

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ УКРАИНЫ
ЗАПОРЖСКИЙ ОРДЕНА "ЗНАК ПОЧЕТА" МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ
им. В.Я.Чубаря

На правах рукописи

БЕЛЕНОВ Сергей Александрович

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПРОЧНОСТИ
И РАЗРУШЕНИЯ ОБРАЗЦОВ И ДЕТАЛЕЙ АВИАЦИОННЫХ ГТД
ПРИ СТАТИЧЕСКОМ И ЦИКЛИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ

Специальность 01.02.04 – Механика деформируемого
твердого тела

01.02.06 – Динамика, прочность
машин, приборов и аппаратуры

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Запорожье 1993



Работа выполнена в Запорожском ордена "Знак Почета" машиностроительном институте им. В.Я. Чубаря

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
А.Б. Ройтман

Научный консультант: доктор технических наук,
член-корреспондент АН РБ
И.И. Маолов

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
В.В. Левитин
доктор технических наук, профессор
В.Ф. Терентьев

Ведущее предприятие: НИИ Механики и прикладной математики
Ростовского государственного университета

Защита состоится "7" сентября 1993 года в 15⁰⁰
часов на заседании специализированного совета К 068.38.01 при
Запорожском ордена "Знак Почета" машиностроительном институте
им. В.Я. Чубаря по адресу: 330063, г. Запорожье, ГСП-39,
ул. Луковского, 64

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан 7 июня 1993 года.

Ученый секретарь
специализированного совета
д.т.н., профессор

И.П. Волчок

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Одной из актуальных проблем, связанных с развитием современного турбостроения, является проблема обеспечения прочности и надежности деталей и узлов турбомашин. Существующие в настоящее время модели, основанные на применении аналитических решений к моделированию процесса многоциклового усталостного разрушения, не позволяют объяснить многие экспериментальные данные. Поэтому для прогнозирования ресурса и долговечности элементов ГТД, испытывавших воздействие циклических нагрузок, необходимо дальнейшее совершенствование методов определения напряженного и деформированного состояния на основе уточнения моделей развития усталостного разрушения.

В последнее время широкое распространение получил акустико-эмиссионный метод неразрушающего контроля. Структурные превращения, изменение напряженно-деформированного состояния материала сопровождаются излучением сигналов акустической эмиссии (АЭ) задолго до наступления его разрушения. В этой связи весьма плодотворным в решении задачи оценки работоспособности материалов с различным напряженно-деформированным состоянием поверхностного слоя может оказаться подход, основанный на анализе акустико-эмиссионных характеристик различных сплавов или одного сплава с различным качеством поверхности, обусловленным технологической наследственностью исследуемых объектов.

Целью настоящей работы является отработка метода акустической эмиссии для оценки процессов деформирования и разрушения при статических и циклических нагрузках, действующих на детали из распространенных в турбостроении сплавов на никелевой основе, имеющих различное напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя; разработка критериев оценки характеристик сопротивления усталости по данным акустико-эмиссионного контроля.

В работе были поставлены следующие задачи:

- разработать методику определения характеристик акустико-эмиссионного излучения образцов и деталей из жаропрочных сплавов на никелевой основе при статическом и циклическом нагружении;
- разработать критерии оценки прочностных характеристик сплава никеля с различным напряженно-деформированным состоянием поверхностного слоя по параметрам акустической эмиссии;
- изучить кинетику процесса усталостного разрушения модельных об-

разцов и деталей ГТД методом акустической эмиссии с целью разработки критериев для прогнозирования остаточной долговечности изделий по данным неразрушающего АЭ-контроля.

Научная новизна работы. С использованием акустико-эмисионного критерия оценки напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя изделий, имеющих различную технологическую наследственность, рассмотрен новый подход к выбору видов и режимов поверхностной обработки, к оценке накоплений повреждений в материалах и прогнозу эксплуатационной долговечности деталей ГТД.

На основании исследованных параметров, характеризующих стадийное накопление усталостных повреждений, предложен новый способ определения трещинообразования непосредственно в процессе усталостных испытаний по моменту изменения параметров акустической эмиссии, который соответствует линии Френча на обобщенной диаграмме усталости.

Получены экспериментальные данные, которые позволяют, исходя из концепции стадийности разрушения, прогнозировать остаточную долговечность образцов и лопаток ГТД из жаропрочных сплавов на никелевой основе.

Практическая ценность работы. Предложена экспериментальная установка и методика для акустико-эмисионного контроля технического состояния материала изделий, позволяющая в лабораторных условиях проводить сравнительную оценку работоспособности деталей ГТД, подвергаемых различным технологическим воздействиям.

Получены экспериментальные данные о влиянии технологических факторов на физико-механические, эксплуатационные и акустико-эмисионные характеристики хромоникелевого сплава. Установлены закономерности, связывающие величину остаточных напряжений и предела выносливости с уровнем акустико-эмисионной активности модельных образцов, позволяющие более оперативно и с меньшими затратами решать вопрос выбора оптимального вида и режимов поверхностной обработки деталей ГТД с целью обеспечения требуемой работоспособности последних.

Реализация работы. Отдельные результаты диссертационной работы использованы на одном из моторостроительных заводов авиационной промышленности при выборе оптимального вида и режимов поверхностной обработки деталей ГТД из жаропрочных сплавов на никелевой основе.

