

М 432123

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР

Московское ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и
ордена Трудового Красного Знамени высшее техническое училище
имени Н.Э. Баумана

На правах рукописи

ПУЗЬКО ВАЛЕРИЙ БОРИСОВИЧ

ЦИКЛИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ ДЕТАЛЕЙ МАШИН
ПРИ АСИММЕТРИЧНЫХ ЦИКЛАХ НАПРЯЖЕНИЙ
И РАЗРАБОТКА МЕТОДА РАСЧЕТА
НА ОСНОВЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ

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 ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени высшем техническом училище имени Н.Э. Баумана

Научный руководитель: д.т.н., профессор Чатынни Р.М.

Официальные оппоненты: д.т.н., профессор Стреляев В.С.

к.т.н., доцент Передрий И.И.

Ведущее предприятие : ВНИИНМАШ

Защита диссертации состоится " " _____ 1985 г.
в " " часов на заседании специализированного Совета К053.15.11
"Машиностроение" МВТУ им. Н.Э.Баумана по адресу:
107005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5.

Ваши отзывы на автореферат в I экз., заверенные печатью,
просим выслать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МВТУ имени
Н.Э. Баумана.

Автореферат

Ученый секрет
специализированной
к.т.н., доцент

M 432 123

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Повышение точности инженерных расчетов деталей машин на основе энергетических представлений об усталости металлов при асимметричных циклах напряжений способствует снижению материалоемкости и повышению надежности машин, отвечает основным направлениям экономического и социального развития страны на 1981-1985 годы и на период до 1990 г. и, следовательно, является актуальной задачей.

Целью работы является исследование усталостной прочности металлов при асимметричных циклах напряжений и разработка метода расчета деталей машин на основе энергетических представлений.

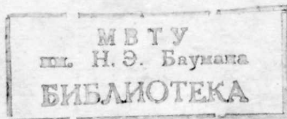
Методами исследования являются: 1) теоретические представления о механизме внутреннего трения в процессе усталости металлов при изменении асимметрии циклов напряжений; 2) экспериментальные исследования усталостной прочности металлов и ее энергетических закономерностей при различной асимметрии циклов напряжений; 3) обработка и обобщение экспериментальных данных с использованием методов математической статистики и ЭВМ.

Научная новизна работы заключается: - в физически обоснованной методике расчета сопротивления металлов усталости при асимметричных циклах напряжений; - в экспериментальном исследовании внутреннего трения в процессе усталости металлов, проведенном в статистическом аспекте при различных значениях коэффициента асимметрии циклов напряжений; - в энергетическом условии, которое может быть принято в качестве критерия усталостной прочности металлов при асимметричных циклах напряжений.

Практическая ценность работы заключается в разработке метода расчета деталей машин, позволяющего по характеристикам усталостной прочности при наиболее полно экспериментально изученных симметричных циклах определять аналогичные характеристики при асимметричных циклах напряжений, послужившем основой рекомендаций, принятых к использованию в промышленности.

Аппробация работы. Основные положения работы докладывались на научно-техническом семинаре "Надежность литого, ковального и термообработанного материала" в г. Владимире (май 1984 г.), на XXXIII научно-технической конференции НТО водного транспорта в г. Владивостоке (апрель 1984 г.), на кафедре "Детали машин" МВТУ им. Н.Э. Баумана (декабрь 1983 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 3 печатных ра-



боты.

Объем. Диссертация состоит из введения, трех глав и общих выводов, изложенных на 205 страницах, включающих 75 рисунков, 33 таблиц, 136 библиографических наименований и приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава I. Усталостная прочность металлов.

В п. I.1 приведен краткий обзор теорий усталости металлов, включающий ранние (п. I.1.1), статистические (п. I.1.2), дислокационные (п. I.1.3) и энергетические (п. I.1.4) теории усталостной прочности металлов.

В п. I.2 рассмотрены методы определения пределов выносливости металлов при помощи схематизированных диаграмм предельных состояний. Рассмотрены основные характеристики циклической прочности при асимметричных циклах напряжений (п. I.2.1) и нашедшее наибольшее распространение диаграммы предельных амплитуд и предельных напряжений (п. I.2.2). Рассматриваемые методы могут быть подразделены на три группы. К первой группе (п. I.2.3) могут быть отнесены методы, основанные на линейной аппроксимации диаграмм предельных состояний (Гудмана, Зодерберга, Серенсена-Кинасашвили и др.). Ко второй группе (п. I.2.4) относятся методы, основанные на нелинейной аппроксимации (Одинг, Гербер, Хейвуд и др.). К третьей группе (п. I.2.5) могут быть отнесены методы, основанные на обобщении уравнения линии предельных состояний (Биргер, Гаф, Гордеев и др.). Проделанный обзор свидетельствует об отсутствии универсального, достаточно точного и простого метода определения усталостных характеристик металлов при асимметричных циклах напряжений. Методы носят эмпирический или полумэмпирический характер и, следовательно, имеют ограниченную область применения. Методы расчета при асимметричных циклах напряжений, основанные на энергетических представлениях, требуют экспериментальной проверки.

