

Конкурсная работа

Проектирование, изготовление и экспериментальное исследование перспективной пустотелой широкохордной лопатки вентилятора

1 . Введение

Основными требованиями, предъявляемыми к современным авиационным газотурбинным двигателям (ГТД), являются высокий КПД, габаритные размеры и запасы устойчивой работы вентилятора. Данные требования не удовлетворяются при использовании традиционного конструктивного исполнения лопаток вентилятора, а именно сплошной широкохордной рабочей лопатки. Для решения этих проблем разрабатываются рабочие полые широкохордные лопатки вентилятора, которые позволяют снизить массу самой лопатки на 30-40% и, как следствие, на 10-15% снизить массу диска, корпусов вентилятора и бронезащиты.

Основным мероприятием при проектировании лопаток ГТД в части обеспечения приемлемого уровня переменных напряжений является частотная отстройка на этапе проектирования от резонансов в рабочем диапазоне частот вращения ротора. Для ее проведения решается задача определения форм и частот собственных колебаний лопаток с привлечением современных методов численного моделирования.

Согласно Нормам Прочности, определение частот собственных колебаний опытных образцов лопаток проводится экспериментально. При этом данные, полученные при эксперименте, могут быть использованы для верификации используемых конечных элементных моделей с целью уточнения методики проведения проектировочных расчетов.

2 . Численное определение собственных форм и частот колебаний полой широкохордной лопатки вентилятора

Для определения собственных форм и частот колебания полой широкохордной лопатки вентилятора создана её конечно-элементная модель. Конечно-элементная сетка полностью состоит из HEXA-элементов Solid185, что позволяет в дальнейшем производить расчет на устойчивость к попаданию посторонних предметов на вход в двигатель. Количество конечных элементов составляет около 1×10^6 , количество узлов – $1,1 \times 10^6$. Используются 3 элемента по толщине каждого листа (спинки, корыта и заполнителя), что также является минимально необходимым для описания

изгиба листов. На рисунке 1 подробно показаны сечение профильной части лопатки, входная кромка и участок гофрированного заполнителя.

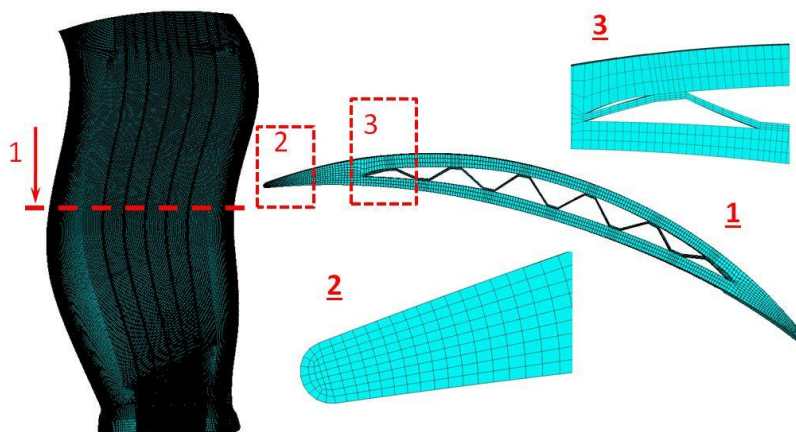


Рисунок 1 – Конечно-элементная модель

На рисунке 2 показан гофрированный заполнитель и сопряжения составных частей пустотелой лопатки (вид со стороны корыта). На изображении видна единая и подробная сетка конструкции с детальным описанием мест быстрого перехода гофрированной части заполнителя в зону диффузионной сварки трех составных частей полый широкохордной лопатки.

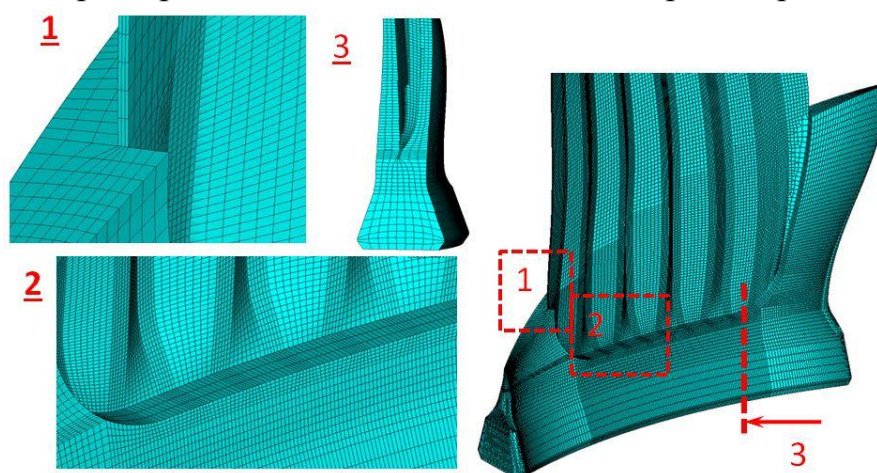


Рисунок 2 – Конечно-элементная модель

Рабочая лопатка вентилятора воспринимает воздействие от газодинамических (интерполяция поля статических давлений из 3D – CFD расчета на рабочие поверхности лопатки) и центробежных (соответствует расчетному режиму работы двигателя) нагрузок. Ввиду условий работы лопатки температурное воздействие в данных расчетах не учитывалось.