Адресация работы. Результаты работы д.к.ладывались и обсужда-

лись на: III Республиканской научно-технической конференции "Повышение надежности и долговечности машин и сооружений" (г. Запорожье, 1988), III, IV, V Всесоюзных конференциях "Новые конструкционные стали и сплавы и методы их обработки для повышения надежности и долговечности изделий" (г. Запорожье, 1986, 1989, 1992), XXIII и XXIV Всесоюзных научных совещаниях по проблемам прочности двигателей (г. Москва, 1990, 1992). III Всесоюзном симпозиуме по механике разгнания (г. Житомир, 1990), Международной конференции по нормированию летной годности и сертификации авиадвигателей (г. Загорск, 1990), XI Международном коллоквиуме "Механическая усталость металлов" (г. Киев, 1991), I Всесоюзной конференции "Технологические проблемы прочности неосуженных конструкций" (г. Запорожье, 1991), Международном симпозиуме по неразрушающим испытаниям и определению напряжений/деформаций (г. Токио, 1992).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 12 работ, получено 2 авторских свидетельства и положительное решение на выдачу патента.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка использованной литературы, включающего 169 наименований, и приложения. Работа изложена на 100 машинописных страницах, содержит 12 таблиц, 28 иллюстраций.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, отражена ее научная и практическая значимость, намечены цели исследования.

В первой главе выполнен анализ проблем, связанных с исследованием и оценкой процессов разрушения изделий в условиях циклического нагружения методом акустической эмиссии. Показано, что рассмотренные представления об усталостном разрушении, основанные на концепции стадийности, могут быть успешно использованы для инженерных расчетов характеристик сопротивления усталости при условии разработки информативных простых и надежных методов определения параметров, характеризующих стадии разрушения. Проанализированы известные из литературных источников косвенные методы определения характеристик сопротивления усталости. Показано, что совершенствование методов ускоренного определения пределов выносливости металлов связано во многом с разработкой новых, более чувствительных методов измерения циклических неупругих деформаций,

а также с обоснованной классификацией сплавов по уровню циклических неупругих деформаций, соответствующих пределу выносливости. В результате анализа методов решения проблемы обеспечения надежности изделий под действием циклических нагрузок показано, с одной стороны, что получение адекватной модели развития усталостного разрушения возможно путем применения новых подходов к оценке напряженно-деформированного состояния материала, работающего в области многоциклового усталости, а с другой – показана перспективность использования акустико-эмиссионного метода при решении таких вопросов, как экспериментальное определение изменения напряженно-деформированного состояния микрообъемов, определяющих процесс усталости. Рассмотрены также возможности акустической эмиссии для решения некоторых прикладных задач. В частности, показано, что метод АЭ дает принципиальную возможность раннего обнаружения и классификации дефектов как по размерам, так и по степени опасности независимо от их положения и ориентации. Однако, для использования этих преимуществ рассматриваемого метода требуется решить ряд проблем, связанных с разработкой методов прогнозирования предельного состояния конструкций на основе анализа АЭ-сигналов. В то же время, найденные корреляционные связи между характеристиками дефектов, в частности трещин, и параметрами АЭ справедливы лишь для определенных классов материалов и нередко противоречат друг другу. Применение аналитических, полуэмпирических и эмпирических зависимостей иногда затруднительно из-за несопоставимости данных, полученных на различной акустико-эмиссионной аппаратуре.

Исходя из современного состояния вопроса, сформулированы задачи настоящего исследования.

Во второй главе проанализирована связь напряженно-деформированного состояния у вершины трещины нормального отрыва с параметрами акустической эмиссии. С использованием соотношений теории малых упругопластических деформаций для аналитического решения задачи по определению полей напряжений и деформаций получено уравнение контура упругопластической области у вершины трещины нормального отрыва, параметрами которого являются внешняя нагрузка и механические характеристики материала, в виде:

$$r(\varphi) = D_1 \sin^2 \varphi \left[\frac{2 \sin^2 \frac{\alpha}{2} \varphi + \sqrt{16 \tau_c^2 / \rho^2 + \frac{3}{4} D_1 \sin 2\varphi \sin \varphi - 4 \cos^2 \frac{\alpha}{2} \varphi}}{2(16 \tau_c^2 / \rho^2 + \frac{3}{4} D_1 \sin 2\varphi \sin \varphi - 4)} \right]^2, \quad (I)$$

где r – безразмерный радиус (отношение величины радиус-вектора точки \vec{r} к длине трещины $2l$); P – нагрузка, приложенная перпендикулярно трещине-разрезу в бесконечной пластине; τ_0 – предел текучести на сдвиг; D_1 – постоянная интегрирования.

Конфигурация упругопластической области является двухлепестковой. Контуры областей, соответствующие разным уровням прилагаемой нагрузки, не пересекаются друг о другом. С увеличением нагрузки размер исследуемой области возрастает. В предположении, что интенсивность АЗ пропорциональна размеру области необратимых пластических деформаций (область активных источников АЗ) определено, что интенсивность АЗ пропорциональна величине внешней нагрузки в четвертой степени. Переходя в дальнейшем от параметра внешней нагрузки к характеристикам локального напряженного состояния у вершины трещины, т.е. к коэффициенту интенсивности напряжений $K = \sigma\sqrt{\pi l}$ (здесь σ – однородное растягивающее напряжение, приложенное бесконечно далеко от трещины), получена зависимость:

$$\dot{N} = Y \cdot K^4, \quad (2)$$

где Y – коэффициент, характеризующий материал, условия нагружения и роста трещины.

Отмечено, что зависимость (2) является частным случаем эмпирической формулы Х.Данегана, что говорит о применимости предлагаемой модели для исследования динамики развития повреждений в материале по параметрам АЗ непосредственно в процессе нагружения и деформирования исследуемых объектов.

