

На всех трех рисунках значений ссылочного времени $TIME = 1$ соответствует начальному пятну контакта (нагрузки на консольном конце образца не прикладывались), значение $TIME = 6$ соответствует выходу одной из зон контактного взаимодействия из контакта.

Аналогичные модели могут применяться для расчета плоских и объемных контактных задач.

Список литературы

1. Петухов А. Н. Сопротивление усталости деталей ГТД. М., Машиностроение, 1993. с.240
2. Басов К. А. ANSYS в примерах и задачах. М, Компьютерпресс, 2002. с.224

КОНСТРУКТИВНЫЙ ОБЛИК ЛОПАТКИ ВЕНТИЛЯТОРА КОНКУРЕНТОСПОСОБНОГО ТРДД

Петухов А.Н.

ЦИАМ им. П.И. Баранова, г. Москва

Создание современных конкурентоспособных двухконтурных двигателей с высокой тягой не возможно без применения широкохордных облегченных лопаток. Об этом свидетельствует опыт всех зарубежных фирм, работающих в этой области.

К вентиляторам современных гражданских ТРДД предъявляют высокие требования по уровню аэродинамических характеристик в широком диапазоне условий эксплуатации: по сопротивляемости вибрационным и циклическим нагрузкам; по стойкости к повреждениям при попадании в воздушный тракт посторонних предметов, включая птиц; по допустимому уровню шума и т. д. Кроме того, известно, что вентилятор существенно влияет на общую тягу и топливную эффективность силовой установки, ее массу.

Применение лопаток с антивибрационными полками ухудшает аэродинамические характеристики вентилятора и повышает расход топлива. Проведенный анализ показал, что только отказ от антивибрационных полок способствует: повышению газодинамической эффективности вентилятора до 6 %; снижению удельного расхода топлива, например, на крейсерских режимах на 4 %; увеличению расхода воздуха через вентилятор. Последнее

обстоятельство чрезвычайно важно, так как проходящий по наружному контуру воздушный поток создает около 75% общей силы тяги.

Для решения основных из перечисленных проблем в современных ТРДД применяются широкохордные бесполочные лопатки, позволяющих за счет внедрения полых металлических конструкций лопаток из композиционных материалов или гибридных лопаток с частичным применением композиционных материалов снизить массу лопаток. Для уменьшения уровня шума снижаются окружные скорости лопаток.

Применение широкохордной лопатки обеспечивает увеличение степени сжатия ступени с одновременным повышением устойчивости при помпаже и стойкости к вибрациям, которые могут быть вызваны различными причинами. Рост газодинамической эффективности широкохордных лопаток дает возможность заметно уменьшить общее количество лопаток в вентиляторе.

Несмотря на то, что масса одной широкохордной лопатки превышает массу лопатки с большим удлинением и с антивибрационными полками, общая масса комплекта рабочих лопаток в колесе оказывается меньше массы альтернативного колеса. Применение широкохордных лопаток позволяет дополнительно применить целый комплекс конструкторских и технологических мероприятий, приводящих к снижению массы каждой лопатки в отдельности.

Показано, что широкохордные лопатки обладают большей жесткостью, чем лопатки с большим удлинением и антивибрационными полками. Упругий потенциал поглощения энергии широкохордными лопатками при ударе её посторонним предметом выше, что повышает ударостойкость колеса при попадании в тракт двигателя посторонних предметов и птиц, в результате чего практически исчезает проблема удержания корпусом вентилятора разрушенной лопатки.

Опыт зарубежных фирм проектирование и изготовления и эксплуатации полых широкохордных лопаток потребовал привлечения принципиально новых конструкторских и технологических решений для обеспечения их эксплуатационной надежности.

Ниже будет рассмотрено оригинальное конструктивно-технологическое решение и технология изготовления полых лопаток с высокой эксплуатационной надежностью и живучестью.

Из опыта зарубежных фирм разработки полых широкохордных лопаток вентиляторов

Рассмотрим некоторые сведения, изложенные в материалах международных конференций [4 - 7, 10], в патентах [1, 2], в справочниках [8, 9, 11] и др. публикациях [3, 12].

Фирма Роллс-Ройс. Лопатки вентиляторов фирмы Роллс-Ройс – металлические, имеют широкохордную пустотелую бесполочную конструкцию. Для их изготовления были разработаны технологии, позволяющие соединять и деформировать две заготовки в условиях сверхпластичности. При этом была выполнена оптимизация свойств пластин-заготовок из титановых сплавов, гарантирующая лопаткам повышенное сопротивление усталости.

