

Вакулюк В.С., Анохин Д.В., Каранаева О.В., Ковалёва А.М.

**РАЗРАБОТКА ПОДХОДОВ К МОДЕЛИРОВАНИЮ И ЧИСЛЕННОМУ
ИССЛЕДОВАНИЮ ПРОЧНОСТИ ПОЛОЙ ШИРОКОХОРДНОЙ ЛОПАТКИ
ВЕНТИЛЯТОРА ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ**

Одним из основных недостатков сплошных (цельных) широкохордных рабочих лопаток, изготавливаемых из титановых сплавов по традиционным технологиям, является большая масса ротора (лопаток и диска) и, как следствие, увеличение массы статора (опоры вентилятора и бронезащиты корпуса вентилятора, необходимой для удержания разрушенной лопатки). Это ухудшает удельные параметры двигателя, увеличивает финансовые расходы на эксплуатацию двигателя. Большая масса сплошной широкохордной лопатки накладывает ограничения по прочности как самой лопатки, так и диска, что ограничивает ее область применения [1].

Одной из наиболее приоритетных технологий на пути к производству перспективных двигателей является освоение производства облегчённых конструкций широкохордных рабочих лопаток (РЛ) вентилятора [2]. В основе производства современных полых конструкций с наполнителем лежат технологии диффузионной сварки давлением (СД) и сверхпластической формовки (СПФ).

Наиболее перспективные мероприятия для снижения массы каждой лопатки в отдельности – это применение в конструкциях лопаток с облегчением за счёт организации внутренних полостей [3]. Внедрение таких мероприятий позволяет уменьшить массу широкохордной лопатки вентилятора на 30-40% и вместе с ней уменьшить массу статора и ротора в целом, решить проблему удержания разрушенной лопатки корпусом вентилятора. Вместе с тем, как показывает опыт, проектирование, изготовление, доводка и эксплуатация облегчённых широкохордных лопаток вентилятора требует привлечения принципиально новых конструкторских и технологических подходов для обеспечения их прочности и надёжности в сочетании с приемлемой стоимостью изготовления и эксплуатации [4,5].

Конструкция полой рабочей лопатки вентилятора состоит из трёх листов образующих спинку 1, гофрированный наполнитель 2 и корытце 3 (рис. 1). Толщины листов выбираются в ходе итераций прочностных расчётов и изменяются по высоте лопатки. Применяется круговой замок типа «ласточкин хвост», что позволяет уменьшить диаметр диска и его массу, а также повысить жёсткость рабочей лопатки. Для

проектировочных расчётов рабочего колеса (РК) с полой РЛ используется предварительная модель диска на основе двухступичной конструкции. При окончательном формировании конструктивного облика РЛ последует окончательная оптимизация конструкции диска по прочностным характеристикам.

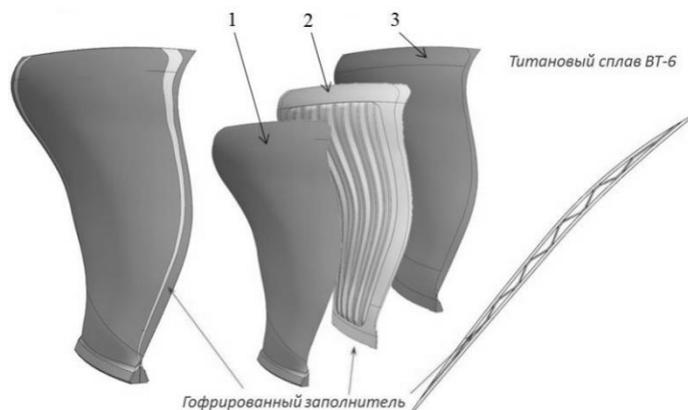


Рис. 1. Составные части полой лопатки вентилятора

Рёбра жёсткости гофрированного заполнителя придают тонким стенкам лопатки более высокую жёсткость и увеличивают стойкость лопатки при попадании в тракт двигателя посторонних предметов, в том числе птиц.

Форма рёбер, их расположение и количество выбиралось из условий обеспечения требуемых запасов прочности лопатки и технологичности её изготовления. Место расположения сварного шва выбирается на пересечении профилей спинки и осей минимальной жёсткости сечений лопатки. Это позволяет разгрузить сварной шов от нагрузок, возникающих при изгибе лопатки.

Сложность геометрии обусловлена наличием зон сверхпластического течения материала:

- «точная» геометрия в зонах СПФ неизвестна без моделирования технологического процесса или изучения образцов;
- возможно появление зон разнотолщинности гофр, вплоть до их разрыва при неоптимальном выборе геометрических параметров и параметров технологического процесса, а также прочих дефектов;
- зона СПФ ограничена в корневом сечении и периферии, следовательно, имеются зоны быстрого перехода гофрированной части листа в плоскую (рис. 2).

