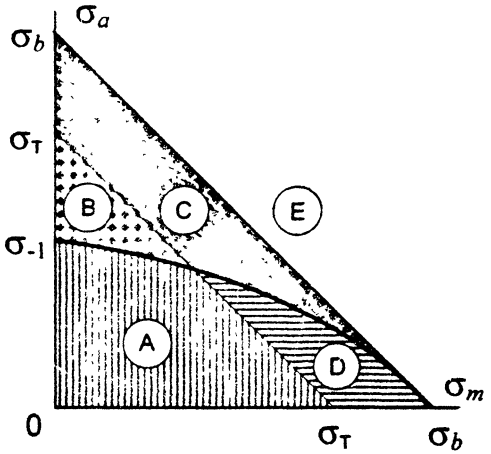
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ВОЛГОГРАДСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра «Сопротивление материалов»

ИСПЫТАНИЯ МЕТАЛЛОВ НА УСТАЛОСТЬ

Методические
указания к лабораторной работе



РПК «Политехник»
Волгоград 2001

УДК 620.178.3

Испытания металлов на усталость: Методические указания к лабораторной работе / Сост. В. П. Багмутов, В. И. Водопьянов, О. В. Кондратьев. – ВолгГТУ, Волгоград. – 2001. – 20 с.

Приведены и разъяснены стандартные термины и понятия об усталостной прочности, распространенные методики испытаний на усталость. Описана методика выполнения лабораторной работы по построению кривых усталости и диаграммы предельных амплитуд на основе имеющегося набора экспериментальных данных. Анализируются области диаграммы предельных амплитуд, рассматриваются варианты ее аппроксимации.

Предназначены для студентов, изучающих дисциплины «Механические свойства металлов» и «Эксплуатационные свойства конструкционных материалов».

Ил. 12. Библиогр.: 6 назв.

Рецензент А. Н. Савкин

Печатается по решению редакционно-издательского совета Волгоградского государственного технического университета

© Волгоградский государственный технический университет, 2001

Цель работы: ознакомление с методиками усталостных испытаний; экспериментальное определение характеристик усталостной прочности металла; построение диаграммы предельных амплитуд и ее анализ. По результатам усталостных испытаний определить области диаграмм предельных амплитуд, отличающиеся различным характером циклического повреждения и разрушения образцов.

1. Теоретическая часть

1.1. Понятие об усталости металлов

Едва ли найдется в живой и неживой природе, технике тело, часть ела, элемент конструкции, которые испытывали бы только статические, не изменяющиеся во времени нагрузки. Цикличность действия нагрузок может быть обусловлена различными факторами: силами природы, условиями эксплуатации машин и механизмов, жизнедеятельностью человека. Практически не найдется ни одной машины, энергетической установки, химического аппарата, не испытывающих действия циклических нагрузок.

В некоторых случаях доля циклической составляющей нагрузки в общей невелика и при расчетах на прочность не учитывается. В других случаях пренебрежение переменной составляющей нагрузки или ее неправильный учет приводит к авариям и разрушениям подчас с тяжелыми последствиями и человеческими жертвами. Актуальность исследования механических свойств при переменных (циклических) нагружениях вызвана тем, что накопление дефектов, развитие трещин происходит постепенно и часто при напряжениях, существенно меньших предела текучести. Сам же акт разрушения может быть скоротечным

ГОСТ 23207-78 дает следующие определения (выделены курсивом).

Усталость *– процесс постепенного накопления повреждений материала под действием переменных напряжений, приводящий к изменению свойств, образованию трещин, их развитию и разрушению.*

Накопление повреждений начинается задолго до окончательного разрушения, протекает незаметно. Разрушение, как правило, наступает внезапно. Усталость, согласно статистике, является причиной около 80 % разрушений изделий машиностроения.

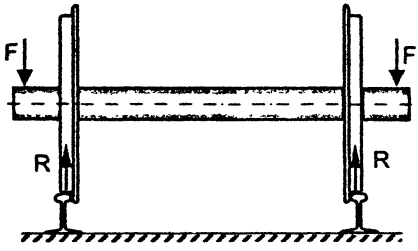


Рис. 1

Причиной, вызвавшей начало исследований усталостной прочности, стали участившиеся в первой половине XIX века разрушения колесных пар железнодорожных вагонов. В оси этой сборки возни-

кают переменные напряжения от изгиба при вращении. На рис. 1 обозначения следующие: F – часть силы тяжести вагона; R – реакция рельса.

