

М417409

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР
Московского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и
ордена Трудового Красного Знамени высшее техническое училище
имени Н.Э.Баумана

НЕ ВЫДАЕТСЯ

На правах рукописи

АРТАМОНОВ АЛЕКСАНДР НИКОЛАЕВИЧ

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОЦЕНКИ УРОВНЯ ВНУТРЕННЕГО
РАССЕЯНИЯ ЭНЕРГИИ В СТАЛЯХ КАК КРИТЕРИЯ
ЦИКЛИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ

Специальность 05.02.02 — Машиноведение
и детали машин

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва — 1984

Работа выполнена в Московском высшем техническом училище им.
Н.Э.Баумана

Научный руководитель: Заслуженный деятель науки и техники РСФСР,
д.т.н., профессор РЕШЕТОВ Д.Н.

Официальные оппоненты: д.т.н., профессор ЛЕЙКИН А.С.
к.т.н., с.н.с. КОНОВАЛОВ Л.В.

Ведущее предприятие: Центральный научно-исследовательский
институт технологии машиностроения
(ЦНИИТМАШ), г.Москва

Защита диссертации состоится "28" мая 1984 г.
в "14³⁰" часов на заседании специализированного совета К053.15.11
"Машиностроение" МВТУ им.Н.Э.Баумана по адресу:

107005, Мос

С диссер

Н.Э.Баумана.

Автореф

Ученый
специализиро
к.т.н.

М418499

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Одним из путей решения проблемы снижения материалоемкости изделий машиностроения является уточнение расчетов на прочность, которое в соответствии с современными тенденциями увеличения мощностей, скоростей и нагрузок без существенного изменения габаритов машин, основано на учете в расчетах все большего числа факторов и на использовании вероятностных оценок прочностных и эксплуатационных характеристик.

Характеристики циклической прочности машиностроительных материалов в зоне чисел циклов до перегиба кривых усталости исследованы достаточно широко. При больших числах циклов, в области горизонтального участка кривых усталости, необходимо уточнение (особенно при переменных режимах нагружений).

Результаты классических испытаний на усталость недостаточны для решения всех вопросов прочности. Возможности могут быть значительно расширены в случае разработки неразрушающего метода контроля при малых числах циклов на основе регистрации изменения какой-либо характеристики металла, например, внутреннего рассеяния энергии.

К весьма актуальным направлениям исследования сопротивления усталости в машиностроении следует отнести две взаимосвязанных проблемы:

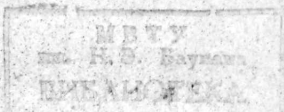
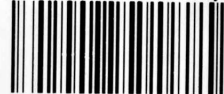
- внутреннее рассеяние энергии в материалах при постоянных и переменных амплитудах, как основная характеристика накопления усталостных повреждений, необходимая для обоснования и уточнения расчетов;
- сопротивление усталости при переменных амплитудах в условиях больших чисел циклов нагружений.

Решение обеих проблем направлено на уточнение расчетов деталей машин при нестационарном нагружении.

Комплексное рассмотрение вопросов оценки внутреннего рассеяния энергии и характеристик циклической прочности в условиях больших чисел циклов при напряжениях с меняющимися амплитудами подготовит условия для создания метода неразрушающего контроля деталей после длительной эксплуатации.

Цель работы. Разработка рекомендаций по уточнению расчетов на изгибную ринносливность деталей машин, подверженных действию напряжений с меняющимися амплитудами.

Научная новизна. Впервые исследованы закономерности внутреннего рассеяния энергии при переменном режиме нагружений, с пла-



но меняющейся амплитудой (равновероятное распределение). Экспериментальные данные по внутреннему рассеянию энергии позволили произвести непосредственную проверку предпосылок расчета деталей машин при переменных режимах нагружений.

Исследовано влияние частоты нагружений на эффект повышения характеристик циклической прочности сталей при среднем нормальном режиме нагружений.

Получены характеристики циклической прочности гладких цилиндрических образцов из стали 40Х с различными вариантами термической обработки при переменном режиме нагружений, описываемом нормальным законом, и особо больших числах циклов (10^8 , $2 \cdot 10^8$, $3 \cdot 10^8$) на усталостной машине, выполненной по обычной схеме (нагружение — изгиб с вращением).

Выявлен и исследован эффект влияния метода финишной обработки на характеристики циклической прочности гладких цилиндрических образцов из закаленной до твердости HRC 43...45 стали 30ХГСА.

Практическая ценность. Предложен новый фотоэлектрический метод непрерывной регистрации прогиба испытываемого образца. Точность измерений повышена за счет крепления средств измерения непосредственно на вращающемся образце.

