

# **Основы производства ЛА и АД. Конструкции их композиционных материалов**

**Макин Ю.Н., доктор технических наук, профессор**

## **1. Основные свойства авиационных композиционных материалов**

**1.1. Композиционный материал (композит)** - конструкционный (металлический или неметаллический) материал, в котором имеются усиливающие его элементы в виде нитей, волокон или хлопьев более прочного материала. Примеры композиционных материалов: пластик, армированный борными, углеродными, стеклянными волокнами, жгутами или тканями на их основе; алюминий, армированный нитями стали, бериллия. Комбинируя объемное содержание компонентов, можно получать композиционные материалы с требуемыми значениями прочности, жаропрочности, модуля упругости, абразивной стойкости, а также создавать композиции с необходимыми магнитными, диэлектрическими, радиопоглощающими и другими специальными свойствами.

### **1.2. Особенности композитов**

Однородные или, как их еще называют, гомогенные конструкционные материалы (к которым относятся и традиционные металлические сплавы) имеют значительный теоретический резерв в повышении своей прочности. Это значит, что прочность применяемых в настоящее время гомогенных конструкционных материалов теоретически может быть увеличена в несколько раз. Однако, техническая прочность этих материалов уже близка к предельно допустимой. Объясняется это тем, что разрушение материала под нагрузкой определяется величиной и количеством микрповреждений (дефектов) в материале. Устранить эти дефекты в гомогенном материале невозможно. В то же время, освободиться от них можно, если взять материал в виде тонкой нити (волокна). Чем тоньше волокно, тем меньше дефектов остается в его сечении. Для использования в конструкциях волокна необходимо заключить в матрицу с целью обеспечения работы волокон на сжатие, сдвиг, растяжение.

Характер разрушения волокнистых композиций при растяжении зависит от объемного содержания волокон и матрицы, а также от соотношения их деформаций до разрушения. Ориентация волокон также оказывает решающее влияние на механические свойства композиции.

Композиты имеют иной механизм усталостного разрушения при циклических нагрузках и обладают более высоким сопротивлением усталости, чем традиционные материалы. Значительно меньшая, чем у металлов, чувствительность композитов к концентрации напряжений и низкая скорость распространения в них трещин обеспечивают повышенную долговечность конструкций из этих материалов.

У деталей из полимерных композитов спектр собственных колебаний гораздо шире, чем у деталей из металлов. Если для алюминиевых, титановых сплавов и сталей спектры собственных частот колебаний близки к резонансным и отход от резонансного режима требует изменения

геометрических размеров деталей, то для высокомодульных полимерных материалов это достигается в основном только изменением ориентации волокон в отдельных слоях. Применение композитов, в частности углепластиков, характерной особенностью которых является низкий температурный коэффициент линейного расширения, позволяет уменьшить термонапряжённость конструкции. Достоинства композитов связаны с имеющейся возможностью широкого варьирования практически всех свойств материала, что достигается путем подбора составляющих компонентов, их количественного соотношения, распределения и ориентации в объеме материала. Это позволяет получать конструкционные материалы многофункционального назначения зачастую с противоположными служебными свойствами.

### **1.3. Основные преимущества композитов:**

- исключительно высокая удельная прочность и жесткость (в 2...3 раза превосходят металлы);
- уникальные показатели сопротивления усталости (предел выносливости на разрыв близок к пределу прочности, стойкость к вибрационным и акустическим нагрузкам);
- ликвидация так называемой избыточности "конструктивной массы", неизбежной в тонкостенных металлических конструкциях;
- технологичность при создании крупногабаритных конструкций сложной аэродинамической формы;
- повышение качества аэродинамической поверхности и жесткостных характеристик оболочек;
- управляемая в широких диапазонах анизотропия свойств.

### **1.4. Состав композитов.**

Композиционные материалы состоят из металлической матрицы (чаще Al, Mg, Ni и их сплавы), упрочненной высокопрочными волокнами (волокнистые материалы) или тонкодисперсными тугоплавкими частицами, не растворяющимися в основном металле (дисперсно-упрочненные материалы). Металлическая матрица связывает волокна (дисперсные частицы) в единое целое. Волокно (дисперсные частицы) плюс связка (матрица), составляющие ту или иную композицию, получили название "композиционные материалы".

### **1.5. Композиты с неметаллической и металлической матрицей.**

В качестве неметаллических матриц используют полимерные, углеродные и керамические материалы. Из полимерных матриц наибольшее распространение получили эпоксидная, фенолоформальдегидная и полиамидная. Углеродные матрицы коксованные или пироуглеродные получают из синтетических полимеров, подвергнутых пиролизу. Матрица связывает композицию, придавая ей форму. Упрочнителями служат волокна: стеклянные, углеродные, борные, органические, на основе нитевидных кристаллов (оксидов, карбидов, боридов, нитридов и других), а также металлические (проволоки), обладающие высокой прочностью и жесткостью (рис. 1). Примеры их применения даны на рис. 2.

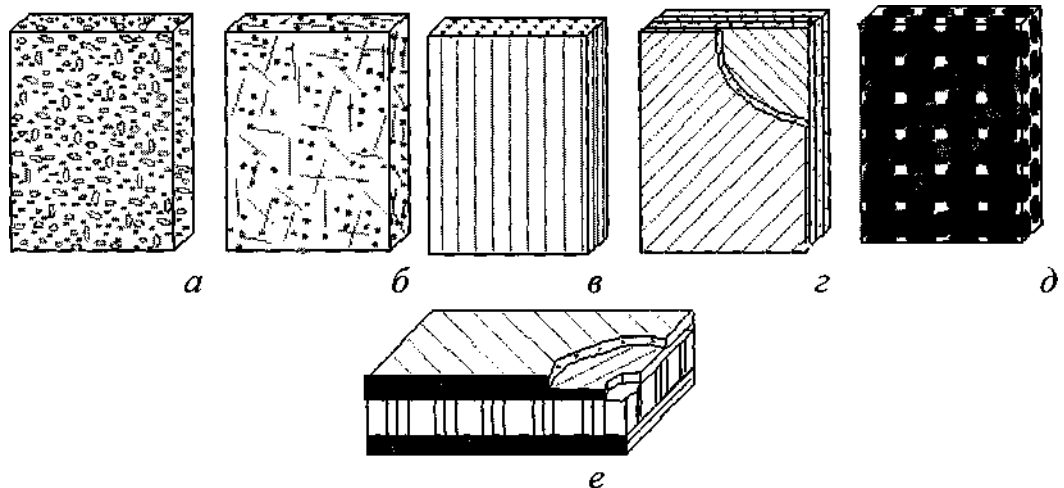


Рис. 1. Примеры строения композитов: а) усиленные частицами; б) усиленные нарубленными волокнами; в) однонаправленные композиты; г) слоистые композиты; д) усиленные тканями; е) сотовые конструкции композитов.

