

ругость лопаток турбомашин. Вып.4. М.: ЦИАМ, 1987. С.195-206.

7. Сачин В.М. Прогресс в раннем диагностировании флаттера рабочих колес компрессоров авиадвигателей // Современные методы обеспечения прочностной надежности деталей авиационных двигателей. Под ред. Б.Ф. Ножницкого, Б.Ф. Шорра, И.Н.

Долгополова. М.: Торус-Пресс, 2010. С. 215-223.

8. Туманов Н.В. Стадийность кинетики усталостных трещин и механизм периодического расслаивания-разрыва // Деформация и разрушение материалов: Труды Первой международной конференции. В 2-х томах. Т.1. М.: ИМЕТ РАН, 2006. С. 85-87.

УДК 621.43

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

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

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

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

Nozhnitskiy Yu.A., Karimbaev K.D., Potapov S.D. Certification requirements for aviation gas turbine disks; design and technological solutions for provision of disks high reliability and life time; methods of confirmation of disks compliance to requirements are considered.

Диски относятся к числу 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 создании, сертификации, производстве и эксплуатации двигателей оптимальному проектированию и обеспечению прочностной надежности этих деталей уделяется особое внимание.

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

Так как диски маршевых двигателей относятся к основным (критическим по последствиям разрушения) деталям двигателя, то разрушение дисков 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 (критических по последствиям разрушения) деталей из деформируемых титановых и никелевых сплавов, по подтверждению ресурса титановых дисков с учетом металлургических дефектов и дисков из различных сплавов с учетом 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 надежности основных деталей на всех стадиях их жизненного цикла.

Для обеспечения низкой массы для изготовления 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 основой для формирования тех.условий на поставку заготовок, исключая возможность изготовления дисков из материала с пониженными свойствами. Для оценки прочностной надежности дисков обычно 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, базируясь на уровне прочностных характеристик материала $\bar{A}-2\sigma_A$.

Для обеспечения прочностной надежности дисков при минимизации их массы могут эффективно использоваться методы оптимизации. Для снижения контурной нагрузки на диск целесообразно использовать легкие лопатки (особенно для вентиляторов, где нашли применение полые металлические и углепластиковые лопатки, и ТНД, где используются лопатки из легких монокристаллических сплавов и γ -алюминид титана), оптимизировать количество лопаток. В рабочих колесах вентиляторов тракторные полки целесообразно изготавливать отдельно от лопаток и использовать для изготовления тракторных полок легкие материалы. В дисках турбин и последних ступеней КВД целесообразно 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 (ограничение максимально возможной частоты вращения ротора) при разрушении, смещении, рассоединении валов. При сертификации необходимо подтвердить достаточную несущую способность диска при наиболее неблагоприятном сочетании свойств материала. Эта задача может быть решена при использовании современ-

ных методов расчета несущей способности диска.

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

Для эксплуатации должно разрешаться меньшее из определенных с соответствующими запасами значений ресурса диска – до появления трещины малоциклового усталости (без учета начальных дефектов) и с учетом 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 расчетов 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. Необходима 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, – по возможности исключать отверстия в диске (для болтовых соединений, выравнивания давления в полостях, подвода охлаждающего воздуха к лопаткам турбины), ограничивать минимальные значения радиусов галтелей, не применять многозубые елочные замки. Увеличению циклической долговечности способствует, в частности, применение в вентиляторах круговых (непрямолинейных) замков, использование в вентиляторах мало-

зубых елочных замков, применение блисков, увеличение количества внецентренных отверстий, оптимизация форм этих отверстий или формирование дополнительных прорезей и т.д. Снижение концентрации напряжений является эффективным средством повышения долговечности серийных дисков (срезка шлиц в зоне действия высоких номинальных нагрузений, перепротягивание замковых пазов и т.д.). При необходимости использования концентраторов напряжений их необходимо располагать в зонах с низкими номинальными напряжениями. Необходимо применять материалы с высоким сопротивлением малоцикловой усталости, в перспективе возможно использование градиентных материалов. Широко используются методы поверхностного упрочнения. Применяются автофретирование, методы предотвращения фреттинга дисков в зонах условно неподвижных соединений.

Для обеспечения высокой долговечности дисков с учетом возможных начальных дефектов необходимо, прежде всего, минимизировать размеры и количество металлургических дефектов. Это обеспечивается, прежде всего, за счет повышения чистоты сплава при выплавке слитка. При применении методов порошковой металлургии тех-

нологически должно быть исключено появление дефектов (карбидов, оксидов) по границам первичных зерен. 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, литье (даже при применении для снижения внутренней пористости ТИП-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, составные конструкции.

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.

УДК 37.013.75

МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ В ПРОЦЕССЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ ПОДГОТОВКИ

Тарабрина Т.Б.

Самарский государственный технический университет

THE INSPECTION METHODS OF SELF-DEPENDENT STUDENTS WORK DURING VOCATIONAL TRAINING

Tarabrina T.B. This article is dedicated to the inspection methods of self-dependend students work in academy. Organization and inspection are impulse forces for learning process and acquirement. The Theory of supposed patterns for organization forming and for inspection of self-dependent students' work is also set in this article.

В современном образовательном процессе нет проблемы более важной и, одновременно, более сложной, чем организация и

контроль самостоятельной работы студентов.

Важность этой проблемы связана с новой ролью самостоятельной работы: она