Разработана методика исследования закономерностей внутреннего рассеяния энергии в процессе усталости при постоянном и переменном режимах нагружений.

На основе проведенных исследований даны рекомендации по уточнению расчетов деталей машин при переменных режимах нагружений, описываемых нормальным и равновероятным законами распределений.

Данные по внутреннему рассеянию являются материалом для изучения закономерностей накопления усталостных повреждений и могут быть использованы для разработки в будущем метода неразрушающего контроля при малых числах циклов.

Методы исследования. Разработан и применен новый фотоэлектрический метод непрерывной регистрации деформации (прогиба) испытываемого образца с целью исследования закономерностей внутреннего рассеяния энергии в процессе усталости при постоянном и переменном режимах нагружений.

Метод корреляционного анализа применен при обработке результатов длительных усталостных испытаний для получения средних значений характеристик циклической прочности и параметров их рассеивания, а также при обработке результатов опытов по определению значений суммарной энергии внутреннего рассеяния в процессе уста-

лости.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на заседании кафедры "Детали машин" МВТУ им. Н.Э.Баумана в 1983 г., на заседании секции НТС ВНИИМаша "Научно-методические основы унификации" в 1984 г.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 4 печатных работы.

Объем работ. Диссертация изложена на 170 страницах машинописного текста и содержит введение, три главы, общие выводы и приложение; включает 65 рисунков, 29 таблиц и список литературы из 98 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение посвящено обоснованию актуальности исследования изменения уровня внутреннего рассеяния энергии в процессе усталости, а также циклической прочности сталей в условиях больших чисел циклов при постоянном и переменных режимах нагружений.

В первой главе (п.2, огл.) рассмотрены методы экспериментального исследования закономерностей изменения свойств металлов в процессе усталости.

Отмечен основной недостаток классических усталостных испытаний — ограниченность информации, которая заключается в зарегистрированном числе циклов нагружений до поломки образцов при тех или иных напряжениях.

Повысить информативность испытаний можно посредством непрерывной регистрации какой-либо характеристики металла, меняющейся при увеличении числа циклов нагружений. Как свидетельствуют результаты многочисленных исследований, наблюдается изменение широкого комплекса физико-механических свойств металлов при циклическом нагружении (модуля упругости, магнитной проницаемости, электропроводности, ширины и площади петли гистерезиса, внутреннего трения, энергии внутреннего рассеяния за цикл нагружения, прогиба образца и др.). Эти изменения могут служить основой для разработки методик исследования закономерностей накопления усталостных повреждений.

Картину изменения механических свойств металлов в процессе усталости дают следующие методы: — энергетический, заключающийся в непосредственном измерении мощности, потребляемой приводным электродвигателем при помощи ваттметра или балансирного электродвигателя; — метод динамической петли гистерезиса (в результате обработки петель механического гистерезиса могут быть получены

основные характеристики неупругих явлений при циклическом нагружении — пластическая деформация за цикл $\Delta \epsilon_a$, удельная энергия рассеяния за цикл ΔW , относительное рассеяние энергии Ψ ; — метод измерения внутреннего трения, который основан на периодическом снятии диаграмм свободных затухающих колебаний системы образец — зажимное устройство; — метод электромагнитного контроля, основанный на регистрации изменения магнитных свойств сталей при циклическом нагружении; — метод непрерывной регистрации прогиба испытуемого образца.

Характер зависимостей различных параметров, отражающих состояние металла испытуемого образца, от числа циклов нагружений идентичен зависимости уровня внутреннего рассеяния энергии за цикл от числа циклов нагружений. Это говорит об эквивалентности внутреннего рассеяния энергии и накопления усталостных повреждений.

Вид кривых, отражающих изменение свойств металлов от числа циклов нагружений, зависит от величины коэффициента перегрузки по отношению к длительному пределу выносливости: чем ближе к ϵ_{-1} , тем труднее уловить изменение какой-либо характеристики металла в процессе усталости.

Большинство существующих методов исследования закономерностей накопления усталостных повреждений применимы лишь при нагружении плоским изгибом или растяжением-сжатием. Их использование при круговом изгибе связано с трудностями передачи сигналов о датчиков, вращающихся вместе с испытуемым образцом.

Отмечено сильное рассеивание кривых, отображающих зависимости свойств металлов от числа циклов нагружений. Это предопределяет статистический подход к исследуемому явлению. Необходимо многократное повторение (5...6) опытов с одинаковыми образцами в одинаковых условиях с последующей статистической обработкой результатов испытаний.

Ни один из разработанных ранее методов не удалось применить для исследования закономерностей накопления усталостных повреждений при переменных режимах нагружений с плавно меняющимися амплитудами.

