

## КРИТИКА И БИБЛИОГРАФИЯ

### Рецензия

на монографию “Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД”. В 2 х ч.: Ч. 1. “Лопатки компрессора и вентилятора” / В. А. Богуслаев, Ф. М. Муравченко, П. Д. Жеманюк, В. И. Колесников, В. К. Яценко, А. Я. Качан, Э. И. Цивирко, М. Р. Орлов, В. Е. Замковой, В. Ф. Мозговой, О. В. Рубель; Ч. 2. “Лопатки турбины” / В. А. Богуслаев, Ф. М. Муравченко, П. Д. Жеманюк, В. К. Яценко, А. Я. Качан, Э. И. Цивирко, С. Б. Беликов, М. Р. Орлов, В. Е. Замковой, В. Ф. Мозговой, О. В. Рубель. – Запорожье: Издательский комплекс ОАО “Мотор Сич”, 2003. – Ч. 1. – 396 с; Ч. 2. – 420 с.

Надежность и долговечность современных авиационных газотурбинных двигателей являются одной из актуальных проблем машиностроения. Повышение экономичности и конкурентоспособности двигателей достигается благодаря внедрению оригинальных конструкторских решений, использованию современных прогрессивных технологий изготовления и контроля качества деталей, применению новых композиционных материалов и материалов с направленной кристаллизацией, а также за счет роста параметров термодинамического цикла и т.д. Это приводит к экстремальности термомеханического состояния камер сгорания, лопаток, дисков, валов компрессора и турбины, что, в свою очередь, предъявляет высокие требования к достоверности информации о предельных допускаемых значениях механических характеристик материалов при циклическом и длительном статическом неизотермическом деформировании.

На основании многолетнего опыта проектирования и создания газотурбинных двигателей авторы выполнили комплексные исследования влияния технологий изготовления и обработки деталей двигателя на их долговечность и ресурс. Исследования имеют научное фундаментальное и прикладное техническое значение и занимают достойное место среди исследований прочности газотурбинных двигателей ГТД в Украине и за рубежом.

В первой части монографии приведены результаты экспериментального исследования усталости лопаток компрессоров и образцов в зависимости от технологических методов изготовления и обработки: вибро- или ручного полирования, ультразвукового или пневмодробеструйного упрочнения, глубины и степени упрочнения, наличия забоин, язв травления, неметаллических включений и т.п. Как известно, в ходе любой технологической операции в материале протекают различные физико-механические и физико-химические процессы, вследствие которых изменяются его структура и состав, происходят диффузия легирующих элементов, возникновение полей остаточных макро- и микронапряжений и т.д., что приводит к изменению механических характеристик. Для каждого технологического метода установлены диапазоны изменения параметров, при которых обеспечиваются

наиболее благоприятные сочетания механических, прочностных и жесткостных характеристик. Выполнен анализ изменения структуры и состава материала лопаток после их циклического деформирования. Определены поля остаточных напряжений и деформаций в лопатках и их влияние на характеристики усталости. Это позволило изучить механизмы поверхностного упрочнения и затем оптимизировать технологические процессы. Предложена феноменологическая модель упрочнения материала, связывающая механические характеристики материала (пределы выносливости, текучести и прочности, твердость, градиент напряжений) с технологическими параметрами (диаметр, масса и скорость шариков, объем камеры, время упрочнения) пневмодробеструйной обработки. Проанализировано влияние повреждения материала лопаток при эксплуатации ГТД на уменьшение предела выносливости материала и на увеличение разброса данных. Изучена эффективность покрытий систем TiN, TiN + CrN, VN и технологий обработки поверхностей на эрозионную стойкость лопаток при воздействии жидких и твердых частиц.

