

# НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

УДК 539.4

*К 75-летию основания ГНЦ ФГУП “Центральный институт авиационного моторостроения им. П. И. Баранова”*

*К 100-летию со дня рождения основателя научного направления “Конструкционная прочность” академика АН Украины Сергея Владимировича Серенсена*

## **Многоцикловая усталость материалов и деталей газотурбинных двигателей**

**А. Н. Петухов**

ГНЦ ФГУП ЦИАМ им. П. И. Баранова, Москва, Россия

*Приведен исторический обзор развития научного направления “Конструкционная прочность” в ЦИАМ за последние 30 лет в связи со 100-летием со дня рождения основателя этого направления в СССР академика С. В. Серенсена и 75-летием основания ЦИАМ. Рассматриваются основные результаты, полученные коллективом сектора “Сопротивление усталости материалов ГТД” этого института.*

**Ключевые слова:** конструкционная прочность, сопротивление усталости, газотурбинные двигатели.

В 1941 г. в ЦИАМ в лаборатории “Динамика и прочность двигателей” (с конца 40-х гг. она стала называться “Динамика и прочность ГТД”) по инициативе академика АН УССР С. В. Серенсена был создан отдел “Конструкционная прочность”, который он возглавлял по октябрь 1967 г.

На базе этого отдела сформировалась основанная С. В. Серенсеном научная школа в области конструкционной прочности материалов и деталей авиационных двигателей, фундаментальные экспериментально-исследовательские работы которой получили широкое признание в нашей стране и за рубежом.

На первом этапе важными направлениями научных исследований руководимого им отдела являлись:

многоцикловая усталость (МнЦУ) конструкционных материалов для деталей ГТД, включая натурные детали, и элементов конструкций в широком диапазоне температур при различных асимметриях цикла с учетом конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов;

длительная прочность и ползучесть перспективных конструкционных материалов для заданных рабочих температур и долговечности;

циклическая долговечность при воздействии повышенных постоянных и циклически изменяющихся температур (термическая усталость).

После перехода С. В. Серенсена на постоянную работу в Институт машиноведения АН СССР отдел возглавил Б. Ф. Балашов.

В 1968 г. в отделе “Конструкционная прочность ГТД” были выделены три научных направления, организационно оформленные в сектора.

1. “Сопротивление усталости материалов и деталей ГТД”, руководитель Б. Ф. Балашов, с 1972 г. – А. Н. Петухов.

2. “Длительная прочность и ползучесть материалов”, руководитель Р. Н. Сизова, с 1996 г. – Н. П. Вильтер.

3. “Термопрочность”, руководитель Р. А. Дульнев, с 1987 г. – Н. Г. Бычков.

В 1974 г. на основании приказа министра авиационной промышленности в отделе создан сектор “Прогрессивные технологические процессы”, руководитель Р. И. Ткаченко.

В 1982 г. создается сектор “Технологические остаточные напряжения”, руководитель А. Н. Архипов.

В предлагаемой работе рассматриваются основные результаты, полученные коллективом сектора “Сопротивление усталости материалов и деталей ГТД” примерно за последние 30 лет.

**Основные направления исследований сопротивления многоцикло-вой усталости конструкционных материалов и деталей ГТД.** Заложенное академиком С. В. Серенсеном в области многоцикло-вой усталости научное направление предполагало:

экспериментальное получение кривых многоцикло-вой усталости на стандартных образцах в широком диапазоне температур для материалов, применяемых в ГТД;

исследование чувствительности материалов к концентрации напряжений, асимметрии цикла нагружения при различных видах напряженно-деформированного состояния (растяжение–сжатие, изгиб с вращением, кручение, изгиб с кручением, растяжение с изгибом);

исследования сопротивления многоцикло-вой усталости деталей ГТД или их моделей, в условиях максимально приближенных к эксплуатационным;

исследование влияния эксплуатационных факторов (коррозия, фреттинг и др. повреждения) на сопротивление многоцикло-вой усталости;

поиск и оценка, с точки зрения сопротивления многоцикло-вой усталости, оптимальных конструктивных и технологических решений для деталей ГТД;

разработку новых методов испытания на усталость.

Тесное содружество с ОКБ и заводами при решении практических задач, связанных с определением причин появления дефектов (разрушений) при доводке и эксплуатации, и активное участие в разработке мероприятий по их устранению существенно расширили исследовательские работы сектора “Сопротивление усталости материалов и деталей ГТД”. В результате появились фундаментальные исследования в области конструкционной прочности, обобщение экспериментальных данных о пределах выносливости конструкционных материалов и натуральных деталей, что позволило более достоверно прогнозировать несущую способность деталей, оценивать запасы прочности

деталей по переменным напряжениям, решать актуальные проблемы прочности и надежности отечественных ГТД на этапах проектирования, доводки и эксплуатации [1–14].

**Исследования характеристик сопротивления многоцикловой усталости конструкционных материалов, применяемых в ГТД.** Обнаружены основные особенности применяемых в ГТД конструкционных материалов: высокая чувствительность к концентрации напряжений, асимметрии цикла нагружения, технологической наследственности, определяемой свойствами поверхностного слоя (шероховатость, структурная неоднородность, остаточные напряжения и т.д.), состоянием общей структуры, текстуры, размерами зерен, а также высокая чувствительность к эксплуатационным факторам (деградация материала от силового и теплового воздействия окружающей среды и проявления отрицательной технологической наследственности) и т.д.

Для основных конструкционных материалов получены очень высокие значения коэффициентов чувствительности  $q_\sigma$ , близкие к единице. Это свидетельствует о том, что в области концентрации напряжений в деталях из титановых сплавов и сталей мартенситного класса практически реализуются теоретические значения коэффициентов концентрации напряжений  $\alpha_\sigma$ . Чувствительность к концентрации напряжений незначительно зависит от температуры испытаний, в условиях асимметричного цикла нагружения она снижается, для нержавеющей сталей – с повышением температуры отпуска.

