

УДК 629.735

## ПРИМЕНЕНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В СОВРЕМЕННОМ АВИАСТРОЕНИИ, КОНТРОЛЬ ЗА ИХ СОСТОЯНИЕМ В ЭКСПЛУАТАЦИИ

А.В. ЗИМБИЦКИЙ, Ю.В. СТАСЮК

Статья представлена доктором технических наук, профессором Стреляевым Д.В.

Предлагаемая статья содержит информацию о применении композиционных материалов (КМ) в авиационной технике на сегодняшний день. Проводится сравнение КМ с металлическими аналогами. Указаны области применения КМ на среднестатистическом современном самолете коммерческой авиации. Рассмотрены проблемы диагностики КМ по состоянию.

**Ключевые слова:** композиционный материал, анизотропия, методы контроля, технология, контроль по состоянию.

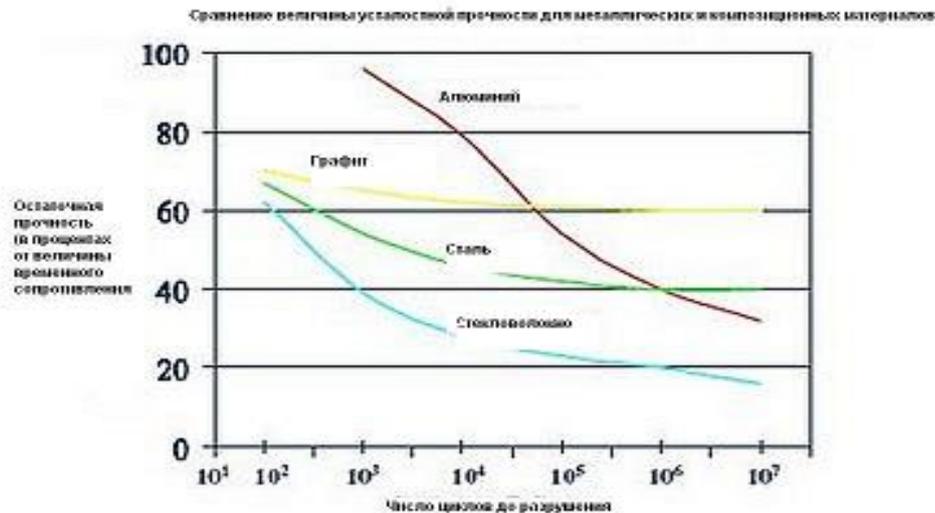
Проблема снижения веса конструкции воздушного судна (ВС) при сохранении его достаточной прочности и жесткости является центральной во всей авиационной отрасли. Опыт развития мировой авиации показал, что снижение массы планера за счет разработки и применения более легких металлических сплавов на основе алюминия полностью исчерпало себя, и на смену “традиционным” материалам пришли принципиально новые – композиционные (КМ). Их новизна проявляется во всем: в свойствах, способах изготовления, методах ремонта, контроля за состоянием. При проектировании КМ учитываются все технологические и физико-механические свойства связующего, все виды взаимодействия между составляющими композита, которые могут изменить характеристики материала. В правильно созданной композиционной конструкции нагрузка воспринимается волокнами. Стоит отметить, что удельная прочность (отношение предела прочности к плотности) таких волокон значительно превышает соответствующую характеристику у традиционных конструкционных материалов (металлических сплавов) и определяет потенциально высокую весовую эффективность композиционных конструкций по отношению к металлическим.

Таблица 1

Сравнительные свойства конструкционных материалов

Свойства	Стекло-локниты		Органо-локниты (СВМ, Кевлар)	Углекловолокниты с углеродными волокнами		Бороволокниты, волокна В/В	Сплавы		
	Стекло E	Стекло S		Высокопрочные	Высокомодульные		Al	Ti	Fe
Плотность, г/см <sup>3</sup>	2.1	2.0	1.25-1.441	1.6-2.15	1.6	2.0-2.7	2.7-2.8	4.5-4.8	7.8-8.1
Усталостная прочность, МПа	200/140		-/180	350/250		350/200	130	500	550
Вибропрочность, МПа	300/650		-/900	420/800		175/560	До 90	15	330
Термонагруженность, ГПа/к	3.0		1.4	1.08		10.8	16.8	10	24
Удельная прочность, ГПа/(г/см <sup>3</sup> )	0.7-1.00/0.5-0.6		1.4-1.8/0.8-1.20	0.70-1.0/0.4-0.6		0.6-0.3	0.14-0.16	0.27	0.16-0.24
Удельный модуль упругости, ГПа/(г/см <sup>3</sup> )	21-32/11-2		59-70/39-46	80-120/53-80		123	27	22-24	25-29

