прочности при растяжении, МПа	670	750
Модуль упругости при растяжении, ГПа	30,0	32,0
Предел прочности при изгибе, МПа	510	510
Удельная ударная вязкость при изгибе, кДж/м <sup>2</sup>	147	250
Предел прочности при межслоевом сдвиге, МПа	36	45
Длительная прочность при растяжении на базе 500 ч, МПа	380	540
Предел прочности при растяжении после выдержки 3 мес в камере тропического климата, МПа	–	495
Прочность при расслаивании, Н/см	6,8	8,4

странство благодаря высокой технологической вязкости. При этом связующее обеспечивает высокую адгезию между слоями композита при объемном содержании 10–15%. Структура органопластика ВКО-2ТБ позволяет практически полностью реализовать баллистическую стойкость арамидной ткани (не менее чем на 87%) за счет пластического деформирования материала при ударе. Для сравнения: реализация баллистической стойкости арамидной ткани в составе конструкционного органопластика типовой структуры составляет 25–32%.

Органопластик ВКО-2ТБ имеет высокую прочность, но низкую конструкционную жесткость (табл. 2). Область применения материала – бронезащитные конструкции, к которым предъявляются требования по формоустойчивости (плоские, одинарной и двойной кривизны бронепанели, защитные шлемы, ненагруженные перегородки).

Таблица 2

## Физико-механические характеристики тринадцатислойного органопластика ВКО-2ТБ

Свойства	Значения свойств
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	1072–1074
Поверхностная плотность, кг	5,7
Прочность при отслаивании, кН/м	2,12
Предел прочности при растяжении, МПа	670
Предел прочности при изгибе, МПа	60
Модуль упругости при изгибе, ГПа	3,60
Баллистическая стойкость	Материал устойчив к проникновению пуль легкого ручного оружия и осколков взрывных устройств в соответствии с АП-25

В конструкции самолета «Суперджет-100» органопластик ВКО-2ТБ применяется для изготовления баллистической части перегородки кабины экипажа в сочетании с металлической перегородкой, которая выполняет несущую функцию. Органопластик ВКО-2ТБ (при массе  $1 \text{ м}^2 : 5,7 \text{ кг}$ ) обеспечивает баллистическую стойкость перегородки в соответствии с требованиями АП-25 п. 25.795. Материал устойчив к проникновению пуль легкого ручного оружия и осколков взрывных устройств с параметрами, соответствующими параметрам следующих демонстрационных снарядов: снаряд № 1 – пуля калибра 9 мм с полностью металлической оболочкой, круглой головкой (FVJ RN номинальной массой 8 г и скоростью 436 м/с); снаряд № 2 – пуля калибра .44 Магнум с пустой полостью (JHP), номинальной массой 15,6 г и скоростью 436 м/с.

После баллистического воздействия органопластик ВКО-2ТБ не имеет сквозных повреждений, максимальная глубина проникновения пули составляет 30% от толщины органопластика, в зоне остановки пули наблюдаются локальные расслоения по границе между слоями материала (рис. 2).

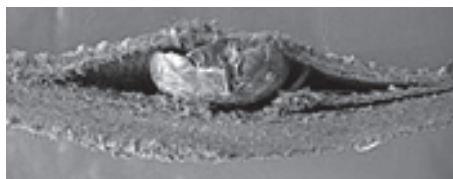


Рис. 2. Органопластик ВКО-2ТБ после баллистических испытаний

Таблица 3

**Свойства органопластика ВКО-2ТБ после воздействия факторов внешней среды**

Условия воздействия	Прочность при растяжении, МПа	Прочность при отслаивании, кН/м	Сохранение баллистической стойкости, %
Тепловлажностное старение (80 сут при 70°C, $\phi = 95\%$ )	520	1,23	100
Термоциклирование (20 циклов: 3 ч при 70°C, затем 3 ч при -60°C)	740	1,97	100
Камера тропического климата (90 сут)	670	1,99	100

Органопластик ВКО-2ТБ сохраняет работоспособность в условиях повышенной влажности, перепадов температур, воздействия плесневых грибов (табл. 3) и может эксплуатироваться в различных климатических зонах при температуре от -60 до +70°C. Материал не представляет пожарной опасности и относится в соответствии с АП-25 п.25.853 к группе «трудногорающие» (не поддерживает горение после воздействия 60 с пламени газовой горелки с диаметром факела 40 мм и температурой 840–850°C). По отношению к металлам органопластик ВКО-2ТБ является коррозионно безопасным и может применяться в контакте с алюминиевыми и титановыми сплавами. Детали из органопластика ВКО-2ТБ изготавливаются методами прессового или автоклавного формования препрега (ТУ 1-595-11-975–2007).

Для повышения защитных характеристик брони органопластик ВКО-2ТБ целесообразно сочетать с другими материалами: титановыми сплавами, керамикой (табл. 4). Создание комбинированных бронематериалов – перспективное направление, которое позволит снизить на 30–50% массу защитных конструкций.

