



ИННОВАЦИИ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЯХ

ФГУП ГНЦ "ЦИАМ им. П.И. Баранова":

Александр Сергеевич Новиков, д.т.н., заместитель генерального директора института,

Тельман Джамалдинович Каримбаев, начальник отдела,

Алексей Анатольевич Луппов, начальник сектора

Дмитрий Викторович Афанасьев, научный сотрудник

Михаил Александрович Мезенцев, инженер первой категории

За много лет в ЦИАМ создан научно-технический задел по изучению композиционных материалов, инновационным приемам проектирования деталей авиационных двигателей из них, специфическим методам переработки исходного сырья композиционных материалов в детали и изделия авиационной техники, особенностям технологии испытаний и процедуры квалификационных испытаний конструкций из композиционных материалов. Накопленный опыт решения описанных в статье инновационных задач, связанных с проблемой применения композиционных материалов в авиационных двигателях, может и должен быть использован для доводки ряда деталей (прежде всего, рабочих лопаток вентиляторов) до VI уровня технологической готовности с последующим внедрением разработок в перспективные конкурентоспособные отечественные двигатели различного назначения.

For many years in CIAM the scientific and technical potential for the study of composite materials, innovative methods of developed elements of aircraft engines from its, specific methods re-processing of raw materials of composite materials in parts and products of aviation technology, the technology structures made of composite materials features testing and procedures qualification testing. The experience described in the article innovative tasks associated with the problem of application of composite materials in aviation engines, can and should be used for finishing some of the details (especially of the blades of the fans) to VI level of technological readiness with the subsequent introduction of the development of competitive domestic engines for various purposes.

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

Введение

Используемые и разрабатываемые в настоящее время композиционные материалы (КМ) можно разделить на пять основных групп: полимерные (ПКМ), металлические (МКМ), интерметаллидные (ИМКМ), керамические (ККМ) и углерод-углеродные (УУКМ) с покрытиями. Каждая группа КМ представляет для отечественного авиационного двигателестроения новый класс материалов, требующий совершенно иных подходов на всех этапах их освоения и применения - от этапа выбора материала и проектирования до технического обслуживания и ремонта изделий в составе двигателя. На рис. 1 представлена область использования КМ различных типов по уровню предельно допустимых температур. Авиационный двигатель является объектом, во всех узлах которого могут найти применение современные КМ различного типа.

Любое использование КМ в силовых элементах авиационных двигателей является скачком в развитии двигателестроения и внедрением инновационных подходов. Таким скачком был 1995 г, когда фирма Дженерал Электрик в двигателе V поколения GE-90 на основе более 30-летнего мирового и собственного опыта впервые использовала лопатки вентилятора из углепластика. Сегодня это уже углепластиковые лопатки

IV поколения фирмы GE и разрабатываемые широкохордные лопатки из углепластика всех других ведущих зарубежных двигателестроительных фирм.

Ничто не может родиться без потребности и без надлежащей подготовленности. Сегодня в отечественном двигателестроении проблемы потребности создания новых конкурентоспособных двигателей постепенно поднимаются на должную для России высоту. Однако подготовленность для решения таких задач относительно низка, особенно, на уровне чиновников, от решения которых во многом зависит развитие отрасли и которые, в большей мере, заняты текущими делами, чем инновационными проблемами и научно-техническим заделом.

Ниже в работе описаны глубокие инновационные проблемы, без понимания которых и без надлежащей работы над которыми на стадии НИР и ОКР трудно рассчитывать на получение ожидаемых дивидендов от применения КМ. Применение КМ, отличающихся, прежде всего, малой массой, повышенной удельной прочностью, жесткостью и внутренним сопротивлением (демпфирование), позволяет по сравнению с деталями из традиционных металлических материалов снизить массу отдельных деталей от 10 до 50%, повысить долговечность узлов от 5 до 25%, снизить на несколько процентов или исключить отбор воздуха на охлаждение в отдельных узлах двигателя. При этом экономичность двигателей может возрасти от 3 до 8%.

