



РАБОЧИЕ ЛОПАТКИ ВЕНТИЛЯТОРОВ БОЛЬШОЙ СТЕПЕНИ ДВУХКОНТУРНОСТИ ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ТРДД

ФГУП ГНЦ "ЦИАМ им. П.И. Баранова":

Александр Сергеевич Новиков, д.т.н., заместитель генерального директора института,
Тельман Джамалдинович Каримбаев, д.т.н., начальник отдела

Рост грузопотоков, увеличение пассажирских перевозок стимулируют развитие двигателестроительной отрасли. Наиболее совместимый с природой ГТД способ повышения их эффективности заключается в освоении высоких температур. Однако этот способ сегодня ограничен предельными температурами работоспособности существующих и перспективных металлических материалов. В этих условиях, по-видимому, наибольший вклад в решение проблемы повышения эффективности ГТД для ГА вносит разработка и использование ТРДД большой степени двухконтурности. Главной проблемой для таких крупногабаритных вентиляторов является обеспечение безопасности полетов, особенно, в нештатных ситуациях.

The increase in freight traffic, the increase in passenger traffic stimulated the development of engine industry. The most compatible with the essence of the GTD method to improve their effectiveness lies in developing high temperatures. However, this method is now limited to a limit temperature operability of existing and promising metallic materials. In these conditions, apparently, the greatest contribution to the solution of problems of increase of efficiency of GTE to the CA introduces the development and use of turbofan high bypass ratio. The main problem for these large fans is to ensure safety, especially in emergency situations.

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

Введение

Рост грузопотоков, увеличение пассажирских перевозок стимулируют развитие двигателестроительной отрасли. Борьба за высокие прибыли в условиях повышенных цен на топливо и суровой конкуренции ведущих двигателестроительных фирм за рынки сбыта (см, например, [1]) предопределяет разработки ГТД повышенной эффективности. Наиболее совместимый с природой ГТД способ повышения их эффективности заключается в освоении высоких температур. Однако этот способ сегодня ограничен предельными температурами работоспособности существующих и перспективных металлических материалов. Высокотемпературные композиционные материалы только начинают созреть. В этих условиях, по-видимому, наибольший вклад в решение проблемы повышения эффективности ГТД для ГА вносит разработка и использование ТРДД большой степени двухконтурности. Однако и это направление сталкивается с определенными ограничениями. Вентиляторы ТРДД большой степени двухконтурности отличаются крупными габаритами, большой массой, что приводит к ряду серьезных проблем. Главной проблемой для таких крупногабаритных вентиляторов является обеспечение безопасности полетов, особенно, в нештатных ситуациях:

- при обрыве рабочей лопасти вентилятора,
- при попадании в тракт двигателя посторонних предметов, в том числе крупных птиц,
- при автоколебаниях различной природы и других.

Очевидно, что с увеличением размеров вентиляторов вероятность появления таких нештатных событий, а также трудности обеспечения прочности основных деталей в условиях эксплуатации и проблемы снижения массы только возрастают.

Сегодня по оценкам всех ведущих двигателестроительных фирм мира при создании ТРДД большой степени двухконтурности решение проблем обеспечения безопасности полетов, повышения конкурентоспособности двигателя невозможно без применения безбандажных широкохордных рабочих лопаток вентиляторов из полимерных композиционных материалов (ПКМ).

1. Рабочие лопасти из углепластика.

Работы по применению композиционных материалов в двигателях начались в 60-х годах прошлого столетия на этапе создания двигателей IV поколения. С того времени было проведено огромное число расчетных, технологических, экспериментальных исследований. Как удачные, так и неудачные результаты этих исследований заметно обогатили опыт обращения с ПКМ. Уже тогда в двигателях Д-18Т появились вставное внутреннее бронезащитное кольцо (бронешилет) из органоластика, лопасти спрямляющего аппарата из ПКМ и др. новшества [2]. В ЦИАМ

разработаны использующийся до настоящего времени энергетический метод расчета непробиваемости корпусов, в том числе, из ПКМ, двухкомпонентная теория деформирования композиционных материалов, оригинальные методы расчета и испытаний, как самих композиционных материалов, так и деталей двигателей из них [3-6]. В ВИАМ создана база по разработке композиционных материалов - нового направления в материаловедении (см, например, [7]). Технологические проблемы использования ПКМ решались в рамках вновь созданного тогда НИИД (см, например, [8]).

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 [9]. В настоящее время фирмой разрабатывается 4-ое поколение лопаток вентилятора для двигателя GE-9X [10]. 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 Снекма совместно с Дженерал Электрик ориентируется на тканую 3D структуру рабочей лопасти вентилятора и RTM-технологии [11]. Фирма Роллс-Ройс развивает роботизированную технологию выкладки при создании рабочей лопасти вентилятора [12].