На рис. 1 приведены кривые усталости материалов, выполненных из графита, алюминия, стали и стекловолокна. Как видно, при низкоцикловой усталости свойства изделий из КМ не намного хуже, чем у металлов, а при многоциклоцикловой усталости (более 100 млн. циклов нагружения) наилучшие характеристики прочности показывает углепластик. Исследования были проведены в Advanced Composite Materials Technology Research Centre at the Hong-Kong University of Science and Technology в 2010 г. ([www.compositeblog.com](http://www.compositeblog.com)).



**Рис. 1.** Кривые выносливости типичных материалов, применяемых в авиационной промышленности

Внедрение элементов из КМ в конструкцию ВС происходило постепенно и очень аккуратно. Вначале из КМ выполнялись несилловые элементы, такие как: лючки доступа, створки нишей шасси и пр. Впоследствии из углепластиков начали делать обшивки закрылков, предкрылков, интерцепторов, элеронов, рулей высоты и направления.

Проблема применения изделий из КМ в силовом каркасе крыла и фюзеляжа является вопросом, окончательно не решенным. В настоящее время лишь у самолета Boeing-787 большая часть фюзеляжа выполнена из КМ, а на самолете А-380 несколько шпангоутов изготовлены из полимерных материалов. Это обусловлено рядом причин, которые рассмотрены в настоящей статье.

1. Анизотропия КМ – свойства материала значительно меняются в зависимости от направления приложения нагрузки. Поскольку силовые элементы конструкции воспринимают весь спектр нагрузок: распределенные аэродинамические, распределенные массовые, сосредоточенные нагрузки, то становится весьма сложно, а порой и невозможно подобрать такую ориентацию волокон, чтобы материал мог воспринимать указанные выше нагрузки в течение назначенного ресурса с достаточным запасом прочности.

2. Сильное влияние на механические свойства КМ оказывают условия эксплуатации ВС, а также температурно-временные факторы. Изделия из КМ в большей степени, чем металлические, подвержены разрушающему агрессивному влиянию температур и внешних условий.

3. Стремительный рост объема воздушных перевозок по всему миру, непрерывное увеличение количества новых ВС, нехватка квалифицированного летного и инженерно-технического персонала и большая цена ошибки при расчете на прочность силовых элементов из КМ на этапе проектирования.

4. Низкая ударная вязкость изделий из КМ, их гигроскопичность (способность впитывать воду, которая, замерзая при низких температурах, разрывает слои материала), токсичность, низкая эксплуатационная технологичность (большая продолжительность и трудоемкость ремонта).