Начало систематическим исследованиям по проблеме усталостного разрушения было положено классическими испытаниями немецкого инженера Альберта Вёлера (Wöhler) (годы жизни 1819 – 1914), проводившимися в 1852 – 1869 годах. Им определялась зависимость между максимальными нормальными напряжениями при симметричном изгибе и числом циклов до разрушения. Такую зависимость иногда по традиции называют *кривой Велера*, отмечая тем самым его вклад в изучение проблемы усталости материалов.

Количественную оценку способности материала или элемента конструкции сопротивляться усталостному разрушению дают на основе результатов усталостных испытаний. Наиболее полные сведения можно получить при проведении натурных испытаний *элементов конструкций*, которые позволяют учесть одновременно множество факторов: свойство материала, форму детали, ее размеры (играет роль так называемый масштабный фактор), особенности технологии изготовления и др. Такие испытания требуют специального оборудования, весьма дороги, применяются редко. Обычно проводят испытания *лабораторных образцов*, форма и размеры рабочей части, как правило, стандартизованы. В такого рода испытаниях определяют механические *свойства материала*, из которого изготавливают элемент конструкции.

1.2. Виды циклов и их параметры

Характер изменения напряжений σ во времени t во многом определяется техническими возможностями имеющегося испытательного оборудования.

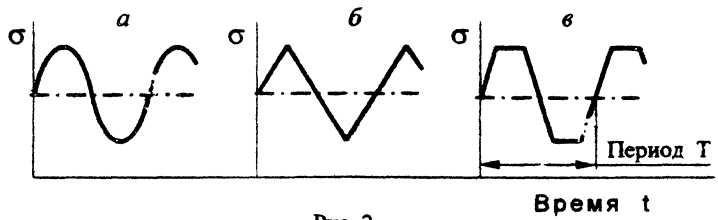


Рис. 2

Циклом называют замкнутую однократную смену напряжений, проходящих непрерывный ряд значений. Время, в течение которого протекает один цикл, называется ***периодом***.

В подавляющем числе случаев напряжение в элементах механических систем изменяется периодически. Совокупность последовательных значений напряжений за один период их изменения T называется ***циклом напряжений*** или просто ***циклом***.

Различают гармонический (рис. 2, а), треугольный (рис. 2, б), трапецеидальный (рис. 2, в) и другие виды циклов, а также их всевозможные сочетания,

например, бигармонический – результат сложения двух гармонических с разной частотой и амплитудой. График изменения напряжений по гармоническому циклу представлен на рис. 3.

Максимальное напряжение цикла σ_{max} *– наибольшее по алгебраическому значению напряжение цикла.*

Минимальное напряжение цикла σ_{min} *– наименьшее по алгебраическому значению напряжение цикла.*

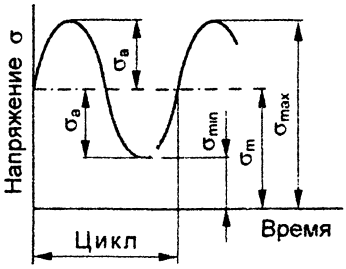


Рис.3 График изменения напряжений во времени по гармоническому циклу

Среднее напряжение цикла σ_m *– постоянная составляющая цикла напряжений, равная алгебраической полусумме максимального и минимального напряжений цикла;*

$$\sigma_m = 0{,}5(\sigma_{max} + \sigma_{min})$$

Амплитуда напряжений цикла σ_a *– наибольшее числовое положительное значение переменной составляющей цикла,* равной алгебраической полуразности σ_{max}, σ_{min};

$$\sigma_a = 0{,}5(\sigma_{max} - \sigma_{min}).$$

Коэффициент асимметрии цикла напряжений R_σ *– отношение минимального напряжения цикла к максимальному* $R_\sigma = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$. По асимметричному циклу нагружены, например, спицы велосипедного колеса При сборке колеса спицы натягиваются напряжением σ_m При езде в той спице, которая оказалась в верхней части колеса, напряжения возросли до σ_{max}, а в спице на противоположной стороне уменьшились до σ_{min}. Через половину оборота ситуация меняется на обратную. Другой пример: автомобильная рессора при движении по ровной дороге нагружена напряжением σ_m. Если колесо попадает в выбоину, напряжения падают до σ_{min}, а при наезде на кочку – увеличиваются до σ_{max}

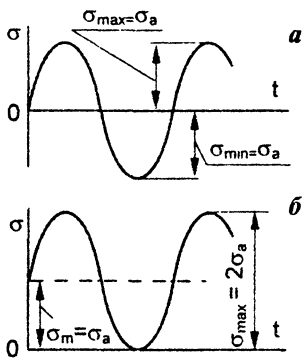


Рис. 4

Наиболее употребительны при испытаниях на выносливость симметричный и отнулевой циклы.