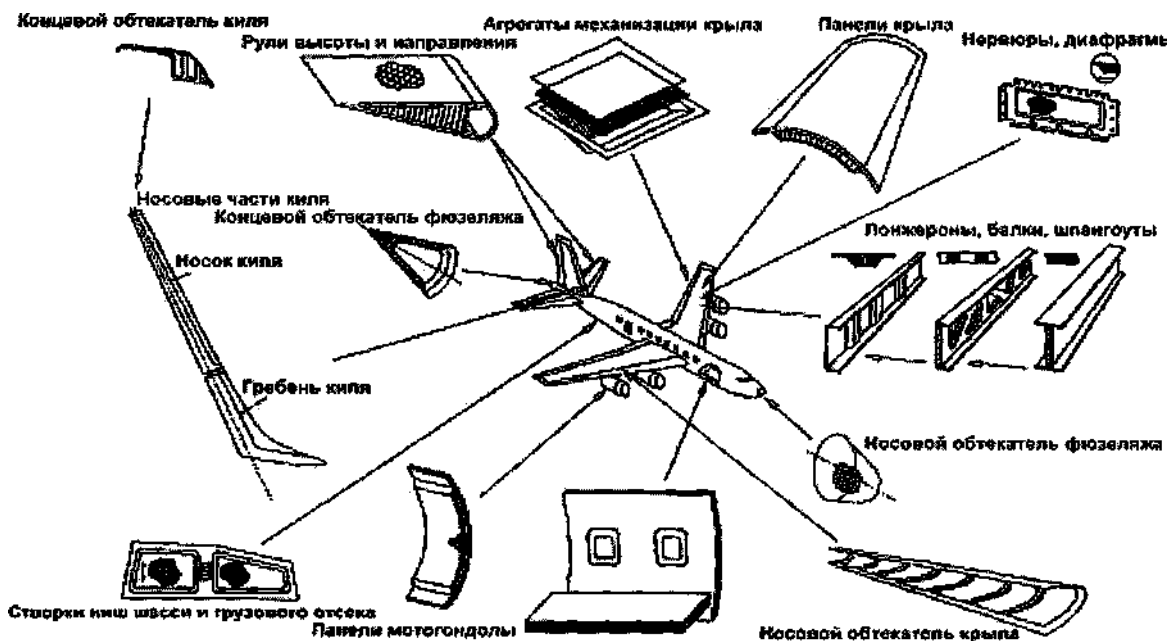


Рис. 2. Примеры применения композитов с матрицей и сотовых трехслойных конструкций для авиации

Свойства композиционных материалов зависят от состава компонентов, их сочетания, количественного соотношения и прочности связи между ними. Армирующие материалы могут быть в виде волокон, жгутов, нитей, лент, многослойных тканей. Содержание упрочнителя в ориентированных материалах (от объёма) составляет 60...80 %, в неориентированных (с дискретными волокнами и нитевидными кристаллами) - 20...30 %. Чем выше прочность и модуль упругости волокон, тем выше прочность и жесткость композиционного материала. Свойства матрицы определяют прочность композиции при сдвиге и сжатии и

сопротивление усталостному разрушению. По виду упрочнителя композиционные материалы классифицируют на стекловолокниты, карбоволокниты с углеродными волокнами, бороволокниты и органоволокниты.

В слоистых материалах волокна, нити, ленты, пропитанные связующим, укладываются параллельно друг другу в плоскости укладки. Плоские слои собираются в пластины. Прочностные свойства при этом получают анизотропными. Для работы материала в изделии важно учитывать направление действующих нагрузок. Можно создать материалы как с изотропными, так и с анизотропными свойствами. Можно укладывать волокна под разными углами, варьируя свойства композиционных материалов. От порядка укладки слоев по толщине пакета зависят изгибные и крутильные жесткости материала. Применяется укладка упрочнителей из трех, четырех и более нитей. Наибольшее применение имеет структура из трех взаимно перпендикулярных нитей. Упрочнители могут располагаться в осевом, радиальном и окружном направлениях. Трехмерные материалы могут быть любой толщины в виде блоков, цилиндров. Объемные ткани увеличивают прочность на отрыв и сопротивление сдвигу по сравнению со слоистыми. Система из четырех нитей строится путем разложения упрочнителя по диагоналям куба. Структура из четырех нитей равновесна, имеет повышенную жесткость при сдвиге в главных плоскостях. Однако создание четырех направленных материалов сложнее, чем трех направленных.

## **2. Свойства волокнистых армирующих материалов**

### **2.1. Полимерные композиционные материалы (полимеры)**

Применение полимеров на основе углеволокна - одно из эффективных средств снижения массы конструкции. Совершенствование прочностных, деформационных, теплофизических характеристик углепластиков и повышение их теплостойкости дает возможность использовать их не только в слабо- и средненагруженных конструкциях пассажирских самолетов (интерьер, средства механизации крыльев, зализы и т.п.), но и в перспективе, по аналогии с военными самолетами, в высоконагруженных деталях типа крыльев, вертикальных рулей и др.

С целью создания теплостойких полимеров, способных работать при температурах 300...400 °С, разработаны научные основы получения полимерной матрицы непосредственно на наполнителе предварительно полученного полимера.

### **2.2. Стекланные волокна.**

Широко используются при создании неметаллических композитов - стеклопластиков. При сравнительно малой плотности они имеют высокую прочность, низкую теплопроводность, теплостойки, стойки к химическому и биологическому воздействиям.