Инновации на этапе выбора материала и проектирования конструкции

Выбор материала в отличие от металлов основан на многокомпонентности и неоднородности структуры КМ. Традиционными методами (компетентность поставщиков, качество сырья, стоимость и т.д.) выбираются не только материалы наполнителя и матрицы будущего КМ, форма их поставки, но и множество сопутствующих материалов (разбавители, отвердители, клеи, самоклеющиеся пленки, краски и т.д.)

В отличие от металлических конструкций при использовании КМ проектирование детали начинается с проектирования материала детали. Как правило, материал детали имеет слоистую, тканую, вязаную или ячеистую структуру. При проектировании материала детали пытаются направление армирующих волокон совместить в каждой точке изделия с направлением

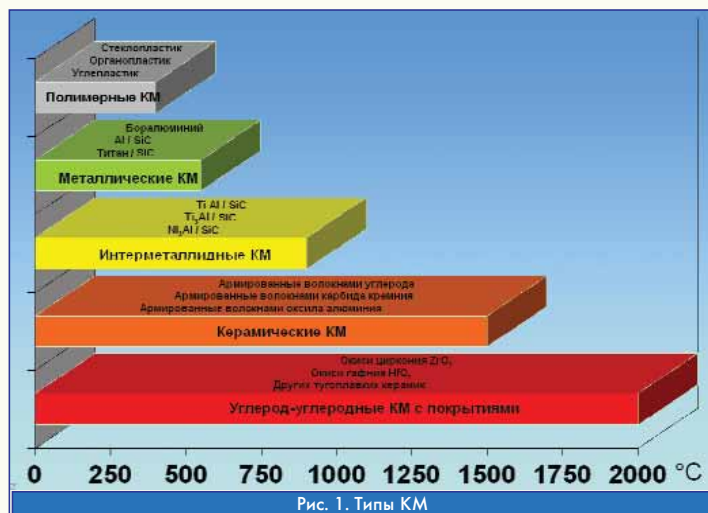


Рис. 1. Типы КМ

ем главной оси действующих напряжений. Это особенно важно в областях действия максимальных напряжений. Для деталей простой геометрической формы (прямолинейные силовые стержни без узлов крепления, вантовые конструкции, цилиндрические кольца и т.д.) такая задача относительно проста и решается применением однонаправленно-армированных КМ. В этих узлах большей частью применяются МКМ, ПКМ. Для деталей сложной геометрической формы (прежде всего, это широкохордные рабочие лопасти вентиляторов современных ТРДД) задача является сложной, многоэтапной и, как правило, она решается итерационными методами [1]. В ЦИАМ разработана и на примере широкохордных лопаток вентилятора отработана технология построения внутренней структуры и оптимизации характера армирования отдельных монослоев для обеспечения жесткости и прочности изделия в целом. Технология основана на разработанной в ЦИАМ процедуре представления материала изделия в форме совокупности монослоев с размерами, соответствующими размерам промышленно поставляемых тканей, ленты, и оптимизации полей напряжений и перемещений с использованием как собственных расчетных моделей, так и коммерчески доступных программ типа ANSYS, LS DYNA.

В отличие от металлов при проектировании изделий из КМ по кратковременной прочности в ЦИАМ используются многокритериальные подходы, позволяющие оценить возможности зарождения различных типов повреждений и различных форм разрушения в структурных компонентах КМ. Например, наиболее вероятны возможности зарождения повреждений в материале матрицы в слоях с направлением армирования, ортогональным главному напряжению. Аналогичные подходы используются также при оценке длительной прочности. Следует заметить, что во многих работах при оценке длительной прочности изделий из КМ применяются опробованные при проектировании металлических изделий модели линейного суммирования. В ЦИАМ с осторожностью относятся к таким правилам, считая что они должны быть модернизированы при оценке длительной прочности деталей из КМ. Действительно, модель линейного суммирования предсказывает одинаковый уровень истощения несущей способности детали при любой последовательности приложения нагрузок [1 и 2]. Имеются экспериментальные результаты, в том числе собственные, которые показывают, что результат истощения несущей способности детали из КМ зависит от того, какая из нагрузок приложена сначала: большая или меньшая по величине.