Минимальной чувствительностью к концентрации напряжений при повышенных температурах ( $q_\sigma \approx 0,3 \dots 0,45$ ) обладают литейные сплавы и сплавы, полученные методом гранульной металлургии [1–4].

Особенность конструкционных материалов проявляется также в *повышенной чувствительности к технологической наследственности*, которая наиболее выражена при формировании свойств поверхностного слоя при обработке деталей ГТД. Известно, что формообразование деталей при механической обработке сопровождается пластической деформацией и тепловым воздействием на поверхностный слой. Пластическая деформация на глубине и на поверхности неоднородна, сопровождается структурными изменениями, вызванными как силовым, так и термическим воздействием на металл [4, 10, 11]. Поэтому большое внимание уделялось изучению влияния на сопротивление усталости конструкционных материалов различных параметров поверхностного слоя: физические (величина зерна, размеры фаз, блоков, плотность дислокаций, концентрация вакансий, накопленная энергия кристаллической решетки); химические (состав фаз, концентрация элементов в объеме сплава и в фазе и т.д.); деформационные (степень деформации и ее глубина, остаточные напряжения); геометрические (шероховатость поверхности). *Впервые были получены зависимости пределов выносливости от величины и знака остаточных напряжений (для титановых и никелевых сплавов при  $T_{исп} = (20 \dots 650)^\circ C$ ), вид которых совпадает с предельными диаграммами усталости.*

Исследования сопротивления коррозионной усталости стандартных образцов и лопаток из нержавеющей сталей мартенситного и аустенитного классов показали, что на коррозионную стойкость материала и вид коррозионного повреждения существенное влияние кроме окружающей среды и

степени легирования сталей оказывают их структурное состояние, степень пластической деформации поверхностного слоя, величина и знак остаточных напряжений и др. Время до возникновения коррозионных трещин зависит от температуры отпуска стали, ориентирования волокна и локальной структурной однородности (рис. 1). Наименее чувствительной к коррозии оказалась аустенитная сталь ЭП718 [4].

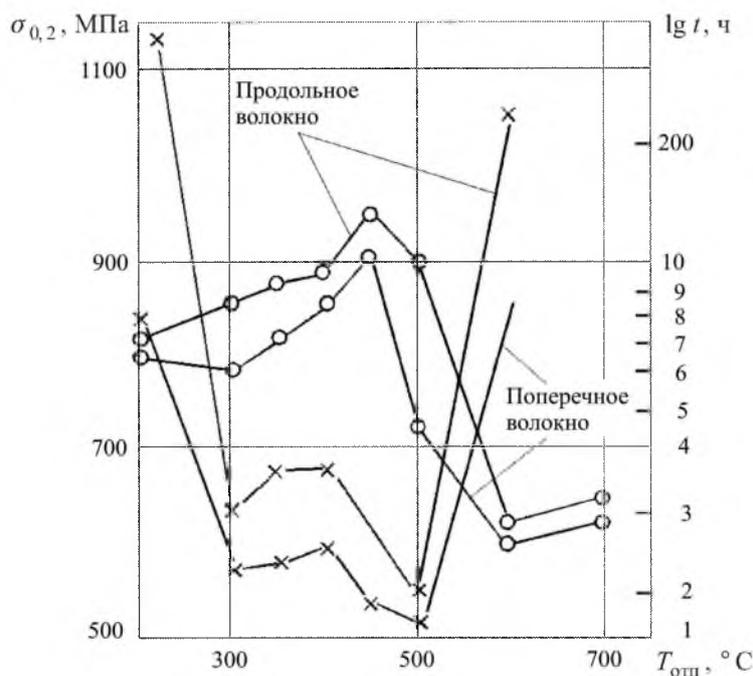


Рис. 1. Зависимость  $\sigma_{0,2}$  и времени  $t$  до образования коррозионной трещины под напряжением при  $\sigma = 0,8\sigma_{0,2}$  в образцах с продольными и поперечными волокнами от температуры отпуска:  $\circ - 0,8\sigma_{0,2} = f(T_{отп})$ ;  $\times - t = f(T_{отп})$ .

В связи с усталостными разрушениями малоподвижных соединений (замковые соединения лопаток компрессоров, валы в зонах прессовых посадок, хиртовские и шлицевые соединения, болтовые соединения дисков компрессоров и др.) была поставлена задача исследования механизма процессов фреттинг-коррозии и фреттинг-усталости [4, 15–17]. Показано, что используемые в этом случае методы исследования и традиционные методы при исследовании процессов износа малоэффективны.

Процесс фреттинг-коррозии рассматривался как объединяющий физико-химические процессы и механику контактного взаимодействия твердых тел. Установлено, что вследствие разрушения поверхности контакта под действием эксплуатационных циклических нагрузок в микро- и макрообъемах, соизмеримых с реальными микронеровностями, создаются условия для возникновения и развития макротрещин, играющих роль концентраторов напряжений. Впервые для типичных конструкционных материалов были получены зависимости предела фреттинг-усталости от амплитуды относительных перемещений в области контакта и величины давления.

Показано, что не для всех материалов при фреттинге соблюдается принцип суперпозиции повреждений (рис. 2). Обнаружена неоднозначная зависимость предела фреттинг-усталости от числа циклов нагружения, свидетельствующая о наличии при фреттинг-коррозии процессов повреждения и "самозалечивания" материала за счет абразивного действия продуктов износа, образующихся в зоне контакта. Результаты проведенных исследований позволили предложить механизм усталостного разрушения замковых соединений лопаток ГТД и других деталей, образующих мало-подвижные или прессовые соединения, и на основе этого дополнить конструктивные и технологические меры по повышению прочности. Для наиболее распространенных конструкционных материалов получены значения эффективных коэффициентов концентрации напряжений  $K_{\sigma}^{\text{фр}}$ , что позволило еще на этапе проектирования учитывать влияние на усталость фреттинга в малоподвижных и прессовых соединениях [4, 13, 14].