Далее выполнялась серия модальных анализов полый широкохордной лопатки вентилятора для определения собственных форм и частот колебаний лопатки. Формы собственных колебаний, полученные численным методом, представлены на рисунке 3.

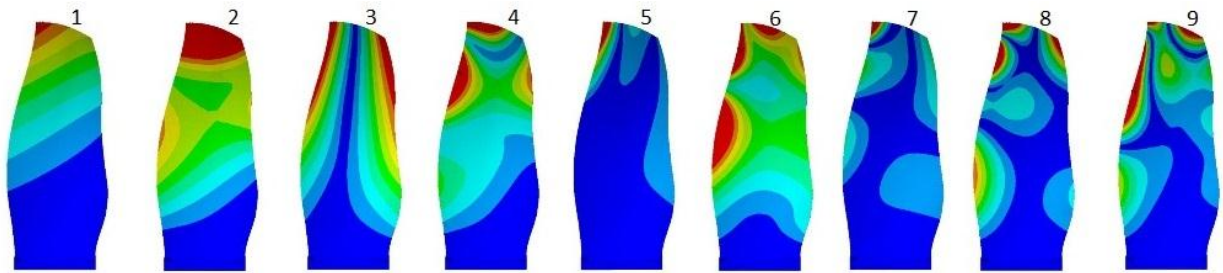


Рисунок 3 – Формы собственных колебаний, полученные численным моделированием

3. Экспериментальное определение собственных форм и частот колебаний полой широкохордной лопатки вентилятора

По рабочей конструкторской документации была изготовлена опытная партия полых широкохордных лопаток вентилятора, которая была исследована на наличие технологических дефектов, в том числе исследование отклонений возникших при изготовлении опытной партии с помощью контрольной измерительной машины. Проведено исследование причин возникновения отклонений и даны рекомендации по их устранению.

Для определения собственных форм и частот колебаний полой широкохордной лопатки вентилятора спроектировано приспособление, представленное на рисунке 4.