Такое развитие инновационных событий в двигателестроении обусловлено, прежде всего, тем, что ПКМ имеют малую массу, повышенную удельную прочность. Непосредственный эффект массы легко считается. Такие оценки проведены. Например, для ПД-14 в сравнении с облегченными полыми лопатками из титанового сплава применение

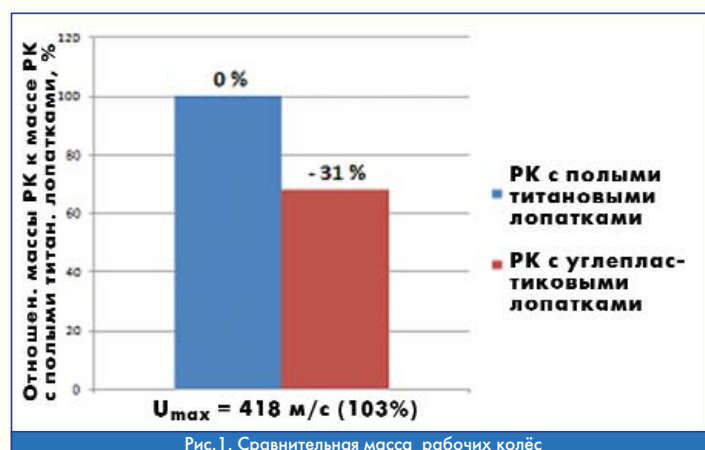


Рис.1. Сравнительная масса рабочих колёс

углепластика позволяет снизить массу лопатки более чем на 30%.

Известно, что центробежная сила пропорциональна массе и ма-

лый удельный вес углепластиков (1650 т/м^3 ; для сравнения у титановых

сплавов - 4500 т/м^3) приводит к относительно низкому уровню рабочих напряжений. Пределы прочности конструкционных углепластиков и титановых сплавов практически сопоставимы. Это означает, что при применении углепластиков запасы прочности по главным напряжениям увеличатся, практически, пропорционально отношению масс лопаток (вес металлической лопатки/вес лопатки из углепластика).

Малая масса лопаток позволяет использовать облегченный диск. Экспертные оценки показали, что снижение массы рабочего колеса в двигателе ПД-14 составит не менее 31%, если вместо рабочего колеса с полыми титановыми лопатками использовать рабочее колесо с лопатками из углепластика (см. рис.1). Если с самого начала двигатель проектируется с лопатками из углепластика, то облегченное рабочее колесо позволяет использовать ТНД меньшей мощности, вал и опоры с более низкой массой. А простая замена штатного рабочего колеса с полыми титановыми лопатками на рабочее колесо с легкими лопатками из углепластика, очевидно, приведет к повышению долговечности ответных металлических узлов в соответствии со сниженным уровнем рабочих напряжений в них.

Наибольший эффект от применения углепластиков малой массы получается при решении проблемы локализации рабочей лопатки вентилятора в случае её обрыва. На рис.2 приведены сравнительные оценки массы различных корпусов при использовании различных рабочих колес. Расчеты выполнены инж. Чернышовым А.А на основе упомянутого выше энергетического подхода применительно к вентилятору ПД-14.

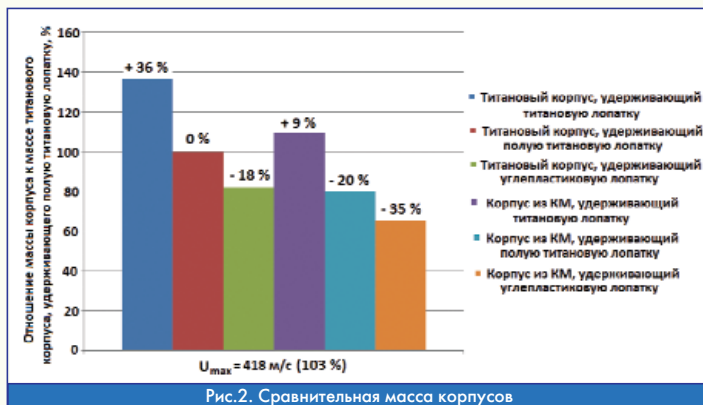


Рис.2. Сравнительная масса корпусов

Аналогичные результаты получены и за рубежом. Так, например, в ТРДД LEAP используется корпус вентилятора из КМ, который на 30% легче его алюминиевого аналога [13]. Фирма Роллс-Ройс [14] разработала вентилятор для двигателей Advance и UltraFan с лопатками и корпусом из композиционного материала, что позволило снизить массу двигателя на 680 кг, что эквивалентно перевозке 7 дополнительных пассажиров.

Общеизвестно, что ПКМ отличаются повышенным сопротивлением усталости [15], что обеспечивает повышенную долговечность лопаткам. Так, например, Стадниковым А.Н. были проведены испытания первых экспериментальных полноразмерных лопаток из углепластика на усталость при колебаниях по первой изгибной форме. Им показано (см. [16.]), что при деформациях $1.75 \cdot 10^{-3}$ лопатка из углепластика не имела никаких усталостных повреждений на базе $2 \cdot 10^7$ циклов нагружения.

