



О ФОРМИРОВАНИИ ТЕХНИЧЕСКИХ ТРЕБОВАНИЙ К ПОЛИМЕРНОМУ МАТЕРИАЛУ ПЕРСПЕКТИВНОЙ РАБОЧЕЙ ЛОПАТКИ ВЕНТИЛЯТОРА ТРДД

ФГУП ГНЦ "ЦИАМ им. П.И. Баранова":

Тельман Джамалдинович Каримбаев, начальник отдела
Алексей Анатольевич Луппов, начальник сектора
Дмитрий Викторович Афанасьев, научный сотрудник
Денис Сергеевич Пальчиков, инженер первой категории

Правильный выбор композиционного материала для широкохордных рабочих лопаток вентиляторов ТРДД обеспечивает заметное снижение трудовых и временных затрат при их создании, приводит к снижению технического риска получить нерациональную конструкцию. В работе рассмотрены параметры полимерных композиционных материалов (ПКМ), которые составляют основу технических требований к материалу разрабатываемой рабочей лопатки вентилятора ТРДД большой степени двухконтурности. Базовая совокупность параметров, необходимых для формирования технических требований к ПКМ лопатки, установлена путём анализа способов выбора ПКМ зарубежными двигателестроительными фирмами, главным образом, фирмой "Дженерал Электрик" для лопатки вентилятора GE-90, а также опыта работ ЦИАМ.

The right choice of composite material for wide-chord work blades fans of turbofan provides a significant reduction in labor and time costs when they are created, leading to reduction in technical risk of inefficient design. The paper discusses the parameters of polymeric composite materials (PCM) that form the basis of technical requirements at the material developed by the fan blade turbofan high bypass ratio. The basic set of parameters, required for the formation of technical requirements for the PCM blades, installed by analyzing ways to select PCM foreign engine companies, mainly by the General Electric company for fan blade GE-90, as well as the experience of the work of CIAM.

Ключевые слова: турбореактивный двигатель, лопатки вентиляторов, полимерные композитные материалы.
Keywords: turbofan engines, fan blades, polymeric composite materials.

Проблемы повышения эффективности ГТД приводят к разработке и использованию ТРДД большой степени двухконтурности, отличающихся большими габаритами вентиляторов. Отмеченная тенденция развития ТРДД большой степени двухконтурности поднимает проблемы массы и стоимости изделия. Решение этих актуальных задач двигателестроительные фирмы мира видят в применении полимерных композиционных материалов (ПКМ) для изготовления широкохордных рабочих лопаток, бронезащитного корпуса и других деталей вентиляторов перспективных ТРДД.

Работы по применению композиционных материалов в двигателях начались в 60-х годах прошлого столетия. В течение этого времени было проведено огромное число исследований. Как удачные, так и неудачные результаты этих исследований заметно обогатили опыт обращения с ПКМ. Накопленный опыт позволил фирме "Дженерал Электрик" впервые в 1995 г. сертифицировать двигатель GE-90 с рабочими лопатками вентилятора, выполненными из углепластика. Опыт эксплуатации двигателя GE-90 позволил фирме бесповоротно заняться внедрением ПКМ в последующие двигатели. В настоящее время фирмой разрабатывается 4-е поколение лопаток вентилятора для двигателя GE-9. Вслед за фирмой "Дженерал Электрик" потянулись все основные двигателестроительные фирмы, каждая из которых вносит свою лепту в развитие как самих ПКМ, так и способов их применения в двигателях. Так применительно к двигателю LEAP-X фирма Snesta совместно с "Дженерал Электрик" ориентируется на тканую структуру рабочей лопатки вентилятора и RTM-технологии. Фирма Rolls-Royce развивает роботизированную технологию создания рабочей лопатки вентилятора.

Особенности механических и эксплуатационных свойств ПКМ, связанных, прежде всего, с их недостаточной вязкостью разрушения, а также ограниченные возможности отечественного рынка в поставке исходных материалов необходимого качества, отсутствие в России опыта эксплуатации высоконагруженных деталей двигателя из ПКМ требуют всестороннего изучения опыта ведущих фирм. На основе изучения опыта создания неметаллической лопатки вентилятора GE-90 проведе-

ны исследования по установлению перечня параметров для формирования технических требований к ПКМ широкохордных рабочих лопаток вентиляторов перспективных ТРДД большой степени двухконтурности. В отмеченных выше условиях анализ и обобщение опыта уже выполненных работ, безусловно, будет способствовать снижению риска при новых разработках и повышению эффективности принимаемых технических решений.

1. Выбор материала лопатки вентилятора GE-90 фирмой "Дженерал Электрик"

Для того чтобы понять важность тех или иных свойств ПКМ и определить критерии отбора материала, стоит обратиться к истории создания рабочей лопатки двигателя GE-90. На рис. 1 представлена конструкция лопатки вентилятора двигателя GE-90. В настоящее время двигатель GE-90 с рабочими лопатками из углепластика является единственным двигателем с наибольшей наработкой в эксплуатации. Нарботка первых экземпляров лопаток из углепластика превысила 30 млн часов. Фирма планирует, что их наработка может быть доведена до 150 млн летных часов. Безотказная эксплуатация двигателя GE-90 является реальным подвее-