Поставлена задача создания универсального метода, позволяющего изучение процесса усталости как при постоянном, так и при переменных режимах нагружения, а на базе результатов этих исследований — уточнение расчетов деталей машин при переменных режимах нагружений.

Во второй главе (п.3, огл.) дано описание установки для исследования закономерностей накопления усталостных повреждений, контрольно-измерительной аппаратуры, объектов испытаний, режимов нагружений, методики оценки уровня внутреннего рассеяния энергии в процессе усталости, а также приведены результаты испытаний.

Методика исследования закономерностей накопления усталостных повреждений разработана применительно к усталостной машине обычной конструкции типа МУИ-6000 (нагружение — чистый изгиб с вращением).

В качестве объектов испытаний выбраны гладкие цилиндрические образцы с диаметром рабочей части 7,5 мм в соответствии с ГОСТом 2860-65 из стали 45 нормализованной. Механические свойства материала образцов: твердость HKB 88...90, предел прочности $\sigma_b = 610$ МПа, предел текучести $\sigma_T = 325$ МПа, предел выносливости $\sigma_{-1} = 270$ МПа. Образцы изготовлены из металла одной плавки по неизменной технологии.

Для непосредственной проверки предпосылок расчета деталей машин при переменных режимах нагружений необходимо получить экспериментальные данные по внутреннему рассеянию энергии при одном из типовых переменных режимов. Выбран средний равновероятный режим, т.к. он обладает наименьшей "контрастностью" — в блоках нагружений отсутствуют участки с резким увеличением скорости изменения амплитуды напряжений, которые трудно воспроизводимы механическими нагружающими устройствами.

Методика исследования основана на применении нового фотоэлектрического устройства непрерывной регистрации прогиба испытываемого образца. В качестве меры поврежденности исходного материала выбрана энергия, поглощаемая образцом в процессе развития микропластических деформаций, которую оценивали по изменению прогиба испытываемого образца.

Основными достоинствами предлагаемой методики являются: крепление средств измерения непосредственно на вращающемся образце (существенно повышена точность измерения деформации образца, т.к. на результат не влияют погрешности изготовления промежуточных деталей, а также контактные деформации в сопряжениях); отсутствие скользящих контактов при передаче сигнала с датчиков на регистрирующие приборы, в других измерительных устройствах при данном виде нагружения (изгиб с вращением) подвижные контакты вносят дополнительную погрешность; стабильность работы всех систем установки, которая позволяла в каждом опыте надежно зарегистрировать

"упругий" прогиб в самом начале циклического нагружения испытуемого образца, этот прогиб соответствует механическим свойствам исходного материала; возможность исследования закономерностей накопления усталостных повреждений при переменных режимах нагружений с плавно меняющимися амплитудами напряжений.

Механические характеристики образцов подвержены сильному рассеиванию, поэтому одна кривая, характеризующая изменение свойств металлов в процессе усталости при определенном уровне нагружения, является случайной реализацией связи, существующей между исследуемыми параметрами, и не может дать надежную картину накопления усталостных повреждений. Для получения более точных данных необходимо многократное повторение опытов.

При постоянном режиме нагружений испытано 10 образцов — по 5 на 2 уровнях нагружений ($\sigma = 310$ МПа, $\sigma = 330$ МПа), при среднем равновероятном режиме испытано 15 образцов — по 5 на 3 уровнях ($\sigma_{max} = 350$ МПа, $\sigma_{max} = 370$ МПа, $\sigma_{max} = 390$ МПа).

В каждом эксперименте непрерывно регистрировали уровень суммарной деформации, т.е. были записаны диаграммы деформирования. После обработки этих диаграмм построены зависимости внутреннего рассеяния энергии за цикл от числа циклов нагружений.

Все кривые внутреннего рассеяния энергии как при постоянном (рис.1, 5), так и при среднем равновероятном (рис.2, 6) режимах нагружений имеют идентичный характер. Это один из важных результатов, полученных в работе, т.к. предположение об идентичности характера зависимостей $w_f = f(n_f)$ при постоянном и переменном режимах использовано в качестве предпосылки расчета деталей машин при переменных режимах нагружений.

Наличие 5 экспериментальных кривых внутреннего рассеяния энергии на каждом уровне нагружения (на рис.1, 2 они изображены тонкими линиями) обеспечило возможность статистической обработки параметров этих кривых для построения средней кривой каждого семейства. Каждая кривая изменения внутреннего рассеяния энергии перестроена в отчислительных числах циклов для обеспечения совместности характерных областей кривых (рис.3, 4), после чего были построены средние кривые семейств как геометрические места точек, соответствующих средним значениям w_f в каждом сечении. На всех рисунках средние кривые начерчены толстыми линиями.