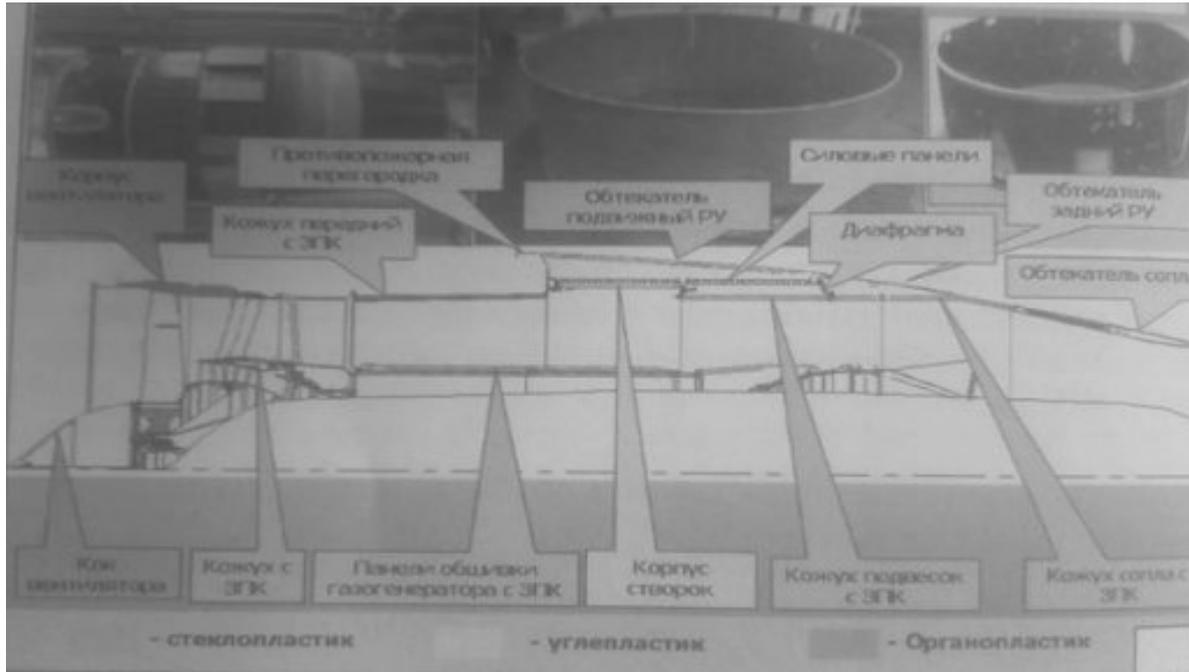
5. Значительная стоимость изделий из КМ. Несмотря на то что КМ находят все более широкое применение, они остаются более дорогими, чем металлические изделия из-за высокой стоимости исходного сырья и более сложного производственного цикла. Это, в конечном счете, увеличивает конечную стоимость ВС.

КМ характеризуются высокой демпфирующей способностью, что определяет хорошую сопротивляемость этих материалов циклическим и вибрационным нагрузкам. В мировой практике наибольшее распространение получили изделия на основе волокнистых полимерных КМ (ПКМ). Из волокнистого полуфабриката можно за одну операцию получить более сложные пространственно-геометрические конфигурации деталей и изделий в целом, чем из конструкционных материалов и их сплавов, тем самым исключая множественные технологические стыки и соединения, улучшая надежность и работоспособность. Использование специальных технологий дает возможность создавать интегральные композиционные конструкции, когда все элементы, например, каркасного отсека (обшивка, продольный стрингерный набор, стойки и стенки, поперечные шпангоуты и ребра жесткости) собираются и соединяются в одном процессе отверждения (полимеризации) связывающего.

Такой процесс сборки менее трудоемок, чем сборка составных частей с помощью многочисленных заклепок. Например, в алюминиевой конструкции центральной части киля А310-300 применяют 2072 детали и 60000 заклепок, а в композитной – 96 деталей и 5800 заклепок. Это экономически выгодно, поскольку уменьшает число независимых элементов, входящих в конструкцию изделия, отпадает необходимость в дополнительных механических доработках деталей, достигается снижение массы и сокращение затрат времени на сборку при изготовлении изделия. Получаемое снижение массы изделия на 1 кг позволяет уменьшить стоимость: 150 долл. – для самолетов, 300 долл. – для вертолетов, 14000 долл. и более – для ракет и спутников [1].



Рис. 2. Детали и агрегаты из КМ в конструкции самолета



**Рис. 3.** Детали и агрегаты из КМ в конструкции двигателя

Федеральная авиационная администрация предупреждает [2], что если относительное число аварий останется на нынешнем достаточно низком уровне, а объем перевозок удвоится, то удвоится и абсолютное количество аварий. В одном из отчетов подсчитано: если нынешнее относительное число аварий не уменьшится вдвое, то к 2015 г. каждые 7...10 дней где-нибудь в мире будет происходить потеря крупного воздушного судна просто из-за возросшего числа пассажиров и полетов. Психологический эффект от такой частоты аварий безусловно будет складываться не в пользу гражданской авиации. Поэтому для сохранения достигнутого уровня частоты аварий необходимо вдвое уменьшить нынешний показатель относительного числа аварий. Придется добиваться практически нулевого показателя аварийности. Так как управляют летательными аппаратами и создают их люди, которым свойственно ошибаться, то “нулевая аварийность” в конечном счете недостижима, но это та цель, к которой надо стремиться [2].

Так как вероятность появления в последующие десятилетия технических достижений, способных полностью преобразить авиацию, как это имело место в прошлом, мала, то трудно недооценить огромную сложность стоящей задачи. “Мы подошли к той границе, после которой любое значительное повышение безопасности потребует непропорционально больших усилий” (Дейл Уоррен, бывший вице-президент фирмы “Макдоннелл Дуглас” [2]).