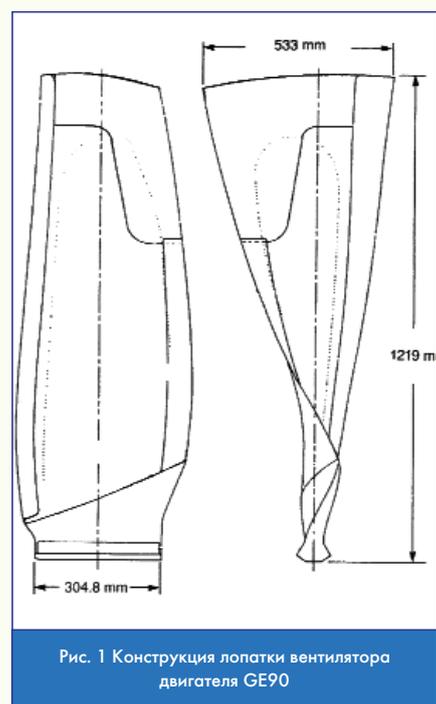


Рис. 1 Конструкция лопатки вентилятора двигателя GE90



рждением верности выбранных технических решений при его создании и необходимости учета этого опыта при новых разработках.

Рабочая лопатка вентилятора двигателя GE-90 изготовлена по технологии автоклавного прессования из предварительно подготовленного препрега. Кандидатами на роль основного материала лопатки GE-90 фирмой были выбраны следующие марки препрегов:

- TOREY F3900 (волокна марки T800/связующее F3900),
- Hexcel F3900 (волокна IM7/связующее F3900),
- BP E7T1-2 (волокна IM7/связующее E7T1-2),
- Fiberite 977-2 (волокна IM7/связующее 997-2),
- Hercules 8551-7 (волокна IM7/связующее 8551-7),
- Amoco 1982,
- Ciba-Geigy RX 121.

1.1 О выборе материала наполнителя. Следует отметить, что в рассматриваемых материалах в качестве наполнителя используются углеродные волокна IM7 или T800. Это высокопрочные волокна, одни из лучших волокон в мире по своим механическим свойствам на тот момент. В таблице 1 приведены сравнительные параметры зарубежных углеродных нитей. Сравнение подчёркивает тот факт, что для такой высоконагруженной детали, как рабочая лопатка вентилятора, следует применять максимально прочные волокна. Наряду с прочностью для наполнителей рассматриваются такие параметры как предельная деформация, стабильность свойств, стоимость, доступность и другие технические и экономические факторы.

Таблица 1
Сравнительные параметры зарубежных углеродных нитей

Волокно	Фирма	Содержание углерода, %	Прочность при растяжении, МПа	Модуль упругости, ГПа	Нитей в жгуте	Свойства ПКМ		
						$\sigma_{в}$, МПа	$\sigma_{сж}$, МПа	Ев, ГПа
IM-4	Hexcel	~94	4769	276	12K	2484	н/д	179
IM-7	Hexcel	~94	5175 (6K) - 5760 (12K)	276 (6K) - 290 (12K)	6K - 12K	3036	н/д	176
IM-9	Hexcel	~94	6072 (6K) - 6141 (12K)	290 (6K) - 290 (12K)	6K - 12K	3222	н/д	176
T700S	Toray	~93	4900	230	6K - 24K	2550	1470	135
T800S	Toray	-	5880	294	24K	2950	н/д	154
T800H	Toray	~96	5490	294	6K - 12K	2650	1570	170
T1000G	Toray	~95	6370	294	12K	3040	1570	165
M40J	Toray	>99	4410	377	3K - 12K	2450	1270	230
M55J	Toray	>99	4020	540	6K	2010	880	340
M60J	Toray	>99	3920	588	3K - 6K	2010	785	365

По значениям модулей упругости при растяжении и прочности углеродные нити IM7 и T800 близки. Препреги TOREY F3900 (волокна марки T800/связующее F3900) и Hexcel F3900 (волокна IM7/связующее F3900) выполнены на одном связующем и отличаются только наполнителем. Тот факт, что в результате испытаний обеих марок этих препрегов фирма GE выбрала для лопатки именно препрег на волокнах IM7 (пусть и на другом связующем), косвенно говорит об их лучших качествах относительно волокон T800.

1.2 Эволюция микроструктуры матрицы ПКМ для лопатки GE-90. Применение углепластиков в авиации было первоначально ограничено повышенной чувствительностью этих материалов к повреждениям. Прочностные характеристики ПКМ низки в окрестности технологических отверстий, выполненных для крепления, после эксплуатационных повреждений, полученных от удара посторонними предметами. Углепластики, используемые для таких силовых структур, как рабочие лопатки вентиляторов, должны быть стойкими к технологическим дефек-

там, эксплуатационным повреждениям и их последствиям. В результате многолетних поисков были разработаны композиционные материалы с многофазной матрицей, являющейся смесью терморезистивных и термопластичных полимеров. Такие ПКМ сочетают в себе высокие механические свойства терморезистивных матриц с высокой ударной вязкостью термопластов. Для рабочей лопатки GE-90 выход оказался в создании матрицы с "трёхфазной системой", в которой эпоксидная матрица была модифицирована применением термопластичной фазы и частиц резины (каучука). Благодаря этому удалось поднять остаточную прочность ПКМ при сжатии до уровня 350 МПа после удара с энергией в 30,5 Дж. При решении ряда технических задач с применением современных полимерных связующих материалов отмеченный уровень остаточной прочности ПКМ при сжатии считают базовым.

