

УДК 621.43

КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЕ ПОВЫШЕНИЕ ПРОЧНОСТНОЙ НАДЕЖНОСТИ И РЕСУРСА ДИСКОВ АВИАЦИОННЫХ ГТД

© 2011 Ю. А. Ножницкий, К. Д. Каримбаев, С. Д. Потапов

Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова (ЦИАМ), г. Москва

Сертификационные требования для дисков АГТД. Конструктивные и технические решения для обеспечения высокой прочностной надежности и ресурса. Методы подтверждения соответствия сертификационным требованиям дисков.

Диск, сертификация, ресурс, надёжность.

Диски относятся к числу основных (критических по последствиям разрушения) деталей авиационных маршевых ГТД. Кроме того, масса дисков во многом определяет массу и удельный вес двигателя в целом. В связи с этим при разработке, сертификации, производстве и эксплуатации двигателей оптимальному проектированию и обеспечению прочностной надёжности этих деталей уделяется особое внимание.

Ниже рассматриваются сертификационные требования к дискам; конструктивно-технологические решения, обеспечивающие повышение прочностной надёжности, ресурса и снижение массы дисков; методы подтверждения соответствия дисков сертификационным требованиям.

Так как диски маршевых двигателей относятся к основным деталям двигателя, то разрушение диска в процессе эксплуатации должно быть практически невероятным событием.

В последние годы сертификационные требования к дискам были конкретизированы и в значительной степени ужесточены. Изданы, в частности, циркуляры FAA по технологии изготовления заготовок основных деталей из деформируемых титановых и никелевых сплавов, по подтверждению ресурса титановых дисков с учетом металлургических дефектов и дисков из различных сплавов с учётом возможных при изготовлении отверстий технологических дефектов. Издана поправка 33-26 к FAR33, включающая изменение требований к прочности роторов турбин, компрессоров, вентиляторов и турбоагрегатов, введено требование к разработке и реализации инженерно-

технического плана обеспечения прочностной надёжности основных деталей на всех стадиях их жизненного цикла.

Соответствующие нормативные технические документы для стран СНГ находятся сейчас в стадии подготовки. FAA издал циркуляр (АС 33, 70-1), содержащий методические материалы для реализации требований к основным деталям двигателя, ресурс которых устанавливается в циклах.

Для обеспечения низкой массы при изготовлении дисков используются высокопрочные титановые сплавы, стали и никелевые сплавы (гранулируемые и деформируемые). Большое значение имеет организация квалификации дисковых сплавов. Результаты исследований конструкционной прочности образцов, вырезанных из заготовок дисков, должны служить, как для подтверждения прочности и ресурса деталей в процессе сертификации двигателя, так и для формирования технических условий на поставку заготовок, исключая возможность изготовления дисков из материала с неудовлетворительными свойствами. Для оценки прочностной надёжности дисков обычно (за исключением характеристик трещиностойкости) используются свойства материала на уровне $\bar{A} - 3\sigma_A$, где \bar{A} – среднее значение характеристики, а σ_A – среднее квадратичное отклонение. В процессе производства отбраковку целесообразно осуществлять, базирясь на уровне прочностных характеристик материала $\bar{A} - k\sigma_A$ ($k \leq 3$).

Для обеспечения прочностной надёжности дисков при минимизации их массы могут эффективно использоваться методы оптимизации, основанные на многокритери-

альных подходах с расчетами в трёхмерной постановке и учётом реальных условий эксплуатации во время всего полётного цикла, включая определение напряженно-деформированного состояния деталей на нестационарных режимах.

Для снижения контурной нагрузки на диск целесообразно использовать лёгкие лопатки (особенно для вентиляторов, где нашли применение полые металлические и углепластиковые лопатки, и турбин низкого давления, где используются лопатки из лёгких монокристаллических сплавов и γ -алюминиды титана) и оптимизировать их количество. В рабочих колёсах вентиляторов трактовые полки целесообразно изготавливать отдельно от лопаток и использовать для изготовления трактовых полок лёгкие материалы.

