

УДК 539.2

## ИНЖЕНЕРНЫЙ ТРИУМФ УГЛЕВОЛОКОН<sup>1</sup>

**А.Келли**, заслуженный исследователь, член Королевского общества и Королевской инженерной академии, иностранный член Национальной инженерной академии США  
Гордоновская лаборатория.

Департамент материаловедения и металлургии Кембриджского университета (Великобритания)

## THE ENGINEERING TRIUMPH OF CARBON FIBRE

**A.Kelly**, Professor

Distinguished Research Fellow

Gordon Laboratory, Department of Materials Science and Metallurgy, University of Cambridge,  
Cambridge CB2 3QZ England

World Fellow of the International Committee on Composite Materials

Волокнистые композитные материалы были хорошо известны ещё со времён Второй мировой войны, однако их влияние на техническую политику в те годы было незначительным из-за отсутствия жёстких и гибких волокон. Ситуация принципиально изменилась в начале 1960-х гг.; эти изменения, а также люди, с которыми связано изобретение углеволокна (с ними автор был лично знаком), описаны и упомянуты в настоящей статье. Требуемая жёсткость композитов вполне понятна, и понятно также, как она используется в инженерной практике. Проблема трещиностойкости композитов менее понятна. Кратко описаны впечатляющие технические объекты, сооружённые из композитных материалов. Использование композитов в самолётах A380 и «Боинг-787» – также предмет настоящей статьи. Описаны проблемы, возникающие в работе с композитами, и возможные их решения (с. 38–49; ил. 9).

**Ключевые слова:** углеволокно, жёсткость, трещиностойкость, самолёты, сосуды давления.

Fibre composite materials were quite well researched in WW 2 and after but failed to make great impact because a stiff and weavable fibre was lacking. This situation changed dramatically in the early 1960s and the author recounts this and the personalities involved in the invention of high performance carbon fibre (all of whom he knew personally at the time). The requisite stiffness of composites is known and it is understood how to use it in engineering situations. The problem of toughness of fibre composites is less well understood. Some of the impressive artefacts made from fibre composites are described and their use in the Airbus A380 and Boeing 787 described in a little detail. Some of the problems of the use of composites and possible solutions are described.

**Keywords:** carbon fibre, stiffness, fracture toughness, aircrafts, pressure vessels.

Наилучшее определение композитного материала я обнаружил в Оксфордском словаре. Вот оно: «Композит – это материал, сделанный из ингредиентов, остающихся в нём различимыми». Впервые термин *композит* использовался в технике применительно к составным конструкциям клиперов – замечательных судов, строившихся для доставки древесины из Австралии и чая из Китая. Он относился к комбинации железной фермы и покрывающей её доски. В то время железная ферма была новинкой по соседству с обычной доской. И сегодня в прекрасной конструкции гигант-

<sup>1</sup> Перевод с английского.