Симметричный цикл напряжений *– цикл, у которого максимальное и минимальное напряжения равны по абсолютному значению, но противоположны по знаку;* $R_\sigma = -1$ (рис. 4, а). Примером такого цикла может служить закон

изменения напряжений в колесной паре железнодорожного вагона (рис 1). Так же изменяются напряжения в мембране динамика акустической системы

Отнулевой цикл напряжений *– знакопостоянный цикл напряжений, изменяющихся от нуля до максимума* ($\sigma_{max} > 0$, $\sigma_{min} = 0$, $R_\sigma = 0$), *или от нуля до минимума* ($\sigma_{max} = 0$, $\sigma_{min} < 0$, $R_\sigma = \infty$) (рис. 4, б). По отнулевому циклу изменяются напряжения в канале орудийного ствола при выстреле. Зуб зубчатой пары, входя в зацепление, испытывает напряжение изгиба. По выходе из зацепления напряжения в зубе падают до нуля.

Замечание: выше и далее под σ понимались нормальные напряжения, но аналогичные испытания проводятся также при циклическом изменении касательных напряжений или при их одновременном изменении.

1.3. Кривая усталости и предел выносливости

1.3.1. Основные участки кривой усталости

Кривая усталости *– график, характеризующий зависимость между максимальными напряжениями σ_{max} или амплитудами цикла σ_a и циклической долговечностью N одинаковых образцов, построенный при фиксированном среднем напряжении цикла $\sigma_m = const$, или при заданном коэффициенте асимметрии цикла $R_\sigma = const$*

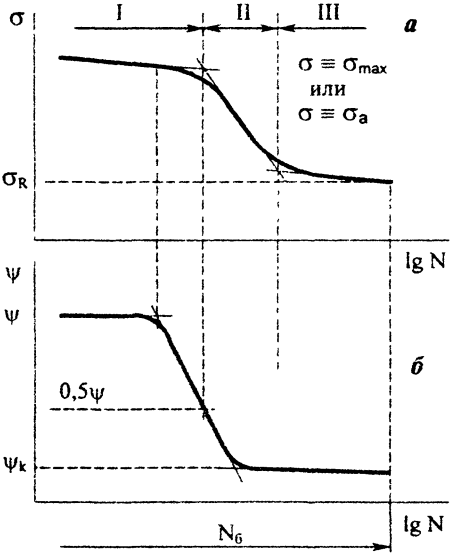


Рис. 5. Кривая усталости (а); изменение относительного остаточного сужения разрушенных образцов (б)

Кривую усталости представляют как в полулогарифмических координатах (рис. 5), так и в двойных (lg σ – lg N) логарифмических координатах (реже). Благодаря особенности логарифмической шкалы на ней можно отложить циклическую долговечность, исчисляемую как единицами циклов, так десятками и сотнями миллионов без потери физической сущности явления.

Зависимость между действующими напряжениями и числом циклов до разрушения имеет вид, называемый в литературе S-образным, что обусловлено наличием на кривой усталости (рис. 5, а) двух перегибов и трех основных участков, отличающихся типом разрушения.

Характерной для усталост-

ных испытаний особенностью является значительный разброс результатов опытов, наблюдаемый даже при тщательной подготовке к эксперименту и его выполнении. ГОСТ предусматривает испытание нескольких партий образцов (до десятка в партии) при одинаковом (в партии) уровне напряжений При этом циклическая долговечность образцов в одной партии может отличаться на порядок (т.е в десять раз). Для построения кривой усталости пользуются методами математической статистики (методика изложена в ГОСТ)

Четкую границу между участками непосредственно по опытной кривой усталости из-за разброса результатов испытаний выявить достаточно сложно. Однако изучение изменений, происходящих в металле по мере накопления усталостных повреждений, позволило сформулировать признаки, по которым можно характеризовать области кривой усталости. К числу признаков, которые можно использовать в любой заводской лаборатории, можно отнести такие, как относительное сужение сечения ψ (рис. 5, б), относительную площадь, занятую трещиной, длину трещины и т. п.

