

ОАО «НПП «Аэросила»

Краткое описание работы по теме:

**РАЗРАБОТКА СЕМЕЙСТВА ВОЗДУШНЫХ ВИНТОВ С
ЛЕГКИМИ ВЫСОКОРЕСУРСНЫМИ ЛОПАСТЯМИ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ТУРБОВИНТОВЫХ
САМОЛЕТОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ**

Авторы:

Шатланов М. И. – Зам. Генерального директора,
Главный конструктор по АВ

Фокин Б. А. – Начальник конструкторско-технологического
отдела лопастей

Кунгурцев В. В. – Зам. начальника конструкторско-технологического
отдела лопастей

г. Ступино

Создание и внедрение композитной лопасти воздушных винтов и винтовентиляторов для самолетов нового поколения

Мировой энергетический кризис конца 70-х годов дал мощный импульс в создании высокоэкономичных турбовинтовых и турбовинтовентиляторных двигателей для самолетов 21^{го} века.

Целевой комплексной программой МАП были определены концепции кардинальных усовершенствований движителей, направленных не только на повышение их экономичности при повышенных скоростях полета, но и на повышение надежности, ресурса, а также снижение веса и шума (см. рис.1).

Основные задачи при создании движителей для турбовинтовых самолетов нового поколения связаны с обеспечением:

- повышенной до 25÷30 % экономичности силовых установок (по сравнению с ТРДД одинакового технического уровня) и увеличения крейсерских скоростей полета турбовинтовентиляторных самолетов до 0,8 Мп, что требует высокой нагруженности мощностью площади, ометаемой винтом;
- высокой тяговооруженности на режимах взлета и посадки, с целью сокращения пробега самолета и использования ограниченных взлетно-посадочных полос;
- снижения веса движителя;
- жестких требований по шуму в салоне и кабине самолетов, а также на местности;
- повышения ресурса.

Такие задачи решаются благодаря применению воздушных винтов и винтовентиляторов, разработанных на основе усовершенствованной аэродинамики, и характеризующихся многолопастностью и меньшим диаметром ометаемой площади по сравнению с традиционными винтами.

Ключевой проблемой, определяющей реализацию измененного облика движителей для самолетов нового поколения, является задача создания легкой и прочной лопасти из полимерных композиционных материалов (ПКМ), поэтому композиционным лопастям в воздушных винтах и винтовентиляторах нового поколения принадлежит особая роль.

Применение композитной лопасти потребовало решения множества принципиально новых проблемных вопросов.

В настоящей работе создание лопасти из ПКМ охватывает совокупность решения многоплановых научно-технических задач в следующих областях:

- разработки методов проектирования;
- разработки критериев прочности и аэроупругости;
- разработки видов, методов испытаний и испытательного оборудования;
- создания комплекта материалов композитной лопасти, техпроцесса изготовления и технологического оборудования;
- разработки методов, средств и критериев неразрушающих методов контроля при производстве, испытаниях и эксплуатации;
- разработки ремонтных технологий для эксплуатационных и заводских условий и норм допустимых повреждений;
- обеспечения эксплуатационной технологичности.

При решении всех перечисленных задач широко используются экспериментальные работы и испытания в интересах объективной оценки и выбора технических решений, положенных в основу создания базовой конструкции лопасти из ПКМ. При этом, в соответствии с тематической направленностью к решению задач широко привлекаются ведущие отраслевые НИИ – ЦАГИ, ВИАМ, НИАТ.

КОНСТРУКТИВНЫЙ ОБЛИК ЛОПАСТИ

Из множества исследованных вариантов конструкций предпочтение отдано лонжеронной из-за ее преимуществ по надежности и массе. В такой лопасти лонжерон является основным силовым элементом, а оболочка образует аэродинамический профиль, служит защитой лонжерона от повреждений и воспринимает основную долю нагрузок от кручения.

На рис.2 представлены варианты лонжеронных конструкций лопастей с пустотелым и сплошным лонжероном из алюминиевого сплава, а также с комбинированным лонжероном, сочетающим в себе элементы из алюминиевого сплава и ПКМ.

