

---

# **Развитие современных полимерных композиционных материалов и технологий применительно к деталям авиационных двигателей**

Д.В. Афанасьев  
ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова», Москва

В докладе приведены требования, предъявляемые к исходным компонентам и полимерным композиционным материалам на их основе, которые предназначены для изготовления деталей авиационных двигателей. Описан многолетний опыт применения традиционных и перспективных композиционных материалов специалистами ЦИАМ.

## **Development of advanced polymer composite materials and technologies for structures of aviation engines**

D.V. Afanasyev  
CIAM, Moscow, Russia

The report presents the requirements for the initial components and CFRP based on them, intended for the manufacture of aircraft engine structures. The long-term experience of application of traditional and perspective composite materials by specialists of the CIAM is described.

---

### **1. Введение**

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) с каждым годом все более активно внедряются не только в конструкцию планера самолета, но и в узлы авиационных двигателей (АД). Так из ПКМ производства компании Hexcel изготавливают корпус входного устройства, элементы мотогондолы, центральный кок, лопатки и корпус вентилятора, спрямляющего аппарата и т.д.

По сравнению с традиционными ПКМ, материалы, предназначенные именно для АД, должны обладать повышенными характеристиками вязкости разрушения, теплостойкости, влагостойкости, долго-

вечности. Рабочие поверхности деталей АД из углепластика должны иметь защиту от пылевой и капельной эрозии, от ударных воздействий, противостоять истиранию или фреттинг-износу в местах контакта с металлическими деталями.

Обеспечение вышеперечисленных требований вынуждает материаловедов создавать принципиально новые многофазные полимерные связующие и препреги сложного состава, содержащие реактопластичные смолы, модифицированные фазой термопласта. В свою очередь, технологам приходится разрабатывать новые способы их переработки в изделия, с тем чтобы гарантировать высокую стабильность объемного содержания матрицы и

волокна, высокую точность геометрических размеров и низкий уровень остаточных напряжений в готовых деталях. Комплекс этих задач специалисты ЦИАМ решают в тесном сотрудничестве с разработчиками и производителями новых ПКМ, такими как АО «ИНУМиТ», ООО «ИТЕКМА», ООО «НИАГАРА», НОЦ «Композиты России», НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

## 2. Научно технический задел ЦИАМ

Отдел конструкционной прочности композиционных материалов под руководством Каримбаева Т.Д. за 50 лет своего существования накопил большой опыт конструирования и изготовления прототипов деталей АД из КМ. За последние 30 лет были отработаны опытные технологии изготовления, а затем испытаны практически все основные элементы АД: изготовлены корпусные изделия сложного профиля, лопатки осевого компрессора, лопатки направляющего аппарата, полноразмерные лопатки вентилятора и модельные колеса вентилятора в сборе, колеса КНД, центробежные колеса разных конструкций, различные варианты лопаток турбин и турбинных колес в сборе, сопловых аппаратов малоразмерного ГТД из керамики, несколько комплектов жаровых труб для камеры сгорания из углерод-керамических композитов (УККМ), створки сопла, силовые кольца и тяги из углепластика, сепараторы подшипников из ПКМ, межлопаточные трактовые полки вентилятора, углепластиковые пилоны для входного устройства с интегрированной электрической ПОС, корпус и улитка пылезащитного устройства для вертолетного двигателя из стеклоорганопластика и др.

До 1995 года подавляющее большинство вышеперечисленных деталей были изготовлены методом прямого горячего прессования препрегов в закрытых металлических пресс-формах. Для углепластиковых изделий использовались препреги марок ВКУ-4, ВКУ-7, разработанные в ВИАМ. Для формования заготовок углерод-углеродных (УУКМ) и углерод-карбидокремниевых композиционных материалов (УККМ) использовали радиационно-химический препрег, производимый в НИИ «Графит».

Были разработаны пресс-формы с различной кинематикой движения подвижных частей, которые могли содержать в своем составе несколько пуансонов, последовательно формирующих все грани и рабочие поверхности изделий сложного профиля.