В п. I.3 изложены энергетические представления о циклической прочности металлов при асимметричных циклах напряжений.

Большинство экспериментальных работ, посвященных исследованию внутреннего трения в процессе усталости проведено при симметричном изменении циклов напряжений. В результате этих исследований установлена связь между характеристиками циклической прочности металлов и их энергетическими параметрами. Можно предположить, что такая связь существует и при асимметричных циклах напряжений.

Процесс внутреннего трения в металле можно представить как

результат деформирования регулярных (т.е. с регулярными расположением атомов в узлах кристаллической решетки) атомных цепей. Совокупность параллельных атомных цепей, расположенных между жесткими матрицами, нагруженными внешними силами, образует, в модельном представлении, силовую схему элементарного статистического блока, т.е. микрообъема, свободного от дислокаций. Деформация элементарного статистического блока, приводящая к смещению жестких матриц, а, следовательно, и к деформации атомных цепей из состава блока, также сопровождается поглощением внешней энергии, расходуемой на внутреннее трение.

Число элементарных статистических блоков, вовлеченных в процесс усталости зависит от амплитуды действующего напряжения. В то же время хорошо известно, что при увеличении коэффициента асимметрии цикла напряжений ($\sigma_m > 0$) амплитуда переменной составляющей предельных напряжений убывает. Это дает основание предположить, что при напряжениях, соответствующих пределу выносливости металла, изменение асимметрии цикла напряжений должно приводить к уменьшению общего числа элементарных статистических блоков, участвующих в течение цикла в процессе внутреннего трения, а, следовательно, и к снижению уровня энергии, рассеиваемой в металле за цикл нагружения.

На основе вакансионно-статистических представлений об усталости металлов и механической модели деформируемого тела с дискретным внутренним трением Чатыняном Р.М. предложена формула для определения предельной суммарной энергии внутреннего трения в металлах до точки перелома усталостной кривой при симметричных циклах напряжений в виде:

$$A(N_G) = K_m \sigma_R^m N_G + K_o \sigma_R^2 N_G, \quad (I)$$

где K_m, K_o - коэффициенты пропорциональности,
 m - показатель степени в уравнении кривой усталости,

Первое слагаемое уравнения (I) представляет суммарную энергию внутреннего рассеяния, второе - суммарную энергию структурных изменений металлов в процессе усталости. На основе этой зависимости могут быть получены соотношения между соответствующими суммарными энергиями при симметричном и асимметричном изменении напряжений:

$$A(N_{G,-1}) = K_A A(N_{G,R}), \quad (2)$$

$$\sigma_{-1}^m N_{G,-1} = \lambda K_A \sigma_R^m N_{G,R}, \quad (3)$$

$$\sigma_{C,-1}^2 N_{C,-1} = \beta K_A \sigma_R^2 N_{C,R} \quad (4)$$

где K_A , Δ , β - коэффициенты, характеризующие отличие между соответствующими величинами энергий при симметричных и асимметричных циклах напряжений, а m' - показатель степени в уравнении кривой усталости при асимметричных циклах напряжений.

Из совместного решения уравнений (3), (4) следует

$$\sigma_R = \sigma_{C,-1}^{\frac{m'-2}{m'-2}} \left(\frac{\beta}{\Delta} \right)^{\frac{1}{m'-2}} \quad (5)$$

$$N_{C,R} = N_{C,-1} \cdot \frac{1}{K_A} \left(\frac{\Delta^2}{\beta m'} \right)^{\frac{1}{m'-2}} \sigma_{C,-1}^{\frac{m'-m}{m'-2}} \quad (6)$$

Полученные формулы позволяют определять значения пределов выносливости и чисел циклов до точки перелома кривой усталости при асимметричных циклах изменения напряжений. Коэффициенты в этих зависимостях поддаются экспериментальному определению, а, следовательно, сами уравнения - экспериментальной проверке.

Глава 2. Экспериментальное исследование усталостных характеристик и энергетических закономерностей сопротивления металлов усталости при асимметричных циклах напряжений.