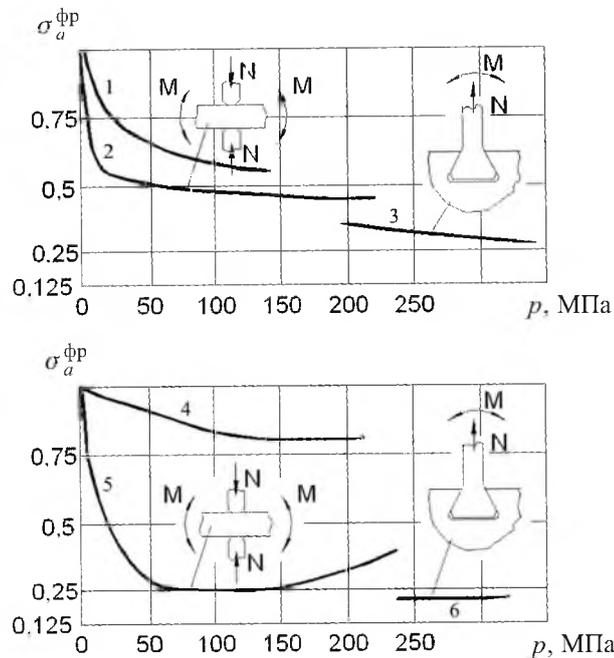


Рис. 2. Зависимость относительной величины предела фреттинг-усталости  $\sigma_a^{\text{фр}}$  от давления  $p$  в контакте для пары сталь–сталь (ЭИ961), отпуск при 580°C (1–3) и пары сплав–сплав (ВТ8) (4–6); 1, 4 – образцы, предварительно поврежденные фреттинг-коррозией; 2, 5 – образцы в исходном состоянии; 3, 6 – детали, испытанные на фреттинг-усталость.

Решение проблемы эксплуатации двигателей по техническому состоянию потребовало изучения кинетики развития усталостных трещин в деталях от эксплуатационных нагрузок. Эту задачу можно было решить путем исследования характеристик трещиностойкости типичных конструкционных материалов (алюминиевые сплавы, нержавеющие стали, титановые и никелевые сплавы), применяемых в отечественных ГТД. Данные были получены при испытаниях компактных образцов на трещиностойкость, стандартных образцов на длительную прочность, мало- и многоцикловую

усталость, а также натуральных лопаток компрессоров и турбин. Показано, что в пластически деформированном слое скорость развития трещин усталости возрастает (рис. 3). Существенного отличия в скорости развития трещин малоциклового усталости в двухфазных титановых сплавах не обнаружено [18].

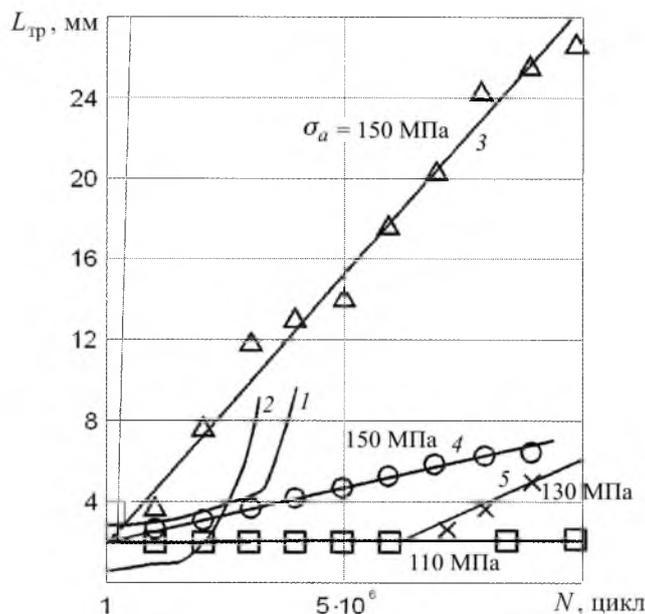


Рис. 3. Рост трещины в лопатках компрессора из стали ЭИ961 ( $\sigma_s = 100$  МПа) – 1 и сплавов ВТ8 ( $\sigma_s = 40$  МПа) – 2 и ЭИ437Б (3–5) в зависимости от числа циклов нагружения и состояния поверхности детали.

Проводились исследования сопротивления усталости материалов при сложнапряженном состоянии применительно к материалам дисков компрессоров, валов. Для учета усталостной поврежденности материала по силовому фактору применяется линейное суммирование относительной долговечности [19, 20].

**Исследования сопротивления усталости натуральных лопаток и дисков ГТД.** Для основных деталей ГТД при эксплуатации характерны: высокая нагруженность и существенная неоднородность напряженного и деформированного состояния; ограниченная возможность прогнозирования эксплуатационных нагрузок; сложность учета влияния большого числа эксплуатационных факторов на детали; различная повреждаемость материала на разных стадиях ресурса; снижение сопротивления усталости – результат одновременного действия конструктивных, технологических, эксплуатационных и т.п. факторов. Выбор оптимальных мероприятий, направленных на повышение несущей способности основных деталей, часто является результатом компромисса между различными видами разрушений: между длительной статической прочностью и многоциклового усталостью, повышением демпфирующих характеристик и фреттинг-усталостью, увеличением износостойкости и снижением сопротивления усталости и т.д.).

Обобщение данных испытаний лопаток компрессоров и турбин позволило установить *статистические закономерности влияния технологической наследственности, конструктивного и масштабного факторов на формирование несущей способности профильных частей лопаток ГТД и получить зависимости, которые рекомендовано использовать при создании новых конструкций* [2, 4, 13, 21]. На основании статистического анализа результатов испытаний на усталость лопаток компрессоров показано, что *при формировании несущей способности профильных частей лопаток решающими являются не только конструктивный и масштабный факторы, но и технологии изготовления* [1, 4, 21, 22].