ПКМ, в том числе, углепластиком свойственно повышенное внутреннее сопротивление. Декременты колебаний углепластиковой лопатки, экспериментальные значения которых приведены в [16], оказались на порядок выше, чем у монолитной титановой лопатки. Это обстоятельство обеспечивает повышенное сопротивление лопаток из углепластика динамическому, в том числе, аэродинамическому возбуждению. Несмотря на малую массу такие характеристики углепластиков как высокое демпфирование и слабая динамическая возбуждаемость, безусловно, способствуют повышенному сопротивлению лопаток аэродинамическому возбуждению [17].

2. Специфика лопаток из углепластика.

Несмотря на описанные очевидные достоинства лопаток из углепластика ряд её специфических особенностей требуют разработки отдельных подходов, которые существенно отличаются от привычных подходов при создании лопаток из металлических материалов.

Прежде всего, углепластик является анизотропным материалом. Это означает, что в разы увеличивается число параметров, использующихся при проектировании лопатки в качестве независимых расчетных характеристик материала. Следовательно, в разы возрастает объем обязательных экспериментальных исследований при формировании значений расчетных характеристик и объем испытаний конструктивно-подобных элементов. Например, в [18] подчеркивается, что использование композиционных материалов для снижения массы самолёта "Боинг-787" на 50% привело к тому, что число испытаний для определения свойств материала возросло до 100 000 вместо 5000, а число испытаний конструктивно-подобных элементов до 10 000 вместо 500.

Кроме того, анизотропия свойств исключает возможность применения таких широко используемых ранее одномерных подходов при проектировании лопаток и анализе их работоспособности, которые приведены, например, в руководствах [19]. При применении композиционных материалов должны быть использованы новые адекватные анизотропным конструкциям подходы (см., например, [20]).

Структура как материала (углеродные нити и полимерное связующее), так и внутреннее строение материала лопатки (слоистость материала, различная схема укладки армирующего элемента в слоях) представляют собой неоднородное тело. Одним из типичных проявлений неоднородности структуры материала является появление множества различных типов несовершенств, повреждений, видов и форм разрушения [21]. Примерами являются инородные включения в материале матрицы, несовершенства на границе раздела компонент композиционного материала, разрывы волокна, пористость материала матрицы и другие. Неоднородность материала требует при проектировании лопатки из углепластика использовать математические модели деформирования и разрушения различного иерархического уровня, такие как модели однородного анизотропного тела [20] (макро уровень), механика многокомпонентной среды [4]-[6] (мезо уровень), модели сплошной неоднородной среды (микро уровень; см., например, в [22]).

Для инженеров, имеющих дело с металлическими изделиями (материалами с изотропными свойствами), наиболее непривычным и новым этапом является проектирование материала детали (в частности, материала рабочей лопатки вентилятора) с определенными свойствами, согласующимися с действующими нагрузками. Как, правило, при проектировании композиционный материал изделия формируется так, чтобы направления главных осей жесткости анизотропного материала совпали с направлениями главных напряжений. Решение этой задачи представляет, как правило, большие трудности. Они связаны с тем, что главные напряжения на жизненном цикле изделия меняются не только по величине, но и по направлениям. В качестве примера можно привести учет нестационарного давления газа на широкохордную лопатку вентилятора, находящуюся в поле центробежных нагрузок. При нештатных ситуациях расчетные поля напряжений могут коренным образом отличаться от "стационарных" случаев. Примером служит та же лопатка, при проектировании которой должна быть обеспечена её стойкость удару посторонними предметами, в частности, удару крупной птицей. В этих случаях руководствуются определенными допустимыми подходами, иногда чисто волюнтаристического типа.

Очевидно, принятая технология производства должна быть способной изготовить конструкцию, иногда, весьма сложной геометрической формы (например, рабочая лопатка вентилятора) со свойствами спроектированного материала, не испортив аналитически построенное внутреннее строение материала. Как известно, в настоящее время проповедуются две технологии: автоклавная (прессовая) технология и технология принудительной пропитки вязкого полимерного связующего под давлением. Независимо от используемой технологии результатом изготовления должна быть конструкция с механическими свойствами, соответствующими проекту.

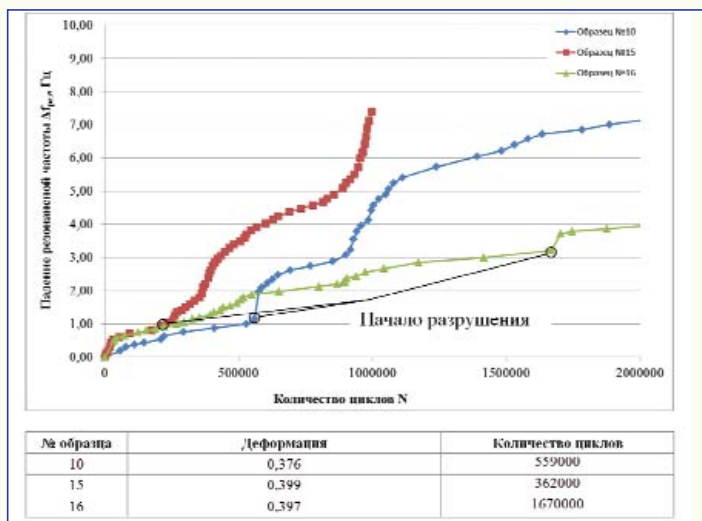


Рис. 3. Зависимость падения резонансной частоты от количества пройденных циклов образцов, испытанных в диапазоне деформаций от 0,37% до 0,40%

Испытаниями должно быть показано, что принятая технология изготовления действительно позволила создать конструкцию со свойствами спроектированного материала. Для экспериментального подтверждения соответствия материала требованиям проекта проводится комплекс специальных испытаний по отдельной программе.