Анализируя это высказывание, можно прийти к выводу, что развитие авиационной техники вообще и широкое внедрение КМ в частности сдерживается как все более возрастающим объемом перевозок, возможным при этом ростом аварийности, нехваткой квалифицированного летного и инженерно-технического персонала, так и отсутствием революционных идей, способных коренным образом изменить авиацию (как, например, отказ от массового использования поршневых самолетов и переход на реактивную тягу, переход от прямого крыла к стреловидному, применение спутниковых навигационных систем в сочетании с крайне осторожным и постепенным отказом от традиционных радиотехнических средств, проводимое под эгидой ИКАО и выросшее в новую систему CNS/ATM – Communication, Navigation and Surveillance / Air Traffic Management) [3].

В настоящее время для контроля за состоянием изделий из КМ в эксплуатации применяются различные стационарные методы неразрушающего контроля: ультразвуковой, тепловой, электрический, акустической эмиссии, колориметрической, оптический, тензометрический [4].

Точность и достоверность результатов, полученных с помощью этих методов, зависят от большого количества факторов: внешние условия, точность настройки аппаратуры, квалификация персонала, чистота подготовки поверхности и пр. В эксплуатации, к сожалению, зачастую результаты не дают однозначного вывода, обнаружено ли повреждение или нет, а возможности использовать какой-либо другой метод не представляется возможным из-за ограниченности производственной базы. В этом случае результаты будут субъективными, что может в случае неправильной интерпретации результатов привести к негативным последствиям для безопасности полетов.

Возможное решение указанной проблемы – применение встроенных (бортовых) методов контроля, основанных на тех же принципах, что и стационарные, с обработкой результатов на ЭВМ и выдачей их в доступном виде инженерно-техническому персоналу для оценки прочностного состояния элемента конструкции в любой момент времени в течение всего эксплуатационного цикла ВС. Решение этой задачи пока, конечно, только гипотетическое, но на основе строго научно обоснованного подхода оно обещает большие выгоды как производителю, который сможет получать ценнейшую информацию о работе спроектированной им конструкции, необходимую для ее доработок, устранения ошибок, не обнаруженных на стадии проектирования, так и эксплуатанту, который сможет повысить регулярность полетов без ущерба их безопасности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бутушин С.В., Никонов В.В., Фейгенбаум Ю.М., Шапкин В.С. Обеспечение летной годности воздушных судов гражданской авиации по условиям прочности. - М., 2013.
2. Кароли А., Шифрин Б. Безопасность полетов – в центре внимания во всем мире. - Вашингтон: Эвиэйшн Уик энд Спэйс Текнолоджи, 1997.
3. Сарайский Ю.Н., Липин А.В., Либерман Ю.И. Аэронавигация. - СПб., 2013.
4. Семин М.И., Стреляев Д.В. Расчеты соединений элементов конструкций из КМ на прочность и долговечность. - М.: ЛАТМЭС, 1996.

#### THE APPLICATION OF COMPOSITE MATERIALS IN MODERN AVIATION AND CONTROL OF ITS CONDITION DURING DESIGN SERVICE GOAL

Zibitsky A.V., Stasyuk Yu.V.

This article has a purpose to give a brief review of usage of composite materials in the structure of modern civil aircraft. The current condition of civil aviation was analyzed, serious problems were determined and possible achievements in the future were discussed. Advantages and disadvantages of composite materials were analyzed, non-destructive methods of control were reviewed and the necessity to design new method, which allows to control the integrity of structure in real time during design service goal of the aircraft (the concept of “clever material”) was shown.

**Keywords:** composite materials, anisotropy, methods of control, technology.

#### Сведения об авторах

**Зимбицкий Анатолий Валерьевич**, 1989 г.р., окончил МГТУ ГА (2012), аспирант МГТУ ГА, автор 2 научных работ, область научных интересов – эксплуатация гражданских воздушных судов с элементами конструкций из композиционных материалов.

**Стасюк Юрий Валерьевич**, 1988 г.р., окончил МГТУ ГА (2012), аспирант МГТУ ГА, автор 3 научных работ, область научных интересов – контроль текущего состояния гражданских воздушных судов при эксплуатации.