В пределах I участка происходит выделение и накопление односторонней деформации, приводящей к разрушению, по всем признакам аналогичному статическому растяжению. Характеристики пластичности – относительное удлинение δ и относительное сужение ψ имеют такие же значения (а в некоторых случаях и бо́льшие), чем при статическом разрушении. Характер разрушения образца из пластичного материала такой же, как при однократном растяжении: местное сужение (шейка), излом типа конус-чашка. Из-за этого участок получил название участка (области) **квазистатического разрушения**.

В пределах участка III остаточное удлинение δ и сужение ψ почти отсутствуют ($\psi \to 0$, $\delta \to 0$). Разрушение имеет хрупкий характер и происходит от усталостной трещины (усталостное разрушение). В некоторых случаях участок кривой усталости переходит в горизонтальную линию, соответствующую пределу выносливости σ_R Этот участок получил название участка (области) **многоцикловой усталости**.

На участке II происходит переход от квазистатического типа разрушения (участок I) к усталостному (участок Ш). Процесс циклического деформирования образца, не завершаясь полностью, прерывается развивающейся усталостной трещиной. Относительное сужение $\psi_ц$ и удлинение $\delta_ц$ ниже, чем ψ и δ при статическом растяжении: $\delta_ц < \delta$, $\psi_ц < \psi$. Для участка II характерны признаки двух типов разрушения: хрупкого от усталостной трещины и вязкого – от накопленной односторонней деформации. На фоне развитой шейки можно наблюдать трещины разной длины и степени раскрытия. Этим участком ограничивается область **малоцикловой усталости.**

Малоцикловая усталость *– усталость материала, при которой усталостное повреждение происходит при упругопластическом деформировании.*

Кривую усталости строят по результатам испытаний и используют для определения предельных напряжений цикла и предела выносливости – характе-

ристики механических свойств материала, количественно оценивающей сопротивление циклическим нагрузкам.

1.3.2. Характеристики циклического нагружения

Предельные напряжения цикла *– максимальное и минимальное напряжения цикла, соответствующие пределу выносливости.*

Предел выносливости σ_R *– максимальное по абсолютному значению напряжение цикла, при котором еще не происходит усталостное разрушение до базы испытаний.* Для симметричного цикла $\sigma_R \equiv \sigma_{-1}$ Для отнулевого цикла $\sigma_R \equiv \sigma_0$.

База испытаний *– предварительно задаваемая наибольшая продолжительность испытаний на усталость* Для черных металлов принята база, равная 10^7 циклов. Для цветных металлов – 10^8 циклов. Иногда для оценки усталостной прочности назначают другую базу испытаний, например 10^4 или 10^5. Тогда определяют *ограниченный предел выносливости, соответствующий заданному числу циклов*

Продолжительность испытаний *– продолжительность нахождения нагруженного образца в режиме испытаний.*

Циклическая долговечность *N – число циклов напряжений или деформаций, выдержанных нагружаемым объектом до образования усталостной трещины определенной протяженности или до усталостного разрушения*

Усталостная трещина *– частичное разделение материала под действием переменных напряжений*

Усталостное разрушение *– разрушение материала нагружаемого объекта до полной потери его прочности или работоспособности вследствие распространения усталостной трещины*

Усталостное повреждение *– необратимое изменение физико-механических свойств материала объекта под действием переменных напряжений* Накопление повреждений начинается задолго до окончательного разрушения. Разрушение, как правило, наступает внезапно

1.3.3. Соотношения между характеристиками статической и усталостной прочности

На циклическую прочность оказывают влияние очень много факторов, зависящих не только от механических свойств металла, поэтому прямой связи характеристик усталости с механическими характеристиками, определяемыми при однократном растяжении, нет.

В справочной литературе приведено множество эмпирических зависимостей, связывающих предел выносливости с пределом текучести $\sigma_{0.2}$, пределом прочности $\sigma_в$, относительным удлинением δ, относительным сужением ψ, твердостью НВ, их различными комбинациями. Приведём лишь некоторые из

них, чаще употребляемые. Для сталей средней прочности предел выносливости при чистом изгибе

$$\sigma_{-1} \approx (0{,}4 - 0{,}5)\sigma_{в}.$$

Для цветных металлов предел выносливости изменяется в более широких пределах

$$\sigma_{-1} \approx (0{,}25 - 0{,}50)\sigma_{в}.$$

При других видах нагружения зависимости иные. Так, при кручении для обычных сталей

$$\tau_{-1} \approx 0{,}56\sigma_{-1},$$

а для хрупких материалов (высокопрочная сталь, чугун)

$$\tau_{-1} \approx 0{,}8\sigma_{-1}.$$

Для ориентировочных расчетов применяют установленные на основе многочисленных исследований приближенные соотношения между пределом прочности и пределом выносливости. Так, при симметричном изгибе с вращением лабораторного образца из углеродистой стали $\sigma_{-1} \approx 0{,}43\ \sigma_b$. При других видах деформации связь между упомянутыми характеристиками иная. Так, для растяжения-сжатия принимают $\sigma^0_{-1} \approx 0{,}28 \cdot \sigma_b$.