Таким образом, в отличие от металлов, где этапы создания материала, проектирования и изготовления в разработках являются отдельными независимыми этапами, при создании детали, в том числе, и рабочей лопатки вентилятора из композиционного материала все указанные три этапа являются органически неразрывными [23] технологиями. Только одновременное проведение проектных работ, разработок по производству и подтверждение испытаниями может обеспечить получение соответствующей техническим требованиям конструкции в короткие сроки.

Одной из важных специфических особенностей полимерного композиционного материала, в том числе, материала лопаточной структуры армирования являются относительно низкая величина предельных деформаций. Так, например, односторонне армированный углепластик IM7/8551-7, являющийся базовым материалом для лопаток двигателя GE-90, имеет предельную деформацию в направлении волокон около 2% (см., например, [24]). Известно, что при использовании металлов погрешности проекта или неточности в свойствах зачастую нивелируются тем, что металл в силу своей податливости может приспособиться к действующей нагрузке и, в некоторой мере, исправить недостатки проекта. При применении ПКМ, отличающихся относительно низкими предельными деформациями, рассчитывать на такой эффект не приходится. Оценки напряженно-деформированного состояния изделия должны быть проведены с повышенной точностью. Это достигается

- более строгой постановкой задачи, формулированием граничных и начальных условий, близких к условиям эксплуатации;
- путём использования при проектировании статистически обоснованных экспериментальными исследованиями значений расчетных характеристик;
- применением математических моделей деформирования и разрушения различного иерархического уровня.

Соответствие решаемой задачи условиям, в том числе, граничным, при которых находится деталь, например, лопатка, является одним из основных критериев при формировании постановки задачи. Исследователь должен показать, что расчетная модель при принятых условиях характеризует исследуемый параметр (жесткость, прочность, состояние и т.д.) адекватно реальному случаю или, по крайней мере, с некоторой степенью (желательно оцененной) консервативности.

Совокупность расчетных характеристик разработанного материала детали, в том числе, рабочей лопатки с "лопаточной" структурой армирования определяется в соответствии с требованиями руководств [25], [26]. Следует иметь в виду, что рабочие лопатки вентиляторов не относятся к основным деталям двигателя, которые проектируются в соответствии с требованиями А-базиса (допустимая вероятность разрушения

1 % при 95 % доверительном уровне). Поэтому при экспериментальном определении расчетных характеристик полимерного композиционного материала лопатки ЦИАМ следует требованиям В-базиса [26] (допустимая вероятность разрушения 10 % при 95 % доверительном уровне).

При применении ПКМ для создания, например, рабочих лопаток вентиляторов используются математические модели высокого уровня. Многие математические модели высокого уровня находятся ещё на стадии развития, например, модели оценки циклической долговечности [21]. Важно иметь в виду, что акт истощения несущей способности деталей из композиционных материалов является только последним этапом процесса зарождения повреждения и его развития. Это можно видеть, например, из результатов испытаний образцов "лопаточной" структуры армирования на усталость. Падение собственной частоты является функцией развития повреждения. На рис. 3 можно видеть, что зарождение повреждения, его рост, взаимодействие с другими типами повреждений происходит с увеличением числа циклов нагружения при каждом уровне амплитуды циклических деформаций. В связи с этим, математические модели должны предоставить возможность описать длительный процесс развития зародившихся и/или технологических повреждений в деталях из композиционных материалов до полного истощения их несущей способности. Некоторые аспекты таких подходов можно найти в [22], [27]. Такие подходы важны при анализе работоспособности лопаток при ударе посторонними предметами, например, птицей крупных размеров, или при проектировании корпусов в случае обрыва лопатки. В таких кратковременных событиях, происходящих при высоких скоростях деформаций, относительная хрупкость ПКМ проявляется в наибольшей мере [28], а создание математических моделей наталкивается на множество трудностей.

Многочисленные исследования обнаруживают, что характер разрушения деталей из ПКМ существенно отличается от традиционных видов разрушения металлических изделий. Особенно это проявляется при усталостных испытаниях, где первые повреждения появляются в материале связующего в слоях, ортогональных направлению действия главного напряжения. От момента зарождения трещины в связующем до полного истощения несущей способности изделия при увеличивающейся нагрузке, или продолжительности действия нагрузки или росте числа циклов нагружения протекает длительный сложный процесс развития повреждения [22]. Некоторые этапы такого развития можно видеть, например, на рис.4, где показано как наличие армирующего элемента может изменить привычный для металлов характер развития трещины.

