Конкурсная работа

Проектирование высокотемпературных охлаждаемых лопаток перспективного авиационного двигателя

1. Актуальность представленной работы.

Повышение рабочих характеристик перспективных двигателей приводит к росту напряжённости горячих деталей двигателя, увеличению температуры газа перед турбиной. Соответственно, ужесточаются требования, предъявляемые к вновь проектируемым деталям.

В связи с этим является актуальным создание новых подходов и конструктивных решений при проектировании охлаждаемых лопаток турбины. Решение данных вопросов позволит расширить возможности эксплуатации самолета и повысит боеготовность авиации воздушно-космических сил.

2. Аннотация работы.

Проектирование перспективных высокотемпературных охлаждаемых лопаток – задача, требующая комплексного подхода и решения связанных задач газодинамики, теплообмена, прочности. В связи с этим при проектировании лопаток были поставлены и решены следующие задачи:

- повышение эффективности охлаждения рабочих лопаток при сохранении высокого КПД (коэффициента полезного действия) двигателя за счёт применения малорасходной системы охлаждения лопатки турбины петлевой схемы;
- совершенствование петлевой схемы охлаждения за счёт поэтапного и поэлементного моделирования;
- разгрузка лопатки от центробежных сил за счёт выносов центров тяжести сечений лопатки с использованием метода конечных элементов;
- поэтапный прочностной расчёт лопатки с целью обеспечения запасов прочности и оценки ресурса лопатки;
- выявление возбуждающих гармоник, действующих на лопатку, и оценка степени отстройки от резонансов.

Проектировочные работы по охлаждающим лопаткам турбины состоят из теплофизической и прочностной составляющей.

2.1. Теплофизические работы.

Повышение эффективности охлаждения рабочих лопаток - одна из важнейших научно-технических проблем при создании и доводке ГТД. Реализация комплекса требований по экономичности, весовому совершенству и надёжности современных двигателей невыполнима без применения передовых высокоэффективных систем охлаждения.

Выбранная малорасходная система охлаждения лопатки турбины петлевой схемы хорошо зарекомендовала себя при проектировании и доводке двигателей 4 и 4+ поколений и обладает рядом преимуществ:

- высокой эффективностью охлаждения при малых расходах охлаждающего воздуха;
- сравнительно низким гидравлическим сопротивлением каналов охлаждения;
- низкой зависимостью расходных характеристик внутренних каналов от производственных отклонений;
- низкой неравномерностью температур стенок в поперечном сечении лопатки и гибкостью её регулирования;
- отсутствием дополнительных центробежных нагрузок на перо и замковое соединение лопатки;
- высокой технологичностью изготовления керамических стержней.

Вместе с тем, имеется значительный резерв для повышения эффективности охлаждения лопаток такой схемы, который был использован при проектировании охлаждаемой лопатки 2-й ступени турбины для перспективного двигателя. Особенностью проектирования явилось поэтапное и поэлементное совершенствование системы её охлаждения по сравнению с лопаткой-прототипом турбины двигателя 4 поколения.

Были значительно повышены величины безразмерной эффективности охлаждения во всех критичных зонах, определённых в рамках предварительного расчёта базовой конструкции, а также выявленных в процессе доводки и эксплуатации лопатки-прототипа. Основным инструментом модификации послужило расчётное исследование в сопряжённой постановке в программном комплексе Ansys CFX. Расчётная модель была верифицирована по результатам горячих продувок блока лопаток на пакетной установке, содержащей 5 лопаток.

На начальной стадии система охлаждения проектируемой лопатки практически полностью повторяла схему прототипа. По результатам «холодных» CFD-продувок было оптимизировано распределение охлаждающего воздуха по высоте лопатки. На следующем этапе выполнялись серии «горячих» CFD-продувок. По их результатам вновь было оптимизировано распределение охладителя по каналам лопатки для обеспечения необходимых расходов через выходные окна.