Модели допускаемой повреждаемости и одна из её базовых основ как степенной или обобщенный закон Пэриса, применяемые в оценках усталостной долговечности металлических конструкций, оказываются недостаточно обоснованными моделями долговечности для деталей из КМ. Это утверждение основано на том, что в КМ зарождение и рост повреждений обусловлены развитием не одной доминирующей трещины, как в металлических изделиях, а множеством видов повреждений, каждый из которых вносит свой собственный вклад в истощение несущей способности изделия. Возможные технологические или эксплуатационные повреждения в материале матрицы, в материале наполнителя, на границе их раздела и сложное (чаще всего непредсказуемое) взаимодействие этих типов повреждений приводит к необходимости разработки и применения более сложных математических моделей развития повреждений, чем модель Пэриса. Интегральные подходы роста пористости в деталях из КМ с хрупкой матрицей разработаны и используются в ЦИАМ [2].

Модели безопасной долговечности с использованием S-N кривых усталости и правило линейного суммирования для оценки усталостной долговечности требуют модификации при использовании КМ. В ЦИАМ выполнены теоретические и экспериментальные работы по использованию зависимости остаточной прочности от циклов нагружения при прогнозировании S-N кривых усталости.

В ЦИАМ разрабатываются математические модели роста повреждений для оценки изменения собственных частот колебаний деталей (в основном рабочих лопаток). Зарождение и развитие повреждений приводит к изменению (в основном снижению) изгибной и крутильной жесткости материала детали. Разработанные модели развития повреждений используются в ЦИАМ для расчетных оценок при установлении границы автоколебаний.

Новые подходы должны использоваться при изучении высокоскоростных процессов, связанных с проблемами обеспечения безопасности полета при обрыве рабочей лопасти вентилятора и/или при попадании в тракт двигателя посторонних предметов, прежде всего, таких как крупные птицы. В ЦИАМ эти задачи решаются на основе изучения кинематики контактного взаимодействия ударяемого тела и преграды, а также с привлечением структурной модели материала преграды. На этой базе проектируется материал преграды (корпуса вентилятора) такой структуры армирования и с такими характеристиками жесткости, которые при движении ударника (например, рабочей лопасти при её обрыве) с высокой скоростью позволяют вовлечь в процесс сопротивления удару как можно больший объем материала преграды (например, корпуса) [3].

Новые уровни температур могут быть освоены при применении ККМ и УУКМ для изготовления отдельных неохлаждаемых или охлаждаемых с меньшими затратами воздуха на охлаждение деталей турбины, камеры сгорания газогенератора. Эти инновации требуют разработки и внедрения новых способов проектирования, переработки материалов в изделия авиационной техники, экспериментальных исследований при высоких, в том числе, стехиометрических уровнях температур. Например, требуют разработки и применения новых методов проектирования, учитывающих не только новые уровни рабочих температур изделия, но и особенности как механических и физических свойств керамических и углерод-углеродных КМ и их структурного строения, так и их совместимость с соседними деталями и узлами двигателя при этих новых условиях. Эти сложные технические проблемы относятся не только и не столько к упомянутой проблеме проектирования. Они относятся к совокупности упомянутых многосторонних проблем, которые могут найти решение только на основе целевой государственной программы создания и использования ККМ в авиационной, ракетной, космической и других отраслях промышленности. Инновационные работы, проводимые в рамках научно-исследовательских программ в ЦИАМ совместно с ВИАМ, ЦНИИМ и др. организациями по исследованию ККМ применительно к МГТД, не могут конкурировать с зарубежными достижениями. Тем не менее даже решение частной задачи внедрения ККМ в МГТД позволило ЦИАМ сформировать базовую инфраструктуру, которая позволяет на основе разработанных методов проектирования, технологий изготовления и испытаний создавать экспериментальные образцы новой техники, а именно:

- соплового аппарата из дисперсно-упрочненного ККМ для МГТД и вертолетного двигателя,
- жаровой трубы из ККМ для МГТД,
- сепаратора из УУКМ,
- тел качения шарикоподшипников из различных керамических материалов,
- "холодную" заготовку рабочего колеса ТВД МГТД,
- рабочие колеса осевого и центробежного компрессора из ПКМ, в том числе, высокотемпературного для МГТД и вертолетного двигателя.

Рациональное использование в авиационных двигателях КМ различного типа с их новыми свойствами и возможностями невозможно не только без разумного проектирования материала деталей двигателя при сохранении их традиционной аэродинамической формы, но и без существенного изменения их конструктивного облика. Ниже приведены только два примера инновационных конструктивных решений при применении КМ. Одним из таких



Рис. 2. Новые конструктивные и технологические решения

примеров является составная конструкция рабочей лопатки биротативного вентилятора с силовыми элементами в виде несущих стержней и с тонкой обшивкой на профильной части лопатки. Разработанные и спроектированные в ЦИАМ модели составной конструкции рабочей лопатки изготовлены с применением МКМ и ПКМ и испытаны в ЦИАМ (см. рис. 2. а). Другим примером являются усиленные МКМ диски рабочих колес, в том числе, бездисковые конструкции типа "блинг" (см. рис. 2. б). Разработанная в ЦИАМ модель рабочего колеса ТВД МГТД (см. рис. 3. а) является уникальным примером рационального использования необычных свойств КМ в изделиях такой сложной геометрической формы и назначения. В ЦИАМ разработана модель МГТД с наружным валом (см. рис. 3. б), обеспечивающим работу рабочих лопаток ТВД из монолитной керамики и ККМ в более благоприятных для этих материалов условиях сжатия и изгиба. Разработанные, изготовленные и испытанные в ЦИАМ экспериментальные образцы рабочих колёс осевого и центробежного компрессоров МГТД могут найти широкое применение в двигателестроении.

Инновации на стадии переработки материала в изделия

При изготовлении деталей авиационных двигателей из любого из перечисленных типов КМ используется совершенно новая, отличная от того, что использовалась для металлов, технология изготовления. Даже такая простейшая операция, как механическая обработка, требует совершенно других режимов обработки (скоростей осевой подачи, рабочих оборотов, режимов охлаждения, вытяжки и т.д.), новых приспособлений, способов крепления и т.д. При этом технологии механической обработки деталей из ПКМ, МКМ, ККМ и УУКМ существенно отличаются друг от друга. Механическая обработка деталей из ПКМ, МКМ, ККМ и УУКМ должна выполняться с соблюдением правил экологической безопасности, вредности и чистоты



Рис.3. Новые конструктивные и технологические решения

производства, которые должны отвечать более жестким требованиям, чем при обработке металлических изделий.

Технология переработки КМ в изделия является многостадийной. Она основана на:

- специфических приемах контроля качества исходных материалов [4];
- разработке, изготовлении и использовании своеобразной технологической оснастки, разной для различных КМ и технологий;
- использовании соответствующего типу применяемого КМ технологического оборудования;
- подготовке преформ в соответствии с типом КМ для дальнейшей их переработки;
- соблюдении режимов (давление, температура, время) переработки КМ, которые для каждого типа КМ свои;
- своеобразии последующих технологических операций (механическая обработка, покраска и т.д.);
- специфическом неразрушающем контроле качества изделия.