Детали слоистой структуры отличаются относительно низкой межслоевой прочностью [24]. Это обстоятельство в условиях эксплуатации может привести к преждевременному зарождению межслоевых повреждений из-за не обнаруживаемых современными средствами контроля несовершенств и технологических микродефектов. Оценки и предсказания зарождения повреждений, которые обусловлены достижением предельных значений деформаций в материале матрицы, возможны только на основе расчетных моделей высокого уровня [22]. Развитие таких повреждений до полного истощения несущей способности детали из композиционного материала при различных условиях нагружения является предметом многих современных исследований [21]. Один из возможных аналитических подходов, описывающих медленный рост пор в матрице композиционного материала, описан в [28].

3. Особенности изготовления лопаток из углепластика.

Фирма GE, добившаяся наибольших достижений в создании и эксплуатации рабочих лопаток вентиляторов из углепластика, для их изготовления использует автоклавную (прессовую) технологию. Даже теперь, когда появилась альтернативная RTM-технология фирма GE в новых разработках (двигатель GE-9X) продолжает ориентироваться на автоклавную технологию [29]. RTM-технология обладает рядом общепризнанных преимуществ [30], среди которых

- низкие капитальные затраты за счет меньшего количества необходимой технологической оснастки,
- низкая стоимость оборудования (нет необходимости в автоклавах, прессах, машинах для пропитки связующего - подготовки препрегов),

- снижение стоимости используемых материалов (нет операции подготовки или закупки препрега),
- снижение трудоемкости, сокращение времени на изготовление и повышение КИМ,
- улучшение условий труда (отсутствие вредных выделений),
- стабильное качество композиционного материала в изделии.

Одним из новых направлений при создании рабочих лопаток вентиляторов является применение перспективной RTM-технологии с предварительной подготовкой сухой 3D заготовки в виде полноразмерного изделия тканой структуры армирования [31]. Рабочая лопатка из ПКМ с тканой структурой армирования, безусловно, обладает рядом достоинств.

Прежде всего, повышается изотропия свойств материала. По крайней мере, характеристики межслоевой жесткости и прочности приближаются к таким характеристикам в слое. Таким образом, наличие повышение межслоевой сдвиговой прочности, которая относительно низка для слоистых материалов. Всё это делает материал более привычным для большинства специалистов, работающих в настоящее время в отрасли [32] с изотропными материалами.

При применении изделий с тканой 3D структурой армирования ожидают повышение ударной вязкости, приводящей к повышению стойкости удару посторонними предметами. Однако не все испытания подтверждают этот факт. В отдельных испытаниях по определению остаточной прочности на сжатие после удара, выполненных в соответствии с требованиями ASTM, получены относительно низкие результаты.

К несомненным достоинствам отработанной технологии производства полноразмерных изделий с тканой 3D структурой армирования является возможность получения изделий с повышенной идентичностью. В этом случае влияние человеческого фактора на качество продукции ничтожно.

В то же время рабочая лопатка вентилятора из ПКМ с тканой структурой армирования имеет определенные недостатки, к которым, прежде всего, относятся

- снижение жесткости и прочности до двух раз в главных направлениях,
- усложнение отстройки от опасных частот в полноразмерной лопатке,
- повышение стоимости сухой 3D заготовки,
- усложнение ремонтных работ.

Увеличение податливости материала лопатки, работающей в условиях растяжения центробежными силами, приводит к проблеме радиальных зазоров. При повышенной податливости требуемый уровень радиального зазора возрастает с увеличением размеров лопатки. Так как допустимые пределы радиальных зазоров ограничены аэродинамическим расчетом, то с увеличением длины лопаток снижается возможность использования данной технологии. Такая лопатка эффективна для лопаток малой длины. Короткая лопатка, полученная по автоклавной технологии, слишком жесткая и из-за хрупкости материала стойкость её удару посторонними предметами (птицей) низка [33]. Этот аргумент фирмы Snecma для относительно коротких лопаток является бесспорным.

Большая податливость материала вязаной структуры приводит к снижению уровня собственных частот лопатки и повышению её чувствительности к аэродинамическим возмущениям. То обстоятельство, что материал становится более однородным (с меньшей анизотропией свойств) приводит к тому, что значения собственных частот по изгибным и крутильным формам колебаний сближаются и становятся менее управляемыми. Это вызывает определенные трудности обеспечения стойкости лопаток к автоколебаниям при использовании вязаной конструкции материала.

Стоимость 3D заготовки лопатки вязаной конструкции намного выше стоимости заготовки слоистой структуры. Стоимость определяется не только сложностью технологии изготовления, но и стоимостью, как используемого технологического оборудования, так и стоимостью его обслуживания.

Если для слоистых конструкций из ПКМ известны технологические приёмы ремонта, то для вязаных структур перспектива ремонта предс-



Рис.4. Типичный характер развития повреждения

тавляется, практически, не реализуемой технологической операцией (по крайней мере, по представлениям настоящего времени).

В связи с проведенным анализом технологий в ЦИАМ для изготовления рабочих лопаток вентиляторов используется модифицированная RTM-технология, в определенной мере впитавшая в себя лучшие стороны различных технологий. Ниже описаны мероприятия, обеспечивающие на базе RTM-технологии получение лопаток с требуемыми качествами.