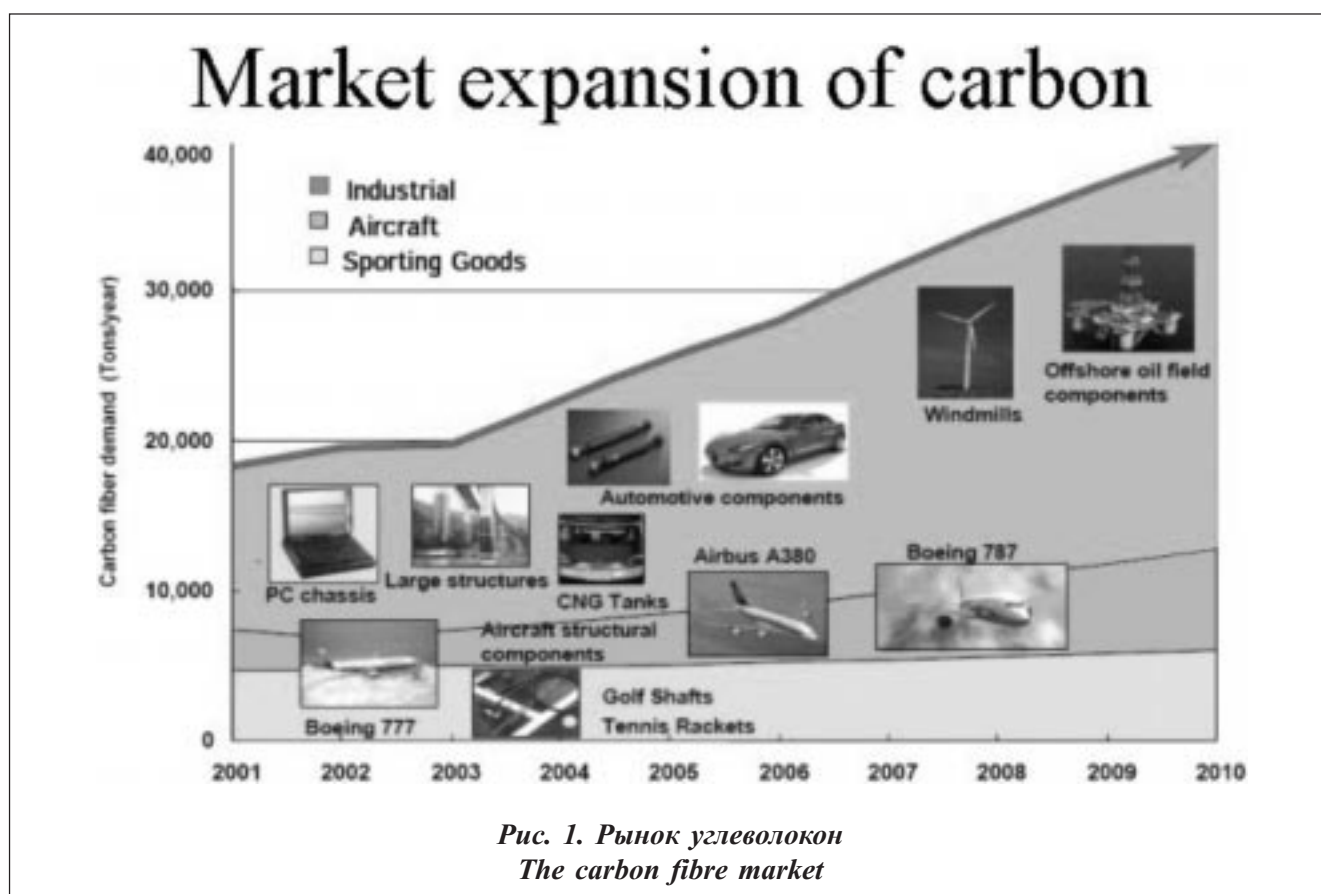


Рис. 1. Рынок углеволокон  
The carbon fibre market

ского крыла самолёта A380 мы имеем хорошо знакомую алюминиевую обшивку на композитных силовых элементах.

Рост применения высокоэффективных композитных конструкций может быть привязан к росту потребностей в углеволокнах (рис. 1). Производство углеволокон в 2007 г. достигло примерно 27 тыс. т, общая стоимость волокна – около 1,3 млрд долл. США при средней стоимости около 50 долл. за 1 кг. Продажи углепластиков достигли примерно 10 млрд долл. Европейская компания «Эйрбас» и американская «Боинг» потребляют около 50% общего количества высокомодульных и высокопрочных волокон. Ввиду особой важности углеволокна я расскажу немного о его открытии, поскольку мне посчастливилось знать все группы, работавшие над этой проблемой, и быть хорошо знакомым с людьми из двух этих групп.

### История: жёсткость композитов

В конце 50-х годов прошлого столетия композитные материалы и их достоинства, такие, как коррозионная стойкость, малая плотность и высокая прочность, были известны многим инженерам. Композитные пропеллеры самолётов появились в начале 1920-х гг. Композитные планёры самолётов из фанеры (бомбардировщики «Москито») и планёры из аналогичного материала строились в 1930-х и 1940-х гг. Была понятной анизотропия упругих свойств фанеры. Стеклопластики были хорошо известны; по удельной прочности они существенно превосходили алюминиевые сплавы (табл. 1). Применение однонаправленных стеклопластиков, в том числе таких уникальных, как корпусные детали ракет, например, в проекте «Полларис» (рис. 2), оказалось впечатляющим и показало реальную заинтересованность в них разработчиков военной техники.

Таблица 1

## Волокна и композиты до 1960 г.

Волокно или композит	Модуль упругости, $E$ , ГПа	Прочность при растяжении, $\sigma$ , МПа	Удельный вес, $\rho$	Удельный модуль	Удельная прочность, $\sigma/\rho$
Льняное волокно	103	690	1,5	69	460
Пенька – влажное волокно	34	–	1,5	23	–
Пенька – сухое волокно	85		1,5	57	
Рама – сухое волокно	19		1,5	13	
Рама – влажное волокно	51	758	1,5	34	505
Асбест хризотил	159	1379	2,6	61	530
Е-стекловолокно	69	3447	2,54	27	1357
Однонаправленный: льняное волокно в фенольной смоле (Аэролит)	34	345	1,35	25	256
Однонаправленный стеклопластик с Е-волокном и эпоксидным связующим	41	1241	2,05	20	605
Частично ориентированный композит: асбест в фенольной смоле Durestos	17	138	1,27	13	109
Алюминиевый сплав	70	600	2,8	25	214

Данные взяты из: P.McMullen. *Composites*. 15. P. 222–230 (1984). Fibre/resin composites for aircraft primary structures: a short history.

Однако не хватало по-настоящему жёсткого волокна малой плотности, которое к тому же можно было бы ткать. И в то же время возникал интерес к композитам в связи с открытием в лабораториях «Белл Телефон» нитевидных кристаллов таких веществ, как оксиды алюминия и бериллия и карбида кремния. Будучи более тяжёлыми (с плотностью от 3 до 4 г/см<sup>3</sup>), чем алюминий (плотность 2,7 г/см<sup>3</sup>), они были гораздо более жёсткими, с модулем Юнга до 700 ГПа (у алюминия 70 ГПа) и, следовательно, имели намного большую удельную жёсткость. Вообще говоря, асбест, и особенно хризотил, тоже довольно жёсткий материал, но токсичность асбеста слишком велика для его практического использования.