В п.2.1 изложены основные задачи экспериментального исследования:

1. Выбор и отработка методики измерения энергии внутреннего трения непосредственно в процессе циклического нагружения.
2. Определение характерных особенностей и количественных закономерностей процесса внутреннего трения при циклическом нагружении металлов с различными значениями коэффициентов асимметрии циклов напряжений.
3. Определение основных характеристик циклической прочности исследуемых металлов при различных значениях коэффициента асимметрии циклов напряжений.

В п.2.2 рассмотрены методы измерения энергии внутреннего трения в процессе усталостного нагружения.

Исследование энергии внутреннего трения в процессе усталости металлов является весьма чувствительным способом изучения влияния множества как внутренних, так и внешних факторов на циклическую прочность металлов, учет которых другими методами не всегда доступен.

Известные к настоящему времени методы измерения внутреннего трения могут быть подразделены на две принципиально отличные группы - прямые (п.2.2.1) и косвенные (п.2.2.2). Анализ методов позво-

ляет сделать следующие выводы:

1. Для получения полных характеристик диссипативных свойств металлов в процессе циклического нагружения необходимо обеспечить однородное напряженное состояние в рабочей части образца.

2. Наиболее точные данные, особенно в области напряжений, превышающих предел усталости, можно получить лишь при использовании одного из прямых способов измерения внутреннего трения.

3. При исследовании сопротивления металлов усталости целесообразно применение метода динамической петли гистерезиса, позволяющего регистрировать энергию внутреннего трения на всех стадиях процесса усталости.

В п.2.3 излагается методика исследования внутреннего трения в металлах.

В соответствии с выводами, изложенными в п.2.2, для исследования энергии внутреннего трения использован метод динамической петли гистерезиса (п.2.3.1). С этой целью спроектирован и изготовлен специальный датчик деформаций, состоящий из тензометрического преобразователя, соединенного с клеммными зажимами, устанавливаемыми на утолщенных частях испытуемого образца. Датчик допускает многократное использование без разрушения упругого элемента при разрушении образца.

Усилия измерялись путем тензометрирования захвата образца, для чего использовалась полная мостовая схема с двумя активными тензодатчиками, наклеенными на противоположных сторонах захвата. Во избежание температурного разбаланса моста из-за нагрева испытуемого образца при циклическом нагружении и невозможности наклейки компенсационных датчиков в непосредственной близости к рабочим, использованы фольговые самотермокомпенсированные тензорезисторы марки КФ-5. Питание обоих тензомостов и усиление сигналов осуществлялось при помощи тензостанции "Топаз", выбор которой обусловлен тем, что тензостанция с усилителями постоянного тока, в отличие от тензостанций с усилителями переменного тока, не вносит в процессе испытаний в исследуемые сигналы собственные фазовые искажения. Присущий усилителям постоянного тока "дрейф нуля" сведен к минимуму за счет применения микросхем, схемотехническое решение которых обеспечило достаточную для целей данного исследования стабильность параметров усилителя. Перед началом каждого измерения "нуль" усилителя контролировался по встроенному стрелочному индикатору и, в случае необходимости, корректировался.

Для устранения начального сдвига фаз сигналов деформации и

усилия использовался электронный фазовращатель, позволявший компенсировать начальное раскрытие петли гистерезиса без изменения амплитуды исследуемых сигналов. Компенсация производилась на специальном тарировочном образце перед началом каждого испытания.

Постоянство температуры на рабочей части образца, контроль которой осуществлялся с помощью хромель-копелевой термопары, соединенной с самопишущим потенциометром марки КСП-4, достигалось применением специальных съемных медных радиаторов, охлаждаемых проточной водой.

Фотосъемка петель гистерезиса производилась на высококачественную (I200 ед.ГОСТ) фотопленку, что позволило фиксировать не только ход луча на экране электронно-лучевой трубки, но и ее послесвечение. В результате этого были получены изображения полных, т.е. замкнутых петель гистерезиса, на которых (рис.1) менее яркие участки получены за счет послесвечения экрана.

В качестве объекта исследований (п.2.3.2) приняты гладкие цилиндрические образцы с диаметром рабочей части 7,5 мм, основные размеры которых выбраны согласно ГОСТ 23026-78. Образцы изготовлены из наиболее распространенных в общем машиностроении сталей марок 45 и 40Х. Партии образцов данной марки стали изготовлены из одного слитка. Образцы из стали 45 подвергнуты нормализации на твердость $HRB\ 56+58$, из стали 40Х - на твердость $HRB\ 58+60$. Обеспечение указанных диапазонов твердости образцов достигнуто их выборкой из всей партии одновременно термообработанных образцов.

Характеристики статической прочности, определенные по результатам испытаний (на разрывной машине модели "Р-5") групп исследуемых сталей, по пять образцов в каждой, представлены в табл.1.