Известно, что с увеличением длины лопатки практически пропорционально длине растут и сдвиговые напряжения. Поэтому с ростом двухконтурности двигателя опасность получения преждевременных повреждений от межслоевого расслоения повышается. Однако участки лопатки, где действительно сдвиговые напряжения могут достигать критических значений, весьма ограничены. Они имеют место в областях с резким изменением формы, в участках повышенной кривизны. Сохранить жесткость и прочность лопатки в главном направлении и одновременно уйти от опасности получения межслоевых повреждений удается применением технологии локального 3D армирования только в критических зонах. В ЦИАМ совместно с ОАО "Ниагара" разработана технология локального армирования в третьем направлении, позволяющая в 1.5-1.8 раза повысить в этих областях прочность на межслоевой сдвиг. По последним публикациям видно, что такого мнения придерживаются и на фирме GE [34].

Наряду с методом локального армирования материала лопатки принимаются меры по повышению межслоевой сдвиговой прочности путём модификации полимерного связующего при сохранении возможности его применения в RTM-технологии. Одним из таких путей является специализированная технология применения термопластичного полимера. Результаты выполненных испытаний образцов свидетельствуют об эффективности принятых мер.

Дополнительными мерами повышения стойкости лопаток вентиляторов большой размерности удару посторонних предметов (птицы) являются конструктивные меры, заключающиеся

- в усилении передней кромки металлическими накладками и обеспечения совместного сопротивления металлической кромки и углепластика,
- в применении упругого элемента, позволяющего лопатке демпфировать ударные колебания и отклоняться в направлении удара в виде пружинчатого подпирающего клина в пазу диска.

Одним из наиболее важных аспектов, обеспечивающих конкурентоспособность лопаток из углепластика, является стоимость их изготовления, которая при промышленном производстве на базе модифицированной RTM-технологии, отличающейся повышенной экономичностью, ожидается на уровне 50-70% стоимости изготовления полых титановых лопаток.

4. Специфика испытаний лопаток из углепластика.

Для проектирования металлической рабочей лопатки достаточны данные общей квалификации материала, представленные его разработчиком. При применении КМ сведения, представленные разработчиком материала, используются конструктором детали (например, рабочей лопатки вентилятора) для проектирования его материала. Специальные квалификационные испытания спроектированного материала детали с индивидуальной для неё схемой армирования являются новым этапом в пирамиде обязательных испытаний, присущим только деталям

из КМ. Специальные квалификационные испытания материала рабочей лопасти предусматривают испытания образцов "лопаточной" структуры армирования по разработанной, утвержденной конструктором и согласованной с АРМАК программе типов, объемов и условий испытаний. Испытания проводятся в соответствии с требованиями В-базиса. Выше указывалось, что при применении КМ кратно увеличивается число испытаний (см, например, [18]). Необходимо отметить, что не только объем испытаний, но и из-за анизотропии материала для получения расчетных характеристик материала лопасти проводятся новые типы испытаний, используются новые формы образцов.

Наиболее важными элементами прочностной доводки рабочей лопасти из КМ, выполняемых в рамках упомянутой пирамиды испытаний, являются испытания

- конструктивно-подобных элементов и образцов, вырезанных из лопасти,
- двухзамковых образцов с хвостовиками, адекватными хвостовикам рабочей лопасти,
- моделей лопаток и их прототипов,
- стендовые испытания полноразмерной лопасти в условиях, приближенных к эксплуатационным условиям.

4.а. Конструктивно-подобные элементы и образцы из лопасти.

При использовании отдельных математических моделей проектирование лопасти осуществляется с учетом распределения механических свойств материала по всей её поверхности. Из-за того, что толщина лопасти является переменной, а толщина моносола конечна, то свойства материала являются функцией толщины. В связи с этим расчетные значения локальных характеристик материала лопасти должны быть получены экспериментально испытаниями специально изготовленных образцов с местной схемой армирования и/или образцов, вырезанных из лопасти. Обычно выбираются отдельные реперные точки поверхности лопасти, для которых испытаниями соответствующих образцов находятся свойства материала.

Наиболее репрезентативным является предсказание несущей способности и циклической долговечности рабочих лопаток кратковременными испытаниями и испытаниями на малоцикловую усталость разработанных в ЦИАМ двухзамковых образцов с хвостовиками полноразмерной лопасти. Недостатком является то, что двухзамковый образец моделирует не весь хвостовик лопасти, а только отдельную часть.

Методические проблемы, связанные с проблемой обеспечения стойкости лопаток удару посторонними предметами, отрабатываются

- на образцах с покрытиями (пылевая и дождевая эрозия) и
- на предварительно растянутых (имитация центробежных нагрузок на лопасть) и подверженных удару конструктивно-подобных образцах с кромками, защищенными металлическими накладками.

4.б. Модели лопаток и их прототипы.