В 1958 г. Галли, работавший в лабораториях «Тексако», нанёс бор на вольфрамовую проволоку и получил волокно с модулем упругости 400 ГПа, но оно было слишком толстым для процедур ткачества. В начале 1960-х гг. Роджер Бэйкон (фирма «Юнион Карбайд») вырастил нитевидные кристаллы графита. К тому времени было известно, что графит с высоким модулем упругости может быть получен высокотемпературной обработкой углерода. Важное практическое значение жёсткости нитевидных кристаллов весьма активно пропагандировал Дж.Е.Гордон, имевший опыт рабо-



*Рис. 2. Одна из первых ракет системы «Поларис» смотанным стеклопластиковым корпусом  
Early Polaris missile with glass fibre filament wound casing*

вытягиванию и тоже получил жёсткие волокна, более жёсткие, чем волокна, полученные из ПАН; он назвал их «Thognel». Акио Шиндо в Японии ещё до этого получил волокна, более жёсткие, чем обычные текстильные нити, и, будучи наслышанным о работе англичан и американцев, выбрал в качестве полимера ПАН-волокно. Выбор Бэйконом целлюлозы нельзя признать удачным. ПАН-волокно было значительно лучше изученным и производилось в больших количествах. Шиндо повезло: он мог получать в компании «Торрей» (один из основных производителей ПАН-волокна) наилучшие по качеству полимерные волокна для карбонизации. Примерно в то же самое время и независимо от других «Роллс-Ройс» разработал своё углеволокно. В книге R.M.Gill «Carbon Fibres», изданной в 1972 г. Институтом пластиков, хорошо описан этот ранний период исследования в области углеволокна.

Данные исследования привели к получению жёстких волокон малого диаметра и большой длины, которые можно подвергать текстильной переработке. Это было концом нитевидных кристаллов. Было ли? Углеродные нанотрубки сегодня заставляют усомниться в этом. Но тот факт, что получаемые из ПАН-сырья углеволокна можно подвергать текстильной переработке, оказался едва ли не столь же важным, как и их высокие величины модуля и прочности. Некоторые волокна, доступные с 1965 г., характеризуются в табл. 2.

Итак, волокна стали жёсткими и композиты – очень жёсткими, но будут ли композиты трещиностойкими?

### История – трещиностойкость

В это время в инженерных кругах возникли сильные сомнения в разумности погони за очень высокой прочностью конструкционных материалов: слишком свежи были в памяти катастрофи-

ты с композитами со времён Второй мировой войны. На узкой конференции в Королевском обществе по новым материалам в 1963 г. я спросил аудиторию: «Почему мы не имеем жёстких графитовых волокон?» Позже У.Вотт (W.Watt), изобретший такие волокна в Англии, говорил, что эта ремарка подвигла его, когда он вернулся в Фарнборо, к попытке получить углеволокна путём карбонизации полимера. Он и его соавторы оказались довольно проникательными, выбрав в качестве исходного полимера ПАН (полиакрилонитрил  $(\text{CH}_2\text{CHCN})_n$ ), образующий полимерную «лесенку» при нагревании, и достаточно знающими людьми, чтобы понять, что перед высокотемпературной карбонизацией ПАН должен быть нагрет до относительно низкой температуры. На этой предварительной стадии волокна слегка окисляются и наматываются на жёсткую рамку, что предотвращало усадку при последующем нагреве. Этот шаг был и остаётся наиболее важным в технологии получения графитового волокна, и он был впервые предпринят британскими исследователями в RAЕ («Ройал Эйркрафт Эстеблишмент»).

Бэйкон же подвергал целлюлозные волокна

Таблица 2

## Некоторые волокна и композиты, разработанные в период с 1965 г.

Волокно или композит	Модуль упругости, $E$ , ГПа	Прочность при растяжении, $\sigma$ , МПа	Удельный вес, $\rho$	Удельный модуль	Удельная прочность, $\sigma/\rho$
S-стекловолокно	86	4480	2,49	35	1780
Однонаправленный стеклопластик с S-волокном и эпоксидным связующим	52	1795	2,08	25	862
Борное волокно	379	2760	2,69	141	1025
Однонаправленный композит бор-эпоксид	269	1345	1,97	137	683
Высокомодульное углеволокно	379	1724	2,0	189	862
Однонаправленный композит углеволокно-эпоксидное связующее	131	1517	1,55	85	979
Kevlar 49	117	2758	1,45	81	1902
Kevlar-эпоксидный композит	83	1930	1,35	61	1430

ческие разрушения цельносварных судов типа «Либерти» и совсем недавняя катастрофа самолёта «Комет». Эти сомнения усилились с обнаружением хрупкости больших вентиляторных лопаток двигателя RB211, выполненных из углепластика.

Существенный «трюк», который превращает комбинацию хрупкого углеволокна и хрупкой эпоксидной смолы в нехрупкий композит, – это специальным образом организованное взаимодействие двух компонентов. Они разрушаются при очень разных деформациях. Матрица, разрушаясь, рассекается некоторой совокупностью трещин. Но прежде чем матрица разделится на части, т.е. до полного разрушения, волокна должны быть вытянуты из «гнезд» в матрице. Первый процесс сопровождается поглощением упругой энергии берегами трещин; во втором процессе энергия затрачивается на трение скольжения между волокном и матрицей. Сложение двух стоков энергии может в единице объёма материала привести к большим затратам энергии при разрушении, чем это имеет место в металлах, например в стали; и действительно, в некоторых композитах эти затраты превышают затраты энергии на единицу объёма в стали. Существенная разница путей рассеяния энергии в металлах и композитах иллюстрируется на рис. 3 двумя примерами разрушения труб.