Обычно форма сечения стекловолокна (рис. 3) – круг (1), но выпускаются и полые волокна (2), шестиугольник (3) и профилированные с формой сечения в виде треугольника (4), квадрата (5), прямоугольника (6).

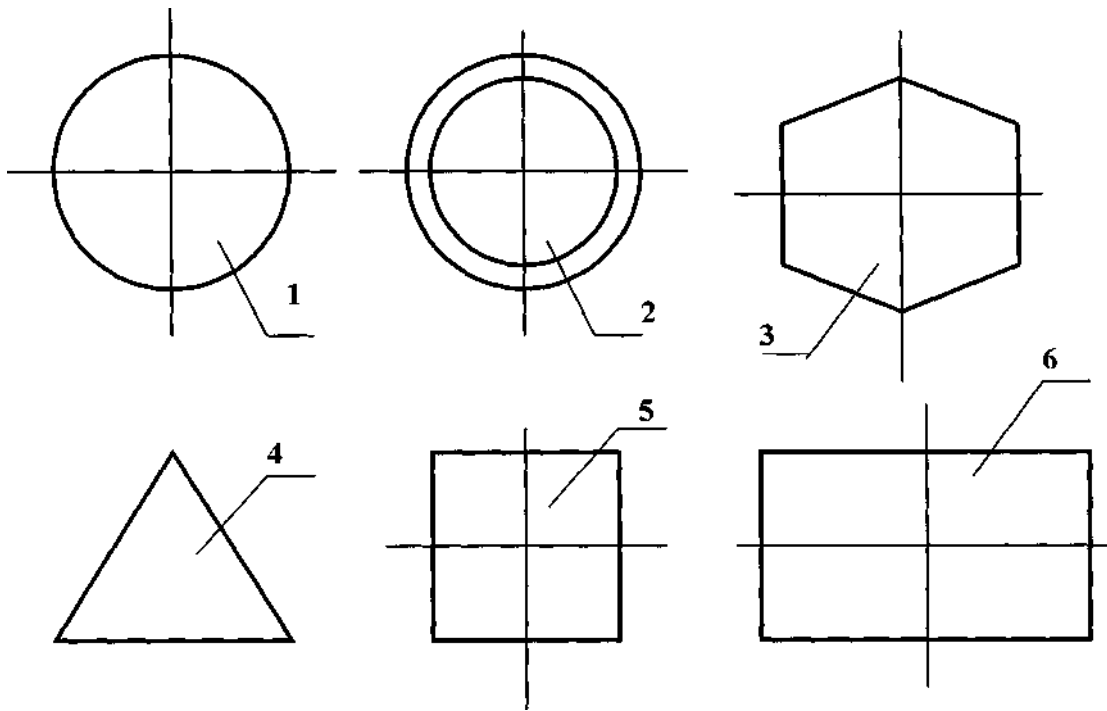


Рис.3. Формы сечений стеклянных волокон

Изготавливаются непрерывные и штапельные стекловолокна. Непрерывные волокна получают вытягиванием расплавленной стекломассы через фильеры диаметром 0,8...3,0 мм и дальнейшим быстрым вытягиванием до диаметра 3...19 мкм. Штапельные волокна получают вытягиванием непрерывного стекловолокна и разрывом его на отрезки определенной длины или разделением расплавленного стекла на отдельные части, которые затем растягивают (раздувают) на короткие волокна центробежным или комбинированным способом. Изготавливаются в основном кварцевые, кремнеземные и алюмоборосиликатные волокна и некоторые другие.

Кварцевые волокна в основном получают из природных кварцевых стрежней вытягиванием. Кремнеземные волокна, содержащие 94... 99%  $\text{SiO}_2$ , получают выщелачиванием из силикатных стекол оксидов алюминия, бора, кальция, магния. Наиболее широко применяются бесщелочные алюмоборосиликатные волокна и волокна из высокопрочного стекла.

Поверхность стеклянных волокон покрывают замасливателем, который предотвращает истирание волокон при транспортировании и различных видах переработки. После удаления замасливателя, на поверхность волокон в ряде случаев наносят связующее - вещества, способствующие созданию прочной связи на границе волокна, обычно, кремнийорганические соединения. Наиболее перспективны активные замасливатели, выполняющие двойную функцию - предохранение волокна от разрушения и улучшение адгезии между стеклом и полимерной матрицей.

По прочности стекловолокна значительно (на один - два порядка) превосходят стекла в виде блоков. На прочность стекловолокон определяющее влияние оказывает состояние поверхности волокон, которое зависит от условий формования.

Стекловолокна весьма термостойки. При повышении температуры до 1200° К

модуль упругости кварцевого волокна возрастает с 74 ГПа (при 300° К) до 83 ГПа. Бесщелочные алюмоборосиликатные стекла начинают снижать свою прочность при 600° К, натрийкальцийсиликатные, боратные, свинцовые и фосфатные - при 400...500° К. Модуль упругости стекловолокон снижается незначительно вплоть до температуры размягчения.

Стекловолокна, применяемые в качестве армирующих элементов композитов, выпускаются в виде жгутов и нитей из элементарных волокон, лент, тканей разнообразного плетения, матов, холстов и других нетканых материалов. Для изготовления изделий из стеклопластиков методом намотки промышленностью выпускаются стекловолокна в виде непрерывных жгутов. Тканые армирующие материалы получают путем текстильной переработки крученой комплексной нити, жгута, пряжи. Для текстильной переработки используются стекловолокна диаметром 3...11 мкм. Тканые армирующие материалы технологичны, удобны при изготовлении крупногабаритных изделий.

Толстостенные изделия, если при этом необходимо обеспечить высокую межслойную прочность, изготавливают из заготовок объемного плетения или трехмерного армирования. Рулонные нетканые армирующие материалы, называемые холстами, представляют собой неориентированные наполнители из непрерывных или штапельных стекловолокон, скрепленных между собой связующим (жесткие холсты) или механическим прошиванием стеклянными нитями (мягкие холсты). Жесткие холсты из рубленых нитей применяются для изготовления методами контактного и вакуумного формирования крупногабаритных стеклопластиковых изделий, мягкие - в основном для изготовления изделий методом прессования.