Таблица 1

Материал	σ_B МПа	σ_T МПа
Сталь 45	650	390
Сталь 40Х	710	470

При полировке рабочих поверхностей образцов уделялось особое внимание на удаление "подрезки" в зоне перехода галтели в рабочий диаметр образца.

Экспериментальные исследования проведены на гидропульсационной испытательной машине ЦДМПу-10 (п.2.3.3) при циклическом растяжении сжатии, в режиме мягкого нагружения с различной асимметрией

цикла напряжений. Для целей настоящего исследования машина дооборудована специально разработанным чувствительным блокирующим устройством, обеспечивающим автоматическое прекращение испытаний при разрушении образца и фотоэлектрическим датчиком частоты циклов. Штатная система динамического силоизмерения, ввиду её низкой точности, заменена электротензометрическим устройством.

В п.2.3.4 рассматриваются вопросы методики измерения энергии внутреннего трения в процессе усталости металлов.

Количество петель гистерезиса, фотографируемых в течение одного испытания, определялось интенсивностью развития процесса внутреннего трения - с чем большей скоростью развивался процесс, тем чаще велась съемка. Число снимков на один образец колебалось в пределах 8-12.

Энергия внутреннего трения за цикл (площадь петли гистерезиса) подсчитывалась по формуле Троценко В.Т.

Последовательная совокупность значений регистрируемой энергии для отдельного испытания дала кривую изменения внутреннего трения в металле в процессе циклического нагружения. Счевидно, что как и любые параметры, отображающие усталостные процессы, величина внутреннего трения подвержена рассеянию, т.е. имеет статистический характер и, следовательно, её устойчивые значения могут быть получены лишь в результате статистической обработки множества экспериментальных кривых. Как показали результаты проведенных исследований устойчивые положения средних кривых могут быть достигнуты при пяти испытаниях на каждом уровне напряжений с фиксированным значением коэффициента асимметрии цикла напряжений.

Средние кривые, представляющие собой математические ожидания семейств реализации случайной функции, т.е. групп экспериментальных кривых энергии внутреннего трения, полученных при неизменных условиях эксперимента, определялись как совокупности математических ожиданий последовательных сечений случайной функции при данном значении аргумента, т.е. числа циклов нагружения.

Определение средних кривых описанным выше способом возможно только при условии обеспечения совместимости характерных областей кривых одного и того же семейства. Это объясняется тем, что рассеянию подвержены не только величины энергии внутреннего трения, но и числа циклов до разрушения. Совместимость обеспечивалась преобразованием величин, откладываемых по осям координат. Наличие средних кривых позволило получить средние значения предельной суммарной энергии внутреннего трения в процессе усталости до момента

разрушения.

В п.2.4 кратко рассмотрены методики определения пределов выносливости металлов (метод "лестницы") и уравнений кривых усталости (регрессионный анализ).

Глава 3. Результаты экспериментального исследования.

В п. 3.1 представлены результаты исследования усталостной прочности при симметричных и асимметричных циклах напряжений с коэффициентами асимметрии $-0,33$ и $-0,60$ при частоте нагружения 1000 цикл/мин. Значение $R_6 = -0,33$, как выяснилось в процессе эксперимента, является предельным для данных материалов, при котором еще может быть построена полная кривая усталости. Для более высоких значений коэффициента асимметрии проведение испытаний связано с риском возникновения пластических деформаций на верхних уровнях напряжений усталостной кривой.

Пределы выносливости определены по результатам испытаний $I3 + I5$ образцов на каждую кривую. Наклонные участки кривых усталости получены в результате испытаний не менее пятнадцати образцов на каждую кривую; число уровней напряжений принималось от трех до семи, а количество образцов, испытанных при одном и том же напряжении - от трех до девяти.

Все испытания проведены в количествах, достаточных для статистической обработки с целью получения средних характеристик циклической прочности, а также параметров ее рассеяния.

Общее число испытанных образцов (включая предварительные исследования и отработку методик) составило более четырехсот.

Полученные в результате эксперимента усталостные кривые приведены на рис. 2а и б, соответственно для стали 45 и стали 40Х, а их основные характеристики - в таблице 2. Из этой таблицы следует, что с изменением коэффициента асимметрии цикла напряжений наблюдается уменьшение как числа циклов до точки перелома усталостной кривой, так и показателя степени в уравнении кривой усталости. Предел выносливости, выраженный в максимальных напряжениях цикла, возрастал.