Таким образом, правильно сконструированные композиты имеют как высокую жёсткость, так и высокую трещиностойкость; их кривая деформирования оказывается в чём-то подобной кривой для стали. Но в стали трещиностойкость обеспечивается пластическим течением в результате изменения атомных конфигураций, не оставляя поверхности сколько-нибудь заметной роли; в то время как процессы, определяющие трещиностойкость композитов, совершенно иные, они включают



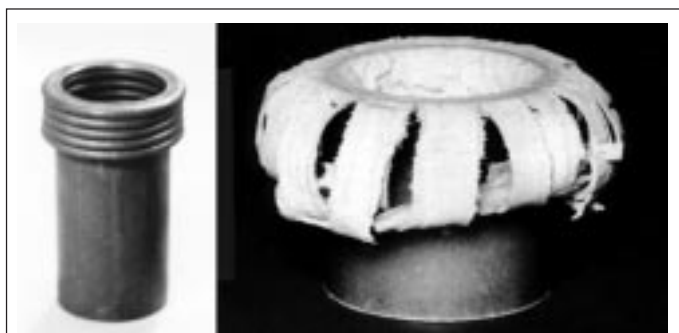


Рис. 3. Разрушение труб: металлической (слева) и стеклопластиковой (справа)  
A crushed tube of steel- left- and of grp- right

растрескивания и расщепления двух компонентов, при этом поверхности играют существенную роль. В процессе деформирования плотность композита уменьшается, материал становится проницаемым, модуль упругости уменьшается. Эти эффекты, конечно же, нежелательны, особенно в сравнении с ситуацией с материалом, обладающим способностью к пластическому течению. Однако большая поглощаемая энергия (рис. 4) эффективно используется в таких конструкциях, как энергопоглощающая (при ударе вертолёта о землю) труба (рис. 5).

### Многослойные конструкции

Углеволокна, безусловно, обеспечивают прочность и жёсткость только в одном направлении – по оси волокон. Волокна связываются между собой матрицей, они могут также использоваться в виде ткани, которая должна быть погружена в матрицу, обычно – в термопласт. Для того чтобы обеспечить свойства композита в плоскости листа, однонаправленные слои набираются в ламинат, в котором соотношение количеств волокна в разных направлениях может задаваться различным – в зависимости от требований конструкции. Существуют достаточно надёжные компьютерные программы, дающие оценки упругих и других физических характеристик как в плоскости слоя, так и по нормали к нему. В такой конструкции, подверженной внешним нагрузкам, возникают, конечно, межслоевые напряжения, которые следует понимать и которыми нужно управлять (рис. 6). Теория многослойных пластин хорошо предсказывает свойства пластины в её плоскости, но она гораздо менее надёжна в оценке трансверсальных характеристик и поведения пластин на её краях. Всё это касалось достаточно исследованного упругого поведения, но трещиностойкость многослойных пластин не заслужила пока должного внимания, и это в прошлом приводило к внушительным случаям разрушения.

Технологическая сторона ламинатов, получаемых обычно в автоклаве, требует дальней-

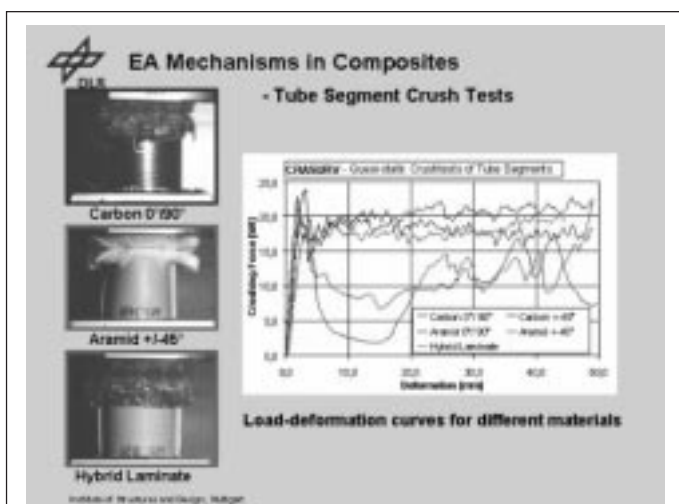


Рис. 4. Разрушение труб из различных материалов и соответствующие кривые «нагрузка – перемещение»  
Crushing of tubes of various materials and the resulting load extension curve