Во второй части монографии представлены результаты исследования влияния параметров технологий на долговечность и ресурс лопаток турбины из никелевых жаропрочных сплавов. Используя современные методы дефектации лопаток, авторы подробно изучили причины их разрушения. Основная причина разрушения – это термическая и термомеханическая усталость материалов, высокотемпературная коррозия, о чем свидетельствуют морфология изломов и фрактологические исследования. В большинстве случаев зона усталостного разрушения составляет ~60% сечения лопатки. Межзеренные трещины полуэллиптической формы со следами окислов на поверхностях зарождаются как на поверхности лопаток, так и на некоторой глубине, в выходных кромках, в зоне сопряжения поверхностей, в охлаждающих каналах, вблизи металлургических и технологических дефектов. Эти результаты важны и необходимы для понимания процессов неизотермического неоднородного упругопластического деформирования материала, а также для дальнейшего научного обоснования методов повышения долговечности.

Перспективы повышения долговечности, длительной прочности рабочих и сопловых лопаток турбины обусловлены применением жаропрочных сплавов с направленной и монокристаллической структурой, дополнительным их легированием, а также использованием многокомпонентных защитных и термобарьерных покрытий. Для исследуемых материалов получены качественные и количественные закономерности изменения упругих характеристик, характеристик кратковременной и длительной прочности, деформативности и ползучести, усталости и термоусталости при рабочих температурах в зависимости от кристаллографической ориентации, степени модифицирования разными элементами: В, Zr, Hf, В + Zr, Zr + Hf, Hf + Ta.

Показано, что механические характеристики монокристаллической структуры сплава больше, чем поликристаллической и направленной структуры. Это объясняется практически отсутствием границ зерен в образце. Например, предельная деформация ползучести образцов монокристаллической структуры в 4-5 раз больше, чем соответствующая деформация образцов поликристаллической структуры. Отмечается также существенная анизотропия

тропия характеристик. Так, скорость ползучести меньше, а время длительной прочности сплава ЖС6Ф в кристаллографическом направлении  $\langle 111 \rangle$  в несколько раз больше, чем в направлениях  $\langle 001 \rangle$  и  $\langle 011 \rangle$ . Представляет интерес тот факт, что характер анизотропии с повышением температуры испытаний изменяется как количественно, так и качественно. Наблюдается инверсия характеристик ползучести в направлениях  $\langle 001 \rangle$  и  $\langle 111 \rangle$ . Эффективность направленной макроструктуры отмечается также при наличии концентраторов напряжений во всем диапазоне эксплуатационных температур и напряжений. Установлены оптимальные значения составов модифицированного легирования. Так, модифицирование сплава ЖС6У-ВИ присадками 0,05%Zr + 0,5%Hf существенно влияет на его длительную прочность, увеличивая время до разрушения в восемь раз при температуре 760°C и напряжении 590 МПа.

Показательны результаты исследований характеристик усталости, термоусталости и трещиностойкости сплавов с направленной кристаллизацией. Для образцов с кристаллографическим направлением  $\langle 111 \rangle$  указанные характеристики имеют наибольшие значения. При этом отмечаются дву-трехкратное по сравнению с равноосной структурой повышение долговечности и роста предела выносливости, что является положительным эффектом. Однако для этого направления характерны также наиболее высокие скорости продвижения трещин. Наличие последних предъявляет, несмотря на некоторый рост порогового значения коэффициента интенсивности напряжений  $K_{th}$ , повышенные требования к живучести лопаток.

Значительное внимание уделено исследованию кинетики высокотемпературной коррозии сплавов и эффективности покрытий. Изучено влияние легирующих элементов на закономерности высокотемпературной коррозии, что позволило выбрать наиболее перспективные сплавы. Дана дифференциальная оценка типу, составу, технологии нанесения многокомпонентных покрытий на проточной и внутренней поверхностях охлаждаемых рабочих лопаток.

Научная и практическая значимость приведенных результатов исследований, основанных на анализе структуры, состава, механизмов деформирования, упрочнения и разупрочнения перспективных материалов турбостроения, заключается в систематизации экспериментальных, зачастую уникальных данных о степени влияния на механические свойства материалов технологического обеспечения изготовления лопаток компрессора и турбины ГТД, которые важны и полезны для механиков, материаловедов, технологов, решающих актуальные проблемы машиностроения.

Академик НАН Украины

*В. Т. Троценко*

Д-р техн. наук, проф.

*Б. С. Карпинос*