Продолжение и развитие начатых С. В. Серенсенем и Б. Ф. Балашовым в середине 50-х годов работ по исследованию прочности замковых соединений лопаток ГТД позволили *впервые на основе оригинальных экспериментальных исследований условий деформирования на площадке контакта хвостовика получить зависимости динамической нагруженности замковых соединений типа "ласточкин хвост" от величины угла клина хвостовика с учетом конструктивных особенностей сопряжения хвостовика с диском и уровня действующих на лопатку центробежных нагрузок* (рис. 4). Для *елочных замковых соединений лопаток получены зависимости распределения деформаций по зубьям хвостовика относительно деформаций в корневом сечении лопатки, а также параметрические зависимости* (рис. 5), *учитывающие конструктивные особенности замковых соединений лопаток ГТД и позволяющие прогнозировать их пределы выносливости* [4, 22, 23]. Подготовлены рекомендации, направленные на повышение пределов выносливости замковых соединений лопаток компрессоров и турбин.

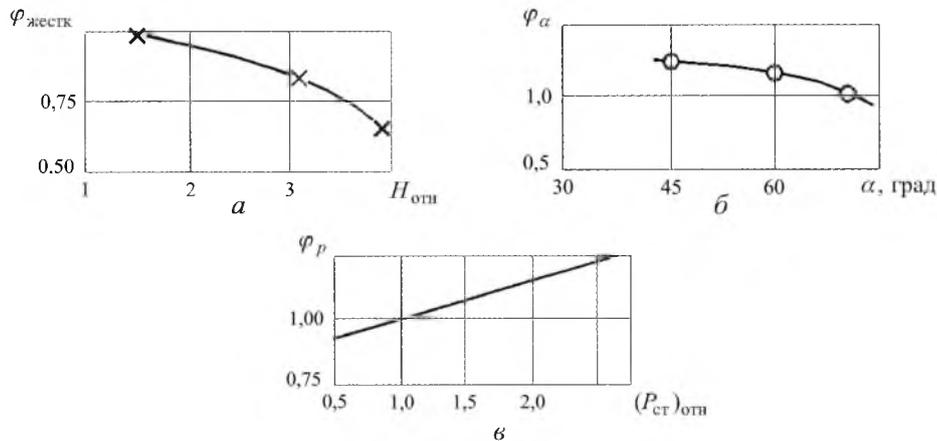


Рис. 4. Влияние на относительную напряженность хвостовика соотношения  $H_{\text{отн}} = H_{\text{хв}}/H_{\text{пр}}$  между изгибной жесткостью хвостовика  $H_{\text{хв}}$  и профильной частью лопатки  $H_{\text{пр}}$  (а), угла наклона контактной грани хвостовика  $\alpha$  (б) и относительной величины статической составляющей  $(P_{\text{ст}})_{\text{отн}}$  (в).

Испытания на усталость образцов и лопаток компрессоров из титановых сплавов, а также металлографические исследования позволили установить *причины снижения сопротивления усталости, вызванные общей и*

локальной структурной неоднородностью материала. Показано, что существенное влияние на снижение оказывают не только режимы механической обработки, но и условия термопластической деформации на этапе получения заготовки в процессах высокотемпературной термической обработки (ВТМО) и термомеханической обработки (ТМО). Оптимальные температурные режимы этих обработок зависят от температуры полиморфного превращения сплава [1, 2, 4].

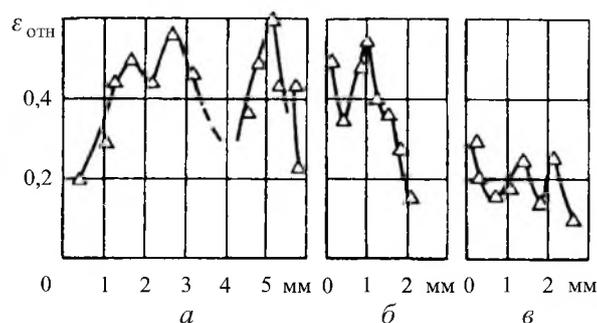


Рис. 5. Распределение относительной величины деформаций на контактных гранях зуба елочного хвостовика относительно корневой части лопатки: а, б, в – соответственно первый, второй и третий зуб.

Для лопаток компрессоров рекомендовались дополнительные термообработки, эффективность которых оказалась существенно (на 30% и более) выше, чем традиционных методов поверхностного упрочнения. В дальнейшем установлены температурные диапазоны эффективности применения последнего [24]. На основании этих исследований были разработаны рекомендации по повышению несущей способности дисков и лопаток компрессора.

Систематические комплексные исследования позволили обнаружить типичные закономерности влияния технологической наследственности, структурного состояния материала и поверхностного слоя (остаточные напряжения, наклеп и т.д.) на несущую способность основных деталей ГТД. В результате сформулированы требования для выбора оптимальных параметров поверхностного упрочнения и эксплуатационных температур для основных деталей ГТД, разработаны методическое руководство, отраслевой стандарт по периодическому контролю и регламентации уровня технологических остаточных напряжений в деталях ГТД. Применительно к деталям сложной формы (хвостовики лопаток, межпазовые выступы дисков турбин, охлаждаемые лопатки и т.п.) была разработана методика определения поверхностных остаточных напряжений для дисков и лопаток.

Создание высокотемпературных турбин потребовало применения охлаждаемых рабочих лопаток, получаемых методом вакуумного литья по выплавляемым моделям. Внедрение лопаток было связано с усталостным разрушением, так как их предел выносливости составлял около 100 МПа.

Комплексные исследования позволили выявить закономерности влияния на сопротивление усталости лопаток турбин технологических и конструктивных факторов: величина вакуума; условия заливки металла в форму и

кристаллизации расплава; микро- и макроструктуры; литейные дефекты; размеры макрозерен и способы их измельчения; механическая обработка; защитные покрытия; масштабный фактор; температуры эксплуатации и др. Разработанные на основании исследований [4, 21] рекомендации позволили устранить дефекты и существенно повысить пределы выносливости охлаждаемых лопаток турбин.