В дисках турбин и последних ступеней КВД целесообразно для снижения уровня температурных напряжений снижать градиент температуры по радиусу диска.

Диски должны обладать достаточной несущей способностью как при нормальной работе, так и при возникновении дефектов. Наиболее сложной задачей является обеспечение несущей способности дисков турбин среднего и высокого давления, силовых (свободных) турбин. Большое значение имеет рациональный выбор подхода к предотвращению недопустимой раскрутки ротора турбины (ограничению максимально возможной частоты вращения ротора) при разрушении, смещении, рассоединении валов. Для этих целей могут использоваться ранжирование запасов прочности в системе "диск - лопатки" (обеспечение при раскрутке ротора разрушения лопаток в корневом се-

чении при исключении разрушения диска), посадке ротора турбины при его осевом смещении после разрушения вала на статор по периферийным сечениям лопаток (отсечения массового разрушения лопаток за счет соответствующего выбора осевых зазоров между ротором и статором), срезка профильных частей лопаток специальными устройствами, механические или электронные системы для отсечки подачи топлива или вызова помпажа компрессора при разрушении вала. Разрушение вала, отказ САУ и ряд других дефектов могут в эксплуатации приводить к увеличению частоты вращения ротора. При сертификации необходимо подтвердить достаточную несущую способность диска при наиболее неблагоприятном сочетании свойств материала. При этом на несущую способность диска оказывает влияние как прочностные характеристики материала диска, так и характеристики пластичности этого материала. При наличии соответствующих экспериментальных данных для оценки несущей способности диска могут использоваться эмпирические коэффициенты. В современных условиях эта задача может быть решена при использовании современных методов расчета несущей способности дисков.

В ЦИАМ [1] проведена экспериментальная верификация различных критериев достижения потери несущей способности дисков сложной формы. На рис.1 показаны меридиональное сечение диска, разрушенный на разгонном стенде диск и поле напряжений при заданной частоте вращения, с указанной точкой действия максимальных напряжений.



Рис.1. Меридиональное сечение, разрушенный диск и поле напряжений

На рис.2 приведено сравнение численных результатов прогнозирования частоты разрушения исследованного диска по деформационному и энергетическому критериям с результатом эксперимента.

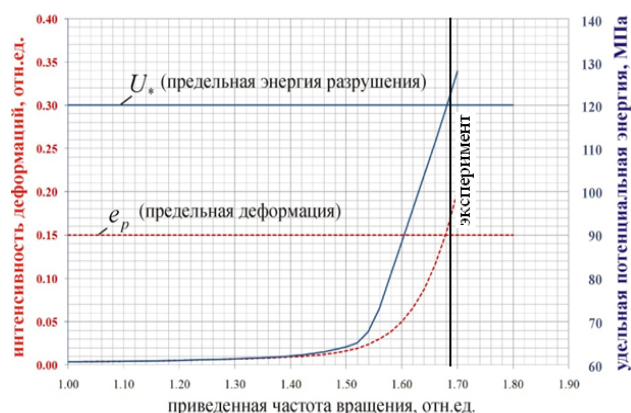


Рис.2. Верификация деформационного и энергетического критериев потери несущей способности диска

При исследованиях несущей способности роторов необходимо учитывать взаимную поддержку всех дисков, составляющих сварной ротор. Живучесть сварного ротора превышает живучесть отдельных его составляющих. Например, известен ротор КВД, у которого на диске 5-ой ступени в течение сотен полётных циклов развивалась радиальная трещина из ступичной части диска до обода. В ободной части скорость роста трещины резко замедлилась. Для отдельного диска, указанная трещина катастрофична. В составе ротора рассмотренный диск удерживал лопатки на необходимом радиусе в течение десятков полётных циклов.

На рис.3,а представлено поле напряжений на взлётном режиме рассматриваемого ротора, полученное в осесимметричной постановке.

На рис.3,б приведена 3D расчётная модель сектора части ротора из 3-х дисков (4,5 и 6 ступени) с радиальной, сквозной трещиной в диске 5-ой ступени. Эта модель использовалась для определения несущей способности ротора с заданной трещиной.

