

Сопоставление расчетных значений и экспериментальных данных проводили на базе $2 \cdot 10^7$ циклов, которая была достигнута для всех частот нагружения. Результаты сопоставления прогноза с экспериментом показали, что максимальное расхождение расчета и эксперимента составляет 12,2% и всего в двух случаях из 32 превышает 10%, что вполне приемлемо для усталостных испытаний.

Список литературы

1. Матохнюк Л.Е. Ускоренные усталостные испытания высокочастотным нагружением. - Киев: Наук. Думка, 1988.-200 с.
2. Яковлева Т.Ю. Взаимосвязь микромеханизмов структурной перестройки титанового сплава ВТ18У в процессе усталостного нагружения // Пробл. прочности. - 2000. - № 4. - С. 33 - 44.
3. Яковлева Т.Ю. Дислокационная структура титанового сплава ВТ22 в условиях циклического нагружения // Там же. - 2000. - № 6. - С. 73-83.
4. Яковлева Т.Ю. Дислокационная структура зоны пластической деформации и микромеханизмы усталостного разрушения титанового сплава ВТ22 // Там же.-2001.-№5.-С. 65-75.
5. Яковлева Т.Ю., Войналович О.В., Матохнюк Л.Е. Структурні зміни у сплаві Амг6Н за дії високочастотного асиметричного навантажування // Металознавство та термообробка металів. - 2000. - № 4.-С. 12-19.

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ЛОПАТОК ГТД ПРИ МНОГОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ

Писаренко Г.Г.* , Васинюк И.М.* , Войналович А.В.* , Мозейко Б.Ю.** , Марков А.М**.
Институт проблем прочности им.Г.С. Писаренко НАН Украины, г. Киев,
** ООО ИТЦ «Самаринжиниринг», г. Самара

Прочностные характеристики газотурбинных двигателей во многом определяются надежностью их лопаточного аппарата, на многоцикловую усталость которого комплексно влияют многочисленные технологические и эксплуатационные факторы. По различным литературным данным на долю усталостных разрушений на этапе освоения нового двигателя приходится около 60...70 % всех поломок. И только индивидуальная оценка ресурса лопаток газотурбинных двигателей позволит обоснованно уменьшить коэффициенты запаса по долговечности, повысить безопасность и экономические показатели эксплуатации.

В свою очередь долговечность лопаток лимитируется состоянием поверхностного слоя в начальный и последующие этапы усталости - остаточные напряжения, поверхностные и подповерхностные дефекты могут существенно влиять на характеристики сопротивления усталости элемента конструкции. Поэтому необходимо на различных стадиях усталости конкретного элемента конструкции оценивать параметры поверхностного слоя относительно оптимальных по критерию многоциклового усталости.

В настоящее время для газотурбинных двигателей исходное и эксплуатационное повреждение обнаруживается с применением трудоемких процедур, например визуальным методом с помощью оптических эндоскопов, капиллярным методом и др., что не позволяет получать оперативную оценку степени развития локального или рассеянного поверхностного повреждения. Другие методы неразрушающего контроля, нашедшие применение в различных областях машиностроения, для газотурбинных двигателей только проходят период адаптации своих возможностей по разрешающей способности и надежности локализации повреждения. Задача этого направления исследований состоит в определении связи между параметрами неразрушающего контроля и прочностными характеристиками объектов контроля.

В Институте проблем прочности НАН Украины в развитие неразрушающих методов контроля ответственных элементов современных двигателей создан измерительный комплекс для оценки состояния поверхностного слоя лопаток, позволяющий регистрировать: а) степень рассеянной поврежденности поверхности контролируемой зоны как кинетический параметр неоднородности структуры; б) наличие и размеры локальных инкубационных поверхностных дефектов в виде изображения на экране монитора персонального компьютера. Для реализации этих задач были использованы усовершенствованные авторами модификации акустического и электромагнитного методов неразрушающего контроля поверхности металлических материалов.

В разработанном измерительном комплексе обеспечивается определение параметра статистического распределения обобщенной характеристики физико-механических свойств поверхности конструкционного металлического материала, коррелирующей со степенью неоднородности микроструктуры поверхностных слоев материала [1]. Реализуя акустический метод неразрушающего контроля, измерительная система комплекса функционально анализирует аналоговый сигнал фазового спектра, пропорциональный микроструктурным напряжениям. При этом чувствительный элемент измерительной системы воспринимает сигнал рассогласования частоты упругих колебаний в структуре приповерхностного слоя материала, пропорциональный величине напряжений в локальном объеме

материала.