На рис. 2 показана эволюция материала матрицы, позволяющая на 200% повысить вязкость разрушения ПКМ и обеспечить указанные выше требования к трещиностойкости и сопротивляемости ударным нагрузкам ПКМ для лопатки вентилятора GE-90.



Рис.2 Эволюция микроструктуры ПКМ лопатки GE-90 для повышения стойкости удара

1.3 О выборе ПКМ для лопатки GE-90. Следующие характеристики ПКМ рассматривались при отборе материала для рабочей лопатки вентилятора:

- свойства ПКМ при растяжении и сжатии,
- свойства ПКМ при межслоевом сдвиге,
- усталостные характеристики ПКМ,
- трещиностойкость (при статических и динамических нагрузках),
- стойкость при попадании посторонних предметов (испытывались как плоские панели, так и одиночные лопатки).

Очевидно, что повышенные характеристики статической и динамической прочности и жесткости являются важными критериями при выборе материала для рабочей лопатки вентилятора. Однако эти необходимые требования, как будет показано ниже, оказываются недостаточными.

Известно, что в результате массовых исследований на этапе выбора материала для лопатки GE-90 лидером стал препрег марки Hercules 8551-7 (IM7/8551-7). В настоящее время он выпускается под маркой Hexcel 8551-7. Для формирования требований к ПКМ рабочей лопатки вентилятора представляет интерес сравнение свойств кандидатов и окончательно выбранного материала. Это позволит понять, в чём конкретно были технические преимущества материала IM7/8551-7 перед остальными конкурентами.

Ниже представлен сравнительный анализ результатов испытаний 10 наиболее совершенных материалов авиационного назначения (на момент 1992 г.), четыре из которых были претендентами на материал лопатки GE-90 (на диаграммах они обозначены индексами А, F, H, I). Результаты экспериментов заимствованы из публикации [2] и [3]. Большинство препрегов выполнено на волокнах IM7 и отличаются только полимерной матрицей. Тем интереснее проследить именно вклад полимер-

ной матрицы на формирование тех или иных свойств ПКМ.

Если выбирать лучший препрег для лопатки из ПКМ, сравнивая материалы только по значениям их модулей упругости или прочностей при растяжении, то материал IM7/8551-7, обозначенный литерой "I", не будет самым лучшим (см. рис. 3). Наибольшую прочность при растяжении имеет материал "E". Это препрег на волокнах IM7 и связующем 5260. Материал "С" на волокнах G40-800X и матрице 5255-3 имеет самый высокий модуль упругости при растяжении вдоль волокон, а материалы "G" и "H" (IM7/F655 и T800/F3900) имеют наибольший модуль упругости при сжатии.

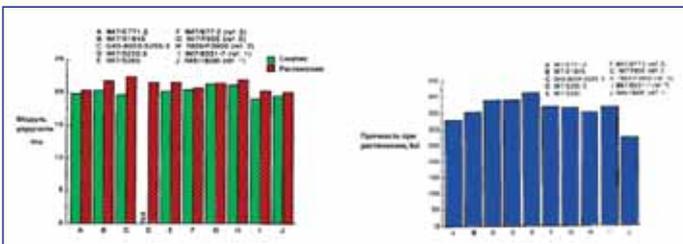


Рис. 3 Свойства однонаправленных ПКМ в направлении волокна: а- модули упругости при растяжении и сжатии, б- прочности при растяжении

По результатам сравнения характеристик трансверсальной прочности (см. рис. 4) в лидерах будут так же препреги других марок, а именно: "E" IM7/5260 (самая высокая прочность) и "С" G40-800X/5255-3 (самый высокий модуль при растяжении). Выбранный материал IM7/8551-7 на рис. 4 с литером "I" по показателю прочности находится на втором месте.

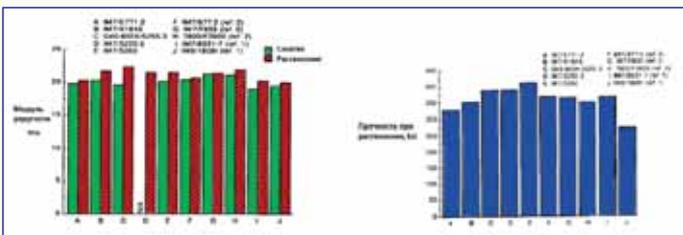


Рис. 4 Свойства однонаправленных ПКМ в поперечном направлении волокон: а-прочности, б- модули упругости

Представленные на рис. 5 характеристики сдвига в плоскости слоя сравниваются путём анализа результатов испытаний на растяжение образцов с симметричной укладкой [45°]_n. Видно, что и в этих испытаниях препрег IM7/8551-7 показал не самые лучшие результаты. Более прочными оказались образцы материала, выполненные из препрега марки Fiberite 977-2 (IM7/ 997-2), а максимальную жёсткость показали образцы из материала IM7/5260.