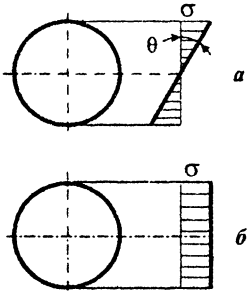


Рис. 6

Более низкие значения усталостной прочности при растяжении-сжатии по сравнению с изгибом $\sigma^0_{-1} \approx (0{,}7 - 0.9)\sigma_{-1}$ можно объяснить следующим образом. При изгибе эпюра распределения напряжений по сечению (например, круглому) имеет вид треугольника (рис. 6, *а*) вершиной к центру. Наибольшие напряжения возникают на периферии, а центральные слои разгружены. По этой причине скорость роста трещины усталости, зародившейся на поверхности, замедляется по мере ее продвижения к центру. То есть внутренние слои оказывают поддерживающее влияние. Сопротивление усталости зависит от скорости убывания напряжений по мере углубления внутрь металла. Эта скорость может быть охарактеризована тангенсом угла наклона эпюры распределения напряжений, который равен производной dσ/dx, где x – расстояние от поверхности до некоторой точки поперечного сечения, взятое по радиусу $G = \dfrac{d\sigma}{dx} = tg\theta$. Величина G называется градиентом напряжений и имеет размерность МПа/мм.

Иная картина при растяжении-сжатии: все точки сечения напряжены одинаково (рис. 6, б), продвижение трещины ничем не сдерживается. Вследствие этого предел выносливости при симметричном цикле растяжения-сжатия со-

ставляет примерно 0,7–0,9 предела выносливости симметричного цикла изгиба.

Аналогичными рассуждениями дается одно из объяснений так называемого *масштабного эффекта*, заключающегося в более низком сопротивлении усталости крупногабаритных образцов или деталей по сравнению с лабораторными, имеющими диаметр 8–10 мм. Для крупных образцов эпюра напряжений на рис. 6, а более полога, т. е. скорость уменьшения напряжений (градиент) по мере приближения к центру меньше. При изгибе и кручении пределы выносливости снижаются на 30-50% с увеличением диаметра до 200 мм. При растяжении-сжатии гладких образцов размеры существенного влияния не оказывают.

Указанные эмпирические зависимости отвечают лишь отдельным частным случаям и не могут рассматриваться универсальной связью. Следует заметить, что столь большое колебание этих коэффициентов обусловлено не только природой явлений, протекающих в металле, но и точностью определения пределов выносливости. Последняя значительно меньше, чем точность определения пределов текучести. Если пределы текучести определяются с точностью ±(2–3) %, то ошибки при определении пределов выносливости будут не меньше ±6 %. Ошибка при определении величины отношения двух пределов выносливости соответственно удваивается.

1.3.4. Влияние асимметрии нагружения на предел выносливости и вид кривой усталости

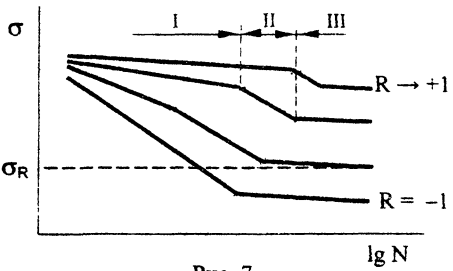


Рис. 7

Протяженность участков кривой усталости и их взаимное расположение зависит от многих факторов, основные из которых – характеристики пластичности δ и ψ, характеристики прочности σ_b, $\sigma_{0,2}$ и асимметрия нагружения. На рис. 7 представлена схема влияния асимметрии цикла на величину предела выносливости и протяженность характерных участков кривой усталости. Так, при симметричном (R= -1) цикле нагружения, когда среднее напряжение $\sigma_m = 0$, накопления односторонней деформации не происходит, имеет место хрупкое разрушение. Участок I вырождается, кривая усталости состоит фактически только из двух ветвей: левой наклонной и правой – горизонтальной или наклоненной к оси долговечности под малым углом. Напротив, при $R \to +1$, когда $\sigma_m \to \sigma_b$ для большей части кривой усталости характерно квазистатическое разрушение. Переходный участок II смещается в область бóльших долговечностей, а протяженность его уменьшается. На приведенной схеме по оси ординат отложено максимальное напряжение цикла σ_{max}.