Результаты расчетных исследований нагрузочных характеристик и массы лопастей, вариантов лонжеронных конструкций представлены на диаграммах в сравнении с традиционной сплошной лопастью из алюминиевого сплава применительно к аэродинамике лопасти винтовентилятора СВ-27 для четырехмоторного самолета Ан – 70.

Лопать с лонжероном из ПКМ имеет преимущества по массе, создаваемым нагрузкам, а также по усталостной прочности.

Лопать с комбинированным лонжероном имеет промежуточные значения.

Лонжерон из ПКМ изготавливается разнотолщинным, а оболочка по технологическим соображениям имеет постоянную толщину.

Наиболее ответственным и проблемным узлом лопасти является высоконагруженный узел комлевой заделки, в котором в ограниченных габаритах организовано сочленение композита лопасти с металлом втулки. Из 90 разработанных вариантов выбраны и всесторонне исследованы 12, а для базовой конструкции выбран наиболее легкий и надежный вариант резьбовой заделки, позволяющий заменять лопасти непосредственно на самолете.

Конструктивные элементы лопасти и примененные в них типовые материалы определены после тщательного поиска и исследований.

На рис. 3 показаны некоторые варианты конструкций заделок из числа испытанных.

На рис.4 представлена принятая для реализации базовая конструкция лопасти из ПКМ.

РАСЧЕТНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ПРОЧНОСТЬ И РЕСУРС

В композитной лопасти лонжеронной конструкции ее весовая эффективность, статическая и динамическая прочность, а также обеспечение требований по аэроупругости (отсутствие срывного и классического флаттера) зависят от многих параметров конструкции (формы лопасти, распределения толщин лонжерона и оболочки лопасти) и материала (упруго-прочностных характеристик и схем армирования силовых ПКМ в лопасти, их плотности, а также плотности пенопластового наполнителя).

Для достижения максимальной эффективности разработана методология проектирования композитных лопастей, которая содержит соответствующую структуру проектирования; многопараметрическую оптимизацию конструктивных параметров силовых элементов лопасти, позволяющую снизить массу лопасти на 15÷20% при сохранении требований по запасам прочности; поверочный расчет напряженно-деформированного состояния (НДС) пера лопасти методом конечных элементов (МКЭ) (см. рис. 5, 6, 7 и 8); методики расчета частотных характеристик и критериев безопасности по аэроупругости, а также динамической нагруженности и ресурса лопасти.

Кроме того, впервые создана программа расчета МКЭ теплового состояния динамически нагруженных комлевых заделок, а также современная

методика расчета электротепловых нагревателей противообледенительной системы (ПОС) лопастей на основе использования МКЭ (см. рис. 9).

ИСПЫТАНИЯ

Для всесторонних и надежных исследований высоконагруженных композитных лопастей впервые сформулированы и реализованы концепции по видам, методам, средствам и объемам испытаний.

Большой объем проведенных испытаний обусловлен новизной решаемой задачи, недостаточной изученностью процессов разрушения композитов в реальных конструкциях, особой чувствительностью композитов к различным климатическим воздействиям, а также отсутствием установленных критериев.

Для проведения всего комплекса работ по исследованиям композитных лопастей создано свыше 50 специализированных стендов, обеспечивающих необходимый объем материаловедческих образцовых испытаний, статических и динамических испытаний лопастей с комплексным нагружением, моторно-стендовых и специальных испытаний. Для исследования влияния на долговечность лопастей предельных значений рабочих температур и повышенной влажности разработаны методики испытаний и созданы специальные тепловые, холодильные и дождевальные камеры с размещением в них динамических стендов.

Для создания эффективной и надежной ПОС композитных лопастей ВВ выбран новый тип нагревателя (полиуретано-проволочный), разработана методика его проектирования, а также виды и методы испытаний (см. рис. 9).

Виды и объемы проведенных испытаний и созданного оборудования представлены на рис. 10, 11, 12, 13, 14, 15 и 16.