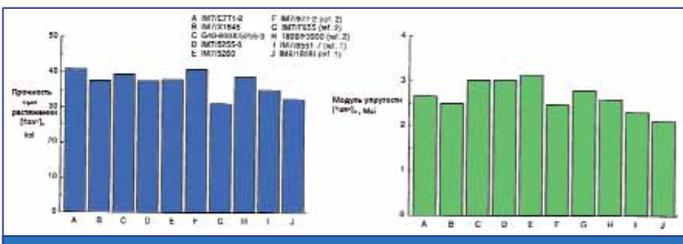


Рис. 5 Свойства при растяжении образцов с укладкой [± 45°]_n а - прочности, б - модули упругости

Далее рассматриваются испытания, в которых оценивается стойкость образцов к различным повреждениям. Можно предположить, что испытания образцов квазиизотропной укладкой с отверстиями выявят лучшие качества препрега IM7/8551-7. Но и это оказывается не совсем так. По результатам этого теста лидирует материал "С" G40-800X/5255-3.

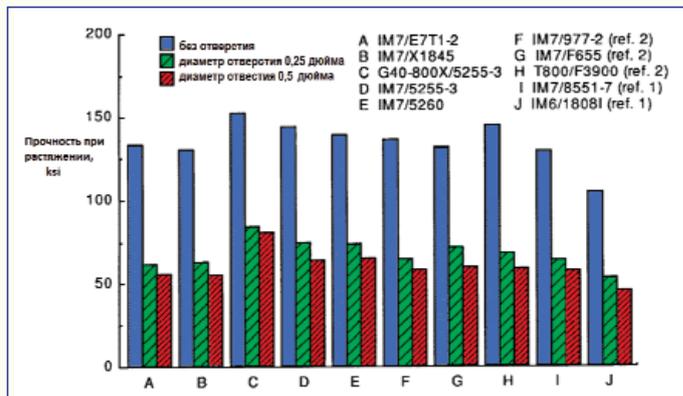


Рис. 6 Прочность при растяжении ПКМ с квазиизотропной укладкой. Образцы без отверстия (unpotted) и с открытым отверстием (open-hole) двух диаметров

Зависимость прочности на растяжение образцов с отверстием от модуля при растяжении ПКМ (рис. 7) также не выявляет материал IM7/8551-7 как наиболее предпочтительный от их модуля упругости при растяжении. Диаметр отверстия 0,25 дюйма (около 6,35 мм).

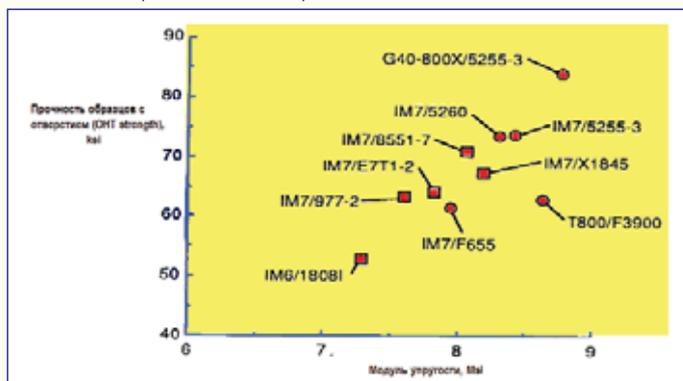


Рис. 7 Зависимость прочности образцов с открытым отверстием от их модуля упругости при растяжении. Диаметр отверстия 0,25 дюйма

Безоговорочное преимущество препрега марки IM7/8551-7 проявляется при сравнении ПКМ по параметру остаточной прочности при сжатии (CAI) как после удара падающим грузом при испытаниях на копре, так и после удара высокоскоростным ударником при стрельбе из пневматической пушки. Результаты сравнительных испытаний конкурирующих материалов по этому параметру приведены на рис. 8. Именно в этих испытаниях проявилось существенное преимущество материала на основе препрега IM7/8551-7. У этого материала практически нет конкурентов. Следом за ним идет материал на основе препрега на волокнах T800 марки TOREY F3900.

К аналогичному заключению можно придти, если сравнить остаточную прочность материала после удара у образцов, испытанных при повышенной температуре и влажности (HW), относительно образцов, испытанных при комнатной температу-

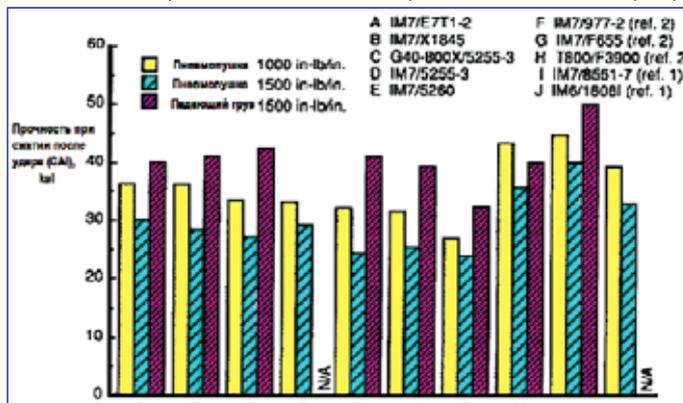


Рис. 8 Прочность при сжатии после удара образцов различных ПКМ с квази-изотропной укладкой



ре (RTD), где преимущества препрегов IM7/8551-7 и T800/F3900 особенно хорошо заметны.