По характерным точкам кривых $w_f = f(n_f)$ весь процесс усталости может быть разбит на три стадии. Стадия 1. В самом начале каждого испытания наблюдали интенсивный рост энергии внутреннего

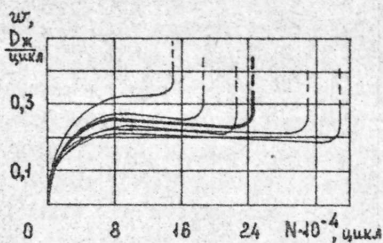


Рис.1 Кривые внутреннего рассеяния энергии в стали 45 при постоянном режиме нагружений и напряжении $\sigma = 330$ МПа

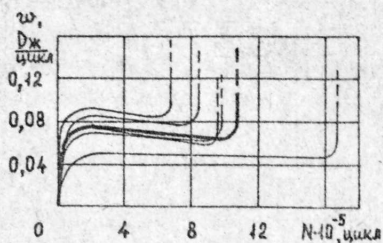


Рис.2 Кривые внутреннего рассеяния энергии в стали 45 при переменном режиме нагружений и напряжении $\sigma_{\max} = 370$ МПа

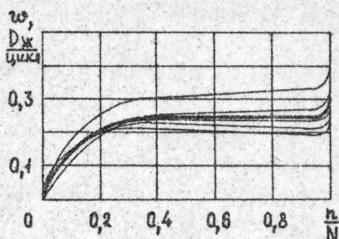


Рис.3 Кривые внутреннего рассеяния энергии при $\sigma = 330$ МПа, перестроенные в относительных координатах

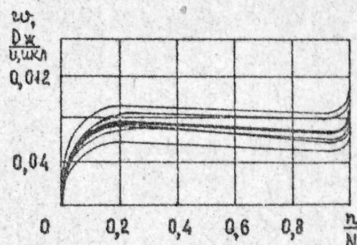


Рис.4 Кривые внутреннего рассеяния энергии при $\sigma_{\max} = 370$ МПа, перестроенные в относительных координатах

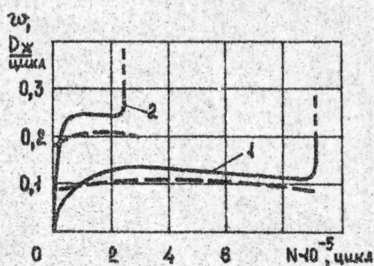


Рис.5 Средние кривые внутреннего рассеяния энергии при постоянном режиме: 1- $\sigma = 310$ МПа, 2- $\sigma = 330$ МПа

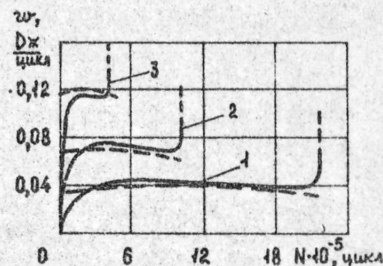


Рис.6 Средние кривые внутреннего рассеяния энергии при переменном режиме: 1- $\sigma_{\max} = 350$ МПа, 2- $\sigma_{\max} = 370$ МПа, 3- $\sigma_{\max} = 390$ МПа

рассеяния за цикл по мере накопления числа циклов нагружений при неизменной амплитуде напряжений (постоянный режим) или неизменном максимальном напряжении блока нагружений (средний равновероятный режим). Продолжительность этой стадии зависит от режима нагружений и величины действующих напряжений. Средняя продолжительность ее по всем образцам 26% от числа циклов до усталостной поломки. Стадия 2. Свойства исходного материала, определяющие сопротивляемость циклическим нагрузкам, к моменту начала этой стадии стабилизируются, о чем говорит резкое уменьшение (по сравнению с начальной стадией усталостного процесса) скорости изменения внутреннего рассеяния энергии за цикл. Стадия 2 наиболее ответственная, т.к. в основном она определяет ресурс (средняя продолжительность этой стадии по всем образцам 66%). Стадия 3. Для всех образцов наблюдали прогрессирующий рост исследуемого параметра, что соответствовало распространению усталостной трещины. Продолжительность стадии 8%.

Площадь под кривыми, отображающими зависимость внутреннего рассеяния энергии за цикл от числа циклов нагружений, представляет собой суммарную энергию, рассеянную в образце в процессе усталости. Определив этот параметр для каждого испытанного образца, можно произвести проверку энергетического критерия усталостного повреждения металлов в виде выражения $W_i = k_f \epsilon_i^2 N_i$, (4) где W_i — суммарная энергия внутреннего рассеяния в процессе усталости, Дж;

k_f — коэффициент пропорциональности;

ϵ_i — напряжения в образце, МПа;

N_i — число циклов до разрушения, цикл.