Повышение рабочих температур потребовало применения лопаток, отлитых с заданной кристаллической ориентацией. Впервые лопатки, отлитые методом высокоскоростной направленной кристаллизации (ВСНК), были внедрены после положительных усталостных испытаний в ЦИАМ. При этом возникли новые проблемы, связанные с конструкционной прочностью лопаток турбин, из-за значительной анизотропии свойств материала, проявляющейся при умеренных температурах, и деградации свойств материала вследствие технологической наследственности и влияния эксплуатационных нагрузок. Эти проблемы в настоящее время решаются.

Разработанное в середине 60-х годов руководство по испытаниям на усталость лопаток ГТД ограничивалось только периодическими усталостными испытаниями. После существенной доработки оно в виде ОСТ [25] внедрено как *методика испытаний на усталость лопаток ГТД и используется при прочностной доводке двигателей, регламентируя различные виды испытаний на усталость:*

- для получения исходной кривой усталости;*
- для сравнительных ускоренных испытаний;*
- для периодических контрольных испытаний и др.*

Испытания на усталость получили широкое распространение при выборе оптимальных конструктивных и технологических вариантов основных деталей узлов ГТД и других изделий машиностроения, стали частью производства лопаток ГТД – как контроль стабильности технологического процесса. ОСТ по методам испытаний на усталость получил признание в разных отраслях промышленности, НИИ, вузах и др.

Использование традиционных методов оценки сопротивления усталости и запасов прочности по переменным напряжениям деталей сложной формы, например дисков компрессоров и турбин, зачастую не позволяет объяснить причины разрушений, так как расчетные запасы прочности нередко превышают значения  $K_V = 10$ . Возникла необходимость разработки таких методов, которые не требуют проведения испытаний большого числа дорогостоящих дисков, но позволяют воспроизвести в зоне концентрации напряжений необходимое напряженно-деформированное состояние (НДС) при сохранении условий обработки натурной детали. Был также разработан способ испытаний на усталость в условиях асимметричного изгиба натуральных дисков с воспроизведением НДС в заданных зонах (обод, ступица или полотно), что позволило определить пределы выносливости дисков двигателей НК8-4, НК8-2У, ТВ3-117, Д30-КУ и др.

В результате таких работ были внедрены *новые методы оценки сопротивления усталости деталей сложной формы и испытаний натуральных деталей и их элементов, в первую очередь ободных частей дисков ГТД, валов* [2–4, 13, 14, 20, 25, 26].

По данным испытаний на усталость ободных частей дисков компрессоров и турбин было установлено, что пределы выносливости натуральных дисков значительно отличаются от таковых стандартных образцов. Кроме того, *определено влияние конструктивных и технологических факторов, а также эксплуатационной наработки на сопротивление усталости, уточнены запасы прочности для дисков, оптимизированы периоды и технологические операции ремонта, обосновано увеличение ресурса двигателей.*

Испытания дисков были дополнены испытаниями элементов обода диска на малоцикловую усталость (МЦУ) при изгибе с целью определения ресурса в циклах в зонах концентрации напряжений. Результаты испытаний на МЦУ в сочетании с исследованиями свойств поверхностного слоя позволили выявить влияние эксплуатационной повреждаемости на циклическую долговечность дисков, определить оптимальные режимы и сроки восстановительного ремонта.

**Исследование причин эксплуатационной повреждаемости лопаток ГТД.** При осмотре досрочно снимавшихся из эксплуатации двигателей (более 30%) обнаружены поврежденные лопатки компрессора из-за попадания в газоздушный тракт посторонних предметов или коррозии, что потребовало разработки нормирующих документов на допустимые (безопасные) для эксплуатации повреждения. Были проведены исследования с целью выявления основных закономерностей влияния эксплуатационных повреждений (забоины) на сопротивление усталости лопаток. Показано, что степень снижения сопротивления усталости лопаток зависит от относительной глубины забоины, радиуса кромки, вида термической и термопластической обработки материала. Наличие начальной трещины в области повреждения существенно (в три-четыре раза) снижает предел выносливости детали (рис. 6).

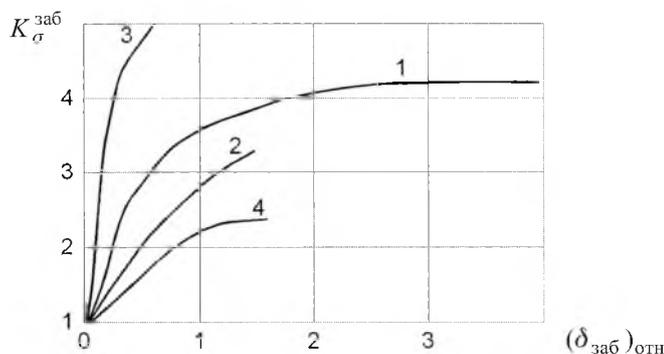


Рис. 6. Зависимость  $K_{\sigma}^{\text{заб}}$  от относительной глубины забоины  $(\delta_{\text{заб}})_{\text{отн}}$  для лопаток из титановых сплавов (1–3) (1 – лопатки, обработанные ВТМО; 2 – лопатки отожженные; 3 – лопатки с начальной усталостной трещиной) и стали (4).

Исходя из результатов исследований были созданы нормативные документы [27–29], регламентирующие:

методику нанесения повреждений лопаток в лабораторных условиях;

подтверждение эффективности выполненного ремонта лопаток на двигателе путем проведения резонансных или эксплуатационных циклических испытаний;

нормирование в эксплуатации размеров допустимых повреждений, оценка ресурса лопаток компрессора, в том числе поврежденных коррозией; требования к разработчикам ГТД по обеспечению в процессе эксплуатации контроля состояния лопаток компрессоров и турбин; обеспечение возможности ремонта деталей в роторе в процессе эксплуатации.

Увеличение ресурса ГТД обострило проблему повреждаемости лопаток турбин, которые наряду со статическими, циклическими и вибрационными нагрузками подвержены переменным термическим воздействиям. Поэтому возникла *проблема исследования механизма повреждаемости материала лопаток и разработки метода прогнозирования их остаточной долговечности*. Показано, что повреждения лопаток в области действия максимальных температур сопровождаются структурными изменениями в поверхностном слое (диффузия легирующих элементов, уширение границ зерен, образование микропор, перерастающих в микротрещины, коагуляция и растворение упрочняющей  $\gamma^1$ -фазы) [30].