В отличие от металлов, где широко используются методы подобия (масштабирования) для исследования свойств лопасти на моделях, при применении КМ необходимо позаботиться о том, чтобы материалы лопасти и её модели были подобными. Это не всегда удается из-за того, что толщина моносола является конечной величиной. Если всё же удастся создать модель лопасти, то она или её прототип используются при установлении характеристик, связанных с наиболее длительными и дорогостоящими испытаниями. К последним относятся циклическая долговечность при многоциклового усталости, стойкость удару посторонними предметами, прежде, всего птицей. Кроме того, на моделях лопаток или прототипах проверяется остаточная прочность лопасти с повреждениями, полученными при испытаниях на много и малоцикловую усталость, на удар посторонними предметами, в том числе, птицей. Чрезвычайно важно на модельных лопатках или её прототипах проверить их стойкость автоколебанию. Наконец, на моделях и их повреждениях должны быть отработаны приёмы ремонта лопаток.

4 в. Стендовые испытания полноразмерной лопасти.

Важнейшим этапом доводки рабочей лопасти вентилятора до VI уровня технологической готовности является подтверждение стендовыми

ми прочностными испытаниями годности разработанной лопасти для постановки на двигатель. Для решения этой проблемы в ЦИАМ создана необходимая инфраструктура.

Испытаниями полноразмерной широкохордной рабочей лопасти вентилятора на установке Instron 8805 по разработанной в ЦИАМ технологии на малоцикловую усталость:

- устанавливаются опережающие данные о её циклической долговечности,
- подтверждается репрезентативность результатов испытаний двухзамковых образцов.

Разработанная технология испытаний полноразмерной широкохордной рабочей лопасти вентилятора на многоцикловую усталость на вибростендах УВЭ 10/5, LDS V875-440В позволяет определить циклическую долговечность.

Разработанная технология испытаний полноразмерной широкохордной рабочей лопасти вентилятора с использованием пневмо-пушек ПУН 40/100 (калибр 40 мм) и ПУН 80/50 (калибр 80 мм) позволяет установить их стойкость на удар, в том числе на удар птицей массой до 500 г.

Испытания полноразмерной широкохордной рабочей лопасти вентилятора на разгонном стенде Т14-01 позволяет установить несущую способность лопаток как только что изготовленных, так и с различными повреждениями, полученными при испытаниях на многоцикловую усталость, на удар, в том числе на удар птицы.

Выводы

Проблема внедрения рабочей лопасти вентилятора из углепластика в отечественные двигатели большой степени двухконтурности, в том числе, в новые версии ПД-14 является актуальной. Для решения этой проблемы в ЦИАМ создана необходимая инфраструктура, включающая в себя

- комплекс современных методов проектирования,
- необходимые технологические разработки и оборудование для мелкосерийного производства рабочих лопаток вентиляторов,
- лабораторное и стендовое оборудование для прочностной доводки рабочих лопаток вентиляторов и выполнения квалификационных испытаний (испытательная лаборатория аттестована АРМАК) как композиционного материала, так и лопасти из него.

Литература

1. Flug Revue, 2014, III, N3, p. 26-27. Дуэль Leap против GTF - Обзорение №25, VI, 2014
2. Г.П. Пейчев, С.В. Николаевский - В XXI век с двигателями ЗМКБ "Прогресс". Опыт внедрения полимерных композиционных материалов - Новые технологические процессы и надежность ГТД. Научно-технический сборник. Вып.3. Композиционные и керамические материалы в ГТД. Москва. 2003, стр.83-96
3. Каримбаев Т.Д. - Конструкционные композиционные материалы для создания деталей и узлов авиационных двигателей - Новые технологические процессы и надежность ГТД. Научно-технический сборник. Вып.3. Композиционные и керамические материалы в ГТД. Москва. 2003, стр.3-55
4. Каримбаев Т.Д. - Структурная теория прочности композиционных материалов - Известия АН СССР, Механика твердого тела, 1977, №2
5. Каримбаев Т.Д. Вариант теории армированных сред. Изв. АН Каз. ССР, серия физико-математическая, 1974, №3
6. Каримбаев Т.Д. Основные соотношения механики двухкомпонентной среды и способы определения их параметров. Труды ЦИАМ, 1985, № 1119, 23 с.
7. Н.М. Скляров - Путь длиной в 70 лет Москва, "МИСИС", "ВИАМ", 2002, 485 стр
8. Преснухин В.А., Кшнякин А.М., Щербинин В.В., Каримбаев Т.Д. - К вопросу создания рациональной конструкции замкового соединения лопаток ГТД из металлических композиционных материалов - Новые технологические процессы и надежность ГТД. Научно-технический сборник. Вып.3. Композиционные и керамические материалы в ГТД. Москва. 2003, стр.139-149
9. Aviation Week, 30/XII-2013-6/1-2014, v.175, N45, p.75-77 - Положение на рынке гражданских и военных авиадвигателей в Европе и США - Обзорение № 26, VI, 2014, стр.3-7