Таблица 4

## Баллистическая стойкость комбинированных бронематериалов

Состав преграды	Поверхностная плотность брони, кг/м <sup>2</sup>	Поверхностная плотность органо-пластика, кг/м <sup>2</sup>	Условия воздействия	Баллистическая стойкость
Керамика + ВКО-2ТБ	35	14	Пуля Б-32 калибра 7,62 мм, скорость 800 м/с	Отсутствие сквозных повреждений
Титан + ВКО-2ТБ	61,6	28	Стальной шарик Ø9 мм, массой 3 г, скорость 2000 м/с	То же

В авиационных двигателях Д-18Т, ПС-90А конструкционные органопластики Органит 6НТ и Органит 6Н используются в качестве удерживающего устройства корпуса вентилятора для обеспечения безопасности полетов в случае разрушения лопатки вентилятора при попадании в двигатель птиц или посторонних предметов. Снижение массы удерживающего устройства при одновременном повышении его эффективности – эта проблема возникла в связи с ужесточением требований норм АП-23 по пробиваемости корпуса вентилятора и требует решения при модернизации и разработке новых двигателей.

Для решения этой задачи предложен *арамидный слоисто-тканый материал*, структура которого выбрана с учетом того, что к нему не предъявляются требования по конструкционной жесткости и формоустойчивости. Удерживающее устройство при штатной работе двигателя не несет нагрузки

и конструктивно расположено на внешней поверхности жесткого металлического корпуса.

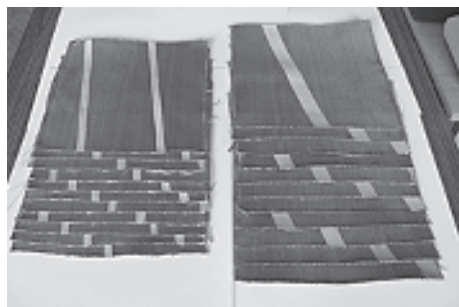


Рис. 3. Заготовки для формования арамидного слоисто-тканого материала

Основу арамидного слоисто-тканого материала составляет баллистически стойкая арамидная ткань Русар (арт. 84127) с поверхностной плотностью 150 г/м<sup>2</sup> (ТУ 8378-020-00320992–2004), слои которой соединены полимерным связующим для предотвращения их смещения в процессе эксплуатации. Помимо баллистической стойкости ткань имеет высокие технологические свойства (высокая плотность текстильной

структуры и гибкость) и пригодна для изготовления удерживающего устройства методом намотки непосредственно на металлический корпус.

Отличительной особенностью арамидного слоисто-тканого материала является то, что с целью снижения массы и повышения реализации баллистической стойкости ткани, соединение слоев ткани осуществляли не по всей поверхности, а локальными зонами (рис. 3).

Баллистическую стойкость арамидного слоисто-тканого материала различной структуры определяли на баллистическом измерительном комплексе ОАО «НИИ стали». Материал подвергали высокоскоростному удару стальным шариком массой 1 г, диаметром 6,35 мм из баллистического ствола калибром 7 мм по ГОСТ РВ 8470-001–2008 с определением  $v_{50}$  – скорости 50%-ного непробития (скорости шарика, при которой вероятность непробития преграды составляет 50%). Установлено, что в арамидном слоисто-тканом материале площадь зон соединения должна составлять 10–25% поверхности слоев. Реализация баллистической стойкости ткани в составе слоистого материала возрастает с 89 до 97% при уменьшении площади зон соединения со 100 до 10%.

Арамидный слоисто-тканый материал (также как органопластик ВКО-2ТБ) не является полностью монолитным композитом и содержит арамидные волокна, не защищенные связующим от воздействия факторов внешней среды, поэтому для обеспечения эксплуатационной надежности этих материалов разработаны способы защиты, включающие нанесение систем покрытий на основе эмалей ВЭ-69 и ФП-566 и применение пленочного герметика марки ВГМ-Л.

Таким образом, исследование особенностей разрушения арамидных органопластиков при низкоскоростном и высокоскоростном ударном воздействии подтверждает, что определяющее значение для ударной стойкости органопластиков имеет структура композита. Органопластики ВКО-2ТБ и арамидный слоисто-тканый материал, структура которых принципиально отличается от структуры традиционных композиционных материалов (частичное отсутствие монолитности, высокая степень армирования и т.д.), имеют повышенную в 3–4 раз стойкость к ударному воздействию по сравнению с типовыми конструкционными органопластиковыми материалами, но уступают им по конструкционной жесткости. Дальнейшее совершенствование структуры ударостойких арамидных органопластиков (использование принципа градиентной жесткости, оптимизация состава и т.д.) позволит разработать композиты, сочетающие в себе бронезащитные и конструкционные функции, и расширить область применения этих материалов.

*Г.М. ГУНЯЕВ, Л.В. ЧУРЦОВА,  
О.А. КОМАРОВА, А.Г. ГУНЯЕВА*

### **КОНСТРУКЦИОННЫЕ УГЛЕПЛАСТИКИ, МОДИФИЦИРОВАННЫЕ НАНОЧАСТИЦАМИ**

Наномодифицированные композиты на основе волокнистых армирующих наполнителей и полимерных связующих, содержащих в составе наночастицы, предназначены для использования в высоконагруженных и особо ответственных изделиях авиационной, ракетно-космической, атомной, энергетической и машиностроительной промышленности.