Установлено, что снижение предела выносливости лопаток, поврежденных коррозией, может составлять  $K_{\sigma}^{\text{кор}} \geq 3$ . Показана эффективность применения с целью повышения коррозионной стойкости материала лопаток различных защитных покрытий (гальванические, полимерные, диффузионные) при нормальной и повышенных температурах, при наличии эксплуатационных повреждений (забоины), а также поверхностных упрочняющих обработок и стабилизирующих термических обработок. На основе проведенных исследований даны рекомендации по повышению эксплуатационной надежности двигателей P27-300, P29-300, АЛ21 и др., турбоэксгаустеров типа “Ангара”.

**Развитие новых направлений и методик исследования несущей способности материалов и деталей ГТД.** Получили дальнейшее развитие статистические методы анализа результатов испытаний на усталость и оценки сопротивления усталости при расчетах на прочность деталей, подверженных воздействию переменных во времени напряжений [1, 2].

Применение вычислительной техники позволило открыть новое направление, связанное с моделированием усталостных испытаний [5, 9] с помощью марковских процессов, в ходе которого определялись параметры распределения для разных объемов выборки. *Полученные результаты использовались для обоснования объема испытаний для заданных вероятностей разрушения при периодических испытаниях на усталость.*

Стремление приблизить условия испытаний к эксплуатационным, где на деталь одновременно действуют статические, циклические и вибрационные нагрузки, потребовало модернизации испытательного оборудования и разработки новых методик испытаний. На основании полученных результатов исследований предложена *методика оценки прочности материалов при комбинированном нагружении* [4, 12].

Разрушение в эксплуатации силовых болтовых соединений потребовало разработки методики испытаний, приближенной к эксплуатационным условиям нагружения с имитацией неравномерностей, связанных с силовыми и

термическими факторами. Были проведены испытания болтов на много- и малоцикловую усталость при нормальной и повышенных температурах применительно к валу винта АВ24 и пакетам дисков КВД (двигатели АЛ31, РД33) и ТВД (двигатели НК25, НК32). По результатам испытаний разработаны конструктивные и технологические рекомендации, направленные на повышение несущей способности и надежности силовых болтовых соединений.

Внедрение в практику эксплуатации ГТД по техническому состоянию основных деталей (ЭТС) потребовало вместо фиксированного ресурса исследовать кинетику развития повреждений (трещин) для обоснования периодичности контроля и допустимых размеров технологических и эксплуатационных дефектов.

*Выполненные исследования позволили создать банк данных, в том числе и на статистической основе, по характеристикам сопротивления усталости при нормальной и повышенных температурах основных конструкционных материалов, применяемых в ГТД. Кроме того, в отличие от известных зарубежных, в него вошел значительный объем результатов испытаний натуральных деталей и элементов конструкций.*

Как показали случаи усталостных разрушений, например, дисков компрессоров и турбин, с помощью существующих методов оценки сопротивления усталости и запасов прочности по переменным напряжениям деталей сложной формы нельзя установить причины разрушения деталей, так как расчетные запасы прочности для них нередко превышали значения  $K_V = 10$ . Это потребовало, с одной стороны, более глубоко исследовать НДС дисков в области разрушения, в том числе экспериментально исследовать зоны концентрации напряжений на крупногабаритных металлических моделях, с другой – разработать методики испытаний на усталость (рис. 7). Результатом таких работ явилось внедрение *новых методов испытаний на усталость деталей сложной формы и их элементов, в первую очередь ободных частей дисков ГТД*, которые нашли широкую поддержку и распространение в промышленности, а также оценка их несущей способности [4, 12, 25].

Исходя из данных исследований были разработаны и внедрены следующие методы испытаний:

- на мало- и многоцикловую усталость при заданной асимметрии цикла дисков и их элементов, а также других натуральных деталей ГТД;
- на усталость лопаток дисков типа “блиск”;
- на мало- и многоцикловую усталость натуральных лопаток ТНА ЖРД, в том числе “блиск” ТНА с покрывным диском, лопаток турбин и др.;
- на фреттинг-усталость конструкционных материалов и элементов мало-подвижных соединений.

Исследования натуральных деталей и их элементов всегда сопровождалось предварительным подробным расчетно-экспериментальным изучением их НДС, а при испытаниях на усталость должны выполняться следующие требования:

- 1) воспроизводимое в опасной зоне детали НДС должно быть максимально приближено к эксплуатационным;

2) тип разрушения в опасной зоне детали должен соответствовать тому, который наблюдается при эксплуатации;

3) технология изготовления моделей должна соответствовать технологии изготовления натурной детали.

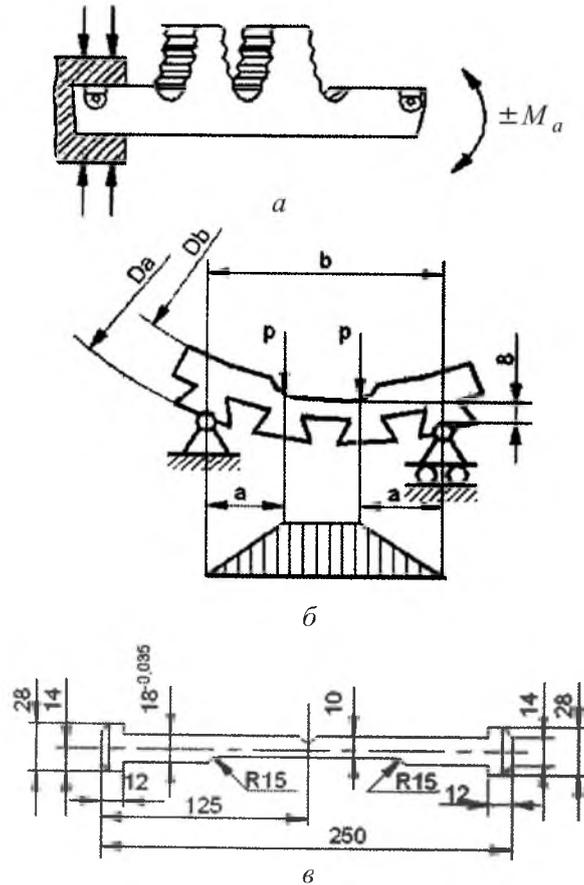


Рис. 7. Схемы испытания элементов ободной части диска турбины на симметричный изгиб (а) и на изгиб с изгибом (б), а также образец для испытания на симметричный изгиб с растяжением (в).