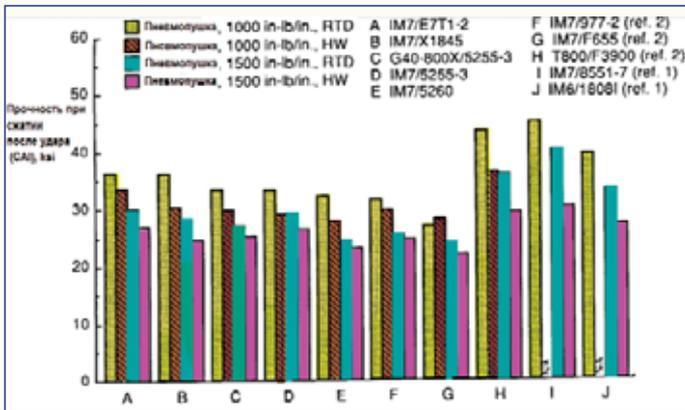


Рис. 9 Остаточная прочность после удара у образцов, испытанных при повышенной температуре и влажности (HW), относительно образцов, испытанных при комнатной температуре (RTD)

Наиболее наглядно преимущества по работоспособности и эксплуатационной надежности ПКМ IM7/8551-7, выбранного для рабочей лопадки вентилятора GE-90, видны при рекомендуемом NASA интегральном сравнении ПКМ с повреждениями одновременно по двум параметрам: по характеристике их остаточной прочности на сжатие после удара и прочности на сжатие образцов с отверстием. На рис. 10 можно видеть, что по указанному сравнительному параметру безоговорочным фаворитом является материал IM7/8551-7.

Из этого краткого анализа можно сделать вывод, что наряду с известными характеристиками прочности и жесткости ПКМ важной сравнительной характеристикой для обеспечения

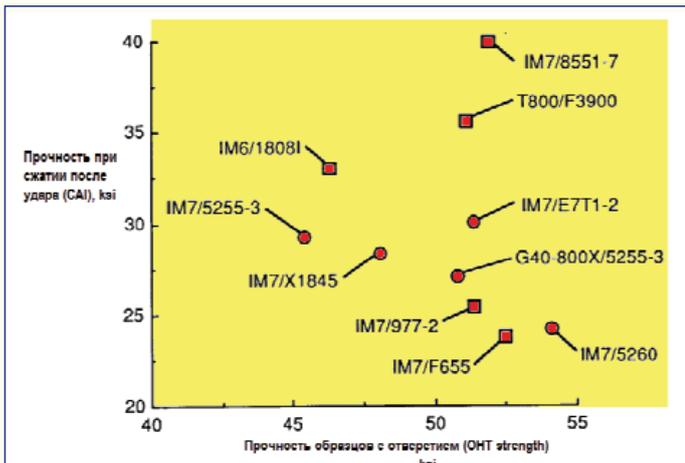


Рис. 10 Прочность на сжатие образцов из различных ПКМ с отверстием 0,25 дюйма в диаметре (ОНС) и их остаточная прочность на сжатие после удара CAI(1500 in-lb/in.)

эксплуатационной надежности неметаллической лопадки вентилятора можно считать совокупность величин остаточной прочности на сжатие после удара и прочности на сжатие образцов с отверстием. Указанные характеристики ПКМ непосредственно не используются при проектировании рабочей лопадки вентилятора. Однако относительная простота их экспериментального определения и их прямая связь с эксплуатационной надежностью изделий определяют их техническую важность. Таким образом, работоспособность материала при наличии повреждений, определение допустимых величин технологических дефектов и эксплуатационных повреждений можно считать решающим фактором, определяющим выбор того или иного ПКМ для лопадки вентилятора при условии, что остальные прочностные характеристики близки. Кроме того, не менее важный вывод, который можно сделать из анализа предыдущих экспериментальных данных, говорит о том, что влияние характеристик вязкости разрушения полимерного связующего

на величину остаточной прочности при сжатии после удара имеет решающее значение.

В подтверждение тезиса о первостепенной важности наличия у лопадки стойкости к ударным нагрузкам можно вспомнить неудачу компании Rolls-Royce с двигателем RB211-06. Лопадки вентилятора двигателя RB211-06, изготовленные из углепластика марки Hifil с относительно мало изученным комплексом свойств в эксплуатационных условиях, в целом, удовлетворяли всем параметрам по прочности и жесткости. Однако в то время они не проходили испытаний на птичестойкость [10]. Именно это стало одной из основных причин банкротства компании Rolls-Royce и замены лопаток из углепластика на двигателе семейства RB211 на полые титановые лопатки.

2 Квалификация материала лопадки вентилятора GE-90

После того, как фирма “Дженерал Электрик” остановила свой выбор на препреге марки Hercules 8551-7 (IM7/8551-7), был проведен полный комплекс квалификационных испытаний материала и других материалов, входящих в конструкцию лопадки. Квалификация ПКМ лопадки GE-90 включала в себя следующие этапы:

- получение характеристик материала путём проведения обширной программы испытаний, выходящих за рамки руководства Mil-Handbook-17;

- получение статистически обоснованных значений расчетных характеристик ПКМ путём статистической обработки результатов экспериментальных исследований, а именно, вычисление средних значений и значений по A-Basis в соответствии с руководством Mil-Handbook-17 и процедурами, рекомендованными координационной группой по композиционным материалам с полимерной матрицей. Следует обратить внимание на то, что рабочая лопадка вентилятора по отечественной классификации не относится к основным деталям двигателя, для которых определение параметров материала должно быть выполнено в соответствии с требованиями A-Basis (99 % вероятность прочности при 95 % доверительном уровне). Тем не менее, фирма “Дженерал Электрик” квалификацию ПКМ лопадки GE-90 провела с удовлетворением требований A-Basis, обеспечив повышенную точность проектных работ. Представляется, что в условиях отсутствия отечественного опыта эксплуатации рабочих лопаток из ПКМ и с учетом качества исходных материалов, расчетные значения характеристик ПКМ для разрабатываемых рабочих лопаток вентиляторов на данном этапе освоения ПКМ следует определять в соответствии с требованиями A-Basis.