Применен корреляционный анализ с использованием индивидуальных значений суммарной энергии внутреннего рассеяния W_i и произведения $\epsilon_i^2 N_i$ (для переменного режима — $\epsilon_{\max i}^2 N_{\Sigma i}$) для каждого образца.

Сравниваемые переменные есть величины существенно разного порядка ($W_i - 10^4$, $\epsilon_i^2 N_i - 10^{10}$). Для их приведения к одному масштабу разработано следующее преобразование: значения W_i и $\epsilon_i^2 N_i$ для каждого образца делили на соответствующие значения этих параметров для 1-го образца, в результате чего получали переменные W_i и $\epsilon_i^2 N_i$, представленные в относительных координатах. Далее составляли корреляционные таблицы и проводили статистическую обработку в обычном порядке. В результате были получены корреляционные уравнения в виде $x_i = A_j y_j + B_j$,

где $x_i = \frac{W_i}{W_1}$ - суммарная энергия внутреннего рассеяния, представленная в относительных единицах;

$y_i = \frac{\epsilon_i^2 N_i}{\epsilon_1^2 N_1}$ - произведение $\epsilon_i^2 N_i$, представленное в относительных единицах;

A_j и B_j - коэффициенты, числовые значения которых определены в результате статистической обработки.

Подтверждено наличие линейной корреляционной связи между исследуемыми параметрами (рис.7, 8). Значения коэффициентов корреляции весьма высоки: при постоянном режиме $r = 0,99$; при среднем равновероятном $r = 0,95$. Это доказывает приемлемость энергетического критерия для ввода зависимостей, с помощью которых можно расчетным путем получить параметры кривой усталости материала при переменном режиме нагружений, если известны параметры кривой усталости при постоянном режиме.

Результаты исследований дают еще одну возможность проверки применимости энергетического критерия расчета на прочность деталей машин при переменных амплитудах напряжений. Параметры кривых усталости при среднем равновероятном режиме нагружений использованы следующим образом: $\epsilon_{max i}$ и $N_{\Sigma i}$ разделили, соответственно на коэффициенты k и k_N повышения предела выносливости и числа циклов до перегиба кривой усталости, определенные по методике расчета параметров кривых усталости при переменном режиме по известным характеристикам циклической прочности материала при постоянном режиме, разработанной Д.Н.Решетовым и Р.М.Чатяняном. В результате получили параметры такого постоянного режима, который эквивалентен по усталостному воздействию нашему переменному. Определив значения произведения $\epsilon_i^2 N_i$ для этого режима: $\left(\frac{\epsilon_{max i}}{k}\right)^2 \cdot \frac{N_{\Sigma i}}{k_N}$ и составив корреляционную таблицу, провели совместную статистическую обработку результатов испытаний при постоянном и переменном, пересчитанном на эквивалентный ему постоянный, режимах.

Анализ подтверждает наличие линейной корреляционной связи с высоким значением коэффициента корреляции $r = 0,94$. Этот результат является прямым подтверждением равенства значений суммарной энергии внутреннего рассеяния, поглощенной образцом при испытании до разрушения, при переменном и эквивалентном ему по усталостному воздействию постоянном режимах нагружений (рис.9).

Используя параметры средних кривых внутреннего рассеяния энергии при постоянном и среднем равновероятном режимах, можно провести комплексный анализ, направленный на проверку предположек расчета деталей машин при переменных режимах нагружений.

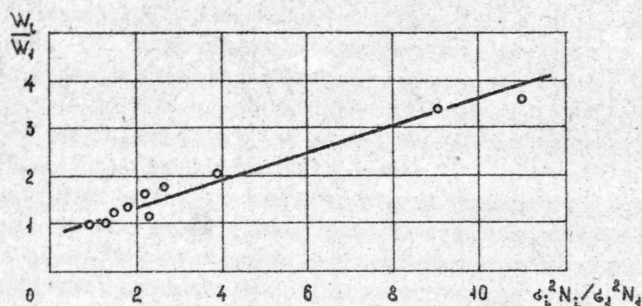


Рис.7 Зависимость между суммарной энергией внутреннего рассеяния W_t в процессе усталости стали 45 нормализованной и произведением $\sigma_e^2 N_e$ при постоянном режиме нагружений