Решен ряд методических вопросов, связанных с разработкой средств для определения сравнительных характеристик работоспособности деталей ГТД с различным напряженно-деформированным состоянием поверхностного слоя по параметрам акустической эмиссии. Показано, что исследуемый сплав ХН77ТФР-ВД генерирует достаточно мощные сигналы АЗ при достижении критических напряжений, что позволяет их оценивать с помощью таких сигналов и применять метод АЗ для изучения деформационных и фрактальных процессов. Установлено, что напряженно-деформированное состояние рабочей поверхности модельных образцов практически не влияет на их базовые акустико-эмиссионные характеристики при испытаниях в условиях одноосного растяжения. Разработана геометрия модельного образца, имитирующего различную технологическую наследственность натуральных изделий. Определены виды нагружающих устройств для статических и динами-

ческих исследований деталей методом акустической эмиссии в условиях поперечного изгиба. Показано, что для решения поставленных в работе задач целесообразно применение серийного акустико-эмиссионного прибора АЭ-15 с комплектом преобразователей АЭ, для которых получены амплитудно-частотные характеристики.

Разработана экспериментальная установка, позволяющая осуществлять акустико-эмиссионный контроль технического состояния материала объектов исследования после различных технологических операций, а также изучать кинетику усталостного разрушения методом АЭ. Структурная схема установки представлена на рис. 1.

Установка состоит из трех основных блоков. Блок нагружения I, предназначенный для выявления акустико-эмиссионной активности материала исследуемого объекта, в зависимости от вида испытаний может быть создан на базе статического механического нагружающего устройства (а) или на базе динамического нагружающего устройства (б). Структурное отличие для двух указанных блоков нагружения в общей схеме установки заключается в месте крепления датчика АЭ. В случае квазистатического нагружения пьезоэлектрический преобразователь крепится непосредственно на контролируемый объект. В случае же динамического нагружения датчик АЭ устанавливается на элемент зажимного приспособления, в котором жестко закреплен объект исследования. Акустико-эмиссионный блок II включает в себя: пьезоэлектрический преобразователь сигналов АЭ I, соединенный последовательно с предварительным усилителем АЭ-сигналов 2 и усилителем фильтров 3 прибора АЭ-15. Усиленные и отфильтрованные по частоте сигналы АЭ с выходов прибора АЭ-15 поступают в блок записи и обработки III. Сначала сигналы АЭ попадают в модули ввода число-импульсных сигналов СМ-1800.2301 4, выходы которых связаны с микро-ЭВМ СМ-1800 5. По программе, записанной на языке BASIC, микро-ЭВМ с дискретностью, заданной в таймере, заносит параметры сигналов АЭ в оперативное запоминающее устройство. Происходит обработка данных по выбранной исследователем программе. Результаты машинной обработки выводятся на периферийное устройство (дисплей, ЦПУ, графопостроитель) 6.

Для осуществления АЭ-контроля напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя объектов исследования с использованием описанной установки разработана специальная методика. С целью выявления АЭ-активности контролируемый объект нагружается ступенчато в условиях поперечного изгиба. Нагружение осуществля-