В таблице 2 приведен объём квалификационных испытаний материалов, использованных в конструкции лопадки GE90 (однонаправленные ленты, ткани и клеи). Кроме того, в таблице перечислены основные виды испытаний и приведено число испытанных образцов. На выходе квалификационного этапа работ ПКМ присваивается статус: “материал полностью испытан” [1].

В течение 6 лет в период с 1988 по 1994 гг. фирма “Дженерал Электрик” формировала базу данных по материалам. Хронологию создания базы данных документов по исследованию, квалификации, а также методам контроля материалов лопадки двигателя GE-90 можно условно разбить на три этапа:

- 1988-1990 годы. Выбор и исследование материалов - более 800 документов. Исследование образцов в виде панелей и лопаток на удар и попадание посторонних предметов.

- 1991г. Квалификация материала Hercules IM7/8551-7 - более 600 документов. Выпуск документов по спецификации материалов и процессам контроля.

- 1992-1994 годы. Формирование документов по всем материалам, допущенным к применению в конструкции лопадки GE-90. База данных включает более 3400 документов.

В дополнение работ по общей квалификации ПКМ фирма “Дженерал Электрик” выполнила громадный объём исследований по специальной квалификации материала лопадки и её

Таблица 2 Номенклатура испытаний и число образцов, исследованных фирмой “Дженерал Электрик” при общей квалификации ПКМ для лопатки

Свойства / материал	Ленты	Ткани	Клей (адгезивы)
Основные свойства слоёв	1569	393	248
Физические свойства	426	20	
Верификация данных	60	100	59
Усталостные характеристики	388	50	
Характеристики ползучести	35		
Воздействие окружающей среды	136	50	194
Эффект от прошивки слоёв	60		
Сжимаемость в оснатке	200		
Всего образцов	2874	613	501

конструкционной прочности, что является предметом последующих исследований.

3 Альтернативные подходы создания рабочих лопаток вентиляторов из ПКМ

Как указано во введении, в настоящее время продолжается активная разработка и внедрение в авиационные двигатели лопаток вентиляторов из ПКМ всеми ведущими зарубежными двигателестроительными фирмами. Ниже кратко охарактеризованы работы фирм Snecma и Rolls-Royce.

3.1 Двигатели семейства LEAP. Помимо семейства двигателей фирмы “Дженерал Электрик” (GE90, GE115B, GENx, GE9) фирма CFM International, являющаяся совместным предприятием GE/Snecma, разрабатывает новый способ получения лопаток вентилятора и бронезащитных корпусов из ПКМ для перспективных двигателей LEAP. Восемнадцать лопаток двига-

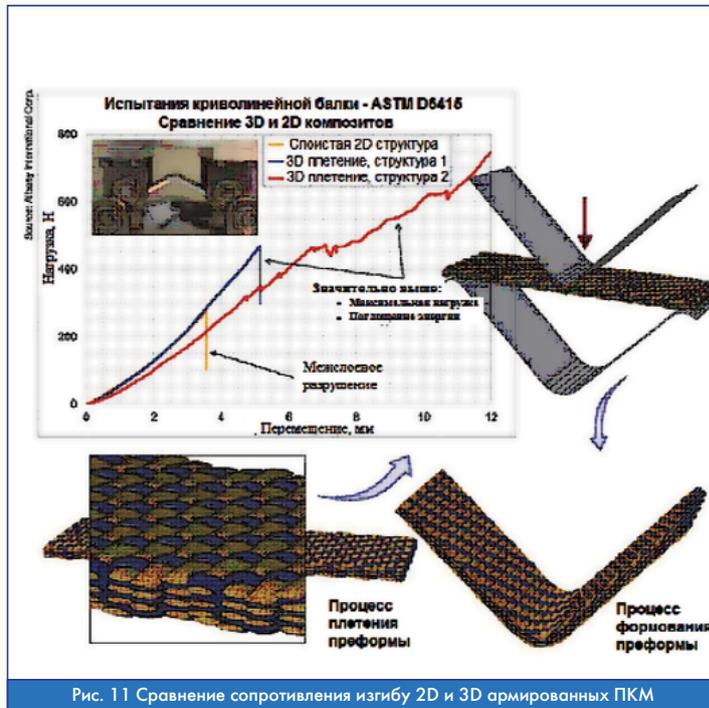


Рис. 11 Сравнение сопротивления изгибу 2D и 3D армированных ПКМ

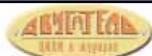
телей LEAP из ПКМ являются первыми лопатками [4], для изготовления которых используются 3D-тканые материалы и, в отличие от препреговой технологии фирмы GE, RTM-технология пропитки смолой под давлением. Трёхмерная тканая структура материала обеспечивает [4] превосходную стойкость лопатки удару, а технологический процесс RTM оказывается благоприятным для изготовления более тонких и изогнутых лопаток. На рис. 11 представлены результаты сравнительных испытаний образцов ПКМ, выполненных из ткани слоистой 2D структуры и объёмного 3D плетения. Испытаниями [5], проведенными в соответствии с ASTM D6415, показано: несмотря на то, что ПКМ с 3D структурой имеют меньшую жесткость на межслоевой сдвиг, их межслоевая прочность почти в 1.5 раза выше.