### **2.3. Органические волокна**

Волокна на основе ароматических полиамидов (арамидов). Используются для получения высокопрочных и высокомодульных композитов с полимерной матрицей органопластиков. Высокомодульные и высокопрочные арамидные волокна обладают уникальным комплексом свойств: высокими прочностью при растяжении и модулем упругости, термостабильностью, позволяющей эксплуатировать их в широком температурном интервале, хорошими усталостными и диэлектрическими свойствами, незначительной ползучестью. Благодаря низкой плотности арамидные волокна по удельной прочности превосходят все известные в настоящее время армирующие волокна и металлические сплавы, уступая по удельному модулю упругости углеродным и борным волокнам. Прочность арамидных волокон после ткачества составляет 90% исходной прочности нитей, что дает возможность применять их в качестве тканых армирующих материалов.

### **2.4. Углеродные волокна.**

Обладают комплексом ценных, а по ряду показателей уникальных, механических и физико-химических свойств. Углеродным волокнам присущи высокая теплостойкость, низкие коэффициенты трения и термического расширения, высокая стойкость к атмосферным воздействиям

и химическим реагентам, различные электрофизические свойства (от полупроводников до проводников). Они могут иметь сильно развитую поверхность (1000...2000 м<sup>2</sup>/г). Углеродные волокна имеют высокие значения удельных механических характеристик. Углеродные волокна делятся на карбонизованные (температура термообработки 1173...2273°К, содержание углерода 80...90 %) и графитизированные (температура термообработки до 3273°К, содержание углерода выше 99 %).

Существует два основных типа исходных материалов для углеродных волокон: химические волокна и из нефтяных каменноугольных (углеродных) пеков. Процесс получения углеродных волокон включает текстильную подготовку материала, окисление, высокотемпературную обработку (карбонизацию и графитизацию). В процессе высокотемпературной обработки осуществляется переход от органического к углеродному волокну. Обработка проводится в вакууме или в инертной среде- азоте, гелии, аргоне. Волокна из нефтяных каменноугольных пеков формируют, пропуская расплав пеков при температуре 370...620° К через фильеры диаметром 0,3 мм. Затем сформированное волокно вытягивается до степени вытяжки 100000...500000%. При этом достигается высокая ориентация макромолекул волокна. Карбонизация и графитизация пековых волокон производится аналогично. Структура углеродного волокна показана на рис.4.

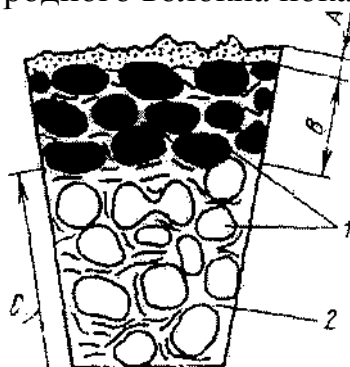


Рис.4. Структура углеродного волокна: А- поверхностный слой; В- высокоориентированная зона; С- низкоориентированная зона; 1- микрофибриллы; 2- аморфный углерод.

Углеродные волокна, применяемые для армирования конструкционных материалов, условно делятся на две группы: высокомодульные и высокопрочные. Получены также волокна, в которых сочетаются высокая прочность и высокий модуль упругости.

### **3. Применение композитов в конструкциях самолётов, вертолётов и двигателей.**

#### **3.1. Концепция «интегральное качество» при конструировании**

Авиационная техника базируется на использовании новейших научно-технических достижений во всех современных областях знаний, являясь по существу катализатором научно-технического прогресса как в области

фундаментальных наук (аэродинамика и газодинамика, механика, физика твердого тела и т.д.) так и в области прикладных исследований (материаловедение, приборостроение, электроника, авионика и т.д.) Современные самолеты и вертолеты проектируются и производятся с учетом особых требований к безопасности полетов и чрезвычайно жестких условий эксплуатации: многократно повторяемых пиковых нагрузок, форсированных режимов полетов во всепогодных и всеклиматических условиях, резких перепадов температур, аэродинамического характера внешних силовых воздействий. Для современной гражданской авиации (магистральные гражданские и транспортные самолеты, самолеты для местных воздушных линий, многофункциональные вертолеты и др.) чрезвычайно важное значение имеют увеличение их ресурса, снижение воздействия авиации на окружающую среду, комфортность, а также минимизация размеров агрегатов. Решение этих задач возможно благодаря новому подходу к выбору конструкционных и функциональных материалов, основанному на понятии интегрированного качества авиационных материалов. Интегрированное качество авиационных материалов определяется параметрами, объединенными в несколько групп. Среди них важнейшими являются: весовая эффективность, технологичность (включая эксплуатационную), экономичность, ремонт и контролепригодность, а также и ряд других. Весовая эффективность определяется преимущественно характеристиками прочности, удельной прочности.

Оценить ресурс и долговечность ЛА позволяют характеристики надежности материала, такие как: выносливость и сопротивление малоцикловой усталости, скорость роста трещины усталости, статическая и циклическая трещиностойкость, сопротивление коррозионному растрескиванию, коррозии под воздействием напряжений, расслаивающей коррозии и другим видам коррозии, совместимость с другими материалами, противодействие "эффекту Ребиндера" (адсорбционное понижение прочности, изменение механических свойств твердых тел вследствие физико-химических процессов, вызывающих уменьшение поверхностной, межфазной энергии тела; проявляется в снижении прочности и возникновении хрупкости, уменьшении долговечности; эффект открыт П. А. Ребиндером в 1928 г.). Надежность конструкций во многом определяется сопротивлением металла распространению уже имеющейся трещины (вязкостью разрушения), а не только ее зарождению.