Обеспечение разработанной на стадии проектирования материала схемы выкладки монослоев изделия является новой технологической задачей. Она требует разработки особых технологических приемов как на стадии подготовки монослоев к дальнейшим технологическим операциям, так и в процессе технологической переработки преформы в изделие. Инновационные решения этой трудной технологической задачи особенно для деталей сложной геометрической формы обеспечивают получение изделия с проектными механическими и эксплуатационными характеристиками. В этой цепи особо стоит проблема изготовления изделий с идентичными параметрами (размеры, масса, жесткость и т.д.) при их массовом производстве с выполнением общих требований о минимальных затратах и времени и средств. Решению этих проблем, при изготовлении широкохордных рабочих лопаток вентиляторов направлено, например, патент [5].

В ЦИАМ освоены новые модифицированные технологические приемы создания деталей авиационных двигателей из ПКМ (полноразмерные широкохордные рабочие лопатки вентиляторов изделий, модельные лопатки биротативного вентилятора) и даже из ККМ на этапе их холодной переработки (элементы камеры сгорания) на основе RTM (Resin Transfer Moulding)-технологий. По сравнению с традиционной технологией подготовки препрега и автоклавного (или прессового) формования метод формования трансферной пропиткой (RTM-технологией) имеет ряд преимуществ. Этими преимуществами являются:

- низкая стоимость технологического оборудования (нет необходимости в автоклавах, прессах, машинах для пропитки связующего - подготовки препрегов);
- возможности для интегрального соединения металлических вкладышей, устройств наружного покрытия и защиты в единой прессформе;
- низкие капитальные затраты за счет меньшего количества необходимой технологической оснастки;
- улучшенная пропитка волокна;
- пониженное содержание пор;

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

Много частных новых технологических задач приходится решать при использовании инновационных технологий. Такими решенными в ЦИАМ задачами являются, например:

- конструктивное и технологическое формирование течения вязкого полимера при изготовлении рабочей лопасти вентилятора методом RTM-технологии;
- приспособление для автоматизированной прецизионной обработки заготовок тел качения из дисперсно-упрочненных керамических композиционных материалов;
- способ "сварки" полок и профильной части лопаток в составных конструкциях соплового аппарата из дисперсно-упрочненных керамических композиционных материалов;
- технология холодной переработки керамообразующего полимера при создании деталей камеры сгорания из ККМ и т.д..

Технологическое оборудование для переработки каждого типа КМ является своеобразным. При этом переработка КМ одного типа в изделие может выполняться на основе различных конкурирующих технологических приёмов (например, изготовление лопаток на основе автоклавной технологии и RTM-технологии), которые используют различное технологическое оборудование. Выбор способа переработки основан на конструктивной форме изделия (технология намотки для тел вращения, технология прессования для тел типа панелей и пластин) и требованиях к детали по условиям его применения.

Наряду с технологическим оборудованием уникальным является технологическая оснастка, индивидуальная для отдельных деталей. Большинство конструкций технологической оснастки для изготовления различных деталей спроектировано и изготовлено в ЦИАМ. Для изготовления спроектированной в ЦИАМ оснастки для рабочей лопасти вентилятора и для рабочего колеса ТВД были привлечены другие организации. В ЦИАМ изготовлены технологические оснастки для жаровой трубы, модели рабочих лопаток, сепаратора из УУКМ и многое другое.

Инновации на стадии испытаний материала и доводки изделия

Новые методы испытаний образцов и деталей двигателей из КМ, прежде всего, связаны с тем, что материал является анизотропным, и в зависимости от структуры армирования материала изделия приходится определять соответствующее характеру армирования большое число независимых упругих и прочностных характеристик, необходимых для рабочего проектирования изделия. Эти характеристики в соответствии с требованиями нормативных материалов должны быть определены с учётом условий эксплуатации (температура, влажность, вибрация, агрессивность среды (масло, топливо, моющее средство и т.д.).