В производстве лопаток двигателя LEAP-1 используется

связующее CYCOM® PR520 RTM фирмы Cytec. Особенность данного связующего в том, что в его составе содержится большая концентрация добавок термопластичного материала, которые придают ПКМ, изготовленным с применением этого связующего, повышенную трещиностойкость и стойкость к удару. Энергия разрушения связующего CYCOM® PR520 равна $GIC = 1,41 \text{ кДж/м}^2$. Остаточная прочность при сжатии после удара с энергией 30,5 Дж углеродистого на волокнах T650-35, сос-

Таблица 3 Свойства ПКМ и их компонентов для лопаток вентиляторов ТРДД

Лопатки	GE90					Rolls-Royce	Leap-X			ГС-12	ГД-14 (2014)		
Марка связующего	Hexcel 8551-7	Hexcel 8552	Hexcel M21	Hexcel M21	Hexcel M21	Hexcel M91	Cycom PR 520 RTM	ИИУМТ T-26	ИИУМТ T-26	ИИУМТ T-26	ИИУМТ T-26	Toho Tenax PEEK	
Температура сушки (алогмаксимальной) стеклования Tg, °C	157 (116)	195 (154)	195 (150)			185-190	161	205 (172)				143 (ЮНИАВУ)	
Максимальная температура эксплуатации, °C	93	121	121			120	104	140					
Прочность при растяжении, МПа	99,3	120,7					82,1	95					
Модуль при растяжении, ГПа	4,1	4,67					4,0	3,1					
Предельная деформация, %	4,40	1,7					3,0	4-7,2					
K _{сг} , МПа·м ^{0,5} (ksi·in ^{0,5})	(3,19)	(1,48)					2,2 (2,0)	0,624					
G _{сг} , Дж/м ² (in lb/in ²)	(5,46)	(3,88)					1410 (8,1)	188					
Марка волокон	IM7 (60%)	IM7 (57,2%)	IM7 (59,2%)	1700 (57%)	1800S (57%)	IM7 (59,2%)	T650-35 88S (60%)	HTA40-3k 8H (60%)	HTA40-3k Пластиф.	T800 (д.уклад.)	IM565-24K exp. HTA40-3K exp.	HT540 [0] _{тн}	HTA40 [0;90]
Прочность при растяжении 0°, МПа	2760	2724	2860	2314	2981	2980	945	910	904	1200	1567,1	2300	955
Модуль при растяжении 0°, ГПа	158,6	164	160	147	170	165	75,8	65	66	92	146,8	123	60
Предельная деформация, %	1,64			1,54			3,0				1,06		
Прочность при растяжении 90°, МПа	75,6	111						661	904	914,5	711,3	88	
Модуль при растяжении 90°, ГПа	8,34	12						66	66	64	29,7	9,8	
Прочность при сжатии 0°, МПа	1586	1680	1790	1461	1657	1860	814	643	638	-	-	1148	725
Модуль при сжатии 0°, ГПа	148,2	149,6	148	118	139	150	63,4					129	59
Прочность при сдвиге в плоскости слоя, МПа	117,2	120	-	112			112			145,9	94	234	144
Модуль при сдвиге в плоскости слоя, ГПа	5,86	-	4,6	4,7	4,8		5,7			18,81	5,38	4,6	4,5
Прочность при межслоевом сдвиге, МПа	100	137	110	113	96	110	61,4 (связ.)	74	66	62	65 (69)		
Прочность на сдвиг после удара, МПа (30,5 Дж)	351		298			350	396	225	301	-	-	255	227
Ударная вязкость по Шарпу б.н. кДж/м ² , торцев [пластик]										141,5 (200,7)	239,5 (235,9)		



твляет сверхвысокое значение в 396 МПа (см. таблицу 3).

Однако термопластичные добавки делают связующее очень густым. При комнатной температуре оно имеет консистенцию густой пасты. Это накладывает свой отпечаток на весь технологический процесс. Для того чтобы произвести процесс дегазации связующего, его требуется разогреть до температур выше 105 °С, а успешную пропитку можно произвести только при температурах, превышающих 165 °С, когда эти добавки перейдут в жидкую фазу и не будут отфильтровываться волокнами наполнителя. Время жизни смолы при такой высокой температуре ограничено. На весь процесс пропитки отводится не более 30 - 40 минут, что, в свою очередь, вынуждает использовать в процессе пропитки высокие давления. По данным [4] смола подаётся в пресс-форму под давлением 8,6 атм. Использование этого связующего требует применения специальной конструкции пресс-формы, оборудованной дополнительными связями для жесткости и каналами разогрева смолы [6].

3.2 Разработки фирмы Rolls-Royce. Компания Rolls-Royce после неудачной попытки с двигателем RB211 повторно возвратилась к решению проблемы создания вентилятора с рабочими лопатками из ПКМ. Для их использования в новом двигателе Trent 1000 фирмы Rolls-Royce и GKN Aerospace открыли новый центр. Технология производства лопаток базируется на процессе автоматизированной укладки ленты, при котором влияние человеческого фактора минимизировано и идентичность изделий гарантирована. Опыт компании GKN в области автоматизации потребовался фирме Rolls-Royce для обеспечения повышенных темпов производства.