Кроме снижения массы лопатки, ставилась задача снижения затрат в производстве и сокращения времени проектирования. С этой целью для последних поколений лопаток вентилятора фирма *Роллс-Ройс* применила компьютерную систему проектирования *Fan Key System*, в которой объединены решения вопросов проектирования, подготовки и выполнения процесса производства. Система проектирования включает моделирование технологического процесса для оптимизации ключевых технологий изготовления. Это позволило получить массу лопатки меньше, чем у композиционной, и на 15 % уменьшить массу по сравнению с находившимися в эксплуатации.

Фирма *Роллс-Ройс* имела неудачный опыт использования композиционных лопаток на двигателе *RB211-22B*, которые разрушались при испытаниях с забросом птиц, и поэтому возврат к ним она считает шагом назад.

Фирма Пратт-Уитни. Впервые в своей практике фирма *Пратт-Уитни* в короткие сроки разработала для двигателя *PW4084* вентилятор диаметром 2840 мм, включающим 22 пустотелые бесполочные титановые рабочие лопатки. Вентилятор конструктивно выполнен иначе, чем находящийся в эксплуатации на двигателях *RB211-524*, *-535* и *V2500*. Фирма считала свое техническое решение менее рискованным, по сравнению с лопатками вентилятора из композиционных материалов, не имевших ранее опыта эксплуатации.

Технологический процесс изготовления рабочих лопаток оптимизировался исходя из обеспечения требуемых аэродинамических характеристик, стойкости к ударам при попадании птиц, стоимости, массы, ремонтпригодности и эксплуатационной технологичности. Сначала плоские заготовки подвергаются механической обработке с последующей полностью контролируемой диффузионной сваркой «в плоскости». Хотя диффузионное соединение материала осуществляется на молекулярном уровне, для гарантии отсутствия пористости в соединении этот процесс осуществляется при небольшой заданной величине давления в контролируемом объеме для всех участков соединения. Второй этап – нагрев заготовки до состояния сверхпластичности и придание плоским заготовкам профиля незакрученной лопатки после чего в закрытом штампе формируется окончательная форма лопатки. Далее следует закрутка с последующей калибровкой и финишная механическая обработка входной и выходной кромок.

Фирма Дженерал Электрик. Нужно отметить, что фирма Дженерал Электрик, выполняя в 70-х годах исследовательскую программу *QCSEE*, накопила опыт разработки лопаток вентилятора из композиционных материалов, который был широко использован при создании широкохордной лопатки вентилятора двигателя *GE90*. За счёт применением для лопаток вентилятора композиционных материалов на основе углеродных волокон и эпоксидных связующих решена проблема стойкости их к ударным нагрузкам при попадании птиц в тракт двигателя. Этой проблеме уделялось исключительно большое внимание уже на стадии проектирования и при проведении расчётно-экспериментальных исследований. Многочисленные расчётные эксперименты были проведены на суперЭВМ "Крэй" с целью изучения поведения композиционной лопатки при действии ударных нагрузок с применением математических моделей различного уровня, включавшие расчеты методом конечных элементов трехмерной динамической задачи. Эти исследования позволили установить приемлемый для безопасности уровень окружных скоростей и более четко сформулировать требования для применяемого материала лопатки.

При изготовлении лопаток вентилятора фирма Дженерал Электрик применила модифицированную эпоксидную смолу, специально разработанную в соответствии с заданными требованиями.

Совместно с фирмой Цинциннати Милакрон была создана автоматизированная система, позволившая сократить время изготовления одной лопатки с 40 до 10-12 часов, а для укладки 630 слоев волокон создана система «Вайпер» с семью степенями свободы и ЧПУ, что обеспечило необходимые стабильность размеров и повторяемость формы лопаток, вызывавшие сначала проблемы. Стоимость одной лопатки составила около 30 тыс. дол.

Лопатка вентилятора из композиционных материалов на полимерной основе успешно прошла все сертификационные испытания в составе двигателя *GE90* и в настоящее время успешно эксплуатируется.

Создав беспрецедентно легкую конструкцию лопатки вентилятора, фирма решила многие вопросы, связанные с массой двигателя. Кроме того, защитное кольцо, также изготовленное с применением композиционных материалов (органопластиков и стеклопластиков). Оно имеет повышенную надежность, обеспечивает локализацию разрушения натурной лопатки. Кинетическая энергия лопатки снижена за счёт её относительно небольшой массы и уменьшения окружной скорости. Последнее и невысокая степень повышения давления позволили уменьшить уровень шума до пределов, допускающих полеты в аэропортах с жесткими ограничениями по шуму.

Прототипом лопаток гибридного типа являются лопасти экспериментального двигателя *GE36* с биротативным винтовентилятором. В отличие от прототипа у лопатки отсутствует стреловидность и металлический лон-

жерон, из-за которого, вследствие различия между деформациями материала лонжерона и композиционной оболочки, в месте соединения возникла проблема с расслаиванием материала. Лонжерон в лопатке вентилятора GE36 был применен из-за необходимости поворота лопаток при реверсировании.