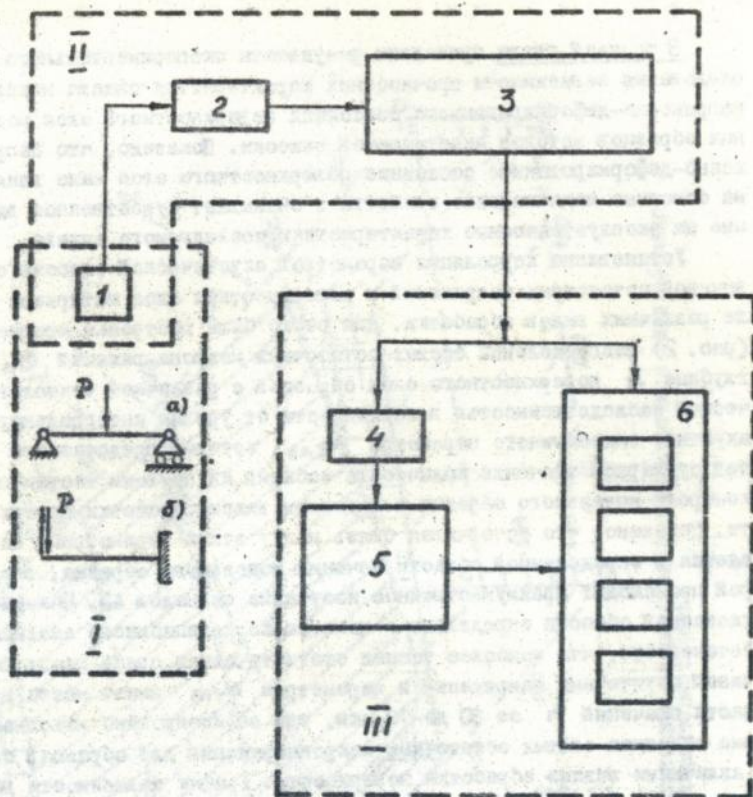


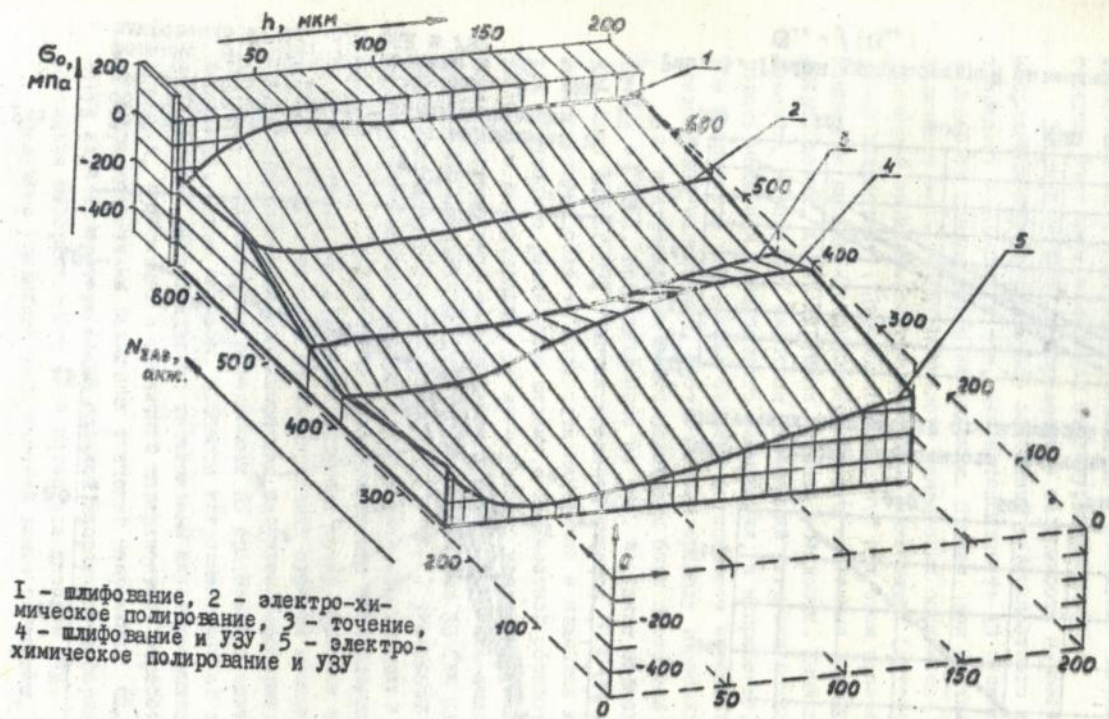
Рис. 1. Структурная схема установки для акустико-эмисионного контроля технического состояния материала изделий

еся до напряжений, близких к пределу текучести материала, т.е. до нагрузки, превышение которой вызывает макропластическую деформацию поверхностных слоев материала. После каждого шага нагружения (от 50 до 100 МПа) производится выдержка объекта под нагрузкой (от 10 до 30 с), в течение которой осуществляется регистрация и обработка сигналов АЭ.

В третьей главе приведены результаты экспериментального исследования зависимости прочностных характеристик сплава никеля от напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя модельных образцов методом акустической эмиссии. Показано, что напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя мало влияет на основные механические свойства и оказывает существенное влияние на эксплуатационные характеристики исследуемого сплава.

Установлена корреляция параметров акустической эмиссии с величиной остаточных напряжений в поверхностном слое материала после различных видов обработки. Для этого были построены кривые (рис. 2) распределения осевых остаточных макронапряжений σ_0 по глубине h поверхностного слоя образцов с различной технологической наследственностью в зависимости от уровня интегрального акустико-эмиссионного параметра $N_{\Sigma АЭ}$, который представляет собой суммарное значение количества событий АЭ по всем тестам при контроле модельного образца с заданным видом обработки поверхности. Показано, что уточняя связь между этими параметрами наблюдается в определенной области сечения модельного образца, в которой происходит преимущественное излучение сигналов АЭ. Положение указанной области определено с помощью корреляционного анализа. Установлено, что наиболее тесная статистическая связь между величиной остаточных напряжений и параметром $N_{\Sigma АЭ}$ имеет место в области значений h от 30 до 70 мкм, где зафиксированы максимальные значения осевых остаточных макронапряжений для образцов с различными видами обработки поверхности. График зависимости величины σ_0 в указанной области значений h от параметра $N_{\Sigma АЭ}$ представлен на рис. 3.

Предлагается новый подход к определению характеристик сопротивления усталости по моменту перехода системы из квазистатического состояния в динамическое. При напряжениях, меньших предела выносливости, несмотря на действие переменных напряжений, материал не разрушается, т.е. система может рассматриваться как квазистатическая. При напряжениях, больших σ_w , происходит качественное изменение механизма воздействия на материал и задача становится динамической. Исходя из этого, естественно предположить, что при напряжениях, не превышающих предел выносливости, весь материал изделия работает в едином напряженно-деформированном состоянии а при напряжениях, превышающих σ_w , напряженно-деформированное состояние в отдельных микрообъемах поверхностного слоя оу-



1 - шлифование, 2 - электро-химическое полирование, 3 - точение,
 4 - шлифование и УЗУ, 5 - электро-химическое полирование и УЗУ

Рис. 2. Распределение остаточных напряжений в поверхностном слое образцов с различными АЗ-характеристиками

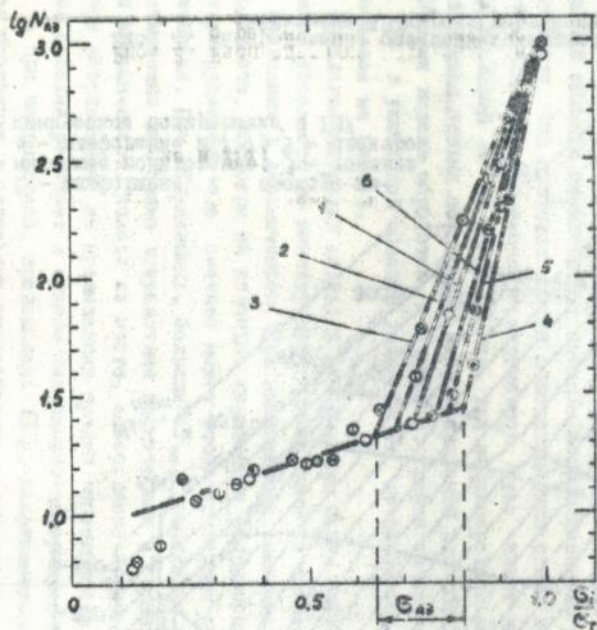


Рис. 4. Зависимости суммарной АЗ от напряжений в образцах после различных видов поверхностной обработки: 1 - точение, 2 - шлифование, 3 - ЭХП, 4 - точение и УЗУ, 5 - шлифование и УЗУ, 6 - ЭХП и УЗУ