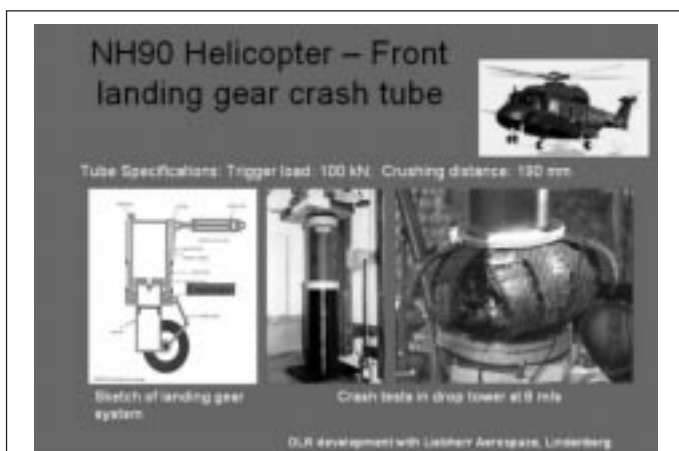


Рис. 5. Посадочный амортизатор вертолёта  
Helicopter crash tube

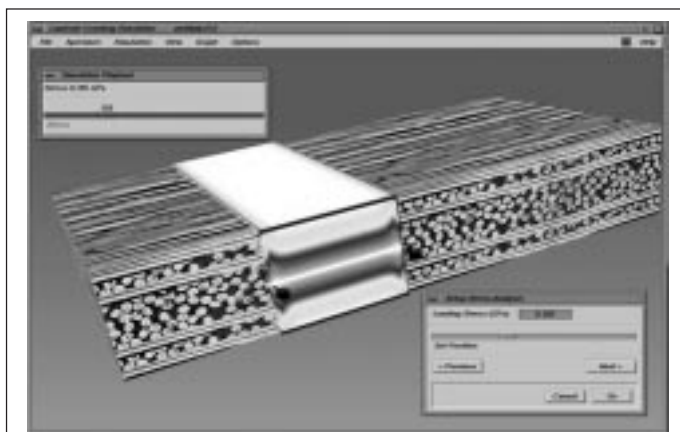


Рис. 6. Многослойная армированная пластина  
*The nature of a laminate*

шего изучения и усовершенствования. Если удастся снизить стоимость формы, улучшить контролируемость процесса отверждения, лучше понять экзотермические и другие технологические процессы, можно будет добиться сокращения стоимости технологии. Должным выбором укладки слоёв можно получить и поразительные, и полезные эффекты, такие, как очень большие и/или отрицательные коэффициенты термического расширения материалов, в которых и волокно, и матрица характеризуются положительными величинами указанных констант. Можно в плоскости ламината изменять коэффициенты термического расширения в широких пределах. В переключателях и устрой-

ствах термомеханического контроля эти эффекты можно использовать в полной мере.

### Новые продукты

Таким образом, благодаря высокой жёсткости и малой плотности, высокой коррозионной стойкости и долговечности, высокой усталостной прочности композиты на основе угле- и других волокон становятся обычными материалами, позволяющими производить конструкции нового качества. Примеров этому множество. К ним относятся лёгкие микросамолёты, приводимые мускульной системой человека, мачты без растяжек, гоночные машины «Формула-1», шесты для прыжков, теннисные и бадминтонные ракетки, клюшки для гольфа (каждый из этих продуктов резко поднял планку спортивных результатов – внедрение углепластика в хоккейную клюшку означало почти мгновенное исчезновение старых клюшек), вертолётные лопасти, лёгкие конструкции, новые возможности ремонта в строительстве. Можно привести и много других примеров.

### Большие самолёты – «Эйрбас» и «Боинг»

И, конечно же, самолёты. В военных самолётах конструкции из композитов используются уже давно, но в настоящее время и в гражданских самолётах это происходит возрастающими темпами; доля композитов в конструкции планёра вот-вот перейдёт через отметку 50%. История развивается в непримиримом соревновании инженеров, главным образом – компаний «Боинг» и «Эйрбас», за лучшую конструкцию. «Боинг» явно нацелился перехватить лидерство, памятуя о том, что в «Эйрбасе» не без основания считают, что именно они были пионерами в использовании современных композитов, опередив в конструкциях второстепенной важности, например, передней кромки кия. В конструкциях самолёта А340-600 мы видим уже первое использование композита в критичных, первостепенной важности элементах, таких, как некоторые лонжероны и килевые балки, киль, горизонтальное хвостовое оперение, элементы механизации крыла, а также панели пола пассажирского салона.

«Боинг» впервые продемонстрировал В-787 7 июля 2007 г. (по американскому времени). Первый полёт планируется на второй квартал 2009 г. Конструкция планёра этого самолёта состоит на 50% по массе из композитов, на 20 и 15% – из алюминиевых и титановых сплавов соответственно, на 10% – из стали и на 5% – из других материалов. Эти данные контрастируют с данными по самому большому в мире пассажирскому самолёту А380, находящемуся в экс-

платации с октября 2007 г., планёр которого состоит на 22% из композитов (или на 25%, если включить сюда Glare), на 10% – из стали и на 61% – из алюминия. Сравнение с В-777 (50% алюминия и только 12% композитов) впечатляет. Возвращаясь к В-787, заметим, что его планёр по объёму состоит на 80% из композитов. Каждый такой самолёт содержит 35 т углепластика, в том числе 23 т углеволокон. Более лёгкий планёр обеспечивает существенное снижение потребления топлива. Побочный положительный эффект – отсутствие коррозии углепластика, что также отличает его от алюминия и позволяет эксплуатировать самолёт в условиях большей влажности воздуха. Другая инновация в этом самолёте – автоматическая система компенсации воздействия зоны турбулентности, изначально разработанная для бомбардировщика В-2. Понятно, почему «Боинг» подписал соглашение с «Торрей» на покупку углеволокон стоимостью 6 млрд американских долларов.

Самая удивительная инновация полностью композитного фюзеляжа «Боинга-787» – его конструкция, состоящая из 4 состыкованных между собой цилиндрических секций, исключаящая 50 000 элементов крепежа, необходимых в алюминиевой конструкции, и позволяющая поддерживать в салоне самолёта более высокое давление.