### **3.2. Примеры использования композитов в конструкциях ЛА**

Материальный облик ЛА Российского производства определяют более 120 конструкционных и функциональных материалов, разработанных в рамках выполнения президентской программы "Развитие гражданской авиационной техники России" и внедренных в самолетах Ил-96М, Ту-204, Ил-114, Бе-200, последних модификациях Ту-154М, Ил-86идр.[10]. Благодаря применению новых алюминиевых сплавов, полимерных композиционных материалов, титановых сплавов, конструкционных сталей, комплекса неметаллических материалов — лакокрасочных покрытий, клеев, герметиков



— обеспечено повышение срока эксплуатации изделий (в 1,5...2 раза), ресурса в (1,5...2 раза), пожаробезопасности интерьера, межремонтного срока при эксплуатации. Структура потребления конструкционных материалов в авиастроении показана на рис. 5.

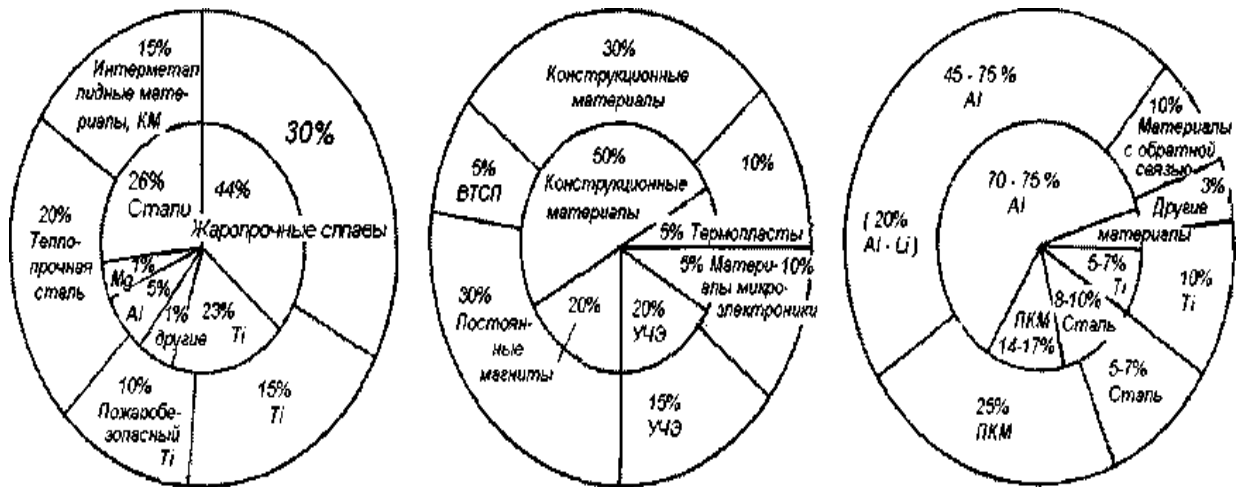


Рис.5. Структура потребления материалов в авиастроении: ВТСП - материалы высокотемпературной сверхпроводимости; УЧЭ - материалы для упругих чувствительных элементов.

Несмотря на то, что композиты всё шире применяются в самолётостроении, основным конструкционным материалом для планера остаются алюминиевые сплавы. В 2000...2015 гг. их доля в структуре применения сохраняется на уровне 50%. Задача повышения надежности, улучшения характеристик трещиностойкости, повышения усталостных свойств сплавов для фюзеляжа, крыла и силового набора решалась путем значительного повышения чистоты сплавов (уменьшение содержания примесей кремния и железа, количества избыточных фаз), разработки новых режимов термообработки, улучшения качества полуфабрикатов.

Благодаря существенным преимуществам по удельной прочности и жесткости, исключительному сочетанию конструкционных, теплофизических, специальных свойств композиты все в большем объеме применяются в конструкциях ЛА. Если в конструкции планера и в интерьере самолета Ту-204 объем применения композитов составил 14% от массы, то в перспективных пассажирских аэробусах (типа А380) он достигнет 25%. Применение композитов в конструкции ЛА иллюстрировано рис. 6.

Опыт АНТК им. А.Н.Туполева по применению органопластиков на предыдущих самолетах для изготовления сотовых и монолитных панелей стабилизатора с рабочей температурой выше 100°C показал их высокую надежность в эксплуатации, особенно при техническом обслуживании. В деталях интерьера и обтекателей радиолокационных станций применен высокотехнологичный материал сферотекстолит, разработанный в Всероссийском Институте Авиационных Материалов (ВИАМ). Широко используются угле- и стеклопластики, изготовленные по препреговой

технологии (слоистые наполнители (стеклоткани, углеродные ткани), пропитанные терморезистивным связующим, частично отвержденные. Используют в производстве изделий средних и больших габаритов и перерабатывают на гидравлических прессах с большими размерами плит, оснащенных выдвижными смолами). Панели пола выполнены из органопластика в сочетании с сотами на основе полимерной бумаги. Для изготовления обтекателей радиолокационных станций применены стеклопластики на основе эпоксидно-фенольного связующего. При изготовлении агрегатов самолета из угле- и органопластиков использовано эпоксидное универсальное связующее ЭДТ-69Н с рабочей температурой 120...130°С.