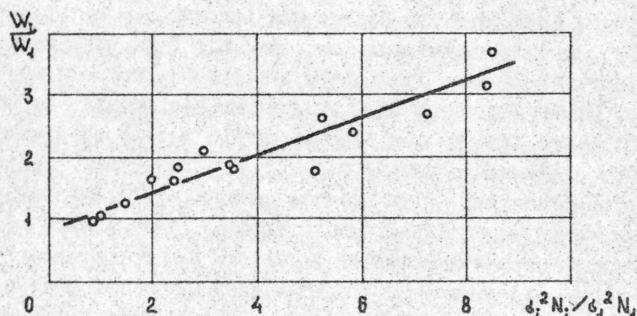


Рис.8 Зависимость между суммарной энергией внутреннего рассеяния W_t в процессе усталости стали 45 нормализованной и произведением $\sigma_e^2 N_e$ при среднем равновероятном режиме нагружений

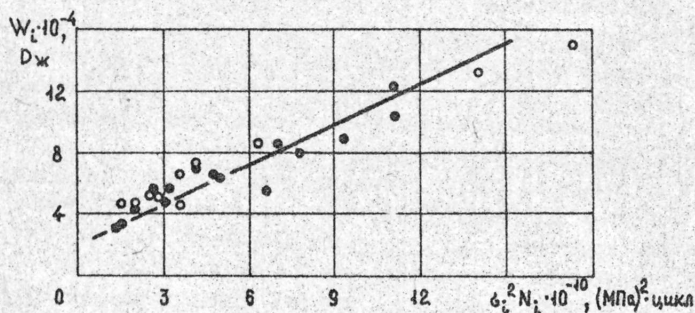


Рис.9 Зависимость между суммарной энергией внутреннего рассеяния W_t в процессе усталости стали 45 нормализованной и произведением $\sigma_e^2 N_e$ при постоянном и переменном, пересчитанном на эквивалентный по усталостному воздействию постоянный, режимах: о - постоянный режим, • - средний равновероятный режим

Чатиняном Р.М. на основе вакансионно-статистических представлений об усталости металлов получена формула, по которой могут быть рассчитаны кривые внутреннего рассеяния энергии при постоянном режиме нагружений

$$\omega_i \cong \frac{k_c}{1 - e^{-k_c}} \left(1 + k_c \frac{n_m}{N_i} \right) \left(k_m \epsilon_i^m + k_0 \epsilon_i^2 \right) \left(\frac{n_i}{N_i} \right)^{k_c} \frac{n_m}{N_i} e^{-k_c \frac{n_i}{N_i}} \quad (2)$$

где ω_i – текущее значение энергии внутреннего рассеяния за цикл, Дж/цикл;

k_c , k_m , k_0 – коэффициенты, числовые значения которых могут быть получены в результате статистической обработки экспериментальных данных по внутреннему рассеянию энергии;

m – показатель степени уравнения кривой усталости;

ϵ_i – уровень нагружения, МПа;

n_m – число циклов нагружений, соответствующее максимуму кривой внутреннего рассеяния энергии;

N_i – число циклов до усталостного разрушения.

Постоянные в формуле (2) являются характеристиками материала образца.

При обработке экспериментальных диаграмм деформирования испытываемых образцов определены координаты характерных точек средних кривых внутреннего рассеяния энергии в процессе усталости при постоянном и переменном режимах на каждом уровне нагружений (табл. I), которые использованы при определении расчетных значений ω_i .

По формуле (2) рассчитаны кривые внутреннего рассеяния энергии при $\epsilon = 310$ МПа и $\epsilon = 330$ МПа. Совпадение расчетных (штриховые линии) и экспериментальных кривых – удовлетворительное.

Параметры кривой усталости при среднем равновероятном режиме нагружений $\epsilon_{\Sigma i}$ и $N_{\Sigma i}$ могут быть преобразованы таким образом, что весь комплекс нагружений при переменном режиме можно заменить таким постоянным режимом, который эквивалентен по усталостному воздействию переменному (посредством определения для каждого уровня нагружения величины эквивалентного напряжения).

Если в формулу (2) вместо ϵ_i и N_i подставить величины $\epsilon_{\Sigma i}$ и $N_{\Sigma i}$, то получим значения энергии внутреннего рассеяния за цикл для такого постоянного режима, который эквивалентен по усталостному воздействию среднему равновероятному.

Построив расчетные кривые на рисунке совместно со средними экспериментальными кривыми внутреннего рассеяния энергии при переменном режиме (рис. 6), можно убедиться в их удовлетворительном совпадении. Это подтверждает справедливость всех предположений; использованных для вывода расчетных выражений (I, 2).