Компания «Эйрбас» объявила о разработке прямого конкурента этой машине – самолёта А350 (взамен ранее объявленного А330), фюзеляж которого состоит на 52% из композитов, на 20% – из алюминий-литиевого сплава, на 14% – из титана, на 7% – из стали и на 7% – остальное. И в этом случае – цельнокомпозитный фюзеляж, но собран он из секций двойной кривизны.

Композитный фюзеляж даёт возможность увидеть все преимущества в большой степени интегрированной конструкции, в том числе существенное снижение стоимости производства. Несомненно, большие возможности заложены и тонкостенной конструкцией типа «сэндвич», имеющей большую жёсткость на изгиб, чем однослойная конструкция.

А380 с размахом крыла 80 м и длиной 73 м успешно выполняет полёты (сравнить с В-787: 60 и 56 м соответственно). Как уже говорилось, композиты составляют в нём около 25% по массе. Стекло- и углепластики, кварц-полимерные композиты интенсивно используются в конструкциях крыла, хвостового оперения и дверей. Это первый серийный самолёт – центроплан с крылом, выполненным из углепластика, при этом обводы крыла таковы, что в нём достигнута прекрасная аэродинамическая эффективность. Термопласты используются в конструкции предкрылка. Glare (сложный композит: стеклопластик + алюминий) используется в конструкции фюзеляжа и передней кромки стабилизатора. Glare имеет лучшие характеристики усталости, коррозионной стойкости и сопротивления удару, чем известные алюминиевые сплавы; конструкции, выполненные из этого материала, ремонтоспособны с применением обычных процедур. Заклёпочные соединения заменены сваркой лазерным лучом (рис. 7).

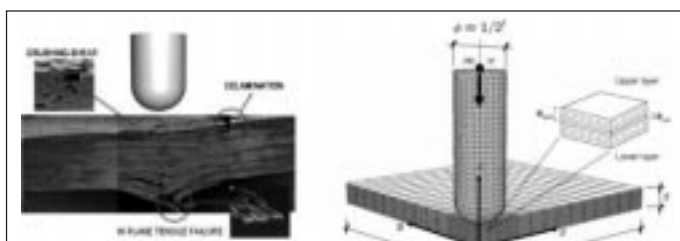
### Проблемы

Многообразие процессов разрушения больших композитных конструкций, подобных описанным выше, бросает вызов сложностью проблем и их взаимосвязанностью. Они не могут быть решены традиционными испытаниями. Единственный путь, позволяющий сегодня достичь цели, – более продвинутые ме-



Рис. 7. Новые и прогрессивные материалы в А380 (предоставлено компанией «Эйрбас») *New and advanced materials in the A 380-courtesy Airbus*





**Рис. 8. Иллюстрация к вычислительному эксперименту: удар по многослойной пластине (предоставлено Карлосом Гонзалесом)**  
*Illustrating simulation of impact on a laminated structure-courtesy Carlos Gonzalez*

тоды испытаний, сопровождаемые большим объёмом компьютерного моделирования. Птица на лопатке вентилятора – это Немезида смелого проекта двигателя RB 211. Теперь её удар по лопатке – объект моделирования такого уровня, что EASA (Европейское агентство авиационной безопасности) принимает в некоторых случаях результаты вычислительного эксперимента, заменяющего физический (рис. 8). Но разница между всем этим, с одной стороны, и конструкцией и методами испытаний металлической конструкции, с другой – велика. Таблицы характеристик, кото-

рые используются в процессе сертификации металлических конструкций, неприменимы для композитных конструкций. А данных для последних всё ещё недостаточно, чтобы иметь надёжные таблицы!

### Кооперация

Особенность инженерии современных композитных конструкций, прежде всего, если речь идёт об очень больших или весьма ответственных конструкциях нового типа, – это особенность взаимодействия университетских групп и исследовательских институтов. В качестве иллюстрации такого взаимодействия можно напомнить, что технический проект задней части планёра A350 включает в себя следующие необходимые работы.

▣ Контроль качества в процессе производства.

▣ Оценка влияния ударов по композитной конструкции объектами, летящими со скоростью до 900 км/ч. Удар может не привести к видимым повреждениям на поверхности; расслоения и разрывы могут возникнуть на межслойных поверхностях внутри конструкции; это оборачивается тем, что конструкции с кривыми поверхностями более чувствительны к удару, чем плоские.

▣ Концепция допустимости повреждения – наиболее важная, поэтому следует особое внимание уделить количественной оценке допустимости повреждения без ущерба для безопасности.

▣ Для двух предыдущих задач очень важна разработка методов неразрушающего контроля для обнаружения разрушений адгезионного контакта. Компания «Фоккер Айркрафт» разработала ультразвуковой метод, позволяющий, по оценке Роберта Крайна, одного из мировых авторитетов в этой области, обнаруживать так называемые «kissing bond», т.е. места, где контакт между слоями имеется, но адгезия отсутствует.

▣ Моделирование повреждений в результате удара может заметно сэкономить время и усилия, как в случае с уже упоминавшимися столкновениями с птицами.