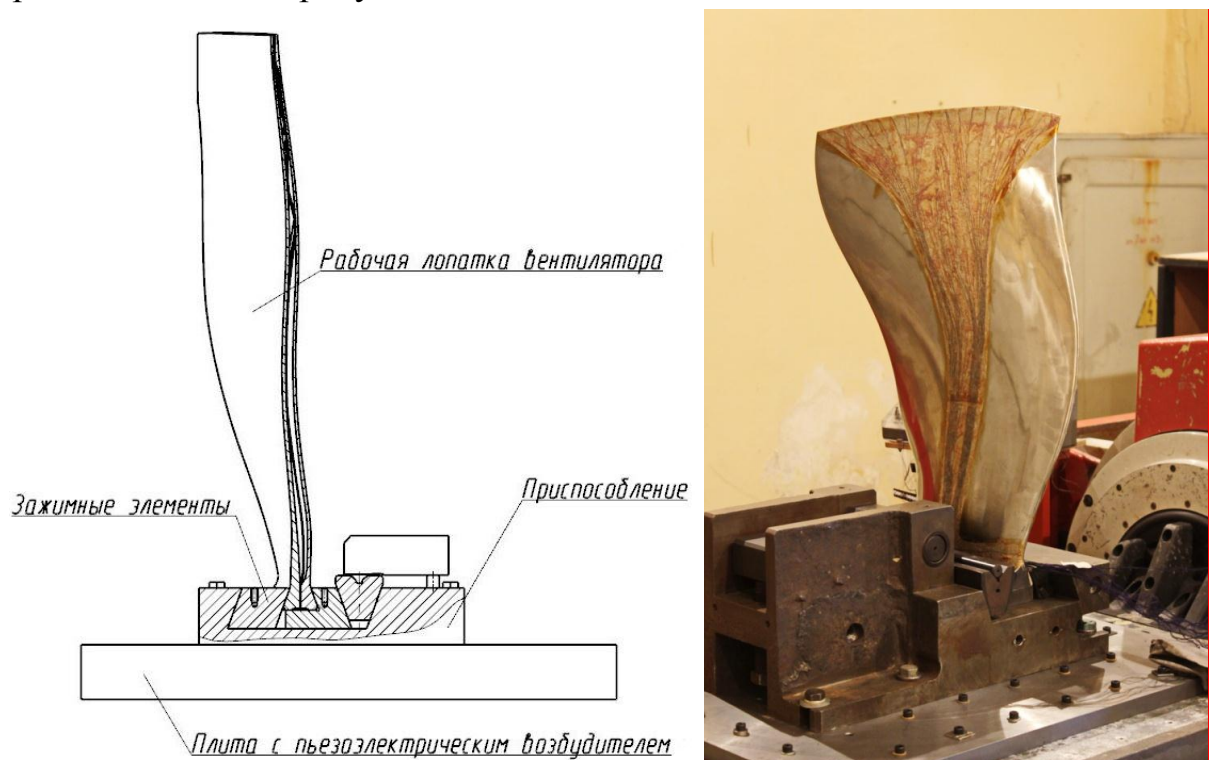


Рисунок 4 – ПШЛ, закрепленная в приспособлении и установленная на испытательный стенд

С помощью специальной установки, изобретенной на предприятии, проведены исследования резонансных колебаний 3-х случайно выбранных из опытной партии лопаток вентилятора.

Регистрация форм колебаний осуществлялась методом цифровой спекл-интерферометрии. Колеблющаяся на резонансной частоте лопатка освещалась когерентным лазерным излучением, ее спекл-изображение с помощью цифровой телекамеры вводилось в персональный компьютер и обрабатывалось. Результат обработки представляет собой изображение лопатки с указанием положения узловых линий в виде распределения спеклов (хаотично разбросанных ярких точек в узловых областях).

Результаты определения собственных частот и форм колебаний полый широкохордной лопатки вентилятора, полученные экспериментальным методом, представлены на рисунке 5.

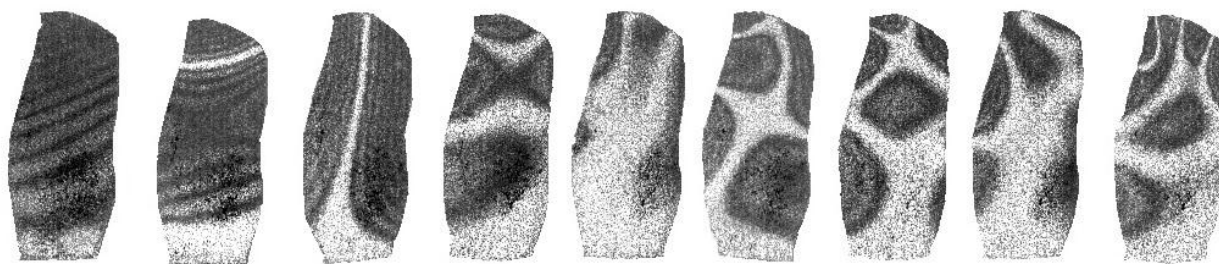


Рисунок 5 – Формы собственных колебаний, полученные методом цифровой спекл-интерферометрии

4 . Верификация расчетных методов

Максимальное расхождение расчетных и экспериментальных частот колебаний выявлено по 1 форме (11,9%). По остальным частотам колебаний расхождение результатов менее 5%.

Результаты расчетов по определению СЧФК РЛ и спекл-интерферометрия по определению СЧФК представлены на рисунке 6 и в таблице.