Для определения показателя степени в уравнении усталостной кривой при асимметричном нагружении можно воспользоваться найденными в процессе обработки эксперимента корреляционными зависимостями вида:

$$m' = MR_6 + K, \quad (7)$$

графическая интерпретация которых приведена на рис. 3. Результаты сравнения значений m' , определенных из эксперимента и рассчитан-

Таблица 2

R_b		-1,00	-0,60	Δ %	-0,33	Δ %
Сталь 45	σ_R МПа	259,7	288,5	11,1	319,4	23,0
	m'	15,129	13,430	-11,2	12,303	-18,7
	$N_{C,R}$	$8,467 \cdot 10^5$	$7,042 \cdot 10^5$	-16,8	$6,255 \cdot 10^5$	-26,1
Сталь 40X	σ_R МПа	293,8	330,4	12,5	365,9	24,5
	m'	13,254	11,708	-11,7	10,771	-18,7
	$N_{C,R}$	$8,973 \cdot 10^5$	$6,932 \cdot 10^5$	-22,8	$6,292 \cdot 10^5$	-29,9

Примечание: $m' = m$ при $R_b = -1,00$

ны по формуле (7), а также величины M и K представлены в табл.3. Совместное рассмотрение рис.3 и табл.3 позволяет заключить, что зависимость между m' и R_b является линейной и с высокой точностью описывается выражением (7).

Таблица 3

Марка стали	R_b	m'		Δ %	M	K
		расчет	эксп-т			
Сталь 45	-1,00	15,086	15,129	0,3	-4,153	10,933
	-0,60	13,425	13,430	0,0		
	-0,33	12,303	12,303	0,0		
Сталь 40X	-1,00	13,184	13,254	0,5	-3,582	9,602
	-0,60	11,751	11,708	0,4		
	-0,33	10,184	10,771	0,1		

Примечание $m' = m$ при $R_b = -1,00$

В п.3.2 приведены результаты экспериментального исследования энергии внутреннего трения при различной асимметрии циклов напряжений.

Измерение уровня внутреннего трения осуществлялось в процессе каждого усталостного испытания. На рис. 4а в качестве примера

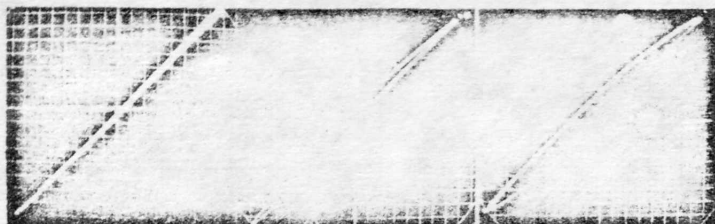


Рис. 1.

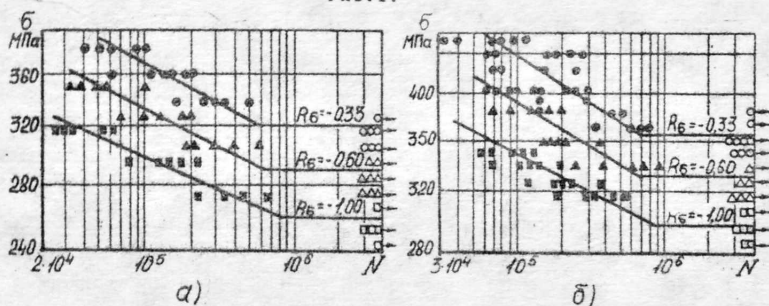


Рис. 2.

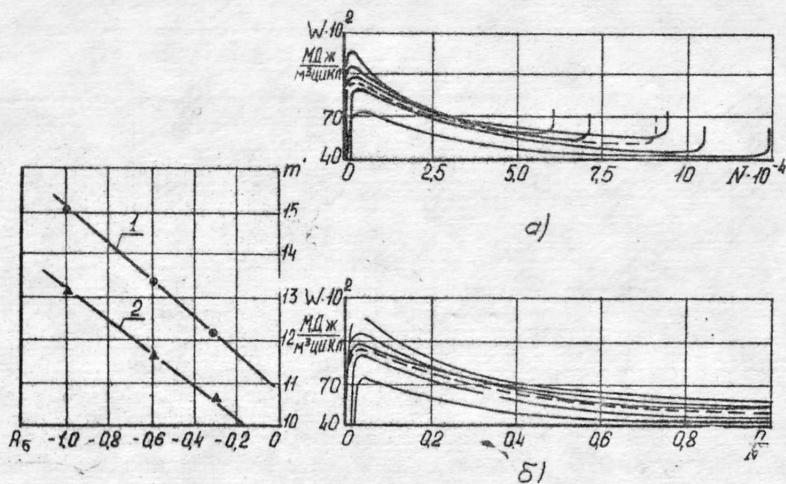


Рис. 3.

Рис. 4.