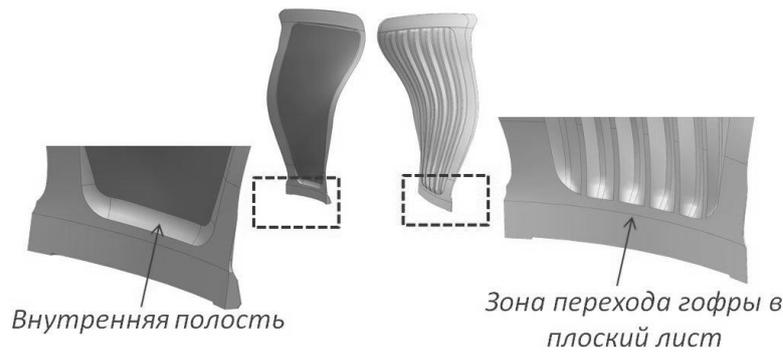


Рис. 2. Внутренняя полость и зона перехода гофрированного заполнителя в плоский лист

Расчёт на прочность и колебания рабочей лопатки вентилятора проводились с использованием расчётного комплекса ANSYS. Относительно традиционных цельных лопаток вентилятора, в данной конструкции увеличивается число параметров, влияющих на прочность:

- профильная часть лопатки: хорды, толщины, выносы сечений и т.д.;
- замковое соединение: габариты, радиус кривизны, угол рабочих поверхностей и т.д.;
- внутренняя полость: толщины стенок, границы полости и т.д.;
- гофрированный заполнитель: толщина листа, число рёбер и их углы.

Конечно-элементная (КЭ) сетка полностью состоит из HEXA-элементов Solid185, что позволяет в дальнейшем производить расчёт на попадание посторонних предметов. Используются три элемента по толщине каждого листа (спинки, корыта и заполнителя), что также является минимально необходимым для описания изгиба листов.

На рис. 3 показаны сечение профильной части лопатки (1), входная кромка (2) и участок гофрированного заполнителя (3).

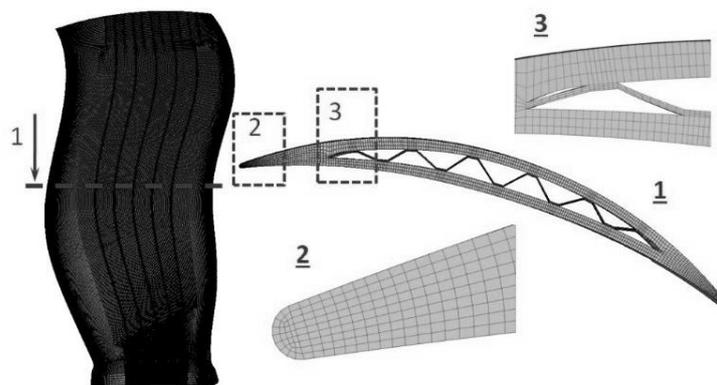


Рис. 3. Конечно-элементная модель

Рабочая лопатка вентилятора воспринимает воздействие от газодинамических и центробежных нагрузок. Температурное воздействие в данных расчётах не учитывалось.

Получаемые в результате поля напряжений указывают на наиболее нагруженные зоны конструкции. На рис. 4 приводятся распределения максимальных главных напряжений (S_1). На данном примере ярко выделяются зоны выходной кромки в корневом сечении и центральная часть спинки пера лопатки. Распределение напряжений по сечениям указывает на не вполне оптимальное распределение масс лопатки относительно плоскостей наименьшей жёсткости.

Однако, проведение нескольких итераций расчётов и изучение отклика поля напряжённо-деформируемого состояния (НДС) на изменение отдельных геометрических параметров позволяют говорить о возможностях дальнейшей успешной оптимизации НДС.



Рис. 4. Распределение напряжений

Полученная детализированная сетка также позволяет исследовать НДС внутреннего заполнителя и замкового соединения. Полученные уровни напряжений используются для расчёта коэффициентов запаса по кратковременной и длительной прочности, проводится оценка циклической долговечности лопатки. Кроме того, результатом статического расчёта являются перемещения точек лопатки. Исследование компонентов вектора перемещений точек периферийной части лопатки позволяет выполнять анализ радиальных зазоров вентилятора.

Анализ перемещений показывает существенное снижение жёсткости профильной части в сравнении с неполными вариантами, и поэтому разрабатываются два мероприятия:

- повышение жёсткости полый профильной части;
- распределение выносов сечений для достижения перемещений преимущественно в окружном направлении для исключения влияния на радиальные и осевые зазоры.