Наконец, по результатам сопряжённых расчётов были получены температуры стенок лопатки, что послужило отправной точкой для последнего этапа оптимизации. Например, для достижения приемлемой температуры входной кромки была подобрана такая конструкция элементов системы охлаждения, которая при минимальных технологических изменениях повысила местную эффективность охлаждения с 0,13 до 0,18, т.е. практически на 40%. Остальные элементы лопатки (выходная кромка, перо, бандажная полка) также были переработаны для повышения эффективности их охлаждения.

Итогом работы стало повышение средней эффективности охлаждения наружного профиля вновь спроектированной лопатки по сравнению с прототипом на 0,03 безразмерных единиц в среднем сечении и на 0,02 - во втулочном и периферийном сечениях при одинаковом относительном расходе воздуха (0,55 % от расхода через горло 2 РЛ). Достигнутая величина средней эффективности охлаждения наружной поверхности при заложенном в проекте расходе (0,74 % от расхода через горло 2 РЛ) составила 0,26 единиц в среднем сечении на взлётном режиме.

2.2 Прочностные расчёты.

Цели расчётов:

— обеспечение нормируемых запасов прочности;
— минимизация массы лопатки;
— расчётная оценка ресурса лопатки.

На базе исходной геометрии лопатки турбины среднего давления проведена серия расчётов на взлётном режиме с целью подбора оптимальных выносов центров тяжести сечений пера лопатки. Получены значения выносов, при которых во втулочном сечении достигается наибольший запас по местной прочности.

Далее проводилась местная корректировка геометрии лопатки с целью обеспечения запасов по местной прочности в критичных местах. Ввиду невозможности проведения параметрической оптимизации (по причине

сложной геометрии лопатки и неизвестного положения критичных мест до проведения расчёта) использовалась ручная оптимизация геометрии в ряде критичных мест после каждой итерации структурного расчёта.

Так, в ходе оптимизации бандажной полки сделаны следующие изменения:

- появились скосы под бандажной полкой, увеличены толщины гребешков для увеличения изгибной жёсткости полки;
- увеличен радиус перехода от бандажной полки к перу в подполочном сечении, выполнено местное утолщение бандажной полки за счёт уменьшения объёма «колодца»;
- уменьшена масса бандажной полки за счёт уменьшения площади контактных поверхностей.

Ещё одним критичным местом являлось отверстие перепуска воздуха через внутреннюю стенку лопатки, запас по местной прочности в котором изначально был меньше единицы. Потребовалась серия прочностных расчётов подмодели критичного места с разнообразными конфигурациями перепускного отверстия (эллипс, круг, прямоугольник со скруглёнными краями) различных типоразмеров. Также расчёты проводились с различными толщинами и конфигурациями стенки, через которое проходит отверстие. Наибольший запас по местной прочности получен при геометрии стенки и отверстия, показанной на рисунке 1. При этом использовано местное плавное утолщение стенки в районе отверстия до 2,1 мм (рисунок 2).