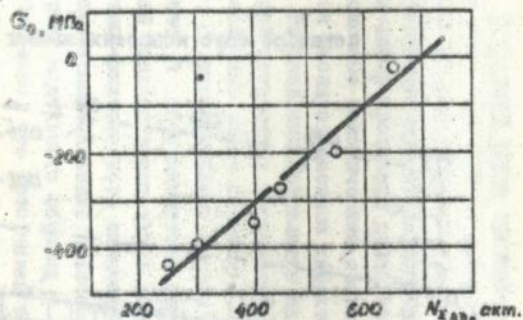


Рис. 3. График зависимости величины остаточных напряжений от параметра $N_{\text{ЭАВ}}$

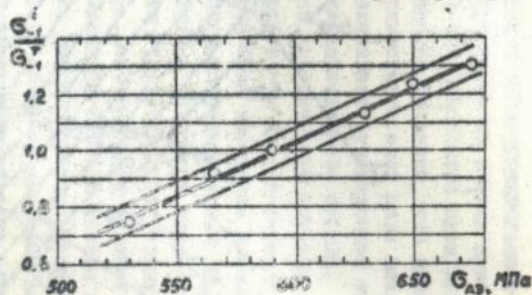


Рис. 5. График регрессионной зависимости $G_0 = f(G_{\text{АЗ}})$

щественно изменяется. Это объясняется блочностью структуры поликристаллического материала, в которой при нагружении действует дислокационный механизм, приводящий к изменению напряженного состояния отдельных элементов структуры материала.

Экспериментальное определение зависимости параметров АЗ от напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя подтверждает положение о том, что интенсивность АЗ экспоненциально зависит от приложенного напряжения. Причем, при достижении определенного значения номинального напряжения показатель степени указанной зависимости скачкообразно изменяется (интенсивность АЗ резко возрастает). Предполагается, что при этом происходит резкое изменение напряженно-деформированного состояния в определенных микрообъемах, контролируемых процессом усталости. Начиная с этого момента, в условиях действия переменной нагрузки начинает действовать механизм усталостного разрушения, а напряжение, при котором изменяется показатель степени зависимости интенсивности АЗ от приложенных напряжений, соответствует пределу выносливости.

Для подтверждения этого положения были построены зависимости $\lg N_{Az} = f(\sigma)$, представленные на рис. 4. Такие зависимости имеют два явно выраженных участка. Плогий участок ($0 < \sigma_i \leq \sigma_{Az}$), соответствует области упругости материала и является идентичным для образцов с различными видами поверхностной обработки из одного и того же материала. На этом участке увеличение напряжений в поверхностном слое сопровождается низкой акустико-эмиссионной активностью. Интенсивное увеличение параметров АЗ (на один-два порядка) на втором участке ($\sigma_{Az} < \sigma_i < \sigma_r$) указанной зависимости, по-видимому, обусловлено процессами микропластической деформации, протекающими в микрообъемах поверхностного слоя материала. Значение напряжения σ_{Az} , соответствующее точке перегиба функции $\lg N_{Az} = f(\sigma)$, зависит от интегральных свойств поверхностного слоя и определяет момент изменения напряженно-деформированного состояния микрообъемов поверхности по сравнению с основной массой материала. Таким образом, процессы микропластической деформации поверхности, сопровождаемые интенсивным акустико-эмиссионным излучением, в образцах с различной поверхностной обработкой начинаются при достижении различных значений напряжения σ_{Az} , которые могут служить критериальной оценкой напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя материала деталей ГТД.

Получено уравнение эмпирической линии регрессии, связывавшее

предел выносливости σ_{-1} с характеристическим напряжением σ_{AB} , графическое изображение которого с 95 % доверительным интервалом показано на рис. 5.

В четвертой главе изложены результаты исследования кинетики процесса усталостного разрушения никелевого сплава методом акустической эмиссии.

На рис. 6 показаны зависимости интенсивности АЭ \dot{N}_{AE} от относительной долговечности образцов с различной технологической наследственностью. Здесь кривые 1 соответствуют образцам, обработанным точением, кривые 2 — шлифованием, кривые 3 — шлифованием с последующим электро-химическим полированием. Анализ приведенных акустограмм показывает, что на характер акустико-эмиссионного распределения оказывает влияние не столько уровень номинальных максимальных напряжений в цикле усталостных испытаний, сколько физические процессы, определяющие долговечность образца. Идентичность поведения АЭ при различных уровнях приложенных циклических напряжений для образцов с различной технологической наследственностью объясняется термофлуктуационной природой процесса разрушения. По Хуркову, долговечность тела при циклическом режиме нагружения определяется формулой:

$$\tau_i = \tau_0 \exp \frac{U_0 - \gamma_i^* \sigma_i}{k T_i^*} \quad (3)$$

где τ_0 — постоянная, соответствующая по порядку величины периоду тепловых колебаний атомов, k — постоянная Больцмана, U_0 — начальная энергия активации процесса разрушения, совпадающая с энергией активации распада межатомных связей, γ_i^* — коэффициент, характеризующий уровень локальных перенапряжений в местах, где развивается разрушение. Полагая, что локальный разогрев материала за счет работы внешних сил T_i^* при различных значениях приложенного напряжения σ_i изменяется незначительно (поглощаемая энергия превращается в тепло лишь частично, а частично переходит в латентную энергию, изменяя структуру и дефектность материала), т.е. $T_i^* = \text{const}$, и учитывая, что величины τ_0 и U_0 — структурно нечувствительны, то уравнение (3) для трех, приведенных на рис. 6 случаев, сводится к условию:

$$\gamma_1^* \sigma_1 = \gamma_2^* \sigma_2 = \gamma_3^* \sigma_3 \quad (4)$$

Таким образом, одинаковые значения долговечности при различных уровнях номинальных циклических напряжений могут быть достигнуты