Проблемы, возникающие при создании широкохордных облегчённых лопаток вентилятора отечественных ТРДД

В настоящее время предлагается четыре типа облегчённых широкохордных лопаток: составная металлическая (из двух половинок) с наполнителем, композитная в чистом виде, гибридная и полая слоистая металлическая.

Не касаясь вопросов экономики, рассмотрим, с точки зрения технологичности, некоторые проблемы создания широкохордных облегчённых лопаток. Как следует из анализа зарубежных конструкции, рассмотренных выше, конструкцию лопатки первого типа в лучшем случае можно отнести к лопатке первого поколения фирмы Роллс-Ройс. Для стабилизации процесса изготовления лопатки необходимо создать специальное прессовое оборудование, обеспечивающее проведение изотермической штамповки в условиях сверхпластичности, т.е. повторить путь фирмы.

Создание лопаток второго типа возможно только при наличии высококачественных исходных материалов для матрицы и наполнителя, специальных укладочных станков, работающие по заданным программам.

Лопатки третьего типа, кроме технологических проблем, относящихся к лопаткам второго типа, имеют дополнительные нерешённые вопросы, связанные с устранением расслоения композита, вызываемым разностью деформаций в разнородных материалах.

Процесс изготовления лопаток четвёртого типа - полых слоистых широкохордных лопаток вентиляторов из титановых сплавов, получаемых методом диффузионного соединения, в отличие от лопаток первого типа, содержит минимальный объём механической обработки, а для формирования профиля лопатки не требуется применения процесса изотермической штамповки в условиях сверхпластичности и специального прессового оборудования. Весь процесс создания лопатки, включая проектирование конструкции, её заготовок, и изготовления предусматривает компьютеризацию и автоматизацию.

Кроме того, конструкция такой лопатки не только принципиально отличается от рассмотренных выше, но и даёт дополнительные преимущества (конструктивные и эксплуатационные), обеспечивающие возможность: повышения и управления демпфирующими способностями материала лопатки; проведения частотной отстройки лопатки без изменения параметров наружного контура лопатки (проточной части компрессора); повышения живуче-

сти лопаток (за счёт торможения роста трещин в пластичных слоях) и сопротивляемость повреждаемости от попадания посторонних предметов и птичестойкость; регулирования механическими свойствами материала лопаток; повышения стабильности прочностных свойств лопатки в целом и управления свойствами материала лопаток в заданных сечениях.

Список литературы

1. B.N. Genkin. Способ изготовления профильных секционных лопаток сваркой давлением. Патент США, № 5170666, 1972, В23К/01
2. J.R. Woodwart. Способ диффузионной сварки титана и его сплавов через жидкую прослойку. Великобритания. Патент № 1438842. 1976
3. J. Lesgourques. Диффузионная сварка титана и его сплавов. *Raeronautique et Lastronautique* 1981, № 2, p. 69-78
4. G.A. Fitzpatrick, T. Broughton "The Rolls-Royce Wide Chord Fan Blade". International Conference on Titanium and Applications, San Francisco, California, USA, October 1986.
5. G.A. Fitzpatrick, T. Broughton "The Diffusion Bonding of Aeroengine Components". Sixth World Conference on Titanium, Cannes, France, June 1988, v., p. 1451-1456
6. G.A. Fitzpatrick "The Application of Diffusion Bonding in the Manufacturing of Aeroengine Components". Third International SAMPE Metals Conference, Toronto, Canada, October 1992
7. G.A. Fitzpatrick, J.M. Cundy "Rolls-Royces Wide Chord Fan Blade. The Next Generation". Seventh World Conference in Titanium, San Diego, USA, June 1992
8. Иностранные авиационные двигатели. (по данным иностранной печати) XII издание. Под ред Л.И. Соркина. М. ЦИАМ, 1992. 300 с.
9. Дополнение к справочнику «Иностранные авиационные двигатели» выпуска 1992 г. Под ред Л.И. Соркина. М. ЦИАМ, 1995, 128 с.
10. G.A. Fitzpatrick, F.D/ Lloyd "Establishing Best practice in the Design and Manufacture of Hollow Titanium Fan Blades". RTO AVT Workshop on "Intelliigent Processing of High Performance Materials", Brussel, Belgium, 13-14 May 1998
11. Иностранные авиационные двигатели. (по данным иностранной печати) XIII издание. Под ред Л.И. Соркина. М. ЦИАМ, 2000. 300 с.
12. Научный вклад в создание авиационных двигателей. В двух кн. Под общей научной ред. В.А. Скибина и В.И. Солонина. М.: «Машиностроение», 2000. Книга 1 725 с., книга 2 616 с.