Политехнический университет Мадрида разработал метод моделирования испытаний падающим грузом с использованием метода конечных элементов. Современное состояние дел в этой области позволяет использовать сложные определяющие соотношения для материала и быстродействующие компьютеры. Основные типы повреждений, исследованные в эксперименте, хорошо известны. Это расслоения и разрушения слоёв; они достаточно точно описываются определяющими соотношениями, и соответствующее моделирование даёт изменения упругих констант и других параметров. Микроструктура неповреждённого слоя детально описывается; поведение межслойной границы даётся простой моделью трещины на границе. Соответствие между данны-

ми физического и вычислительного экспериментов очень хорошее, максимальная нагрузка и поглощённая энергия вычисляются достаточно точно (см. рис. 8).

Другой пример подобного рода – разработанная в университете в Кренфилде, Англия, технология простёгивания многослойных структур для предотвращения реального расслоения, особенно в окрестности Т-образных стыков. Большинство, если не все эти трудности, возникают из-за того, что в настоящее время нет полного понимания механизмов разрушения композитных элементов конструкции в условиях сжатия. Как мы видели, композитная панель может быть повреждена в результате удара, при этом повреждения визуально не обнаруживаются. Однако она оказывается ослабленной, и разрушающая сжимающая нагрузка уменьшается. Если она, как это бывает в условиях эксплуатации, подвергается знакопеременным нагрузкам, зона повреждения может расти – материал обнаруживает усталостное поведение.

### **Усталость композитов**

Усталостное повреждение металлического элемента наблюдается обычно как зарождение и рост отдельных трещин, скорость роста которых определяется максимальным локальным растягивающим напряжением. Как правило, наиболее опасные трещины зарождаются на поверхности элемента. Мы знаем, что трещины растут, и можем оценивать оставшуюся долговечность путём мониторинга длины наибольшей трещины. Усталостное поведение элемента при сложном напряжённом состоянии выражается количественно диаграммами Гудмана. Ситуация изменяется, когда мы переходим к композитной конструкции.

Хотя, как было сказано, сопротивление усталости композита выше, чем сопротивление усталости металлов, это верно лишь для случая пульсирующего растяжения. В большинстве случаев, в отличие от ситуации с металлами, усталостное повреждение композитов с полимерной матрицей проявляется в виде многочисленных микротрещин, главным образом, в матрице и на границе раздела «волокно-матрица», а часть этих трещин, и наиболее важная часть – между волокнами. Повреждение распространяется на значительную часть объёма конструкционного элемента. Доминантная трещина отсутствует, и современный уровень знаний не позволяет оценить степень опасности повреждения с помощью микроскопа.

Чтобы исключить неопределённость, конструктор вынужден снижать допустимые нагрузки, утяжеляя и удорожая конструкцию. Автор имеет в этом деле личный опыт и предлагает для мониторинга усталостного повреждения конструкции использовать измерения коэффициента Пуассона, величина которого является более чувствительным индикатором наличия трещин, нежели другие упругие характеристики. Это предложение, казалось бы, дезавуируется тем, что величина коэффициента Пуассона однонаправленного углеэпоксидного композита в главных осях очень мала, и поэтому трудно измерять её изменения. Но композит анизотропен и характеризуется набором коэффициентов Пуассона, так что малый коэффициент Пуассона для одной пары направлений сопровождается большой его величиной для другой пары направлений, которую и следует использовать для таких измерений. Многослойные пластины, содержащие слои разных направлений, характеризуются большим коэффициентом Пуассона в главных осях. Их и нужно выбирать для соответствующих измерений.

### **Как делать оценки**

Как работают новые методы оценки повреждения материала конструкции, можно иллюстрировать путём, которым Банселл оценивает остаточную долговечность показанного на рис. 9 сосуда давления, выполненного из углепластика (сравнить с фюзеляжем В-787). Металлический сосуд давления подвергался обычно испытательному давлению, равному 150% от рабочего. Но для композитной конструкции это недопустимо, поскольку такое нагружение ослабляет материал. В этом случае повреждение возникает не в форме растущей макроскопической трещины, но в форме обрывов



*Рис. 9. Мотанные сосуды давления в парижском автобусе (предоставлено Банселлом)*  
*Filament wound pressure vessels on a Paris bus- courtesy A. Bunsell*

волокон, распределённых более или менее случайным образом по объёму композита. Поскольку в этом случае волокна определяют прочность композита, то можно предположить, что если волокна не дробятся при испытательном нагружении, то дальнейшего повреждения в процессе эксплуатации не будет. Однако при нагружении однонаправленного композита постоянной нагрузкой композит накапливает обрывы волокна. Это детектируется акустической эмиссией. Конечно-элементная модель, основанная на первых принципах, которая учитывает перераспределение нагрузки от разорванного волокна на соседние волокна, позволяет достаточно точно оценить разрушающую нагрузку. Модель позволяет построить эталонную кривую, которая соответствует поведению сосуда с заданной долговечностью. Пороговый уровень повреждения определяется экспериментально. Накопление повреждений, даваемое эталонной кривой, достигает порогового уровня, когда заданная долговечность достигнута.

Испытания сосуда давления в процессе эксплуатации, проводимые периодически, дают информацию об остаточной долговечности. Показано, что скорость накопления повреждений является функцией только приложенного напряжения. Испытания включают в себя мониторинг повреждений на отрезке времени несколько часов и сравнение этой величины с величиной, даваемой эталонной кривой. Банселл получал данные о работе сосудов давления в течение 2 лет, они показывают, что остаточная долговечность исследуемых сосудов превышает 20 лет.