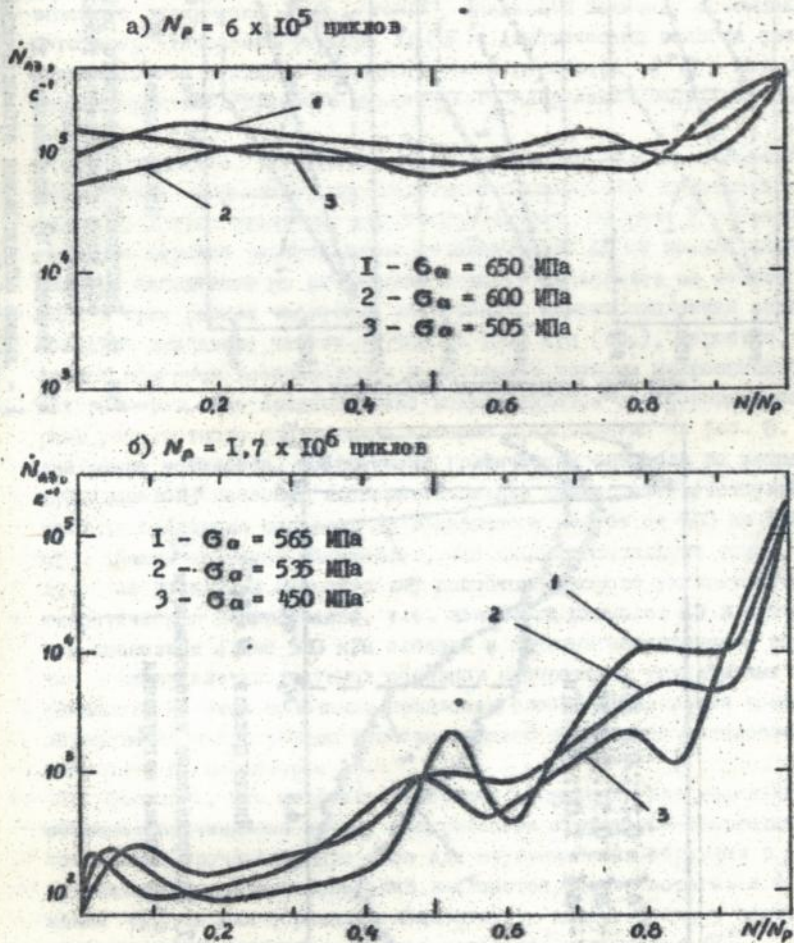


Рис. 6. Зависимости интенсивности АЗ от относительной долговечности образцов из сплава ХН77ТДР-ВД после различных видов окончательной обработки

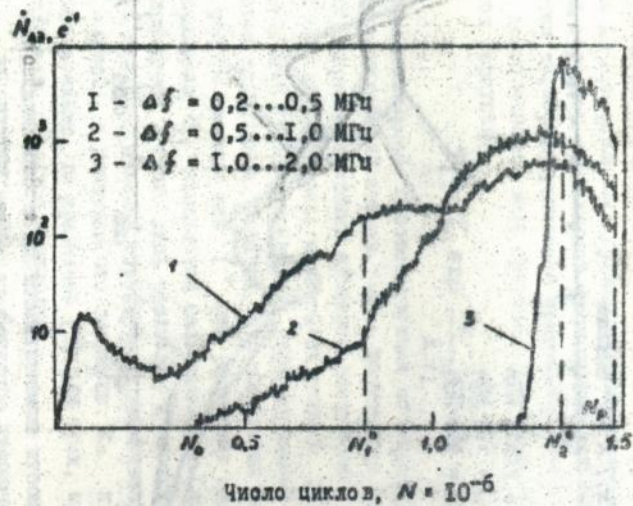


Рис. 7. Распределение интенсивности АЭ по циклам нагружения

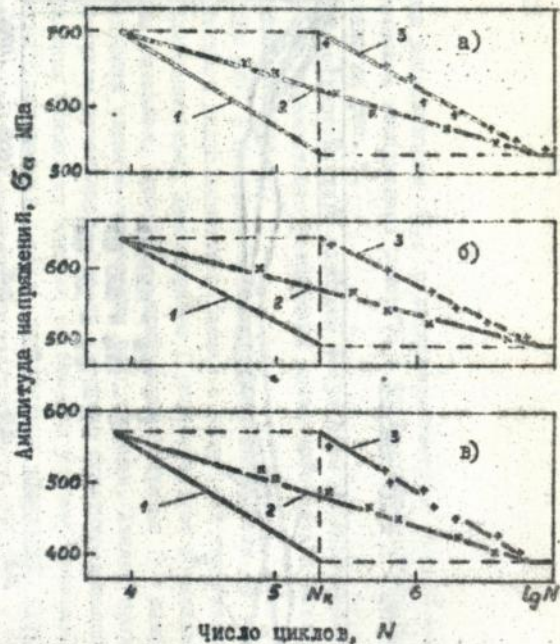


Рис. 8. Диаграммы усталостного разрушения образцов с различной технологической наследственностью:

а) - точение, б) шлифование, в) - ЭКП;

1 - линия образования субмикроскопических трещин, 2 - линия Френча, 3 - кривая усталости

лишь при различных значениях показателя локальных перенапряжений δ_i^* , которые обуславливают в данном случае постоянство величины внешнего возмущения $\delta_i^* \sigma_i = const$, снижающей величину потенциального энергетического барьера $U(\sigma)$. Акустическая эмиссия при этом является откликом энергетического параметра $\delta^* \sigma$, который регистрируется в процессе циклического нагружения модельных образцов.