приведены кривые энергии внутреннего трения при $R_6 = -1,00 \text{ б}_{\text{та.}} = 272 \text{ МПа}$. Сплошными линиями представлено изменение уровня внутреннего трения, полученное в каждом отдельном испытании одного образца до разрушения, а пунктирными – средние кривые каждой группы. Используя для определения последних кривые внутреннего трения в относительных координатах (п.2.3) приведены на рис. 4б. На участках максимумов интервалы между сечениями по оси абсцисс кривых равны 0,01, на остальных участках – 0,1. Определение средних кривых, представленных на рис.5 (а – сталь 45, б – сталь 40Х) производилось графическим способом.

Процесс внутреннего трения обычно подразделяется на три этапа. На первом этапе имеет место прогрессивный рост рассеиваемой энергии, которая стабилизируется с началом второго этапа, имеющего наибольшую продолжительность и резко возрастает на третьем этапе, соответствующем конечной стадии усталостного разрушения. Наблюдавшийся в данном исследовании процесс внутреннего трения характеризуется наличием еще одного этапа, именуемого в литературе инкубационным периодом процесса усталости. Его продолжительность составляет, в среднем, 5–6% общей долговечности и зависит от уровня действующих напряжений и коэффициента асимметрии цикла. Наблюдается в начальный период процесса усталости, уровень рассеиваемой при этом энергии постоянен, раскрытие петли гистерезиса минимально. Его регистрация оказалась возможной вследствие относительно низкой частоты испытаний.

Для обоих исследованных металлов интенсивность процесса внутреннего трения при увеличении асимметрии напряжений снижалась – экспериментальные кривые становились более пологими без ярко выраженных экстремумов.

В п.3.3 описываются энергетические закономерности и приводятся расчетные зависимости для определения пределов выносливости и чисел циклов до разрушения или до точки перелома кривой усталости при асимметричных циклах напряжений.

Для оценки справедливости гипотез, принятых в п.1.3 и полученных на их основании расчетных зависимостей (5), (6) необходимо определить коэффициенты, характеризующие изменение суммарной энергии внутреннего трения и ее структурных составляющих при различной асимметрии цикла напряжений. С этой целью получены методом регрессионного анализа данных эксперимента корреляционные уравнения вида $A(N) = K_0 \sigma^2 N + B$ (здесь $B = K_m \sigma^m N$), графическая интерпретация которых приведена на рис.6. Из этого рисунка следует, что зависи-

мость между предельной энергией внутреннего трения и $\sigma^2 N$ при всех значениях коэффициента асимметрии линейна, а следовательно, $\sigma^2 N$ и $\sigma^m N$ являются, как и предполагалось (п.1.3), энергетическими характеристиками усталостной прочности металлов, отображающими суммарные энергии внутреннего рассеяния и структурных изменений. Значения предельных энергий внутреннего трения в металлах, при различной асимметрии циклов напряжений, приведенные в табл. 4, свидетельствуют об отчетливо выраженной тенденции к уменьшению значения $A(N_G)$ с ростом средних растягивающих напряжений цикла. Следовательно, расчетные зависимости, основанные на гипотезах, не учитывающих данное явление, могут приводить к ошибочным результатам.

Таблица 4

R_σ	σ_R МПа	$A(N_G) \cdot 10^{-3}$ МДж/м ³	R_σ	σ_R МПа	$A(N_G) \cdot 10^{-3}$ МДж/м ³
Сталь 45			Сталь 40Х		
-1,00	259,7	212,107	-1,00	293,8	252,092
-0,60	288,5	115,469	-0,60	330,4	101,833
-0,33	319,4	71,721	-0,33	365,9	67,878

Наличие соотношений, связывающих предельные суммарные энергии внутреннего трения с суммарными энергиями внутреннего рассеяния и структурных изменений, а также наличие параметров уравнений кривых усталости при симметричных и асимметричных циклах напряжений позволило, используя зависимости (2) - (4), определить величины коэффициентов K_d , α , β и, тем самым, сопоставить значения пределов выносливости и чисел циклов до точек перелома кривых усталости, полученных экспериментально, с величинами, рассчитанными по соотношениям (5), (6). Найденные значения коэффициентов K_d , α , β и результаты сравнения приведены в табл. 5, из которой видно удовлетворительное совпадение результатов эксперимента со значениями, определенными по соотношениям (5), (6).