В табл. 1 приведены результаты расчетов запасов прочности по меридиональному сечению $K_{В1}$ и по радиальным сечениям $K_{В2}$ диска, рассчитанные по теории предельных напряжений [2] во всём роторе с учётом сквозных радиальных трещин в различных дисках.

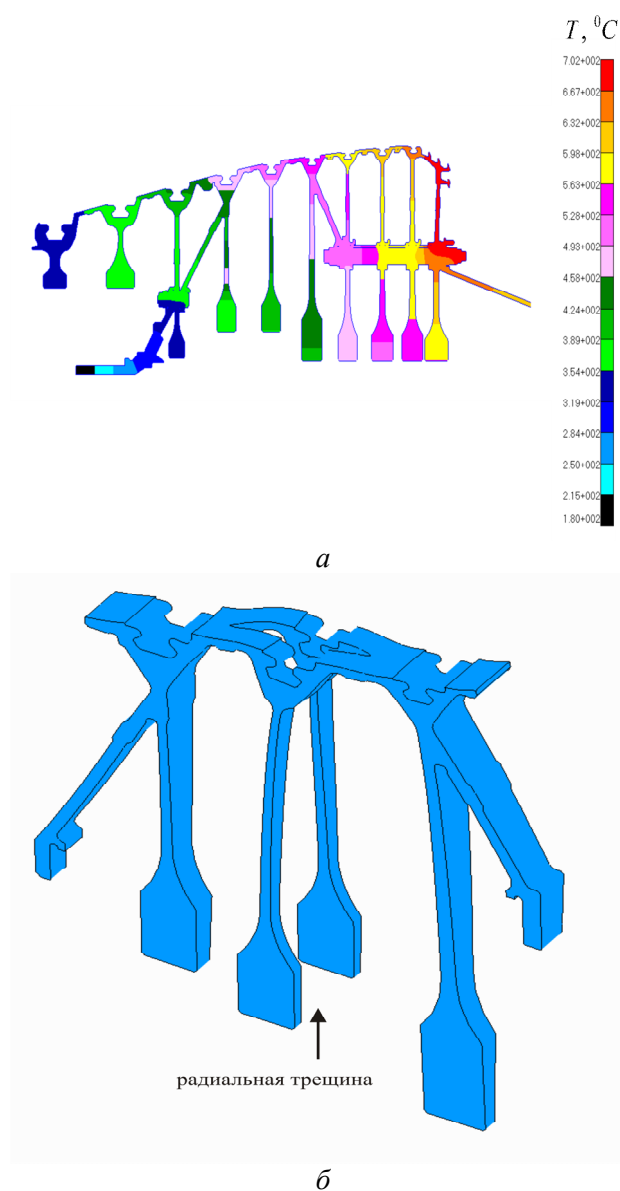


Рис.3. Моделирование сектора части ротора из 3-х дисков с радиальной, сквозной трещиной в среднем диске

Таблица 1. Запасы прочности ротора КВД со сквозными трещинами в дисках

№№ ступеней, имеющих диски со сквозной трещиной	6	5	4	5,6	4,6	4,5
$K_{В1}$ по кратковременной прочности	1,25	1,36	1,31	0,94	0,85	1,02
$K_{В2}$ по кратковременной прочности (минимальное значение достигается на радиусе 150 мм)	1,27	1,36	1,286	---	---	---
$K_{В1}$ по длительной прочности	1,2	1,3	1,24	0,914	0,817	0,96

Проведённые исследования на базе разработанной методики, основанной на энергетическом критерии, хорошо согласуются с реальными результатами по потере несущей способности рассмотренных роторов.

Для предотвращения недопустимой вытяжки диска или охрупчивания его материала в процессе эксплуатации необходимо с одной стороны оптимизировать тепловое и напряженно-деформированное состояние диска, с другой – использовать для его изготовления сплав с соответствующими характеристиками - не подверженный охрупчиванию в условиях эксплуатации. Применяют также автофретирование. Конструктивно должен быть обеспечен допустимый (с учётом высокой статической нагруженности) уровень вибрационных напряжений в диске.