Автоматическая выкладка узкими лентами позволяет менять направление укладки волокон даже в пределах одного слоя, направляя ленту, например, по "линиям жёсткости". В настоящее время рядом зарубежных исследовательских центров ведутся работы по оптимизации различных структур из ПКМ с помощью автоматизированной выкладки, в том числе, с оценками влияния нахлёстов лент друг на друга или пробелов между ними [7].

Для изготовления лопаток компания Rolls-Royce применяет препрег марки M91 фирмы Hexcel, имеющий величину остаточной прочности при сжатии после удара (с энергией удара 30,5 Дж) равную 350 МПа, что полностью совпадает с аналогичным параметром у лопатки двигателя GE90 (см. таблицу 3).

4 Разработки ЦИАМ при создании рабочих лопаток вентиляторов из ПКМ

ЦИАМ совместно с ГП "Ивченко-Прогресс", ВИАМ, НИАТ, НИИД включился в работы по созданию материалов и деталей, в том числе рабочих лопаток вентиляторов двигателей IV поколения из ПКМ, во второй половине 60-х годов прошлого столетия [8]. Новый виток исследований начался в 2000 годах.

Таблица 4 Результаты испытаний на межслоевой сдвиг ПКМ, изготовленных методом пропитки (RTM, инфузия) с различными компонентами

Марка волокна (ткани)	Hexcel 0926 сатин	Hexcel 0926 сатин	Hexcel 0926 сатин	Porsher HTA-40 саржа (прессов.)	IMS65-24к HTA40-3К полотно	Porsher HTA-40 саржа	Porsher M46JB-12к однонапр.	IMS65-24к HTA40-3К полотно	HTA-40 Сатин Инфузия
Связующее	RTM-6	ЭДТ-10	ВСТ-1210	ВСЭ-17	ВСЭ-17	УП-610 Э-181 Диаметр-х	УП-610 Э-181 Диаметр-х	T-26	T-26
Прочность при сдвиге, кгс/мм2	6,02	5,55	5,68	5,4	6,0	6,03	5,93	6,5	7,55
Марка ткани (волокна)	УТ-900 (УКН-3К) саржа	УТ-900 (УКН-3К) саржа	УТ-900 (УКН-3К) саржа	УТ-900 (УКН-3К) саржа	УТ-900 (УКН-3К) саржа	УТ-900 (УКН-3К) саржа	УТ-900 (УКН-3К) саржа	УОЛ-300 (УКН-6К) Однонапр.	T800 саржа
Связующее	RTM-6	Sicomин 1720	NPPN-631 Диаметр-Х	УП-610 Э-181 Диаметр-х	УП-637 Изо МТГФА (инфузия)	T-26	УП-610 Э-181 Диаметр-х	T-26	T-26
Прочность при сдвиге, кгс/мм2	3,33	4,08	4,12	4,2	5,2	5,32	6,67	5,7	

Результаты исследований 2006-2010 годов, приведшие к освоению RTM-технологии изготовления рабочих лопаток вентилятора ПС-12, изготовлению с её применением партии экспериментальных лопаток, и успешными разгонными и усталостными испытаниями их на стендах ФГУП "ЦИАМ им. П.И. Баранова", опубликованы в [9]. Следует отметить, что первые модификации лопаток ПС-12 изготавливались полностью из отечественных материалов. Наполнителем служила углеродная ткань УТ-900-240-3К на волокнах УКН-3К. В основе связующего была смола УП-610 (триглицидиловый эфир парааминофенола). Лопатки изготавливались по RTM-технологии и для снижения вязкости связующего оно разбавлялось низковязкими эпоксидными смолами. В разное время использовались такие смолы, как Э-181, ЭА, УП-637. Одновременно велись поиски оптимального отвердителя. В качестве основного отвердителя использовался Диаметр-Х (Куамин). Кроме Диаметр-Х велись эксперименты с отвердителями ДДС, Изо-МТГФА и др.

Основным критерием выбора связующего и то время была прочность ПКМ при межслоевом сдвиге, определяемом трёхточечным изгибом или методом короткой балки по аналогичному с приведенным на рис. 11 методу.

Повсеместное, в том числе в ВИАМ, использование зарубежного сырья направили наши поиски "хорошего" материала для рабочей лопатки вентилятора ПД-14 в это русло. Во-первых, была произведена замена волокон отечественно производства УКН-3К на импортные волокна T800 (фирма TOREY), из которых фирмой "Ниагара" была изготовлена ткань УТ-900(И). Во-вторых, к этому времени фирмой ЗАО "ИНУМиТ" было создано тетра-функциональное связующее марки T-26, предназначенное для RTM-технологии и высокотемпературной инфузии, которое по своим свойствам не уступало лучшим зарубежным аналогам. В таблице 3 приведены свойства изученных ПКМ и их компонентов, а в таблице 4 приведены результаты проведенных экспериментальных исследований.

Партия лопаток ПС-12, изготовленная на волокнах T-800 и связующем T-26, обладала несколько более высокими прочностными характеристиками по сравнению с первой партией лопаток, изготовленных с применением отечественного сырья.

Что касается улучшения свойств трещиностойкости и стой-