На основе семейства кривых усталости при разных коэффициентах асимметрии цикла (рис. 7) строят диаграмму предельных напряжений или диаграмму предельных амплитуд.

1.4. Диаграмма предельных амплитуд

В расчетах на прочность при любом виде нагружения предполагается сопоставление расчетных напряжений с допускаемыми или предельными, т. е. проверяется условие прочности. Значения предельных (а значит и допускаемых) получают на основе эксперимента. Предельными при переменных нагрузках являются пределы выносливости. Наиболее просто, с позиции реализации эксперимента, выполнить испытания при симметричном ($R_\sigma = -1$) цикле. Однако в реальных конструкциях подавляющее большинство деталей работает при асимметричном нагружении. Поэтому, чтобы обеспечить корректность расчета, необходимы сведения о пределах выносливости для любой асимметрии цикла. В расчетной практике обычно пользуются двумя типами диаграмм.

На основе семейства кривых усталости (рис. 7) определяют пределы выносливости σ_R. По заданному коэффициенту асимметрии цикла R_σ вычисляют максимальное и среднее напряжения цикла, соответствующие пределу выносливости, и строят *диаграмму предельных напряжений Смита* (Smith) в координатах $\sigma_{max} - \sigma_m$.

Бо́льшее распространение получила диаграмма Хейга. Зная коэффициент асимметрии цикла R_σ и предел выносливости σ_R, вычисляют амплитуду σ_a и среднее напряжение цикла σ_m. Используя последние как координаты, строят *диаграмму предельных амплитуд Хейга* (Haigh).

Диаграмма предельных амплитуд цикла *– график, характеризующий зависимость между значениями предельных амплитуд напряжений и значениями предельных средних напряжений цикла для заданной долговечности $N = const$* Обычно N соответствует базе испытаний

По абсциссе σ_m и ординате σ_a на диаграмме ставят точку (рис.8, точка M), которая должна быть на луче OM. Угол наклона луча определяется отношением

$$tg\beta = \frac{\sigma_a}{\sigma_m} = \frac{1 - R_\sigma}{1 + R_\sigma}.$$

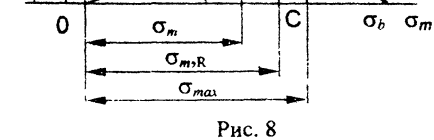


Рис. 8

На луче откладывают подобные циклы. ***Подобными*** *называются циклы, имеющие одинаковое значение коэффициента асимметрии цикла.* Все результаты испытаний при заданном коэффициенте асимметрии цикла R_σ будут отложены на этом луче.

Линия АМВ – геометрическое место точек, соответствующих пределам выносливости при разных коэффициентах асимметрии цикла для заданной базы испытаний. Особо можно выделить два частных случая. Если среднее напряжение цикла (постоянная составляющая) $\sigma_m=0$, то предел выносливости равен σ_{-1}, т. е. цикл нагружения – симметричный (точка А). При отсутствии переменной составляющей ($\sigma=0$) разрушение наступит при $\sigma_m=\sigma_b$ (точка В). Этому случаю соответствует статическое растяжение до разрыва.

Максимальное разрушающее напряжение цикла определяется как сумма двух отрезков ОС и СМ, равных соответственно среднему напряжению и амплитуде (определение σ_{max} для произвольного напряжения $\sigma_{max} < \sigma_{max,R}$ показано на схеме пунктиром). Таким образом, задав значение коэффициента асимметрии R_σ, можно построить луч ОМ и найти значение амплитуды σ_a (отрезок СМ) и среднего напряжения цикла σ_m (отрезок ОС), соответствующие пределу выносливости.

В расчетной практике диаграмму предельных амплитуд используют и для определения запаса усталостной прочности. Если параметры рабочего цикла образца (σ_a и σ_m) соответствуют некоторой точке D, расположенной под предельной кривой, то образец способен выдержать неограниченное число циклов или сохранять прочность до базового числа. Коэффициент запаса прочности будет равен отношению отрезков ОМ к OD.