В конце 1990-х и начале 2000-х годов в стране сложилась трудная экономическая ситуация, в результате которой использовать в своих работах промышленно выпускаемые препреги для ЦИАМ

стало нерентабельно. Основное внимание уделялось отработке технологий мокрой намотки, ручного ламинирования, а также прессования тканей, пропитанных вручную жидкими смолами. В этот период в ЦИАМ использовали однонаправленные углеродные ленты ЭЛУР, ЛУ-2, ткани «Урал» и УТ-900. Для намотки применяли углеродные волокна марок ВМН-4, УКН-5К, «Кулон». Данные наполнители, как правило, пропитывались эпоксидно-диановой смолой ЭД-20 с отвердителем ТЭАТ.

При изготовлении изделий из углерод-керамических композиционных материалов и, в частности, жаровых труб для камер сгорания применяли метод ручной пропитки углеродной ткани связующим на основе поликарбосилана. Изделия формовали всесторонним обжатием пропитанных заготовок в жестких металлических пресс-формах с нагревом в печи. Работы провели в сотрудничестве со специалистами ВИАМ.

Убедившись, что ламинирование тканями, пропитанными вручную, не является эффективным решением, в ЦИАМ были освоены технологии трансферного безавтоклавного формования: пропитка сухих заготовок, так называемых преформ, смолой под давлением (RTM) и инфузионная пропитка в вакууме (VIP). Для вакуумной инфузии были использованы зарубежные и отечественные низковязкие связующие комнатного отверждения. Пропитка по методу RTM осуществлялась смолами отечественного производства: УП-610, УП-637, ЭХД и др. с использованием отвердителей ДДС, «Диамет-Х», изоМТГФА. Для полимеризации использовали либо печи, либо нагревательные прессы. Для разбавления вязких связующих применяли низковязкие эпоксидные смолы УП-624, ДЭГ-1, ЭА, Э-181 производства завода «Химэкс». Пропитку углепластиковых заготовок, предназначенных для высокотемпературных УУКМ, осуществляли спиртовым раствором бакелитового лака ЛБС-1.

Впоследствии для технологии RTM в ЦИАМ стали использовать герметичные металлические пресс-формы, имеющие встроенную систему электрического обогрева. Применение технологии RTM позволило значительно поднять качество изготовления углепластика: уменьшить объемную долю пористости до 1...2%, увеличить прочность при межслоевом сдвиге до 45 МПа, увеличить температуру стеклования до 170°C, обеспечить требуемую точность формования. Прочность при растяжении удалось заметно поднять путем замены отечественных углеродных волокон УКН-3К («Аргон») на зарубежные Т-800 (Toray) и IMS-65 (Toho Tenax).

Однако к 2010 году все еще оставались не

решенными две существенные проблемы: углепластики демонстрировали низкую ударную вязкость (были слишком хрупкими) и имели недостаточную для конструкционных пластиков авиационного назначения прочность при межслоевом сдвиге.

Существенно поднять (до 75 МПа) сдвиговую прочность изделий удалось только начав применять высокопрочное эпоксидное связующее марки Т-26, которое было разработано ИНУМиТ специально для процессов высокотемпературной инфузии и RTM. Более того, имея температуру стеклования 205°C, оно обеспечило возможность эксплуатации ПКМ во влагонасыщенном состоянии при температурах до 150°C.

С 2014 года началось более тесное научно-техническое сотрудничество ЦИАМ с ИНУМиТ. На совместном совещании для рабочей группы специалистов была поставлена крайне амбициозная цель – разработать полностью отечественный углепластик, по своим характеристикам соответствующий лучшим зарубежным авиационным маркам, позволяющий заменить собой титановые сплавы (при температуре эксплуатации до 150°). На втором этапе работ стояла задача довести технологию его переработки до промышленного уровня применительно к высоконагруженным деталям АД сложной формы. В качестве целевого объекта была выбрана полноразмерная лопатка вентилятора.

В течение трех лет в ИНУМиТ проводились активные поиски. В итоге материал с требуемыми прочностными и технологическими свойствами был создан, после чего компания «ИТЕКМА» начала его промышленный выпуск.