Для эксплуатации должно разрешаться меньшее из определённых с соответствующими запасами значений ресурса диска – до появления трещины малоциклового усталости (без учёта начальных дефектов) и с учётом безопасного развития трещин от начальных дефектов.

Ресурс диска (ротора) до появления трещины малоциклового усталости подтверждается либо эквивалентно-циклическими испытаниями (в составе двигателя или на разгонном стенде), либо на основании использования 3-D расчётов диска на нестационарных режимах работы и данных по сопротивлению материала малоциклового усталости. При этом важно учитывать возможное влияние на сопротивление малоциклового усталости выдержки под нагрузкой. Необходимо также верификация методики подтверждения ресурса на основании данных по сопротивлению материала малоциклового усталости (прежде всего методики выбора необходимого запаса по циклической долговечности).

Для обеспечения высокой долговечности диска до появления трещины малоциклового усталости необходимо не использовать в конструкции интенсивные концентраторы напряжений. В частности, необходимо не использовать в диске отверстия (для болтовых соединений, выравнивания давления в полостях, подвода охлаждающего воздуха к лопаткам турбины), ограничивать мини-

мальные значения радиусов галтелей, не применять многозубые ёлочные замки. Увеличению циклической долговечности способствует, в частности, применение в вентиляторах круговых (непрямолинейных) замков (рис.3), использование в вентиляторах малозубых ёлочных замков (рис.4), применение блисков, оптимальный выбор количества внецентренных отверстий, оптимизация формы этих отверстий и т.д. Снижение концентрации напряжений является эффективным средством повышения долговечности серийных дисков. В частности, нашли применение срезка шлиц в зоне действия высоких номинальных нагрузений, перепротягивание замковых пазов с удалением поврежденного слоя материала и/или увеличением радиуса сопряжения дна и болтовой поверхности паза и т.д. При необходимости использования концентраторов напряжений их необходимо располагать в зонах с низкими номинальными напряжениями. Необходимо применять материалы с высоким сопротивлением малоциклового усталости. В перспективе возможно использование градиентных материалов. Широко используются методы поверхностного упрочнения, применяется автофретирование.

На рис. 4-7 приведены некоторые эффективные решения конструкционных задач, которые в ряде случаев позволили решить оптимизационные задачи по выбору конструкций минимального веса, удовлетворяющих всем требуемым прочностным критериям по несущей способности, малоциклового долговечности и трещиностойкости.

На рис. 4 показано, как за счёт введения криволинейности оси удалось решить вопрос о размещении необходимого количества лопаток (замковых соединений) на диске ограниченного (заданного) радиуса. На левой части показано, какую часть окружности занимает один прямолинейный замок - h_1 , и какая часть достаточна - h_2 при использовании криволинейного соединения для одной и той же лопатки с корневым сечением, окрашенным зелёным цветом. В рассмотренном случае $h_1=1.8h_2$. На правой части представлена трёхмерная модель спроектированного криволинейного замкового соединения типа "ласточкин хвост".

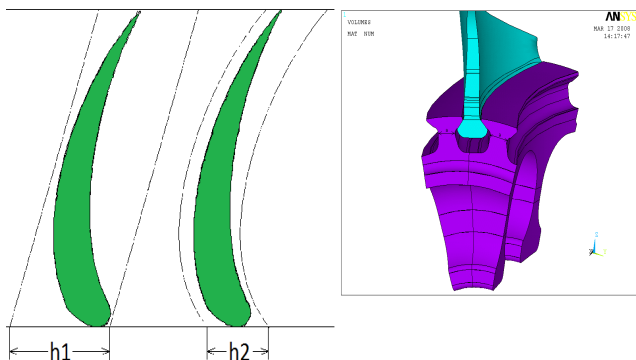


Рис. 4. Использование криволинейного замкового соединения на вентиляторной ступени

В другом случае, для обеспечения прочности замкового соединения типа «ласточкин хвост» необходимо было увеличивать осевой размер всего колеса. Применение замкового соединения типа «двузубая ёлочка» позволило обеспечить все выдвигаемые требования при заданных из аэродинамических соображений осевых размерах проектируемой ступени.