Поскольку испытания на усталость требуют больших затрат труда, средств и времени, то не прекращаются попытки аналитического описания диаграммы предельных амплитуд (поиск аппроксимирующих зависимостей). Из множества известных зависимостей упомянем лишь две, позволяющие определить амплитуду предела выносливости. Это парабола Гербера (1874 г.), очертания которой близки к линии АМВ на рис. 8

$$\sigma_R = \sigma_{-1}\left[1-\left(\frac{\sigma_m}{\sigma_b}\right)^2\right]$$

и прямая Гудмана (1899 г.), соединяющая точки А и В на рис.8, дающая более консервативные (т. е. в сторону увеличения запаса прочности) результаты:

$$\sigma_R = \sigma_{-1}\left(1-\frac{\sigma_m}{\sigma_b}\right).$$

Следует заметить. что поскольку механические характеристики конструкционных материалов могут сильно отличаться друг от друга, универсальных аппроксимирующих зависимостей не найдено. Кривая или ломаная, выпуклые кверху, больше подходят для описания экспериментальных результатов с пластичными материалами Поведение хрупких материалов при циклическом нагружении с меньшей погрешностью описывается прямой линией

Для обоснованного выбора параметров рабочего цикла элемента конструкции с учетом механических свойств материала этого элемента рассмотрим несколько областей, выделенных на диаграмме предельных амплитуд (рис. 9).

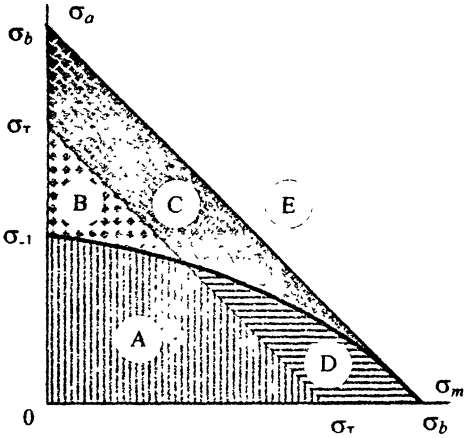


Рис. 9. Характерные области диаграммы предельных амплитуд

Области ограничены собственно кривой предельных амплитуд (геометрическим местом пределов выносливости σ_R), координатными осями (σ_m и σ_a) и линиями предельных напряжений, соответствующих характеристикам прочности: пределу текучести $\sigma_т$ - $\sigma_т$ и пределу прочности σ_b - σ_b. Каждая из этих областей (или их сочетания) характеризуется наличием или отсутствием различного рода повреждений. Так, если максимальное напряжение цикла при любом коэффициенте асимметрии не выйдет за пределы областей А и В – треугольника, катеты которого соответствуют пределу текучести, образец не получит пластической деформации. Если максимальное напряжение цикла выйдет за пределы упомянутого треугольника, но останется внутри трапеции, состоящей из областей С и D, стороны которой соответствуют пределу прочности, образец получит пластическую деформацию, но не разрушится в первом цикле. Усталостного разрушения до базы испытаний не наступит для образцов, нагруженных так, что максимальное напряжение не выйдет за пределы области, ограниченной треугольником, состоящим из двух областей А и D. Область Е – неосуществимых циклов.

2. Оборудование и образцы

2.1. Машины для испытаний на усталость

Построение кривой усталости представляет весьма трудоемкую задачу. Для проведения испытаний применяют специальные машины, которые по виду нагружения можно разделить на несколько групп. Простейшие испытательные машины позволяют проводить испытания при изгибе с вращением (не кручением!) образца (рис. 10). Реализуется схема чистого изгиба, характерная для осей подвижного состава железных дорог (см. рис. 1). От двигателя посредством муфты вращение передается образцу. После пуска двигателя к образцу прикладывают силы F и включают счетчик числа циклов. При разрушении образца машина автоматически отключается.

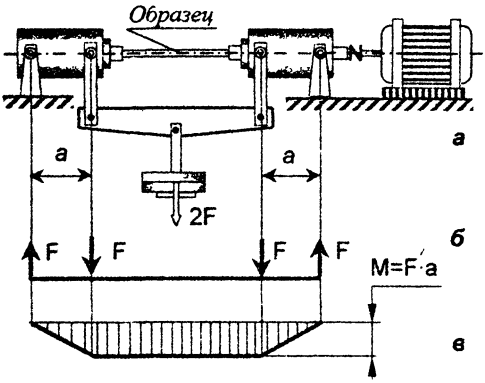


Рис. 10. Схема испытательной машины (а), расчетная схема (б) и эпюра изгибающих моментов в образце (в) при испытании чистым изгибом с вращением

Еще проще реализуется схема поперечного изгиба при вращении образца (рис. 11, а) или поперечного изгиба в одной плоскости (рис. 11, б). Недостатком таких схем является непостоянство внутреннего усилия по длине образца. Частота изменения напряжений в образце при испытаниях по схемам рис. 10 и 11, а обычно 3000 цикл/мин.