Для исследования и выбора критерия безопасности по срывному флаттеру ($1/\lambda$) и оценки влияющих на него факторов проведены специальные расчетно-экспериментальные исследования (см. рис. 17)

МАТЕРИАЛЫ

Решению проблемной задачи по созданию материалов для композитной лопасти предшествовали обширные расчетные и экспериментальные исследования.

Для обоснованного выбора упругих и массовых характеристик ПКМ и пенопластового заполнителя, в интересах обеспечения требований по безопасности от срывного флаттера, допустимой нагруженности и минимальной массы лопастей, проведены соответствующие расчетно-параметрические исследования (см. рис. 18).

В качестве исходного базового ПКМ для экспериментальных исследований был принят высокопрочный стеклотекстолит ВПС-20.

С использованием данного композита проведены обширные расчетные и экспериментальные исследования на образцах влияния схем армирования и окружающей температуры на упруго-прочностные и усталостные характеристики материала.

Проведены динамические испытания 135 лопастей при нормальной и повышенной температурах.

Проведены динамические испытания 65 натуральных узлов комлевых заделок, а также расчетные исследования условий саморазогрева заделок в зависимости от их условий нагружения, характеристик материала и температуры окружающей среды.

На основе перечисленных выше полученных результатов теоретических и экспериментальных работ сформированы требования к новому композиту с

более теплостойким связующим и определены требования к облику перспективного ПКМ.

При тесном взаимодействии со специалистами «ОАО НПП «Аэросила» ВИАМ разработал и паспортизировал новые ПКМ, в полной мере удовлетворяющие условиям прочности и требованиям прогрессивной технологии изготовления лопасти: для оболочки лопасти базовой конструкции – стеклотекстолит СК-2561, а для лонжерона гибридный ПКМ – слоистый углепластик ГКМ-3 (всего при создании композитной лопасти было опробовано 68 различных материалов, разработанных и рекомендованных ВИАМ).

С использованием данных материалов на предприятии проведены испытания на образцах и натурных лопастях при обычной и повышенной температурах и получены разительные преимущества перед исходным базовым ПКМ и традиционным для серийных лопастей алюминиевым сплавом.

Результаты перечисленных выше видов исследований на образцах, лопастях и комлевых заделках на исходном базовом ПКМ и специально разработанных для лопастей новых ПКМ представлены на рис. 19, 20, 21 и 22.

Кроме того, для обеспечения длительной работоспособности высоконагруженной зоны контакта ПКМ комлевой заделки и стакана втулки винта специально разработано ВИАМ, а затем исследовано на предприятии на образцах и натурных узлах комлевых заделок фреттингостойкое полимерное покрытие, ВФП-5. Как испытания, так и практической эксплуатацией на самолетах показана его высокая эффективность, а также ремонтпригодность.

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛОПАСТЕЙ

Из множества рассмотренных вариантов технологий выделено и экспериментально исследовано на натурных лопастях 4 конструктивно-технологических направления, которые представлены на рис. 23.

Создание и исследования альтернативных технологических процессов позволяет сделать обоснованный выбор варианта технологии в зависимости от формы, размеров, условий работы конкретных лопастей и располагаемых материалов.

Для реализации любого из перечисленных процессов на предприятии созданы уникальные конструкции точных и жестких прессформ каркасного типа из алюминиевых сплавов и стали для получения основных элементов лопасти. Прессформы снабжены встроенной системой зонного электрообогрева. Каждая из зон управляется по программе и обеспечивает рациональное подведение тепла к разнотолщинным элементам лопасти.

На основе полученного практического опыта в качестве основного базового выбран техпроцесс совместной пропитки лопасти, собранной из сухих заготовок армирующего наполнителя, под давлением и вакуумом.

Этот техпроцесс обеспечивает стабильное качество композита, требует меньшего количества прессформ, снижает трудоемкость и длительность изготовления, улучшает условия труда.

Особенности техпроцесса изготовления лопастей из ПКМ с использованием пропитки под давлением и вакуумом представлены на рис.24.