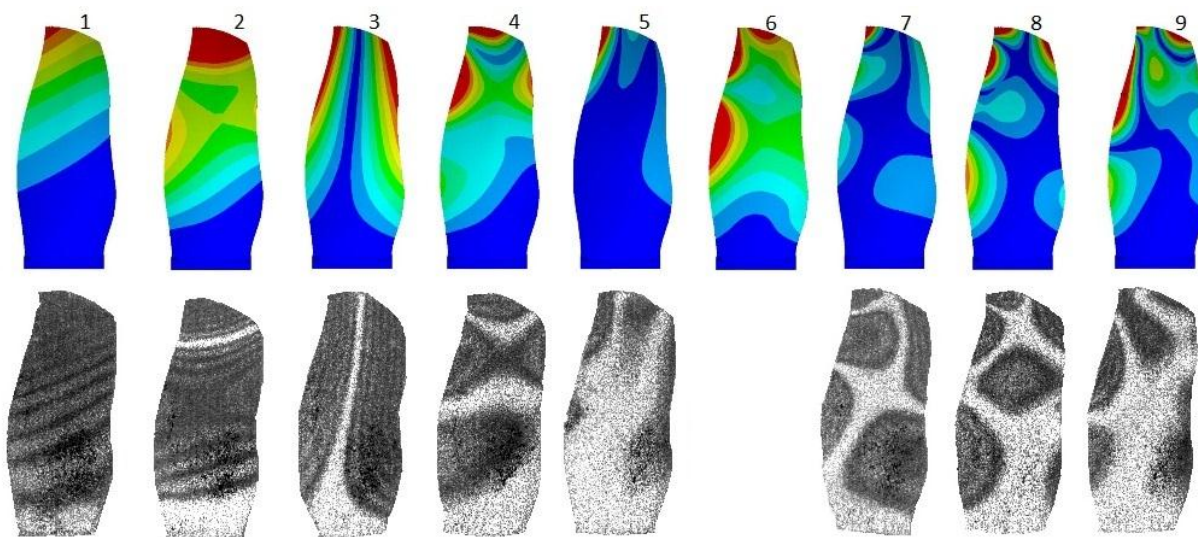


Рисунок 6 – Верификация расчетных методов

Таблица – Верификация расчетных методов

Форма колебаний	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\Delta, \%$	11,9	1,6	0,8	1,7	2,7	-	3,3	2,7	4,1	2,7

Расхождение расчетных и экспериментальных частот колебаний полой широкохордной лопатки вентилятора происходит из-за технологических отклонений изготовления лопатки, в том числе отклонения от КД в замке, которое приводит к дополнительным погрешностям при определении СЧФК ПШЛ.

Измерения на контрольной измерительной машине выявили отклонения изготовления полой широкохордной лопатки вентилятора от конструкторской документации. По профильной части полой широкохордной лопатки вентилятора отклонения составили не более 1,0 мм, по торцу полой широкохордной лопатки вентилятора – 1,6 мм, по хвостовику – 0,2 мм.

Формы и частоты собственных колебаний, полученные экспериментально, совпадают с расчетными.

5. Экспериментальное исследование (тензометрирование) динамических напряжений в полой широкохордной лопатки вентилятора и определение предела выносливости опытной партии

5.1 Технология проведения испытаний по исследованию относительных напряжений

Оценка относительной напряженности лопаток проводилась с использованием проволочных тензорезисторов.

Исследование распределения относительных напряжений проводилось на электродинамическом вибростенде, на котором закреплялось приспособление с лопаткой. Схема закрепления лопатки и лопатка, установленная на стенд, показаны на рисунке 4.

Нагружение лопаток осуществлялось с помощью автоматического регулятора механического нагружения. В качестве регистрирующей аппаратуры при исследовании относительной напряженности лопаток использовался измеритель вибраций и напряжений (ИВН).

Лопатка приводилась в состояние резонанса и сигналы с тензорезисторов подавались на два канала ИВН через коммутатор, который осуществлял попеременное подключение тензорезисторов. Поддержание режима вибронагружения осуществлялось по одному из тензорезисторов, принятому за контрольный. Показания контрольного и других тензорезисторов, а также знаки (фазы) напряжений определялись по табло ИВН.

5.2 Проведение усталостных испытаний. Результаты

Испытания лопаток проводились при комнатной температуре на электродинамическом вибростенде с горизонтальным вибростолом, на котором закреплялось приспособление с лопаткой.

Предел выносливости лопаток определялся при их колебаниях по основному тону.

Перед проведением испытаний лопатки препарировались тензорезисторами.

При задании уровня переменных напряжений принимался динамический модуль упругости для лопаток из материала ВТ6 при комнатной температуре. База испытаний $N_0 = 20 \cdot 10^6$ циклов.

За критерий разрушения принималось снижение резонансной частоты колебаний лопатки на 2% относительно исходного значения. Для визуального обнаружения трещин испытания продолжались до снижения резонансной частоты на $\sim 10\%$, наработанные при этом циклы не учитывались.

В соответствии с ОСТ 100870–77 проведена статистическая обработка результатов испытаний методом линейного регрессионного анализа с построением кривых усталости и оценкой разброса результатов испытаний. Линейный регрессионный анализ проводился по экспериментальным точкам разрушившихся лопаток.

6 . Выводы

В ходе проведенных работ спроектирована полая широкохордная рабочая лопатка вентилятора перспективного двигателя.

Конструкция лопатки обеспечивает требуемые по нормативной документации показатели статической прочности и не имеет резонансов на длительных режимах работы двигателя. По конструкторской документации, выпущенной на основе оптимального варианта лопатки, методом верхпластического деформирования и диффузионной сварки изготовлена опытная партия рабочих лопаток.

Проведено сравнение экспериментально определенных собственных частот и форм колебаний лопатки с данными, полученными на основе применяемых на предприятии методик математического моделирования.

Погрешность математического метода при определении частоты основного тона колебаний лопатки составила 11,9%, по остальным формам колебаний - не более 5%. Исследованы причины возникновения погрешности, разработаны мероприятия по их устранению.

На опытной партии лопаток исследовано распределение переменных напряжений и выполнен комплекс расчетно-экспериментальных работ по определению уровня предела выносливости.