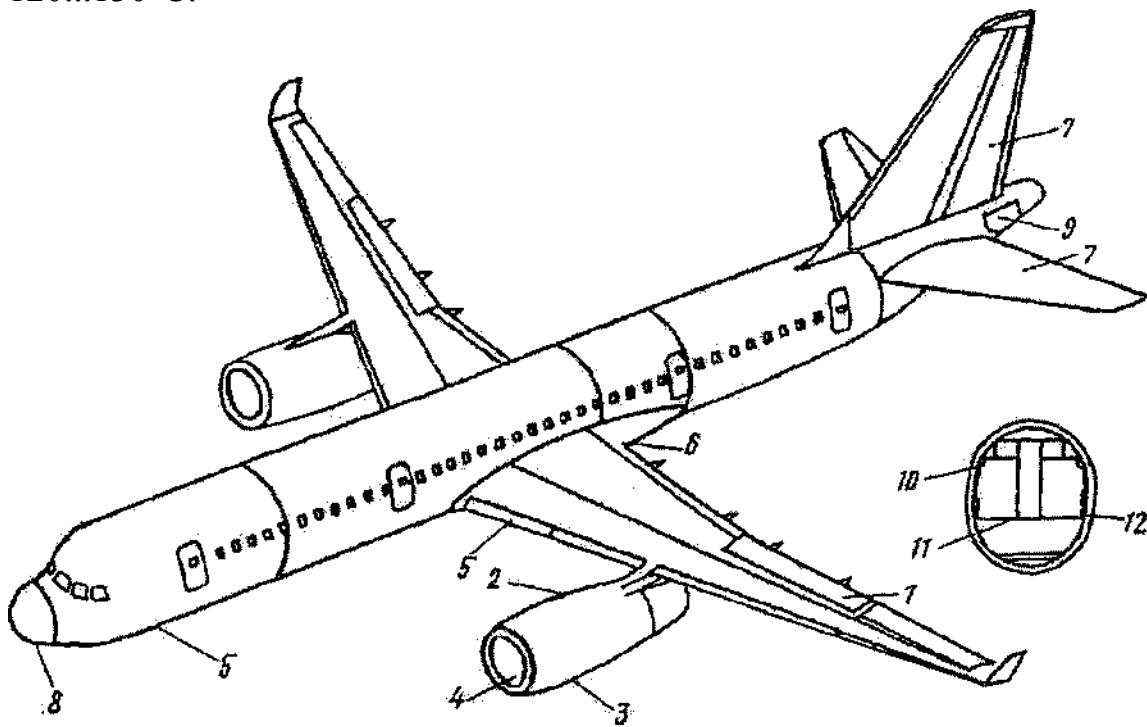


Рис. 6. Применение композиционных материалов в конструкции планера самолета Ту-204: 1- элементы механизации крыла; 2 - пилон; 3 - мотогондола (носовая часть, створка); 4 -ВЗК; 5 - створки шасси; 6 - зализ крыла; 7 - элементы оперения: киль, стабилизатор; 8 - обтекатель носовой; 9 - створки ВСУ; 10 - Сотовые панели; 11 -панели пола; 12 - монолитные детали.

На рис. 7 показано применение композитов в конструкции планера дальнего магистрального широкофюзеляжного самолета Ил-96-300 (КБ им. С.В.Ильюшина). В конструкции самолета нашло применение большое количество композитов (1650 кг), что позволило уменьшить его массу на 520 кг. Особенность применения композитов в планере самолета Ил-96-300 состоит в том, что все элементы конструкции изготовлены с использованием гибридных материалов. В тонких обшивках на поверхность из пропитанных углеродных лент наформовывается за единый технологический процесс слой органической ткани, обеспечивающий эрозионную стойкость и защиту

хрупких слоев углепластика от повреждений в процессе эксплуатации. В более нагруженных конструкциях слои органопластика расположены равномерно по толщине обшивок (25% слоев органопластика от общего количества слоев), что обеспечивает более высокую трещиностойкость гибридных конструкций по сравнению с углепластиковыми. Кроме того, применены дополнительные слои из стеклоткани, исключая контакт коррозионноактивного углепластика с алюминиевыми и стальными деталями. Таким образом, снижается трудоемкость выполнения сборочных работ и подгонки деталей при сборке, так как в этом случае сверление и резка производятся по слоям стеклоткани, что более технологично. Большое внимание при изготовлении самолета Ил-96-300 уделено коррозионной стойкости композитов.

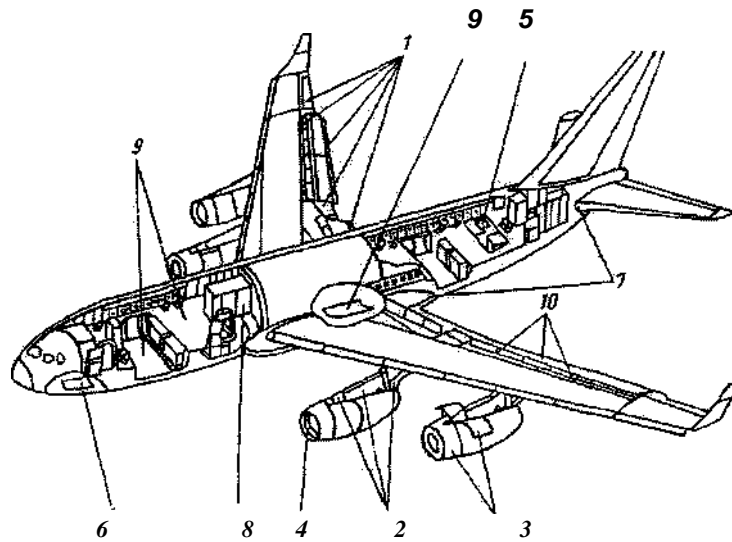


Рис. 10. Применение композиционных материалов в конструкции планера самолета ИЛ - 96 – 300: 1 - элементы механизации крыла; 2 - пилон; 3 - мотогондола; 4 - воздухозаборник; 5 - служебные люки; 6 - створки шасси; 7 - зализ крыла, бортовой щиток; 8 - сотовые панели и монослойные выклейки; 9 - сотовые панели пола; 10 - панели хвостовой части крыла.

Впервые в Российской практике создания пассажирских магистральных самолетов в конструкции планера самолета Ил-96-300 широко использованы композиты для элементов механизации крыла, створок шасси, пилонов, мотогондол и других, а также в сотовых панелях полов, интерьера. В конструкции используются композиционные материалы (в основном гибридные углеорганопластики) на основе универсального связующего ЭДТ-69Н (с применением эпоксидных смол КДА, ЭТФ, УП-631У), не уступающие по своим характеристикам зарубежным аналогам. В самолете Ил-96-300 широкое применение нашли высокопрочные пленочные клеи ВК-51 и ВК-51А (армированный), которые позволили создать высокоэффективные клееные элементы конструкции, обеспечив повышение надежности и снижение массы силовых агрегатов планера.

Проведенные работы по модификации материалов интерьера - декоративной пленки ПДОА3-25, органита 7ТЛК, искусственной кожи АИКос, напольного материала "Авилин-2", прорезиненной ткани 51-3Т-1Н для гибких трубопроводов СКВ и других позволили довести их до соответствия требованиям «Норм лётной годности» по горючести, дымообразованию, токсичности.