Исследования на много- и малоцикловую усталость полотен и ободных частей дисков компрессоров турбин позволили разработать конструктивные и технологические рекомендации по повышению надежности и ресурса двигателей серии АИ, НК, АЛ, ДЗ0 и др.

Большой вклад сотрудники сектора внесли в создание и освоение отраслевой базы прочности. Для исследования конструкционной прочности были спроектированы специальные испытательные установки, которые в процессе их освоения усовершенствовались, что не только значительно расширило их экспериментальные возможности, но и позволило ставить и решать принципиально новые научно-исследовательские проблемы.

Экспериментальный комплекс для исследования конструкционной прочности включает.

Установки типа МВИ-6000 для испытания на усталость стандартных образцов на изгиб с вращением (максимальная частота вращения 100 Гц) в широком диапазоне температур (до 1000°C) при программном изменении нагрузки.

Установки типа УРС-10/30000 для испытания на усталость материалов в условиях растяжения–сжатия при заданной асимметрии цикла нагружения в широком диапазоне температур (до 900°C).

Модернизация этих установок дала возможность дополнительно проводить испытания на малоцикловую усталость и реализовать бигармоническое нагружение (сочетание низкочастотного малоциклового нагружения с высокочастотным многоцикловым) в широком диапазоне частот и температур ( $f = 0,5 \dots 500$  Гц и  $T = 1500^\circ\text{C}$  на воздухе) как образцов, так и деталей (натурные лопатки, ободные части дисков и др. при асимметричном цикле нагружения).

Электродинамические вибростенды типа УВЭ-10/5000, ВЭДС-400, ВЭДС-200, ВЭДС-10 с толкающим усилием на столе от 100 до 15000 Н и диапазоном частотного возбуждения 100...3000 Гц, оснащенные специально разработанными нагревательными устройствами (печи сопротивления, обеспечивающие нагрев до 1500°C в воздушной среде, и индукторы).

Воздушный вибростенд типа КуАИ для испытаний на усталость натуральных лопаток при нормальной температуре в диапазоне частот 1000...20000 Гц.

Гидравлические пульсаторы типа 10-Рн, ЕU-20 и ЕU-100 с предельной нагрузкой от 100000 до 1000000 Н для испытаний на много- и малоцикловую усталость материалов и натуральных деталей.

Электрогидравлическая система типа МТС-100 для испытаний на малоцикловую усталость конструкционных материалов и элементов конструкций, снабженная матобеспечением для системы управления программами испытаний, для обработки результатов в ходе эксперимента, включая построение диаграмм деформирования, и позволяющая проводить исследования как при “мягком”, так и при “жестком” цикле нагружения.

Специальные нагревательные устройства: оптические отражательные печи (до 1200°C) и печь с хромит-лантановыми нагревателями (до 1600°C на воздухе).

На этом экспериментальном комплексе выполнен ряд основополагающих исследований в области конструкционной прочности, разработаны и внедрены новые методы испытаний на мало- и многоцикловую усталость при заданной асимметрии цикла нагружения конструкционных материалов и натуральных деталей ГТД (элементы дисков, валы и др.).

Основные результаты исследований были включены в разделы и приложения “Норм прочности ГТД”, в руководства для конструкторов, обобщены в виде методик в ГОСТах, ОСТах и методических руководствах по методам испытаний и оценке прочности деталей ГТД, а оригинальность ряда предложенных способов испытаний подтверждена многими авторскими свидетельствами.

В 1982 г. за разработку и внедрение высокотемпературных испытательных машин на этом экспериментальном комплексе Б. Ф. Балашов и А. Н. Петухов были удостоены Государственной премии Совета Министров СССР.

Научное направление “Исследование конструкционной прочности материалов и сопротивления усталости натуральных деталей двигателей” возглавили профессор Б. Ф. Балашов и член-корреспондент А. Н. Петухов.

Руководителями отдельных направлений были Л. А. Козлов, Т. П. Захарова, А. Н. Архипов, В. П. Харьков. Среди активных участников работ следует отметить А. М. Вахромеева, И. В. Пучкова, Б. В. Володенко, Ю. Д. Красникова, А. Ф. Орлова, А. Н. Стадникова, А. Е. Тихомирову, Н. Ф. Тютереву, З. Х. Юровского, В. В. Великанову, Г. И. Зубицкую, М. В. Зубкову, Л. Н. Красникову, В. А. Мальшеву, М. М. Мамкина, А. М. Николаева, И. В. Ульянова.

В секторе “Сопротивление усталости деталей ГТД” защищено две диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук и пять диссертаций – кандидата технических наук, написано шесть монографий.

## Резюме

Наведено історичний огляд розвитку наукового напрямку “Конструкційна міцність” в ЦІАМ за останні 30 років у зв’язку зі 100-річчям від дня народження засновника цього напрямку в СРСР академіка С. В. Серенсена і 75-річчям заснування ЦІАМ. Розглядаються основні результати, що отримані колективом сектору “Опір утомі матеріалів ГТД” цього інституту.