Сегодня материал для получения ударопрочного углепластика выпускают в виде препрега двух типов: под торговой маркой «Карболом» производят однонаправленную ленту шириной 300...1000 мм без утка (волокна скреплены термопластичным биндером), а под маркой «Карбопласт» изготавливают ткань шириной 1000 мм с редким угольным утком. Углепластики, отформованные из данных препрегов, имеют показатели прочности при межслоевом сдвиге 90 МПа. А характеризующая вязкость разрушения средняя остаточная прочность при сжатии после низкоскоростного удара достигает значений  $CAI = 330...340$  МПа. Высокий уровень этих свойств говорит об очень хорошей стойкости данного материала к ударным нагрузкам и способности активно сопротивляться процессу роста трещин. Данные материалы полностью удовлетворяют особым требованиям, предъявляемым к ПКМ авиационного назначения с температурой длительной эксплуатации

до 120°C.

В настоящий момент в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ для нужд авиации ведется разработка препрегов с аналогично высокими техническими характеристиками.

Используя препреги марок «Карболом» и «Карбопласт», в ЦИАМ были отработаны две директивные технологии получения лопаток вентилятора. Первая технология в зарубежной классификации носит название Same-qualified resin transfer molding (SQRTM). Это процесс прессования изделий из препрега в закрытой жесткой металлической пресс-форме при одновременной подаче внутрь нее дополнительного жидкого связующего под давлением, которое поддерживается в течение всего процесса полимеризации. Причем управление уровнем гидростатического давления в смоле обеспечивается независимо от силы предварительного сжатия наполнителя в пресс-форме, то есть независимо от механического давления пресса на пакет армирующих волокон. Такой процесс гарантирует получение изделий с низкой пористостью при заданном объемном содержании волокна, что крайне актуально для обеспечения надежности деталей АД из ПКМ.

Вторая технология состоит в том, что, используя автоклавный способ формования и препрег любых марок, могут быть изготовлены изделия из ПКМ с двумя лицевыми сторонами с помощью пресс-формы, которая сама выполнена из углепластика. В ходе процесса прессования в зазоры между матрицей и пуансоном (аналогично процессу SQRTM) подается избыточное количество жидкого связующего под давлением. Данная технология, названная авторами автоклавным SQRTM, разработана в ЦИАМ.

С использованием обеих технологий были изготовлены полноразмерные лопатки вентилятора, которые подтвердили правильность выбранных технических решений. Лопатки прошли успешные испытания на вибростенде и показали высокую стойкость к выстрелам из пневматической пушки.

В течение ряда лет в рамках различных научных программ в ЦИАМ были сформованы как полноразмерные лопатки вентилятора, так и модельные (уменьшенные). Лопатки прошли этап контроля, были скомплектованы и собраны с дисками в рабочие колеса вентилятора и в их составе прошли успешные испытания на разгонном и аэродинамическом стендах. Была показана работоспособность лопаток при рабочих и увеличенных центробежных нагрузках, а также их устойчивость к критическим режимам: повышенным вибрациям и флаттеру. На всех этапах работ проводилась верификация расчетных моделей с

экспериментальными данными, которая продемонстрировала их высокую сходимость.

Для производства углепластиковых пресс-форм компанией ИНУМиТ было создано специальное инфузионное связующее ТО-29-02, обладающее уникальным набором свойств. Его частичная полимеризация происходит при комнатной температуре до состояния, позволяющего снять заготовку с мастер-модели. А после дальнейшей термообработки обеспечивается температура стеклования матрицы 220°C.

### 3. Перспективные разработки

Сегодня в ЦИАМ обрабатываются несколько инновационных технологий производства объемно-армированных преформ для деталей АД. К настоящему моменту создан задел в технологии создания заготовок методом автоматизированной нашивки армирующих волокон. Нашивка жгутов (ровинга) осуществляется на специализированном вышивальном станке с ЧПУ и сводит к минимуму долю ручного труда. Технология позволяет создавать преформы практически с любыми траекториями укладки волокна в плоскости нашиваемого слоя, одновременно с этим обеспечивая общую сшивку несколько слоев в трехмерные пакеты (до 8 мм). Эти пакеты затем сами могут быть собраны в стек и совместно прошиты в единую заготовку, готовую к пропитке.

К сожалению, в России пока еще не создано связующее, которое одновременно отвечало бы двум взаимно противоречащим условиям: было бы настолько жидким, чтобы давать возможность применять безавтоклавные методы пропитки объемно-армированных структур (включая нашитые), и одновременно с этим гарантировало бы высокую стойкость пропитанных углепластиков к повреждениям, то есть соответствовало бы по уровню трещиностойкости вязким связующим, традиционно применяемым в составе ударопрочных препрегов.