Установлено, что различным механизмам накопления и развития усталостных повреждений соответствуют определенные характеры сигналов АЭ в трех различных диапазонах частот. На рис. 7 показана типичная картина распределения интенсивности АЭ от начала циклического нагружения до разрушения изделий из сплавов на основе никеля в трех разных частотных диапазонах. Момент появления сигналов АЭ в диапазоне частот от 500 до 1000 кГц (N_0), вероятно, является моментом возникновения в материале трещины микроскопических размеров. Это предположение подтверждается построением диаграмм усталостного разрушения, которые представлены на рис. 8. На диаграммы усталости, построенные графическим способом по методике В.С.Ивановой, нанесены экспериментальные точки, соответствующие моменту появления сигналов АЭ в диапазоне частот от 500 до 1000 кГц. Анализ графиков показывает, что экспериментальные точки, полученные по данным АЭ-контроля, достаточно хорошо укладываются на теоретическую линию Френча, т.е. появление сигналов АЭ в частотном диапазоне свыше 500 кГц связано с началом накопления и развития в материале исследуемых образцов необратимых усталостных повреждений. На этом основании предложен способ определения момента образования микротрещины непосредственно в процессе усталостных испытаний по параметрам АЭ.

Показано, что пороговые значения напряжений для модельных образцов подчиняются закону дискретности структурно-энергетической теории прочности. При этом для неупрочненных образцов в результате усталостных испытаний выявляется второе пороговое напряжение σ_w^u , а для образцов, подвергнутых поверхностному пластическому деформированию - третье пороговое напряжение σ_w^m .

Проведенными исследованиями усталостного разрушения сплава ХН77ТЮР-ВД также установлено, что специфические значения числа циклов нагружения N_1^* и N_2^* , выделенные на рис. 7 (N_1^* - начало повышенной активности АЭ в диапазоне частот от 500 до 1000 кГц, N_2^* - максимум интенсивности АЭ в диапазоне частот от 1 до 2 МГц),

связаны соотношением:

$$\lg N_1^*/\lg N_2^* = \Delta^{1/8} \cdot \Delta^{1/16} \cdot \Delta^{1/32} \quad (5)$$

и отвечает моменту смены механизма стабильного развития трещины и моменту образования магистральной трещины критического размера соответственно. Здесь Δ - универсальная постоянная разрушения. Этими моментами период распространения трещины разделяется на три стадии с реализацией различных механизмов разрушения. Подтверждение представленных результатов, получено в результате микрофрактографического анализа стадий усталостного разрушения путем количественного анализа топографии излома с помощью угольных реплик. Исходя из закономерностей дискретного роста усталостной трещины, получено соотношение:

$$\delta_a/\delta_s = (K_{Ia}/K_{Is})^2 = \left[\Delta^{1/32} \cdot (\lg N_1^*/\lg N_2^*) \right]^2, \quad (6)$$

которое позволяет производить оценку остаточной долговечности изделий по данным неразрушающего АЭ-контроля в процессе испытаний или эксплуатации.

Показана идентичность распределений акустико-эмиссионной активности в процессе усталостных испытаний модельных образцов и реальных деталей ГТД из жаропрочных сплавов на никелевой основе, что позволяет распространить методику расчета остаточной долговечности образцов на реальные детали.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЕ

1. На основе анализа напряженно-деформированного состояния у вершины трещины нормального отрыва получены уравнение контура упругопластической области активных источников акустической эмиссии и зависимость между интенсивностью АЭ и коэффициентом интенсивности напряжений.

2. Создана экспериментальная установка и разработана методика акустико-эмиссионного контроля технического состояния поверхностного слоя материала изделий, позволяющего производить сравнительную оценку их работоспособности.

3. Установлена корреляция параметров акустической эмиссии с величиной остаточных напряжений в поверхностном слое материала модельных образцов.

4. Предложен подход к исследованию процесса усталости, за-

ключавшийся в том, что предел выносливости рассматривается как пороговое значение циклического напряжения, при котором происходит переход системы из квазистатического состояния в динамическое, сопровождающийся существенным изменением характера напряженно-деформированного состояния микрообъемов поверхностного слоя по сравнению с напряженно-деформированным состоянием основной массы материала.

5. Предложен акустико-эмиссионный критерий оценки характера напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя изделий из сплава ХН77ТДР-ВД после различных видов поверхностной обработки, которым является характеристическое напряжение σ_{A3} , соответствующее точке перегиба интегральной зависимости $\lg N_{A3} = f(\sigma)$. Получено уравнение эмпирической линии регрессии, связывающее предел выносливости σ_{-1} с характеристическим напряжением σ_{A3} .

6. Установлено, что изменения интенсивности АЗ в различных частотных диапазонах образцов и реальных деталей в процессе их циклического нагружения имеют немонотонный, стадийный характер, который обусловлен структурными изменениями, связанными с механическими характеристиками исследуемого материала.

7. Показано, что число циклов нагружения модельных образцов, при котором зафиксировано появление сигналов АЗ в частотном диапазоне от 500 до 1000 кГц, соответствует линии Френча на обобщенной диаграмме усталости. Предложен способ определения момента образования микротрещины по параметрам акустической эмиссии.

8. Установлено наличие трех стадий усталостного разрушения сплава ХН77ТДР-ВД, каждая из которых имеет различный характер АЗ-излучения в трех диапазонах частот. Показано, что пороговые значения основных параметров, характеризующих эти стадии, подчиняются закону дискретности структурно-энергетической теории прочности. Моменты смены стадий развития микротрещины предложено определять по изменениям интенсивности АЗ в различных диапазонах частот.

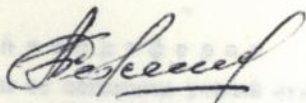
Основные результаты диссертационной работы нашли свое отражение в следующих публикациях:

1. Беженев С.А., Куземко В.А. Определение области активности акустической эмиссии у вершины трещины нормального отрыва /Запорож. машиностр. ин-т. - Запорожье, 1988. - 9 с. - Деп. в УкрНИНТИ II.03.88, № 65I Ук-88.