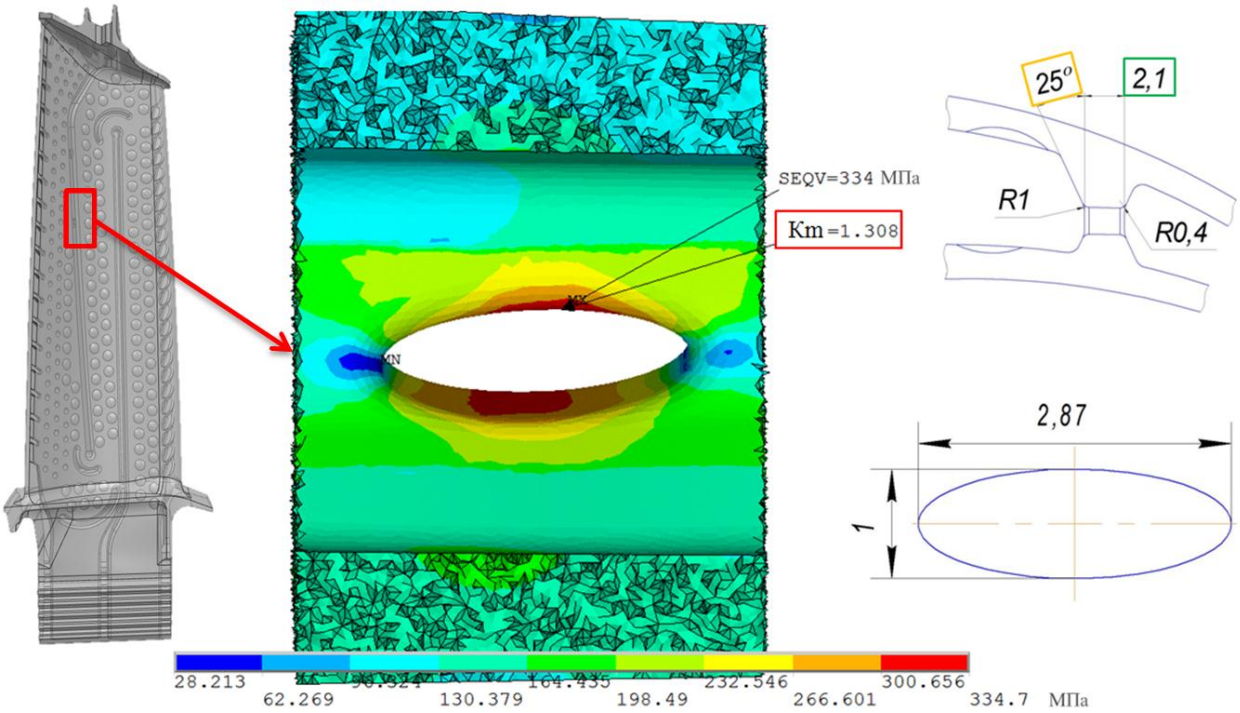

Рисунок 1 – Геометрия стенки и отверстия с удовлетворительным запасом по местной прочности

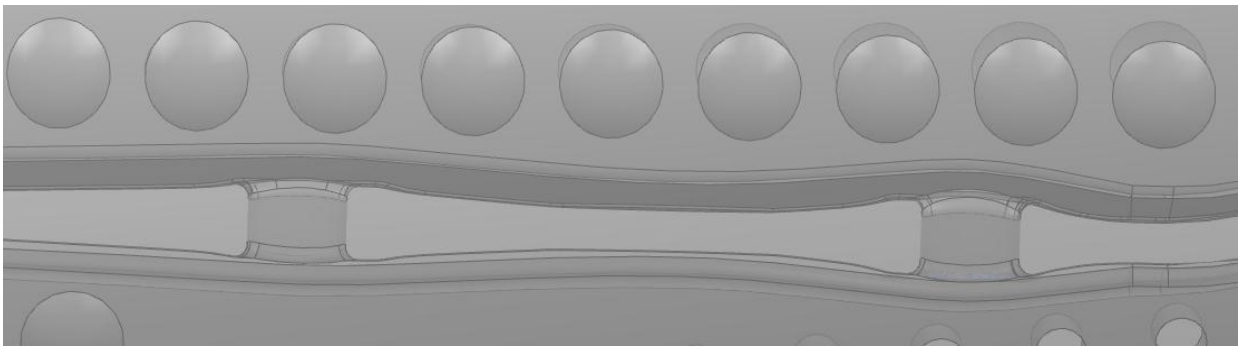

Рисунок 2 – Итоговая конфигурация стенки и отверстий перепуска воздуха

Проведены расчёты запасов длительной прочности (по напряжениям, времени и температуре) рабочей лопатки с материалом под первый вылет и со штатным материалом с учётом работы на различных режимах. Обеспечены запасы по местной прочности, долговечности, по циклической долговечности (по числу циклов), по температуре профильной части лопатки.

Результатом проведенных работ является спроектированная рабочая лопатка турбины среднего давления перспективного двигателя. Значительно повышена средняя эффективность охлаждения наружного профиля лопатки по сравнению с прототипом. Проведённые прочностные расчёты позволили установить ресурс лопатке, соответствующий межремонтному ресурсу двигателя. Выпущена конструкторская документация на лопатку.