Чтобы обойти это противоречие, сотрудники ЦИАМ и ИНУМиТ разработали и запатентовали [1] гибридную двухстадийную технологию формования ПКМ. Первый этап пропитки сходен с методом пленочной инфузии (RFI), а вторым этапом является автоклавное прессование. Новая технология позволяет использовать для пропитки сухих заготовок любые смолы, разработанные ранее, включая те, что обычно применяются при производстве высокопрочных препрегов. Для пропитки своих 3D-преформ, изготовленных по технологии автоматической нашивки ровинга, в ЦИАМ используется связующее, производимое компанией «ИТЕКМА», входящее в

состав препрега марки «Карболом».

Используя технологии автоматической нашивки и гибридной пропитки, в ЦИАМ были изготовлены несколько модельных лопаток вентилятора. Их испытания показали, что нашитые лопатки обладают более высокой стойкостью к удару посторонними предметами и увеличенной усталостной прочностью по сравнению с классическими слоистыми лопатками, выполненными из препрега аналогичного состава. Обе технологии, и автоматическая нашивка ровинга, и технология гибридной RFI-автоклавной пропитки, сами по себе обладают большим потенциалом. Совместно же они способны поднять технологичность и надежность авиационных изделий из ПКМ на новый уровень.

### 4. Вектор будущего развития

Задачей будущего является создание авиационных ПКМ с повышенными температурами эксплуатации. Для температур до 230°C наиболее перспективными являются бисмалеимидные (БМИ) связующие. Для более высоких температур оптимальны фталонитрильные (ФН) связующие. Углепластики на основе ФН могут работать длительно при температурах до 300°C; при температурах до 450°C иметь средний ресурс (~100 ч); и при температурах порядка 1250°C обеспечивать работоспособность в течение короткого времени.

В ВИАМ было разработано связующее ВСН-31 на основе фталонитрила и углепластики на его базе марок ВКУ-38ТР и ВКУ-38ЖН, из которых в ЦИАМ был изготовлен первый вариант рабочего колеса центробежного компрессора (РКЦК) для малоразмерного газотурбинного двигателя.

В это же время группой ученых ИНУМиТ была создана уникальная модификация фталонитрильного связующего марки ФНИ350, которая позволяет применять при переработке все технологические решения, отработанные ранее для эпоксидных смол: вакуумную инфузию, RTM, порошковую пропитку и прессование в составе препрегов. В настоящий момент компанией «ИТЕКМА» начат промышленный выпуск как БМИ, так и ФН-связующих и препрегов на их основе.

Используя способ пространственной намотки жгута и пропитку БМИ, в ЦИАМ были изготовлены сепараторы подшипников, успешно прошедшие разгонные испытания. Сейчас в ЦИАМ начаты работы по созданию высокотемпературных лопаток вентилятора с применением БМИ-связующих. В ЦИАМ были изготовлены рабочие колеса центробежного компрессора малоразмерного ГТД

---

методом автоматической нашивки углеродного ровинга с последующей пропиткой ФНИ350. На основе кварцевой ткани и ФНИ350 удалось изготовить образцы высокотемпературного огнезащитного ПКМ, соответствующего требованиям безопасности, принятым в авиации.

Как БМИ, так и ФН-смолы обладают высокими прочностными свойствами, не уступая в этом эпоксидным связующим. Ближайшей задачей является отработка способов снижения их хрупкости и уменьшения микрорастрескивания смолы при термоциклировании. Решение этих задач приведет к тому, что высокотемпературные смолы и ПКМ на их основе непременно займут достойное место в перечне материалов авиационного применения.

## **5. Заключение**

Тесно сотрудничая с производителями современных композиционных материалов, отдел под руководством Т.Д. Каримбаева накопил большой опыт в решении самого широкого круга технологических задач, направленных на внедрение ПКМ в узлы АД.

## **Список использованных источников**

- [1] Способ изготовления деталей из волокнистого полимерного композиционного материала : пат. RU 2 656 317 С1/ Т.Д. Каримбаев, М.А Мезенцев, Д.В. Афанасьев, В.В Авдеев, А.В Кепман, А.В. Бабкин ; патентообладатель Минпромторг России; № 2017110034; заявл. 27.03.2017; опубл. 04.06.2018. Бюл. 16. 6 с.