10. Flightglobal. Com.26.08.2024. GE планирует оснастить двигатели самолетов B.777.X вентилятором с новыми лопатками из композитных материалов. - Обзорение. № 46. Ноябрь. 2014, стр. 8-9
11. Aviation Week, 2013, 1/VII, v.175,N22,p.18-20 - Сравнение ТРДД LEAP-1A и PW1100G - Обзорение №48, Ноябрь, 2013, стр.6-10
12. Aviation Week, 2014, 25/VIII, v.176,N29,p.36-38. Стратегия разработки двигателей Rolls-Royce до 2025г. - Обзорение №5, Январь, 2015
13. Flight 2013,14-20/V,v.183, 5390, p. 14. Ход работ по программе Leap - Обзорение № 42, Октябрь, 2013
14. Aviation News. 03.09.2014. Rolls-Royce проводит стендовые испытания узлов вентилятора из КМ- Обзорение № 46, Ноябрь, 2014
15. J.R. Shaff - Fatigue and Life Prediction - ASM Handbook. Vol.21. Composites. ASM International. The Materials Information Company 2001
16. Каримбаев Т.Д., Луппов А.А. и др. - Разработка легких широкохордных лопаток вентиляторов с применением композиционных материалов для перспективных турбовентиляторных двухконтурных двигателей - В Сборнике "Современные методы обеспечения прочностной надежности деталей авиационных двигателей", Труды ЦИАМ №1344, Москва, Торус-Пресс, 2010, стр.415-435
- 17.. Scott C. Morris and Thomas C. Corke - Aero-Mechanical Coupling in a High-Speed Compressor - Final Technical Report by the University of Notre Dame Notre Dame, Indiana for the Air Force Office of Scientific Research Contract No. FA9550-07-1-0166 UND-SM10-0338 February 2010
18. NASA-Led Consortium Will Bring Science To Art Of Composites. Qualifying Carbon - Aviation Week & Space Technology.14.05.2015, Mon.2015-04-27
19. Руководство для конструкторов по расчету на прочность газотурбинного двигателя. Расчет лопаток на прочность, вып.2, Гос. изд-во оборонной промышленности, 1956г, 150 стр.
20. С.Г. Лехницкий -Теория упругости анизотропного тела -Изд-во "Наука", Москва, 1977, 416 стр.
21. Composite Materials. Handbook 17 2F. Vol. 2,3. Polymer Matrix Composites. Properties. June 17,2002
22. Каримбаев Т.Д. - Подходы при моделировании деформаций композиционных материалов - Журнал "Космонавтика и ракетостроение"

№1(54), г. Королев, 2009 г., стр. 91-102

- 23 А.С. Новиков, Т.Д. Каримбаев, А.А.Луппов, Д.В.Афанасьев, М.А.Мезенцев - Инновации при применении композиционных материалов в авиационных двигателях - Журнал "Двигатель", №2(98) 2015,стр. 2-5
24. Каримбаев Т.Д., Луппов А.А., Афанасьев Д.В., Пальчиков Д.С. - О формировании технических требований к полимерному материалу перспективной рабочей лопатки вентилятора ТРДД - НТЖ "Двигатель", №1 (97+244), 2015, стр. 2-8.
25. Трунин Ю.П., Коновалов В.В., Сеник В.Я., Дзюба А.С., Хватан А.М. - Методические рекомендации к п.613 АП 23 (25,27,29). Прочностные характеристики полимерных композиционных материалов и их расчётные значения - 2006г
26. Composite Materials, Military Handbook 17, Materials Usage Design and Analysis, Vol 3, Department of Defense, Philadelphia, PA
27. Каримбаев Т.Д., Мыктыбеков Б., Панова И.М. - Математические модели нелинейного деформирования однонаправленно-армированных композиционных материалов - Труды ЦИАМ №1334, Москва, 2005, 160 стр.
28. Каримбаев Т.Д., Мамаев Ш - Параметры материалов, чувствительные к скоростям деформации - Новые технологические процессы и надежность ГТД. Научно-технический сборник. Вып.8. Предотвращение опасных отказов при разрушении рабочих лопаток турбокомпрессора. Москва. 2008,стр.7-37
29. Air & Cosmos. 2014, 4/IV, N2400 ,p3 - Использование композитных лопаток трехмерного плетения - Обзорение № 44, Октябрь, 2014, стр. 6
30. Aviation Week. 2014, 21/IV, v.176, N13, p36,37 - Развитие партнерства США-Франция по программе LEAP - Обзорение № 33, Август, 2014, стр. 8-10.
31. <http://www.jeccomposites.com/news/composites-news/composite-and-prof-stephen-t...>29.05.2015
32. Aero engines lose weight thanks to composites - Reinforced plastics, November-December,2012, p32-35
33. GE Aviation reveals new hybrid composites in GE9X - <http://www.flightglobal.com/news/articles/ge-aviation-reveals-new-hybrid-composites>.29.03.2015

10-12 августа, 2016 Казань

8-я международная специализированная выставка

АВИА
КОСМИЧЕСКИЕ
ТЕХНОЛОГИИ, СОВРЕМЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ И
ОБОРУДОВАНИЕ



Россия, 420059, г. Казань, Оренбургский тракт, 8,
Выставочный центр "Казанская ярмарка"
Тел/факс: (843) 570-51-26, 570-51-11, 570-51-23
E-mail: d9@expokazan.ru, www.aktokazan.ru