Таблица I

Параметры кривых внутреннего рассеяния энергии в процессе усталости образцов из стали 45 нормализованной при постоянном и среднем равновероятном режимах нагружений

Режим нагружения	Уровень нагружения $\sigma_c, \sigma_{max}, \sigma_{\text{Па}}$	$n_m \cdot 10^{-5}$ циклов	$w_c (n_m)$ Дж/цикл	$N_c \cdot 10^{-5}$ циклов	$w_i (N)$ Дж/цикл	Суммарная энергия внутреннего рассеяния $W_i \cdot 10^{-4}$, Дж		Отличие расч. от эксперимент. %
						экспериментальн.	расчетные	
Постоянный	310	2,721	0,1333	9,070	0,1171	9,4061	9,4067	0,01
Постоянный	330	1,448	0,2504	2,413	0,2502	5,2975	5,5199	4,2
Средний равновероятный	350	4,740	0,0446	21,731	0,0412	9,1360	8,5662	6,3
Средний равновероятный	370	2,332	0,0748	10,299	0,0647	6,6131	7,2243	9,3
Средний равновероятный	390	1,239	0,1190	4,010	0,1120	4,2258	5,1768	22,7

В работах Чатиняна Р.М. приведена также формула для расчета суммарной энергии внутреннего рассеяния в процессе усталости до разрушения при постоянном режиме нагружений

$$W_i = \left(1 + k_c \frac{n_m}{N_i}\right) \left(k_m \epsilon_i^m N_i + k_0 \epsilon_i^2 N_i\right) \quad (3)$$

Коэффициенты и постоянные (параметры средних кривых внутреннего рассеяния энергии) в формуле (3) те же, что и в формуле (2).

Используя выражение (3), можно произвести аналогичный расчет и определить суммарную энергию внутреннего рассеяния для такого постоянного режима, который эквивалентен по усталостному воздействию принятому переменному. Получили удовлетворительное соответствие расчетных и экспериментальных данных (табл. I).

В главе 3 (п. 4, огл.) приведены результаты экспериментальных исследований характеристик циклической прочности гладких лабораторных образцов из стали 40Х с различными вариантами термообработки при особо больших числах циклов нагружений и наиболее распространенном в реальной эксплуатации среднем нормальном режиме нагружений.

Испытания проведены на усталостной машине обычной конструкции (нагружение — изгиб с вращением). Для обеспечения возможности испытаний при особо больших числах циклов внесены конструктивные изменения. Частота нагружений повышена до 160 Гц (9800 об/мин).

Количество образцов было достаточно для статистической обработки с целью определения средних значений характеристик циклической прочности, а также их рассеивания. Наклонные участки кривых усталости получены в результате испытаний не менее 25 образцов на каждую кривую. Горизонтальные участки построены с помощью метода "лестницы" по результатам испытаний не менее 12 образцов на каждую кривую (рис. 10, II).

Получены данные, свидетельствующие о наличии четко выраженного горизонтального участка кривых усталости при среднем нормальном режиме нагружений для всех исследованных сталей. Кривые усталости при переменном режиме, представленные в координатах "максимальное напряжение из числа действующих в блоке ϵ_{max} — суммарное число циклов нагружений N_{Σ} ", смещаются вверх и вправо практически параллельно соответствующим кривым усталости при постоянном режиме нагружений.

Выявлено снижение действия фактора переменности режима нагружений с увеличением частоты. Для исследования этого явления проведены дополнительные испытания образцов, взятых из той же партии, что и образцы, использованные для построения кривых усталости при

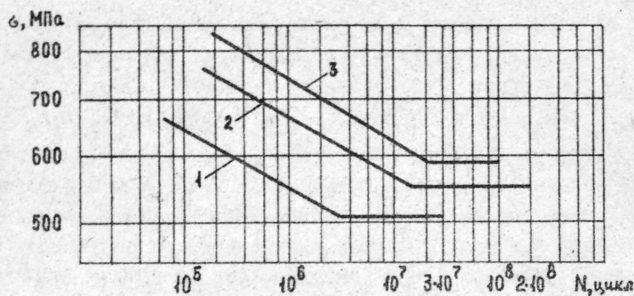


Рис.10 Кривые усталости круглых цилиндрических образцов из стали 40Х улучшенной: 1 – при постоянном режиме нагружений и частоте $f = 160$ Гц, 2 – при среднем нормальном режиме и $f = 160$ Гц, 3 – при среднем нормальном режиме и $f = 60$ Гц

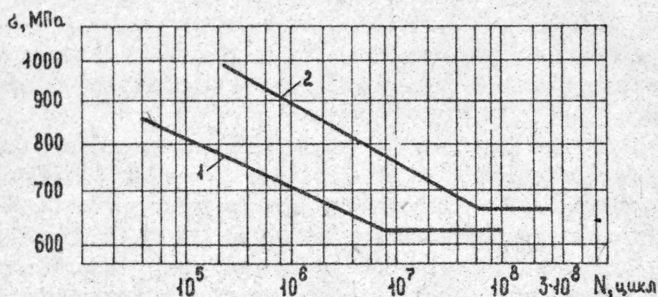


Рис.11 Кривые усталости круглых цилиндрических образцов из стали 40Х закаленной: 1 – при постоянном режиме нагружений, 2 – при среднем нормальном режиме нагружений ($f = 160$ Гц)