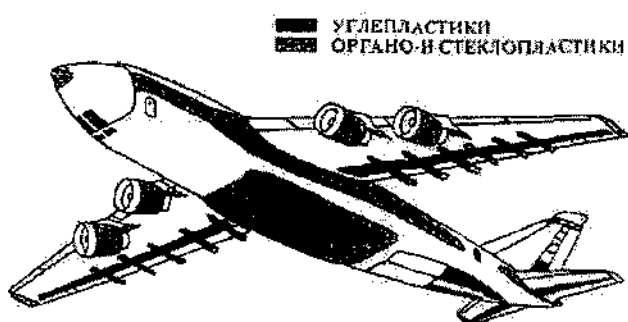
Разработаны, созданы, внедрены материаловедческо-технологические и конструкторско-технологические решения по изготовлению элементов системы кондиционирования из стеклопластика СТП-97КП, багажных полок из микросферотекстолита МСТ-7П; в целях снижения трудоемкости изготовления конструкций сложной конфигурации разработан трикотажный наполнитель, используемый в конструкциях вместо сотопласта; разработан литевой термопласт ПА-610 декоративно-конструкционного назначения, отработана технология окраски деталей в процессе их изготовления методом литья под давлением с применением суперконцентратов пигментов; разработана новая огнестойкая комплексная нить "Тогилен" для огнеблокирующей ткани и др. Материалы обеспечивающие повышение массовой эффективности, надежности и долговечности конструкций, комфортности пассажирских салонов.

На основе синтеза конструктивно компоновочных и технологических решений композиты находят все более широкое применение, в том числе при создании крупногабаритных высоконагруженных агрегатов, в вертолетах КБ им. Н.И.Камова. Так, масса конструкций из композитов в вертолете Ка-26 составляла 6%, Ка-27 (Ка-32) - 15%, Ка-126 (Ка-226) - 17%, Ка-50 - 35%, Ка-62 - 55%. Спроектировано четыре поколения лопастей несущего винта из композитов. В настоящее время изготавливаются серийно и находятся в эксплуатации лопасти вертолетов Ка-26, Ка-27 (Ка-32), Ка-50. Применение композитов на вертолетах КБ им. Н.И.Камова обеспечивает: снижение массы на 15...35%, увеличение ресурса в 1,5...3 раза, повышение живучести, снижение трудоемкости и цикла изготовления вертолета в 1,5.. .3 раза.

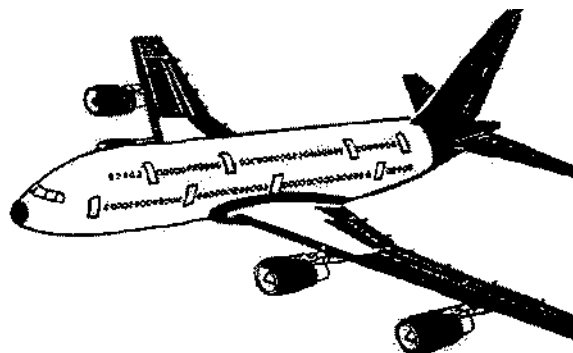
Так, унифицированные лопасти несущего винта вертолетов Ми-17 и Ми-38 из композиционных материалов с планируемым летным ресурсом 5000 ч по материальным затратам и трудоемкости изготовления в серийном производстве имеют равные показатели с аналогичными затратами на производство цельнометаллических лопастей с летным ресурсом 2500 ч.

С учетом более высоких эксплуатационных свойств, качеств (снижение вибраций, увеличение грузоподъемности на 300 кг, повышение живучести и надежности), увеличения летного ресурса для лопастей из композитов до 5000 ч и выше, освоение производства лопастей несущего винта из композитов на Казанском вертолетном заводе является экономически эффективным мероприятием по модернизации вертолета Ми-17 и важным направлением в освоении производства вертолета Ми-38. По сравнению с вертолетами Ми-8, Ми-17 в вертолете Ми-38 предусмотрено дальнейшее значительное увеличение использования композитов в конструкции фюзеляжа, кия, стабилизатора и других элементах конструкции вертолета.

В конструкции Ан-124 "Руслан" широко применены полимерные композиционные материалы на основе высокопрочных и высокомодульных углеродных, органических и стеклянных наполнителей в объемах, превышающих зарубежные аналоги. (Рис. 11). Европейским консорциумом "Эрбас индастри" в аэробусе А380 применяется композиционные материалы для гондол двигателей, крыльевых обшивок и хвостового оперения (рис. 11).



Композиционные материалы, используемые в самолете Ан-124



Применение конструкций из КМ самолете А 380 "Эрбас Индастри"

Рис. 11. Применение композитов в конструкциях пассажирских самолетов

Рост применения композитов в авиации, и прежде всего в военных самолетах в основном происходит за счет расширения объема их использования в основных частях планера: хвостовом оперении, крыле, фюзеляже, для вертолетов важным направлением является использование композитов для производства приводных валов и лопастей главного и хвостового винта. Кроме того, они применяются для изготовления радиолокационных обтекателей, внутренних панелей, потолка, воздухопроводов, топливных баков, брони для защиты команды и наиболее уязвимых частей самолета и вертолета и т.п.

Вместе с тем необходимо отметить, что внедрение композитов в несущие элементы конструкции самолетов, в особенности тяжелых гражданских, на первом этапе велось крайне осторожно, ограничиваясь в основном слабо- и средненагруженными деталями. Причина — недостаточная уверенность в эксплуатационной надежности новых материалов, связанная прежде всего с ограниченным объемом их экспериментальных исследований и натурных испытаний. Постепенное накопление экспериментальных данных об эксплуатационных свойствах композитов, а также опыта, в разработке и эксплуатации различного рода композитных конструкций и совершенствование методов контроля их качества привели к тому, что к настоящему времени существует большое число самолетов, таких как DC-10, "Боинг-727", -737, -747, -757, -767, А-310 и др., а также вертолетов: "Сикорски S-76", "Сикорски SH-53D и др., в конструкциях которых, в том числе и жизненно важных, были использованы композиты.