В отличие от металлов, где общая квалификация материала достаточна для того, чтобы приступить к проектированию рабочей конструкции, при применении КМ сведения общей квалификации КМ используются только на стадии концептуального проектирования изделия. Данные общей квалификации КМ, представленные разработчиком материала, могут быть использованы только для проектирования материала детали. Как было выше отмечено, необходимо показать, что спроектированный материал детали с индивидуальной для неё схемой армирования может быть технологически реализован. Специальные квалификационные испытания, подтверждающие свойства спроектированного материала детали, являются новым этапом, присущим только КМ, в пирамиде испытаний, которая является обязательной.

Важными элементами упомянутой пирамиды испытаний являются её этапы, касающиеся испытаний конструктивно-подобных элементов и стендовых испытаний полноразмерных изделий в условиях, приближенных к эксплуатационным. Инновационными, безусловно, являются, например, разработанные в ЦИАМ:

- конструкции двухзамковых образцов, выполненные по "лопаточной" схеме армирования, испытания которых на кратковременную прочность и малоцикловую усталость позволяют экспериментально установить несущую способность хвостовика широкохордной рабочей лопасти вентилятора и её долговечность;
- метод испытаний и конструкция хвостовика рабочей лопасти ТВД из дисперсно-упрочненного ККМ;
- исследования стойкости на удар предварительно растянутых образцов из КМ и т.д..

Прочностная доводка созданных на технологическом участке ЦИАМ полноразмерных изделий проводится на стендах испытательной лаборатории, стендах отделения и ЦИАМ. Инновационными являются:

- технология испытания полноразмерной широкохордной рабочей лопасти вентилятора на малоцикловую усталость на установке Instron 8805;
- технология испытания полноразмерной широкохордной рабочей лопасти вентилятора на многоцикловую усталость на вибростенде УВЭ 10/5;
- технология испытания полноразмерной широкохордной рабочей лопасти вентилятора на разгонном стенде Т14-01.

В ЦИАМ создана необходимая инфраструктура для выполнения квалификационных испытаний КМ. Испытательная лаборатория аттестована АРМАК.

Выводы

Особенности композиционных материалов всех типов таковы, что технология создания деталей и узлов авиационных двигателей из них может привести к положительным результатам только при условии неразрывной взаимосвязанности технологий проектирования, изготовления и испытаний. Инновационные разработки ЦИАМ в области создания и исследования полноразмерных широкохордных рабочих лопаток вентилятора из углепластика, сопловых аппаратов из высокотемпературной турбины из дисперсно-упрочненного керамического КМ, керамических тел качения шарикоподшипников, неметаллических сепараторов должны найти применение в двигателях. Однако, для этого события необходимо пройти большой путь создания научно-технического задела, соответствующий шестому уровню технологической готовности. 

Литература:

1. Каримбаев Т.Д., Луппов А.А., Афанасьев Д.В. - Рабочие лопасти вентиляторов из углепластика для перспективных двигателей, Журнал Двигатель № 6(78+243), 2011, стр.2-7.
2. Каримбаев Т.Д., Мыктыбеков Б., Панова И.М. - Математические модели нелинейного деформирования однонаправленно-армированных композиционных материалов - Труды ЦИАМ №1334, Москва, 2005, 160 стр.
3. Каримбаев Т.Д., Чернышов А.А. - "Устройство для удержания оборвавшихся лопаток или их фрагментов в турбореактивном двигателе" Патент РФ №133879, 2013 г.
4. Каримбаев Т.Д., Луппов А.А., Афанасьев Д.В., Пальчиков Д.С. - О формировании технических требований на полимерный материал перспективной рабочей лопасти вентилятора ТРДД - Двигатель, №6(96), 2014, стр.1-8.
5. Каримбаев Т.Д., Афанасьев Д.В., Мартовский С.В., Колганов С.П., Деревянных Ю.А., Даньшин К.А. - "Устройство для получения многослойной заготовки слоистых изделий" - Патент РФ №2419541, 27 мая 2011 г.

Связь с авторами: karimbayev@ciam.ru