Данные табл. 5 свидетельствуют, что во всех случаях значение произведения коэффициентов βK_d настолько близко к единице, что его отличие от единицы может быть объяснено лишь погрешностями эксперимента. Произведение βK_d отображает, в соответствии с (4), пропорциональность между энергетическими характеристиками струк-

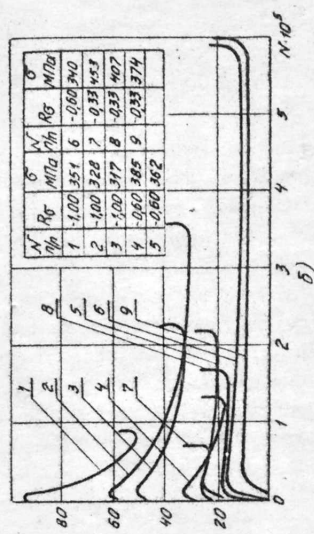
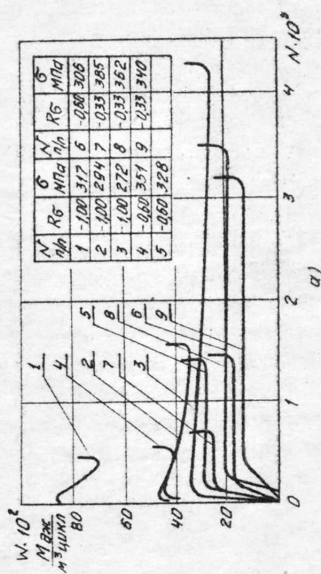


Рис. 5.

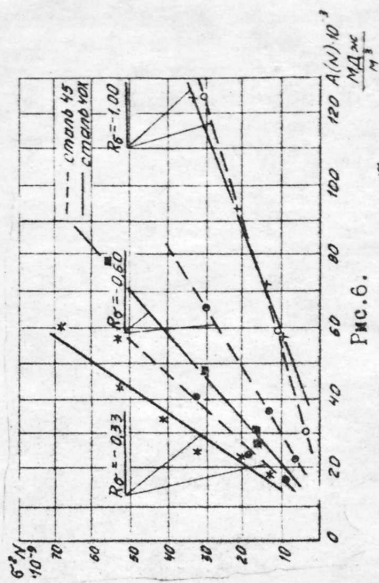


Рис. 6.

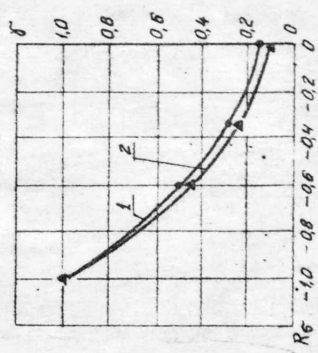


Рис. 7.

турных изменений металла при симметричных и асимметричных циклах напряжений. Следовательно, установленный факт равенства βK_R единице позволяет заключить, что выражение (4) может быть принято в качестве энергетического критерия усталостной прочности деталей машин при асимметричных циклах изменения напряжений. В соответствии с изложенным выше из уравнения (4) следует:

$$\sigma_R = \sigma_{-1} \sqrt{\frac{N_{G,-1}}{N_{G,R}}} \quad (8)$$

из рассмотрения рис. 7, на котором приведена зависимость между $(\beta/\alpha)^{\frac{1}{m-2}}$, обозначенной через γ и R_6 видно, что для исследованных сталей эта взаимосвязь практически одинакова и может быть выражена следующим образом:

$$\gamma = \exp 2 \frac{R_6 + 1}{R_6 - 2} \quad (9)$$

Это свидетельствует об одинаковом характере протекания процесса изменения энергии внутреннего трения при возрастании асимметрии цикла напряжений в сталях различных марок.

Учет отмеченных закономерностей позволяет преобразовать расчетные формулы (5), (6) к более удобному для практического использования виду:

$$\sigma_R = \sigma_{-1}^{\frac{m'-m}{m'-2}} \cdot \exp 2 \frac{R_6 + 1}{R_6 - 2} \quad (10)$$

$$N_{G,R} = \sigma_{-1}^{\frac{2(m'-m)}{m'-2}} \cdot \exp \left(-4 \frac{R_6 + 1}{R_6 - 2} \right) \cdot N_{G,-1} \quad (11)$$

В табл. 6 представлены результаты сравнения значений σ_R и $N_{G,R}$, рассчитанных по выражениям (10), (11) и определенных экспериментально. Таким образом, экспериментальные исследования

данной работы подтверждают правомерность принятых в п. 1.3 исходных предположений, а также полученных на их основе зависимостей (5), (6) и (10), (11). Пренебрежение в расчетах числами циклов до точек перелома кривых усталости при определении пределов выносливости при асимметричных циклах по значениям пределов выносливости при симметричных циклах могут привести к существенным погрешностям расчетов и не отвечают физическим (энергетическим) представлениям о процессе усталости металлов.