На рис. 5 приведён график необходимой длины осевого размера оптимального по массе замкового соединения в зависимости от числа пар зубьев замкового соединения, при одинаковых условиях по требуемым запасам прочности и одинаковым условиям нагружения по температуре и по контурным нагрузкам. Красной линией отмечена величина осевого размера корневого сечения лопатки оптимальная с точки зрения к.п.д. рассматриваемой вентиляторной ступени. Видно, что при увеличении числа пар зубьев, необходимая длина осевого размера уменьшается. В скобках заметим, что это уменьшение происходит за счёт привлечения более глубоких слоёв материала диска - глубина (размер по радиусу диска) необходимого замкового соединения с увеличением числа пар зубьев возрастает.

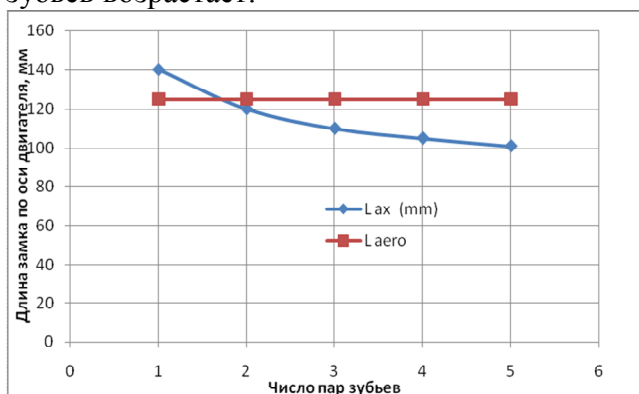


Рис. 5. Рациональный выбор количества пар зубьев

На рис. 6 приведено сравнение дисков вентиляторной ступени обычной конструкции (рис. 6,а) и диска, у которого рационально выбраны количество и расположение полотен.

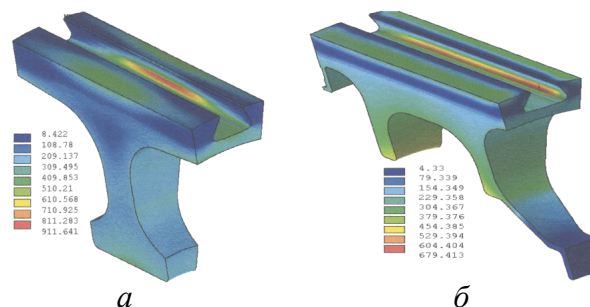


Рис. 6. Диски вентиляторной ступени обычной конструкции (а) и с рациональным выбором количества и расположения полотен (б)

В диске на рис. 6, б максимальные напряжения σ_{max} снижены на 25%, а масса - на 14% по сравнению с первоначальным проектом.

На рис. 7 представлен пример увеличения радиусов в торцевом шлицевом соединении, с 0.6 мм до 0.8 мм, что снизило коэффициент концентрации в галтели с 2.1 до 1.5 и позволило обеспечить работоспособность в течении требуемого Техническим Задаанием ресурса.

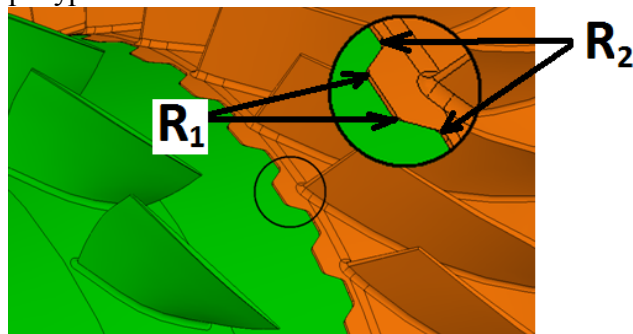


Рис. 7. Шлицевые соединения

Для обеспечения высокой долговечности дисков с учётом возможных начальных дефектов необходимо минимизировать размеры и количество металлургических дефектов. Это обеспечивается, прежде всего, за счёт повышения чистоты сплава при выплавке слитка. При применении методов порошковой металлургии технологически должно быть исключено появление дефектов (карбидов, оксидов) по границам первичных зёрен. Для уменьшения количества и размеров керамических включений необходимо