1. *Балашов Б. Ф., Петухов А. Н., Володенко Б. В.* Конструкционная прочность титановых сплавов // Тр. ЦИАМ. – 1972. – № 545. – 24 с.
2. *Конструкционная* прочность материалов и деталей ГТД. Руководство для конструкторов // Там же. – 1979. – № 835. – 520 с.
3. *Конструкционная* прочность материалов и деталей газотурбинных двигателей / Под ред. И. А. Биргера и Б. Ф. Балашова. – М.: Машиностроение, 1981. – 221 с.
4. *Петухов А. Н.* Сопротивление усталости деталей ГТД. – М.: Машиностроение, 1993. – 240 с.
5. *Козлов Л. А., Балашов Б. Ф.* Вероятностная оценка сопротивления усталости и действующих напряжений в деталях машин в связи с расчетом на прочность при многоцикловом нагружении // Пробл. прочности. – 1983. – № 5. – С. 59 – 64.
6. *Ресурсное* проектирование авиационных ГТД. Руководство для конструкторов. Вып. 1. Общие принципы ресурсного проектирования и модели долговечности материалов и деталей авиационных ГТД // Тр. ЦИАМ. – 1990. – № 1253. – 208 с.
7. *Расчеты* и испытания на прочность. Методы оценки сопротивления усталости в условиях фреттинг-коррозии. Методические указания. МР217-86. – М.: Госстандарт, 1986. – 19 с.
8. *Петухов А. Н.* Прогнозирование сопротивления усталости деталей ГТД с учетом технологических, конструктивных и эксплуатационных факторов / ЦИАМ. – Препр. – М., 1994. – 41 с.

9. *Харьков В. П.* Вероятностно-статистическая оценка запасов прочности // Проблемы прочности и динамики в авиадвигателестроении. – 1989. – Вып. 4. – С. 152 – 167.
10. *Петухов А. Н.* О некоторых закономерностях влияния параметров поверхностного слоя на сопротивление усталости высокопрочных конструкционных материалов // Механическая усталость металлов: Тр. XI Междунар. кол. В 2 т. – Киев, 1992. – С. 247 – 252.
11. *Петухов А. Н.* О необходимости регламентирования свойств поверхностного слоя при проектировании деталей ГТД с учетом усталости // Техника воздушного флота. – 1995. – 69, № 1-2 (612-613). – С. 74 – 77.
12. *Захарова Т. П.* Модели усталостного разрушения при сложном нагружении // Механическая усталость: Тр. VI Междунар. кол. – Киев, Наук. думка, 1983. – С. 74 – 81.
13. *Петухов А. Н.* Усталость елочных хвостовиков лопаток турбин. – М.: ЦИАМ, 1986. – 12 с.
14. *Петухов А. Н.* Усталость замковых соединений лопаток компрессоров // Тр. ЦИАМ. – 1987. – № 1213. – 36 с.
15. *Петухов А. Н.* Методические особенности исследования процесса фреттинг-коррозии в связи с усталостью материалов // Завод. лаб. – 1974. – № 10. – С. 1246 – 1250.
16. *Петухов А. Н.* Несущая способность деталей при фреттинг-коррозии // Испытания авиационных двигателей (Межвуз. сб. № 8). – Уфа, 1980. – С. 28 – 34.
17. *Петухов А. Н.* Прогнозирование характеристик сопротивления усталости конструкционных материалов с учетом влияния эксплуатационных повреждений фреттингом // Механическая усталость металлов: Материалы VI Междунар. кол. – Киев: Наук. думка, 1983. – С. 381 – 386.
18. *Быков Ю. Г., Петухов А. Н., Черкасова С. А.* Циклическая трещиностойкость титановых сплавов ВТ3-1 и ВТ25 // Физ.-хим. механика материалов. – 1990. – № 3. – С. 49 – 53.
19. *Вахромеев А. М., Петухов А. Н.* Исследование титанового сплава ВТ3-1 при двухосном напряженном состоянии // Прочность материалов и конструкций при сложном напряженном состоянии. – Киев: Наук. думка, 1986. – С. 61 – 64.
20. *Вахромеев А. М., Петухов А. Н.* Сопротивление усталости титанового сплава ВТ3-1 в условиях совместного действия изгиба, кручения и асимметрии цикла нагружения // Проблемы прочности и динамики в авиадвигателестроении. – 1989. – Вып. 4. – С. 253 – 262.
21. *Балашов Б. Ф., Петухов А. Н., Архипов А. Н., Володенко Б. В.* Рассеивание результатов усталостных испытаний литых лопаток газовых турбин в связи с конструктивно-технологическими факторами // Пробл. прочности. – 1976. – № 6. – С. 18 – 21.

22. *Балашов Б. Ф., Харьков В. П., Юровский З. Х.* Статистический анализ характеристик усталости лопаток турбомашин // Там же. – 1984. – № 10. – С. 15 – 19.
23. *ОСТ 100870-77.* Лопатки ГТД. Методы испытаний на усталость. – Введен 01. 06. 77.
24. *А. с. № 411154.* Способ термической обработки изделий из титановых сплавов / *Б. Ф. Балашов, А. Н. Петухов, А. Н. Архипов.* – Оpubл. 23. 02. 74. Бюл. № 2.
25. *ОСТ 101 049-83.* Роторы ГТД. Методы испытаний элементов роторов на усталость. – Введен 01. 01. 85.
26. *ОСТ 1 02569-85.* Двигатели газотурбинные. Методы расчета пределов выносливости деталей. – Введен 01. 01. 87.
27. *ОСТ 10034-85.* Лопатки газотурбинных двигателей. Нормирование повреждений лопаток компрессора от попадания посторонних предметов. – Введен 01. 07. 85.
28. *ОСТ 100447-82.* Двигатели газотурбинные. Использование лопаток в течение ограниченного ресурса. – Введен 01. 01. 83.
29. *ОСТ 102506-84.* Лопатки компрессоров газотурбинных двигателей. Использование лопаток, поврежденных коррозией. – Введен 01. 01. 85.
30. *Захарова Т. П., Пименова Г. П., Красникова Л. Н.* Остаточная долговечность неохлаждаемых лопаток турбин большого ресурса // Проблемы прочности и динамики в авиадвигателестроении. – 1982. – № 996. – С. 205 – 212.

Поступила 04. 04. 2005