Таблица 5

Марка стали	R_b	K_A	Δ	β	ΔK_A	βK_A	σ_R , МПа		$N_{C,R} \cdot 10^{-5}$		Δ	$\%$
							расчет	эксп-т	расчет	эксп-т		
Сталь 45	-0,60	1,87958	2,49184 10^3	0,52135	4,68361 10^3	0,97992	282,7	288,5	7,16	6,88	4,1	
	-0,33	2,97135	2,64390 10^5	0,29145	7,85595 10^5	0,86600	315,2	319,4	6,52	6,35	2,7	
Сталь 40X	-0,60	2,42659	7,55958 10^2	0,41220	1,82440 10^3	1,00024	335,1	330,4	6,83	7,03	2,8	
	-0,33	3,66625	4,38856 10^4	0,24926	1,60896 10^5	0,9133	370,5	365,9	6,12	6,27	2,4	

Таблица 6

Марка стали	R_b	σ_R , МПа		$N_{C,R} \cdot 10^{-5}$		Δ		Δ	
		расчет	эксп-т	расчет	эксп-т	расчет	эксп-т	расчет	эксп-т
Сталь 45	-0,60	286,9	282,7	6,81	7,16	1,5	4,9		
	-0,33	310,1	315,2	5,83	6,52	1,6	10,6		
Сталь 40X	-0,60	333,5	335,1	6,90	6,83	0,5	1,0		
	-0,33	369,2	370,5	5,63	6,12	0,4	8,0		

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Энергетические представления позволяют осуществлять непосредственную экспериментальную проверку гипотез циклической прочности металлов.

2. При исследовании усталостной прочности металлов наиболее точные результаты могут быть получены при напряжениях растяжения-сжатия и использовании прямого метода измерения энергии внутреннего трения - метода динамической петли гистерезиса.

3. Усовершенствована аппаратура, применяемая при исследованиях методом динамической петли гистерезиса. Разработаны и изготовлены тензометрическое устройство, сохраняющее свою работоспособность после разрушения образца, а также приспособление для охлаждения рабочей части образцов в процессе испытаний. Модернизированы датчик частоты нагружений, предельный выключатель по разрушению образца, система динамического силоизмерения испытательной машины ЦДМПу-10.

4. При изменении коэффициента асимметрии цикла от $-1,00$ до $-0,33$:

а) уменьшается как рассеиваемая за цикл нагружения, так и суммарная энергия внутреннего трения до точки перелома усталостной кривой;

б) усталостные кривые при коэффициентах асимметрии отличных от $-1,00$ смещаются влево и вверх по отношению к кривым усталости при коэффициенте асимметрии $-1,00$; это смещение тем больше, чем больше отличие между коэффициентами асимметрии;

в) зависимость между пределами выносливости и коэффициентами асимметрии линейна.

5. Предельная суммарная энергия внутреннего трения является энергетической характеристикой усталостной прочности металлов как при симметричных, так и при асимметричных циклах напряжений.

6. Предложено и экспериментально проверено условие, которое может быть принято в качестве энергетического критерия усталостной прочности деталей машин при асимметричном нагружении.

7. На основании энергетических закономерностей циклической прочности металлов получены формулы (5), (6), которые проверены экспериментально и приведены к виду (10), (11), удобному для практического использования. Они позволяют с точностью, достаточной для инженерных расчетов, определять пределы выносливости и числа циклов до точек перелома кривых усталости при асимметричных циклах

напряжений.

8. Результаты теоретических и экспериментальных исследований данной работы позволили разработать физически обоснованную методику расчета металлов на сопротивление усталости при асимметричных циклах напряжений.

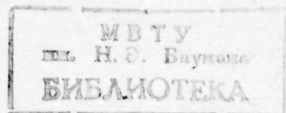
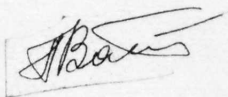
По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. Чатынян Р.М., Пузько В.Б. О методике исследования внутреннего рассеяния энергии в процессе усталости металлов. - ИВУЗ. Машиностроение, 1982, № 12, с. 17-20.

2. Чатынян Р.М., Пузько В.Б. Расчетное определение пределов выносливости при асимметричных циклах напряжений. - ИВУЗ. Машиностроение, 1984, № 5, с. 23-25.

3. Пузько В.Б. Энергетические закономерности усталости металлов при асимметричных циклах напряжений. - ИВУЗ. Машиностроение, 1984, № 6, с. 9-13.

М432.123



Подписано к печати 26.02.85 Объем I п.л.
Тираж 120 экз. ВД 07163 Заказ 390

Отпечатано в офсетной лаборатории ДВВИМУ
690059, г.Владивосток, ул. Верхне-Портовая, 50а.