Расчёт выполняется для множества режимов работы изделия с применением преднагружения по результатам ранее проведённого статического расчёта. Получаемые частоты и формы колебаний позволяют производить построение резонансной диаграммы

и частотную отстройку лопатки от резонансов в рабочем диапазоне частот вращения ротора вентилятора. По факту выявляемых несоответствий варианта лопатки критериям прочности проводятся мероприятия по оптимизации конструкции. Основным инструментом по оптимизации НДС профильной части является введение осевого и окружного выносов поперечных сечений. Управление выносами позволяет достичь наиболее оптимального распределения масс и, соответственно, изгибающих моментов от центробежных сил относительно плоскостей наименьшей жёсткости сечений при условии действия переменных газовых сил и тем самым снизить изгибные напряжения в профильной части. На рис. 5 показаны результаты статических расчётов трёх вариантов лопатки с изменением радиальных распределений выносов сечений относительно радиальной оси (показаны на графиках). Видно, что даже незначительное изменение выносов сечений позволяет существенно снижать уровень напряжений.

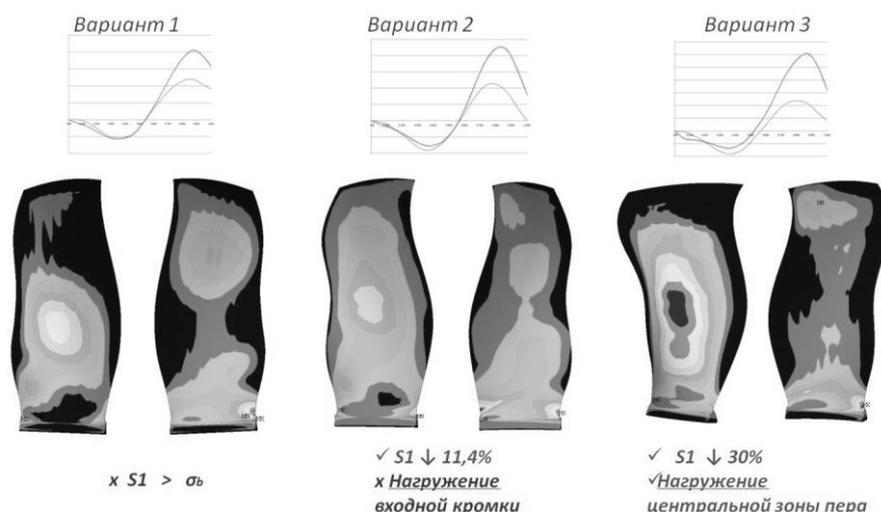


Рис. 5. Результаты статических расчётов трёх вариантов лопаток

Необходимо дальнейшее снижение напряжений до полного соответствия с требованиями норм прочности, повышение жёсткости профильной части (особенно периферийной) с целью стабилизации радиальных зазоров, повышение частоты основного тона колебаний лопатки, оптимизация конструкции диска, оптимизация замкового соединения, дальнейшее исследование влияния отдельных параметров на характеристики прочности изделия, изготовление опытного образца, определение предела выносливости.

Выводы

Применение полой лопатки вентилятора газотурбинного двигателя значительно снижает массу. Лопатка удовлетворяет нормам прочности. Снижение массы лопатки позволило существенно снизить массу рабочего колеса, массу ротора и статора.

Полученные результаты исследования позволяют поэтапно вводить новые виды расчётов для развития методик: расчётов лопаток в составе рабочего колеса (с диском), формализовать процессы построения моделей и прогнозирования выносливости лопаток.

Библиографический список

1. Иноземцев, А.А. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок, серия «Газотурбинные двигатели» [Текст] / А.А. Иноземцев, М.А. Нихамкин, В.Л. Сандрацкий // М.: Машиностроение, 2008 – 1204 с.

2. Каблов, Е.Н. Конструктивные и технологические решения для создания составных лопаток перспективных вентиляторов с применением прочных и жестких металлокомполитов [Текст] / Е.Н. Каблов, С.Е. Салибеков, Ю.А. Абузин и др. // М.: ЦИАМ, 2003. – С. 124-138.

3. Скибин, В.А. Работы ведущих авиадвигателестроительных компаний по созданию перспективных авиационных двигателей (аналитический обзор) [Текст] / В.А. Скибин, В.И. Солонин и др. – М.: ЦИАМ, 2004. – 422 с.

4. Каримбаев, Т.Д. Гибридные конструкции лопаток перспективных вентиляторов [Текст] / Т.Д. Каримбаев, А.А. Луппов // Материалы XXV Юбилейной международной конференции и выставки, май-июнь 2005 г. – С. 331-332.

5. Иностранные авиационные двигатели (по данным иностранной печати) [Текст] / М.: ЦИАМ, 2000. – Вып. XIII. – 534 с.

6. Биргер, И.А. Расчёт на прочность деталей машин: Справочник [Текст] / И.А. Биргер, Б.Ф. Шорр, Г.Б. Иосилевич. – М.: Машиностроение, 1993. – 640 с.