В использованной схеме акустического метода измерений угла сдвига фаз в локальных зонах материала к образцу исследованного материала упруго с помощью скобы прижимается игольчатый волновод двухканального пьезодатчика. Излучающая часть датчика, возбуждающегося от генератора высокочастотных сигналов, через волновод активизирует локальную зону материала под поверхностью образца. Обратный сигнал имеет некоторые отличия амплитудно-временных параметров по сравнению с излучаемым сигналом, которые коррелируют с микронапряженностью и другими характеристиками микроструктуры. Этот сигнал принимает второй канал датчика, далее электрический сигнал поступает на фазометр для последующего анализа измерительной аппаратурой.

Аналитическая (измерительная) часть приборного комплекса обеспечивает параллельный анализ результатов измерений параметров статистического распределения свойств материала, характеризующих степень неоднородности структурных напряжений. Измеряемый параметр (средняя величина максимальных отклонений микронапряжений) определяется логической схемой прибора в результате осреднения результатов многократных измерений в отдельных точках контролируемой поверхности. На цифровом табло прибора отображается статистически обоснованное значение средней величины максимальных отклонений напряжений второго рода относительно общего эквипотенциального уровня макронапряжений поверхностного слоя.

Функциональные параметры измерительной системы составляют: чувствительность прибора 10^{-7} град/Па; динамический диапазон чувствительности +200...-120МПа; линейность рабочей характеристики 0,1%. Зона чувствительности сенсора ограничена глубиной активации приповерхностного слоя материала датчиком измерительной системы и составляет около 0,1 мм.

Как иллюстрация возможностей разработанного измерительного комплекса в данной работе представлены результаты анализа кинетики структурной неоднородности титанового сплава при постадийной многоциклового усталости на основе дискретных измерений, выполненных на лабораторных образцах при прямом тестировании физико-механических свойств (рис. 1). Усталостные испытания листовых образцов титанового сплава ВТ 14 проводили на второй форме консольного изгиба на электродинамическом вибростенде [2].

В исследованной зоне образца (в опасном сечении) измерения проводили, устанавливая волновод датчика в окрестности шести разнесенных между собой точек поверхности (расстояние между точками 5 мм). При этом в указанных местах поверхности образца на каждом из этапов исследований было проведено по 10 измерений угла сдвига фаз с

дований было проведено по 10 измерений угла сдвига фаз с интервалами между отдельными измерениями 30с.

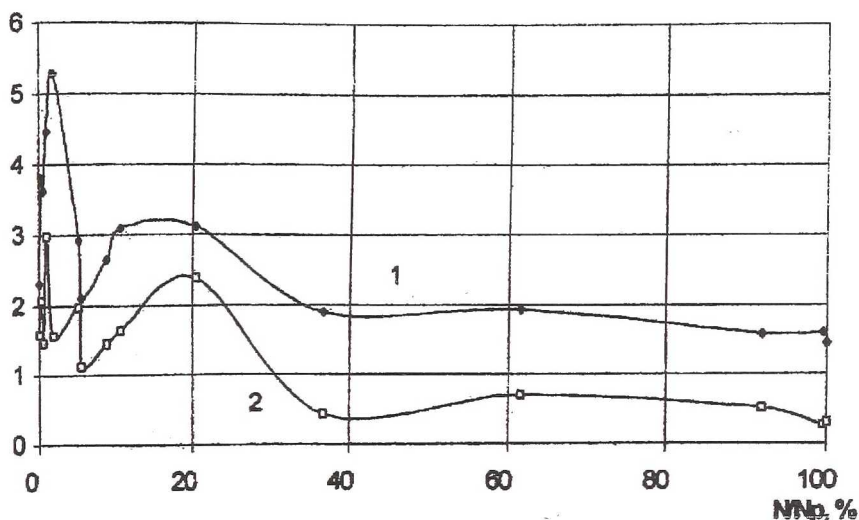


Рис. 1. Кинетические зависимости усредненных значений (кривая 1) и дисперсии (кривая 2) угла сдвига фаз в поверхностном слое листового титанового образца, испытанного при циклическом изгибе (количество циклов до разрушения $N_p = 1,9 \cdot 10^9$ цикл)

Выбор моментов проведения измерения сдвига фаз с прекращением циклического нагружения образца был обусловлен изменениями как в резонансной частоте, так и через заданные промежутки времени после начала испытаний. Были выполнены измерения характеристического параметра (угла сдвига фаз) подповерхностных объемов материала для 15 этапов циклического нагружения. Это позволило получить достоверную информацию об особенностях кинетических зависимостей характеристических параметров (среднего значения и дисперсии угла сдвига фаз) структурной неоднородности на разных стадиях усталости.

Показано, что в процессе усталости исходная неоднородность структуры микронапряжений на границе раздела обладает определенными кинетическими свойствами, которые могут быть выражены через параметры стационарного стохастического процесса. Установлено, что на инкубационной стадии усталости исследованного сплава существует сложная немонотонная зависимость обобщенных параметров структурной неоднородности поверхностного слоя от относительной наработки до разруше-

ния, а экстремальные точки полученной зависимости коррелируют с закономерностями изменения остаточных напряжений и формирования дислокационной структуры.