Проведенные технологические исследования и практические доводочные работы по технологии и оборудованию позволили определить облик видов специализированного технологического оборудования для прогрессивного серийного производства.

На рис.25 представлены основные виды такого оборудования.

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ЛОПАСТЕЙ

Для обеспечения высоких требований по надежности композитных лопастей разработана и внедрена система неразрушающего контроля,

охватывающая все этапы приборного контроля, от параметров технологического процесса до контроля в эксплуатации.

При этом выбраны методы и средства контроля для каждого из указанных этапов, разработаны и внедрены соответствующие методики. Кроме того определены виды автоматизации контроля применительно к прогрессивному серийному производству.

Виды неразрушающего контроля композитных лопастей в производстве, при сдаточных испытаниях и в эксплуатации представлены на рис. 26.

ПОВРЕЖДАЕМОСТЬ И РЕМОНТОПРИГОДНОСТЬ ЛОПАСТЕЙ

Специфика проектирования и характер кривой выносливости композитных лопастей таковы, что расчетный ресурс пера лопасти равен бесконечности, и их фактическая долговечность будет определяться различными эксплуатационными повреждениями, в том числе предметами аэродромной засоренности и боевыми авиационными средствами поражения (для самолетов ВВС).

Экспериментальные исследования стойкости композитных лопастей к соударению с птицами весом до 1,8 кг, проведенные в процессе моторно-стендовых испытаний на соосном винтовентиляторе СВ-36 и одиночных винтах СВ-34 (для Ил-114), АВ-140 (для Ан-140), дали положительные результаты и не накладывают ограничения на ресурс композитных лопастей.

Экспериментальные исследования молниестойкости композитных лопастей, снабженных специальной молниезащитной шиной и подвергнутых воздействию соответствующего электрического разряда, с последующими испытаниями на динамическую прочность, также дали положительные результаты.

Для оценки влияния повреждений лопастей предметами аэродромной засоренности (ПАЗ) на их работоспособность, на основе имеющихся статических данных по видам и размерам ПАЗ, проведены расчетные исследования по определению условий соударения и зон лопастей, которые будут подвергаться воздействию ПАЗ.

Совместно с ВВИА им. Жуковского разработана методика расчета зон повреждений и имитации соударения фактических ПАЗ с композитными лопастями, выбраны наиболее вероятные размеры кусочков бетона, гранита, битума и льда, с использованием которых на спецустановке ВВИА наносились повреждения по различным участкам лопастей.

Поврежденные композитные лопасти подверглись динамическим испытаниям и ремонту, после чего для них были установлены предварительные нормы допустимых повреждений для длительной и кратковременной эксплуатации, а также предварительные нормы по ремонтным лопастям.

Окончательные нормы повреждений и ремонта будут устанавливаться с учетом практического опыта расширенной эксплуатации лопастей. Повреждаемость и ремонтпригодность лопастей после перечисленных видов спецвоздействий представлена на рис. 27.

Для исследования боевой живучести (БЖ) – стойкости композитных лопастей к повреждению боевыми авиационными средствами поражения (АСП) - совместно со специалистами ВВИА им. Жуковского были разработаны программа и методика проведения экспериментальных исследований БЖ, определен состав испытательного и измерительного комплекса.

Выполнено нанесение повреждений различными АСП на лопасти. Поврежденные лопасти подверглись динамическим испытаниям, в результате которых было определено:

1. Композитные лопасти обладают боевой живучестью после воздействия потока осколков ракет массой 3 г, плотностью 6 оск/м², скоростью

до 2000 м/с, с различными углами прохода, так как они выдержали усталостные испытания без разрушений в объеме наработки $N=0,5 \cdot 10^6$ циклов, что обеспечивает выполнение полета продолжительностью не менее 5 часов.

2. Композитные лопасти не обладают стойкостью к воздействию осколочно-фугасных снарядов, а тем более снарядов авиационных пушек. Ремонтопригодность лопастей определялась и обеспечивалась не только на специально поврежденных лопастях, но и лопастях, имеющих дефекты в процессе производства.