2. Куземко В.А., Беженов С.А. Исследование малоциклового усталости в условиях вибрации методом акустической эмиссии // "Повышение надежн. и долговечн. машин и сооружений": Тез. докл. III Республ. научно-техн. конф.: В 2 ч. - К.: Ин-т пробл. прочности АН УССР, 1988. - Ч. 2. - С. 6.
3. Куземко В.А., Беженов С.А. Акустико-эмиссионный анализ процессов малоциклового усталости /Повышение надежн. и долговечн. деталей машин и конструкций: Сб. научн. тр. - К.: УМК Ю, 1988. - С. 96 - 100.
4. Беженов А.И., Беженов С.А. Исследование влияния состояния поверхностного слоя никелевого сплава на его долговечность в условиях циклического нагружения // "Новые констр. стали и сплавы и методы их обработки для повышения надежн. и долговечн. изделий": Тез. докл. IУ Всесоюзн. конф. - Запорожье, 1989. - С. 31-32.
5. Беженов А.И., Беженов С.А., Ройтман А.Б. Определение стадий усталостного разрушения методом акустической эмиссии // XXIII Всесоюзн. научн. собрание по проблемам прочности двигателей: Тез. докл. - М., 1990. - С. 21 - 22.
6. Ройтман А.Б., Беженов С.А. Исследование кинетики усталостного разрушения ник. левых сплавов методом акустической эмиссии // "Трещиностойкость материалов и элементов конструкции": Тез. докл. III Всесоюзн. соимпоз. по механике разрушения: В 3 ч. - К.: Ин-т пробл. прочности АН УССР, 1990. - Ч. I. - С. 106.
7. Roitman A.B., Bezhenov S.A. Use of the Acoustic Emission Method for Choosing Surface Treatment Conditions of Gas Turbine Engine (GT) Parts /Proc. of the Int. Conf. on Airworthiness and Certification of Aviation Engines. - Moscow, 1990. - P. 201-207.
8. Беженов С.А. О применении акустико-эмиссионного контроля для анализа усталостного разрушения материалов / Новые констр. материалы, эффективные методы их получения и обработки, повышения надежн. и долговечн. деталей машин и конструкций: Сб. научн. тр. - К.: УМК Ю, 1991. - С. 28 - 29.
9. Беженов С.А. О применении метода акустической эмиссии для оценки характеристик сопротивления усталости / "Технологич. проблемы прочности несущих конструкций": Труды I Всесоюзн. конф. - В 2-х т., 4-х ч. - Запорожье, 1991. - Т.2, Ч.2. - С. 242 - 247.
10. Беженов С.А., Ройтман А.Б., Хупожа В.П. Акустоэмиссионный способ контроля состояния поверхностного слоя изделий / М.к.л.⁵ 601N29/14; заявка № 4929671/28 от 04.02.91; положит. реше-

ние от 28.10.91 г.

- II. Roitman A.B., Bezhenov A.I., Bezhenov S.A. Fatigue Fracture Kinetics of Metal Alloys / Mechanical Fatigue of Metals : Proc. of the XI-th Int. Colloquium : (in 2 Vol.). - Kiev , 1992. - Vol. 2. - P. 66 - 72.
12. Ройтман А.Б., Беженов С.А., Степанов Н.В., Силин С.Л. Акусто-эмиссионный способ определения границ стадий усталостного разрушения изделий //Авторское свидетельство СССР № 1747942, кл. G 01N29/14, опубли. 15.07.92, Бюл. № 26.
13. Беженов А.И., Беженов С.А. Способ контроля трещинообразования //Авторское свидетельство СССР № 1748051, кл. G 01N29/14, опубли. 15.07.92, Бюл. № 26.
14. Roitman A.B., Bezhenov S.A. Use of the Acoustic Emission for Investigating Fatigue Fracture Kinetics of Ni-Alloy / Proc. of the Int. Symp. on Nondestructive Testing & Stress-Strain Measurement. - Tokyo, Japan, 1992. - P. 1 - 8.
15. Boguslaev V.A et al. Rapid Estimation of Endurance of Vases Using Acoustic Emission / Boguslaev V.A., Bezhenov S.A., Banas F.P. et al. / Proc. of the Int. Symp. on Nondestructive Testing & Stress-Strain Measurement. - Tokyo, Japan, 1992. - P. 9 - 15.



1. The first of these is the fact that the...
2. The second is the fact that the...
3. The third is the fact that the...
4. The fourth is the fact that the...
5. The fifth is the fact that the...
6. The sixth is the fact that the...
7. The seventh is the fact that the...
8. The eighth is the fact that the...
9. The ninth is the fact that the...
10. The tenth is the fact that the...

БЕЖЕНОВ Сергей Александрович

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ
ПРОЧНОСТИ И РАЗРУШЕНИЯ ОБРАЗЦОВ И ДЕТАЛЕЙ
АВИАЦИОННЫХ ГТД ПРИ СТАТИСТИЧЕСКОМ И ЦИКЛИЧЕСКОМ
ДЕФОРМИРОВАНИИ

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано к печати 04.05.93 г. Объем I п.л. Заказ № 209

Тираж 100. ЗМИ, Ротапринт, 330 003 г. Запорожье, ул. Жуковского, 64.

AB 27.832

AB 27.832

REPRODUCTION OF THE ORIGINAL

THIS IS A COPY OF THE ORIGINAL
AND IS NOT A REPRODUCTION OF THE ORIGINAL
REPRODUCTION OF THE ORIGINAL
REPRODUCTION OF THE ORIGINAL

REPRODUCTION OF THE ORIGINAL

REPRODUCTION OF THE ORIGINAL
REPRODUCTION OF THE ORIGINAL

REPRODUCTION OF THE ORIGINAL
REPRODUCTION OF THE ORIGINAL
REPRODUCTION OF THE ORIGINAL
REPRODUCTION OF THE ORIGINAL