Таким образом, анализ статистических характеристик физико-механических свойств, определенных в определенной зоне образца по множеству его локальных микрообъемов, дает представление об исходном механическом состоянии материала. Кинетика изменения статистических характеристик, полученная путем мониторинга свойств структурного материала на стадиях предразрушения, дает оценку состояния его поврежденности при усталостном разрушении.

В разработанном измерительном комплексе электромагнитный метод неразрушающего контроля поверхности металлических материалов реализован на основе токовихревого метода [3 - 5]. Работа дефектоскопа основана на взаимодействии переменного электромагнитного поля датчика прибора с объектом контроля. Наличие дефектов и несплошностей микро-структуры, которые увеличивают траекторию вихревых токов, обуславливает изменение амплитуды и фазы электромагнитного поля, которое излучает датчик контроля. В результате аппаратурной обработки параметров суммарной электромагнитной волны дефекты, которые внесли эти изменения, могут быть выявлены с максимальной разрешающей способностью. Применяемые в данном приборе технические решения дают возможность выявить такие дефекты, как трещины, раковины, несплошности, коррозионные язвы, расслоения, а также дефекты под нанесенным на поверхность материала покрытием.

Составляющими элементами прибора являются: высокочастотный LC - генератор, настроенный на частоту 3,5 МГц; фильтр, выделяющий постоянную составляющую из колебаний генератора; компаратор, сравнивающий величину этой составляющей с некоторым опорным напряжением; низкочастотный управляемый звуковой генератор, вырабатывающий вместе с блоком индикации звуковой и световой сигналы при обнаружении датчиком дефекта в объекте контроля.

Датчик прибора представляет собой катушку, намотанную на ферритовом стержне диаметром 3 мм. Индуктивность катушки, вместе с емкостью конденсатора C , определяют рабочую частоту генератора. Его частота выбрана достаточно высокой для создания большой плотности вихревых токов в зоне дефекта с целью повышения чувствительности прибора к коротким трещинам.

Конструкционные размеры катушек можно выбирать в соответствии с условиями контроля, ориентируясь на размеры и форму контролируемого объекта, его доступность для исследований, месторасположение возможных дефектов, надежность и оперативность контроля.

Использованный в измерительном комплексе разработанный авто-рами дефектоскоп нечувствителен к шероховатости поверхности и выявляет дефекты при $Rz > 60$. Отсутствует влияние краевого эффекта и эффекта отвода датчика. Автоматическая электронная калибровка прибора на объекте контроля в неповрежденном месте существенно повысила надежность прибора, а также исключила влияние износа наконечника датчика контроля, присущее другим аналогам. Схемная реализация прибора позволяет выявлять дефекты под изоляционным покрытием до 5 мм, делает возможным в конструкции наконечников использовать износостойкие полимерные покрытия, а также ограничивать положение датчика относительно контролируемой поверхности.

К преимуществам разработанного комплекса неразрушающего контроля следует автоматическую настройку на исследованный материал, а диапазон выявления трещин в случае применения к лопаткам газотурбинных двигателей составляет: глубина - больше 0,2 мм, длина - больше 0,2 мм; ширина - больше 0,1 мкм.

Таким образом, предложенный в работе измерительный комплекс неразрушающего контроля состояния поверхности элементов конструкции газотурбинных двигателей позволяет с высокой разрешающей способностью оценивать кинетику поверхностного рассеянного и локального повреждений, что важно при создании изделий большого ресурса.

Список литературы

1. Писаренко Г.Г., Войналович А.В., Голованев Ю.М., Васинюк И.М. Исследование закономерностей изменения статистических свойств титановых сплавов при циклическом нагружении // Проблемы прочности, 2001, № 3. — С. 80 — 87.
2. Матохнюк Л.Е. Ускоренные усталостные испытания высокочастотным нагружением. - Киев: Наук.думка, 1988. -200с.
3. Писаренко Г.Г.,- Войналович А.В., Васинюк И.М. К исследованию кинетики малых поверхностных трещин при высокочастотном нагружении легких сплавов // Проблемы прочности, 2000, № 2. С.
4. Чаплыгин В.Н., Абабков Г.В. Электромагнитный метод обнаружения и регистрации роста усталостных трещин// Вопросы авиац. науки и техники. - 1995. - № 1. - С. 241 - 246.
5. Учанин В.Н. Методы количественного вихретокового контроля с определением параметров дефектов. // Техническая диагностика и неразрушающий контроль, 2002. - № 1. - С. 33 -38.