### Незатронутые темы

Композиты в этом обзоре описывались с точки зрения материаловедца, исследователя и инженера; технологические аспекты здесь не рассматривались. Есть и много других аспектов композитов, не упоминавшихся в настоящем обзоре. Один из аспектов связан с так называемыми *smart* (умными) материалами: здесь сам материал становится активным. С этим связан и другой аспект: внедрение в структуру композита волокон, позволяющих осуществлять мониторинг состояния материала. В будущем такую систему можно будет использовать в целях преодоления тех трудностей, о которых говорилось выше: контролировать степень повреждения структуры. Не обсуждалась также значимость композитов с металлической матрицей, из которых наполненные частицами композиты занимают автора в настоящее время более, нежели волокнистые композиты. Опущено также обсуждение весьма существенного вопроса об использовании композитов для ремонта строительных конструкций, в частности, в труднодоступных местах. Существенным преимуществом композитов в этом приложении, по сравнению с обычно применяемыми стальными элементами, является малая масса, что позволяет монтировать их без использования кранов и других тяжёлых механизмов. Этому не мешает даже более высокая стоимость композитов.

### Вопросы охраны окружающей среды

Эти проблемы до определённой степени не являются проблемами материала как такового, они относятся к компонентам, составляющим композит. В то же время одна из побудительных причин

использования композитов – уменьшение крепёжных элементов (напомним уменьшение количества элементов в А380 и крепежа в В-787) – имеет обратную сторону медали: трудности переработки отработавших свой срок конструкций усиливаются трудностями демонтажа. Этой проблемой должна заниматься образованная производителями самолётов Aircraft Fleet Recycling Association (Ассоциация рециклинга парка самолётов).

Волоконная форма любого материала небиологического происхождения всегда оказывается более дорогим материалом, чем тот же материал в объёмной или листовой форме. Такая форма всегда получается с большими затратами энергии. Углеволокна – чрезвычайно дорогой материал с точки зрения энергозатрат на его производство. Композиты могут быть получены и из возобновляемых материалов – волокон; по этой теме имеется много публикаций. Это возвращает нас к вопросу об использовании волокон, перечисленных в табл. 1. Конечно же, будут продолжаться и усилия, нацеленные на производство более экологически чистых смол, а также смол, полученных не из нефти.

Однако всё превосходящий вклад композитов в производство лёгких некорродирующих конструкций, требующих затрат энергии для их движения, существенно снижает эти затраты и поэтому должен быть оценён весьма и весьма позитивно.

Композиты с керамической матрицей могут в большой степени повысить эффективность энергогенерирующих машин.

### **Композиты в СССР и России**

Изложенный личный взгляд автора на развитие композитов на основе углеволокон базируется на его детальном знании о событиях, главным образом, в Западной Европе и США. На рассматриваемом отрезке времени большая работа в этом направлении проводилась в Советском Союзе и в России. Во времена «холодной войны» автор имел удовольствие работать вместе с покойным академиком Ю.Н.Работновым и профессором С.Т.Милейко в совместном издательском проекте, описывающем сопоставимые работы по обе стороны «линии раздела». Этот проект вылился в четырёхтомную серию «Handbook of Composites», опубликованную издательством «North Holland» в 1983–1989 гг. и показавшую некоторые результаты, полученные в обоих регионах. Внимательное чтение этих томов будет способствовать восстановлению баланса.

\*\*\*

*Эта статья представляет собой переработанную и обновлённую версию статьи [Very Stiff Fibres Woven into Engineering's Future: a Long Term Perspective // J Mater Sci. (2008). 43. P. 6578–6585], которая была написана на основе лекций, прочитанных автором в Австралии в аудиториях, состоявших из инженеров общего профиля. Эта поездка была спонсирована двумя организациями – Engineers Australia и австралийским отделением Royal Aeronautical Society. Автор признателен доктору М.Скотту за приглашение в Австралию. В дополнение к этому автор благодарен докторам Питеру Бюмо и Янгу Квону за приглашение на конференцию на Мадейре, что позволило ему пополнить свои знания последними результатами в области композитов. Автор также признателен следующим лицам за предоставленную информацию, иллюстрации и советы: К.Х.Рендигсу и Р.Брай («Эйрбас»), А.Юзефиани и Дж.Х.Смиту («Боинг»), А.Джонсону и его коллегам (Германский аэрокосмический центр, Штутгарт и Кёльн), А.Банселлу (Ecole des Mines, Париж), Р.Крейну, К.Гонзалесу (Политехнический университет, Мадрид), И.Янкару (Технический университет, Брно), А.Кинлоху (Империял колледж, Лондон), Н.Маккартнину (Национальная физическая лаборатория, Англия), И.Партриджу (Университет Кренфилд, Англия), Р.Талрейя (Университет Техаса, США), О.Т.Томсону (Aalborg).*

#### **Сведения об авторе:**

**Professor Anthony Kelly**

Distinguished Research Fellow

Gordon Laboratory, Department of Materials Science and Metallurgy, University of Cambridge, Cambridge CB2 3QZ England. World Fellow of the International Committee on Composite Materials. ak209@cus.cam.ac.uk