На рис. 12 в качестве примера приведены схемы применения композитов на самолета "Боинг-767". Общая масса агрегатов из композитов па самолете "Боинг-767" составляет 1534,5 кг, что позволило снизить массу самолета на 813 кг. Другой пример - самолет MD -100 фирмы "Макдонелл-Дуглас", в конструкциях которого было использовано около 6950 кг композиционных материалов.

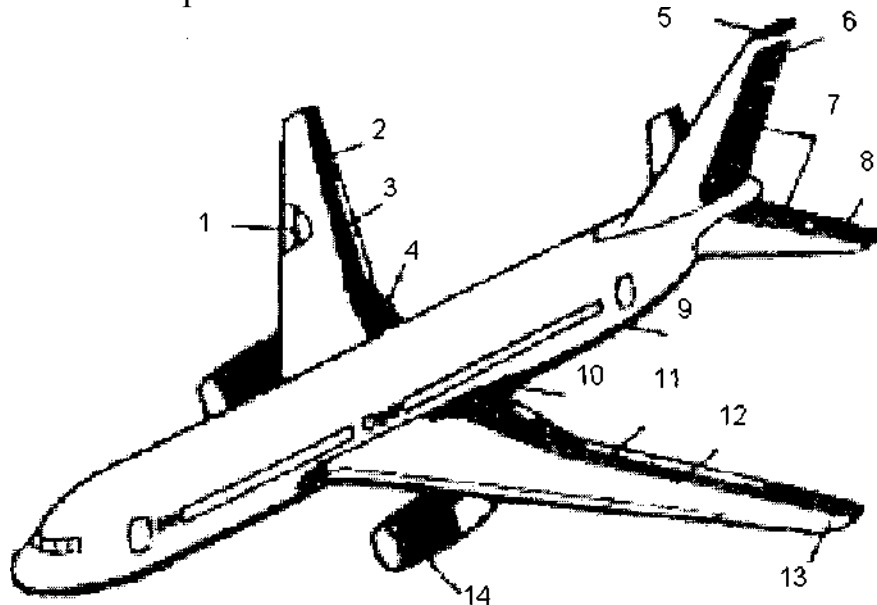


Рис. 12. Схема применения композиционных материалов в конструкции самолета Боинг-767: 1 - стенки лонжерона; 2 - панели фиксированные задние; 3 - интерцептор; 4 - элерон внутренний; 5 - законцовка киля; 6 - руль направления; 7 - руль высоты; 8 - обшивка грузового отсека; 9 - облицовка грузового отсека; 10 - зализ крыла; 11 - обтекатель системы выпуска, закрылков; 12 - обшивки верхняя и нижняя крыла, стрингеры; 13 - элерон внешний; 14 - обшивка гондолы.

В большинстве случаев замена, в деталях металлических сплавов на композиты привела не только к снижению массы конструкций (до 20-40% по сравнению с металлическими аналогами), но и к уменьшению их стоимостей.

### 3.3. Композитные корпусные детали обшивки авиадвигателей

Тонкостенные малонагруженные корпусные детали авиадвигателя являются наиболее перспективными с точки зрения использования полимерных композиционных материалов. Легкий доступ, возможность периодического визуального контроля, диагностики и замены в случае необходимости обеспечивают их надежную работу при эксплуатации двигательной установки. В композитном исполнении корпусные детали обладают массой на 20.. 5% меньше, чем металлические аналоги.

В настоящее время в серийном производстве находятся следующие узлы двигателя ПС-90А: кожух сопла со звукопоглощающим контуром, обтекатель сопла и задний обтекатель реверсивного устройства, обеспечивающие снижение массы двигателя на 21кг. На этапе внедрения и

опытной отработки находятся: диафрагма, корпус подвесок, силовой корпус, корпус створок, внешний обтекатель реверсивного устройства, панель со звукопоглощающим контуром, кожух внутренний 1, обтекатель, кожух, корпус, обеспечивающие дополнительное снижение массы двигателя на 39 кг. На стадии проектирования находятся: корпус вентилятора, лопатка спрямляющая, решетка реверсивного устройства, силовая панель, с планируемыми выигрышем по массе до 63 кг.

Таким образом, суммарное снижение массы двигателя ПС-90А при использовании композитных деталей составляет порядка 123 кг. Это приводит к увеличению коммерческой нагрузки для среднемагистральных самолетов типа ТУ-204, оснащенных двумя двигателями ПС-90А на 246 кг, а для дальнемагистральных самолетов типа ИЛ-96-300 с четырьмя двигателями на 492 кг. Очевидное преимущество композитов привело к тому, что в настоящее время при создании нового двигателя ПС-90А12 уже на этапе проектирования закладываются требования выполнения ряда корпусных деталей из композиционных материалов.

Формование композитных корпусных деталей осуществляется методом ручной укладки на оправку различным образом ориентированных слоев стекло и карбопрепрегов. Большинство деталей выполняются полностью из композитов, хотя в некоторых конструктивных решениях предусматривается использование металлических фланцев, которые могут быть впоследствии заменены на фланцы из композиционных материалов по мере отработки последних.

В общем случае на корпусные детали авиадвигателя действует сложная система сосредоточенных и распределенных нагрузок, основными из которых являются: внутреннее давление, растягивающая нагрузка от газовых сил и равнодействующая инерционных сил, приложенная в центре масс конструкции. Кроме того, отдельные детали могут быть подвержены избыточному наружному давлению, воздействию набегающего наружного потока, а также сжимающим усилиям, возникающим при сборке конструкции обшивки авиадвигателя.

Наиболее нагруженными элементами деталей при этом являются фланцевые узлы крепления, которые в рассматриваемых конструктивных вариантах выполнены из тех же материалов, что и сами детали и составляют с ними одно целое. Согласно требованиям технического задания фланцы должны обеспечивать надежное крепление в диапазоне температур от  $-60^{\circ}\text{C}$  до  $100^{\circ}\text{C}$  при действии инерционных сил с перегрузкой 5733g и вибрационных нагрузок с частотой от 5 до 200 Гц, амплитудой виброускорения до 3,5g, а также обладать ресурсом работы 25 000 часов за период 10 лет.

В настоящее время разрабатываются методики расчета композиционных фланцев на прочность, позволяющие прогнозировать ресурс корпусных деталей, в которых они используются.