реализовать комплекс специальных мероприятий, в том числе ограничить максимальный размер применяемых гранул. Не рекомендуется применять для изготовления роторов сварку, за исключением сварки трением (инерционной или линейной), и, тем более, литьё (даже при применении для снижения внутренней пористости ГИП-обработки). Необходимо применение высокочувствительных методов неразрушающего контроля (НК) с вероятностной оценкой выявляемости дефектов применяемыми методами НК. Для дисков должны использоваться сплавы, обладающие высокой трещиностойкостью.

Высокой долговечностью при развитии трещины и живучестью обладают диски с несколькими полотнами, сварные ротора (см. пример, представленный на рис.3) , составные конструкции, конструкции со специальными стопперами трещин.

В процессе эксплуатации должна учитываться накопленная повреждаемость и определяться остаточная долговечность дисков. Большое значение имеет регламентация технического обслуживания, прежде всего НК дисков при ремонте двигателя.

Библиографический список

1. Каримбаев, К.Д. Численное моделирование разгонных испытаний дисков турбомашин [Текст] / К.Д. Каримбаев, А.Н. Серветник // Вестник двигателестроения. Научно-техн. журнал. - 2008. - №3. - С.130-134.

2. Биргер, И.А. Расчёт на прочность деталей машин [Текст]: справочник, 4-е изд. / И.А. Биргер, Б.Ф. Шорр, Г.Б. Иосилевич. - М.: Машиностроение, - 1993. - 640с.

DESIGN AND TECHNOLOGICAL SOLUTIONS FOR PROVISION OF HIGH RELIABILITY AND LIFE TIME OF AVIATION GAS TURBINE ENGINE DISKS

© 2011 Yu. A. Nozhnitskiy, K. D. Karimbaev, S. D. Potapov

Central Institute of Aviation Motors named after P.I. Baranov (CIAM), Moscow

Certification requirements for aviation gas turbine disks; design and technological solutions for provision of disks high reliability and life time; methods of disks confirmation compliance to requirements are considered.

Disk, certification, life time, reliability.

Информация об авторах

Ножницкий Юрий Александрович, доктор технических наук, заместитель Генерального директора центрального института авиационного моторостроения имени П.И. Баранова. Тел.: (495) - 362-39-32. E-mail: nozhnitsky@ciam.ru. Область научных интересов: безопасность, прочность и ресурс газотурбинных двигателей.

Каримбаев Камалиддин Джамолдинович, кандидат технических наук, начальник сектора дисков отделения прочности, Центрального института авиационного моторостроения имени П.И. Баранова. Тел.: (495) - 362 -49 -71. E-mail: kem@ciam.ru. Область научных интересов: прочность и ресурс газотурбинных двигателей.

Потапов Сергей Давидович, кандидат технических наук, начальник сектора ресурсов отделения прочности Центрального института авиационного моторостроения имени П.И. Баранова. Телефон (499) - 763 - 55 -68. E-mail: potapov_sd@ciam.ru. Область научных интересов: прочность и ресурс газотурбинных двигателей.

Nozhnitskiy Yury Alexandrovich, Doctor of Technical Sciences, professor, deputy director general of Central Institute of Aviation Motors named after P.I. Baranov. E-mail: nozhnitskiy@ciam.ru. Area of research: safe, integrity and life of gas turbine engines.

Karimbaev Kamalitdin Djamoldinovich, Candidate of Technical Sciences, head of sector, Central Institute of Aviation Motors named after P.I. Baranov. Phone: (495) - 362 -49 -71. E-mail: kem@ciam.ru. Area of research: integrity and life of gas turbine engines.

Potapov Sergey Davidovich, Candidate of Technical Sciences, head of sector, Central Institute of Aviation Motors named after P.I. Baranov. Phone: (499) - 763 - 55 -68. E-mail: potapov_sd@ciam.ru. Area of research: integrity and life of gas turbine engines.