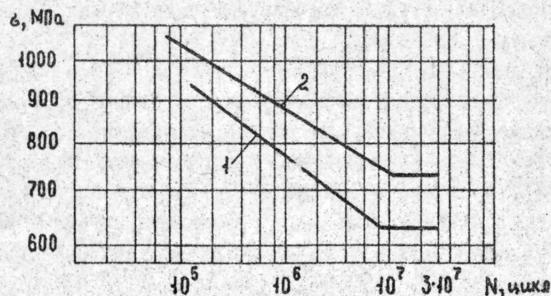


Рис.12 Кривые усталости круглых цилиндрических образцов из стали 30ХГСА закаленной: 1 – шлифованных, 2 – обточенных резцами из эльбора

частоте $f = 160$ Гц. Частота нагружений была понижена до 60 Гц. Получены более высокие значения Δ_{-1} (кривая 3, рис. II).

Обнаружен и исследован эффект повышения характеристик циклической прочности образцов из стали 30ХГСА закаленной, обточенных резцами из альбо́ра, по сравнению со шлифованными (рис. I2).

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. На основе реализации нового фотоэлектрического метода непрерывной регистрации прогиба вращающегося образца разработана методика определения уровня внутреннего рассеяния энергии в процессе усталости при постоянном и среднем равновероятном режимах.

2. Получены экспериментальные кривые внутреннего рассеяния энергии в количестве, достаточном для статистической обработки с целью построения средних кривых на каждом уровне нагружения при постоянном и впервые при переменном режимах.

3. В результате комплексного анализа данных по внутреннему рассеянию энергии при постоянном и переменном режимах получено подтверждение приемлемости энергетических представлений об усталости металлов для расчетов деталей машин при переменных режимах нагружений.

4. Выявлена закономерность уменьшения влияния переменности режима нагружений на повышение длительных пределов выносливости при увеличении частоты нагружений.

5. В соответствии с результатами длительных усталостных испытаний можно рекомендовать увеличение расчетного значения предела выносливости при переменных режимах нагружений (и расчете по максимальной длительно действующей нагрузке) по сравнению с длительным пределом выносливости при постоянном режиме:

а) при среднем равновероятном режиме и частоте нагружений

$f = 46,7$ Гц — для стали 45 нормализованной — на 18%;

б) при среднем нормальном режиме и частоте нагружений $f = 60$ Гц — для стали 40Х улучшенной — на 17%;

в) при среднем нормальном режиме и частоте нагружений $f = 160$ Гц — для стали 40Х улучшенной — на 9%; для стали 40Х закаленной — на 6%.

Вместе с ранее проведенными на кафедре опитами при меньших частотах над образцами из разных материалов показана общая картина изменения коэффициентов повышения предела выносливости при переменных режимах от частоты нагружений и прочности материалов.

6. Длительный предел выносливости образцов из стали 30ХГСА закаленной до HRC 43...45, обточенных резцами из альбо́ра, выше предела выносливости шлифованных образцов на 15%. Можно рекомен-

довать обточку резцами из эльбора в качестве финишной обработки деталей машин, подвергаемых высоким переменным напряжениям.

Использование результатов работы позволит уточнить расчеты ответственных деталей машин, подверженных действию напряжений с меняющимися амплитудами, во всем диапазоне общих чисел циклов нагружений, и на этой основе снизить общую металлоемкость изделий без уменьшения показателей надежности.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. Решетов Д.Н., Артамонов А.Н. Исследование циклической прочности стали при переменных, распределенных по нормальному закону, напряжениях и больших базах. - Труды /МВТУ, 1978, вып.278, с.56 - 65.

2. Артамонов А.Н., Кириллов А.П. Методика исследования микрореформаций в процессе усталости металлов. - ИВУЗ. Машиностроение, 1981, № II, с.45 - 49.

3. Артамонов А.Н., Решетов Д.Н., Чатинян Р.М. Исследование внутреннего рассеяния энергии в металлах при циклических напряжениях с меняющимися амплитудами. - ИВУЗ. Машиностроение, № 2, 1983, с.12 - 15.

4. Влияние финишной обработки на характеристики циклической прочности образцов. /А.Н.Артамонов, Л.Р.Юренкова, А.В.Клыпин, К.П.Панченко. - ИВУЗ. Машиностроение, 1977, № 9, с.162 - 166.



Л-83036 от 12.04.84 г. Заказ № 749 объем I п.л., тираж 100

Типография МВТУ им.Н.Э.Баумана