В результате специально проведенной работы выбраны соответствующие материалы и разработаны техпроцессы, обеспечивающие проведение ремонта пера, силовых композитных элементов лопасти, ремонт и замену нагревателя ПОС, ремонт и замену защитной накладки передней кромки, а также ремонт комлевой зоны с повышенным контактным нагружением, с сохранением работоспособности и высокой точности сопряжения с ответной деталью втулки винта.

Все виды ремонтных работ апробированы, защищены испытаниями, имеют положительные результаты и внедрены в эксплуатационную документацию воздушных винтов с лопастями из ПКМ.

ВЗАИМОЗАМЕНЯЕМОСТЬ ЛОПАСТЕЙ

В связи с большей вероятностью повреждений композитных лопастей в эксплуатации по сравнению с серийными из алюминиевого сплава, по причине увеличенного числа лопастей в новых двигателях, вопрос замены поврежденных лопастей в эксплуатации без возврата и перебалансировки винта, является особенно актуальным.

Впервые в практике отечественного винтостроения такая задача решается за счет внедрения оригинальной технологии модульной (раздельной) балансировки винтов. Для ее реализации в лопастях предусмотрено несколько элементов для размещения балансировочных грузов.

На основе большого комплекса перечисленных вводов работ и полученного опыта эксплуатации ВВ нового поколения совместно с отраслевыми институтами решена проблемная многоплановая научно-техническая задача создания композитной лопасти (см. рис. 28).

СЕМЕЙСТВО СОЗДАНЫХ ЛОПАСТЕЙ ИЗ ПКМ

На рис. 29 представлено широкое семейство композитных лопастей для летательных аппаратов различного назначения, от малогабаритных винтов неизменяемого и переставного шага до уникальных, не имеющих мировых аналогов, соосных открытых и закапотированных винтовентиляторов.

Изучение информационных материалов, посещение передовых винтостроительных фирм Гамильтон Стандарт (США), Даути Ротол (Англия), Хартцель Пропеллер (США) и Ратье Фижак (Франция) с подробным знакомством с технологиями и вопросами создания композитных винтов, а также многократные обсуждения со специалистами этих фирм проблем создания и исследований композитных лопастей позволяют сделать следующие сопоставления с нашими достижениями:

- независимо друг от друга все фирмы пришли к лонжеронной конструкции лопастей с различными вариантами исполнения лонжеронов и комлевых заделок, но с единым выбором технологии пропитки под давлением и вакуумом.

- условный удельный вес пера лопасти с одинаковыми геометрическими размерами примерно одинаков у всех фирм, однако

конструкция комлевой заделки «Аэросилы» позволяет иметь лучшую эксплуатационную технологичность (позволяют проводить монтаж и демонтаж лопастей без демонтажа втулки винта с самолета) и более высокую прочность.

- объемы и виды прочностных и специальных испытаний и исследований при создании композитных лопастей в «Аэросиле» превосходят объемы исследований и испытаний западных фирм.

- в последний годы фирмы Даути Ротол и Ратье Фижак внедрили прогрессивную технологию получения силовых элементов из ПКМ методом оплетки на спецстанках. Из-за отсутствия такого отечественного оборудования «Аэросила» была вынуждена ограничиться проведением апробирования такой технологии на малоразмерных образцах элементов лопастей.

Благодаря легкой и надежной лопасти из ПКМ удалось реализовать принципиально новый облик высокоэкономичных соосных винтовентиляторов СВ27 для самолета Ан-70 и СВ-92 для уникального двигателя НК-93.

Создание соосных ВВ с композиционными лопастями позволяет получить:

- сочетание высокой стартовой тяги и высокого КПД на $V=0,7$ Мп
- высокую реверсную тягу (4,5 т.с.)
- эффективный обдув крыла
- обеспечение эксплуатации самолета на укороченных ВПП
- отсутствие реактивного $M_{кр}$ от ВВ
- высокую эффективность по массе ВВ
- уменьшенный уровень шума

Эффективность новых разработок по сравнению с широко известными соосными винтами прежнего поколения для самолетов Ту-95 и Ан-22 представлена на рис.30.