Благодаря своей простоте испытательные машины таких типов наиболее распространены. По этой причине большинство исследований проведено именно на таком оборудовании, и основные закономерности усталостной прочности выведены для симметричного цикла при изгибе с вращением образца, реже – при плоском изгибе.

Испытания при повторно-переменном растяжении-сжатии требуют более сложного и дорогостоящего оборудования. Сила F прикладывается вдоль оси образца (рис. 11, в). В настоящее время применяют несколько вариантов приложения силы к активному захвату

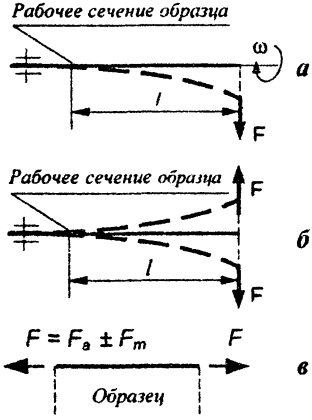


Рис. 11. Схемы нагружения образцов

Механический привод: электродвигатель → зубчатая и винтовая передача → траверса → захват → образец. Скорость нагружения – несколько циклов в минуту.

Гидравлический привод: электродвигатель → масляный насос → гидропульсатор → траверса → захват → образец. Скорость нагружения – несколько сотен циклов в минуту; испытания до базы 10^7 циклов займут 300-500 часов непрерывной работы. Результаты испытаний, которые обрабатывают студенты в настоящей лабораторной работе, получены на гидравлической машине МУП-20 при частоте нагружения 350 цикл/мин.

Электродинамический привод: электромагнит → якорь → (возможно

рычаг) захват → образец. Частота – несколько сотен циклов в секунду.

Магнитострикционный метод нагружения использует физическое свойство некоторых металлов изменять свои размеры под действием магнитного поля (аналогия: изменение размеров пьезокристалла под действием электрического поля). Одна головка образца защемляется, к другой головке крепится магнитостриктор. Подается электрический ток с частотой 10–20 кГц, возбуждаются механический колебания. Если к образцу дополнительно приложить растягивающую или сжимающую нагрузку, то цикл колебаний будет асимметричным. База испытаний 10^7 циклов нарабатывается за 10-20 минут, однако начальный участок кривой усталости, примерно до $N = 10^5$ циклов, выпадает из поля зрения экспериментатора. Из-за пластической деформации, проходящей в микрообъемах образца при циклическом нагружении, выделяется тепло, приводящее к интенсивному саморазогреву образца и возможному изменению свойств металла. Приходится применять специальные меры для его охлаждения. Тепло выделяется и при обычных скоростях нагружения, однако, поскольку процесс растянут во времени, оно рассеивается в окружающую среду (воздух), не приводя к заметному росту температуры образца.

Следует заметить, что кривые усталости (и пределы выносливости) при одинаковой схеме нагружения, но разных скоростях испытаний далеко не всегда совпадают. С ростом частоты нагружения пределы выносливости увеличиваются, кривые усталости смещаются в область более высоких напряжений. В первом приближении объяснить это можно тем, что для прохождения пластической деформации (течения) в микрообъемах материала образца требуется некоторый промежуток времени Вспомните, выдержка под нагрузкой при испытаниях на твердость по Бринеллю, Роквеллу составляла не менее 10 с для черных и 30 с для цветных металлов – время, достаточное для **завершения** пластической деформации

2.2. Образцы

ГОСТ 25.502-79 предусматривает 10 типов образцов для усталостных испытаний круглого или прямоугольного поперечного сечения, гладких или с концентратором напряжений и в зависимости от схемы нагружения. Виды испытуемых образцов, их размеры определяются задачей планируемого исследования, принципом действия, мощностью испытательного оборудования, конструкцией захватов машины и др. факторами. Так, если исследуются свойства материала, используют образцы с гладкой, тщательно подготовленной поверхностью. При изучении влияния вида и режимов механической, термической, электромеханической и др. обработок рабочая поверхность, или весь образец подвергается соответствующей обработке. С аналогичными целями на рабочую часть образца наносят концентратор напряжений. В этих случаях испытания классифицируются как сравнительные. Сопоставляются результаты экспериментов образцов, подвергшихся специальной обработке с не подвергавшимися. В некоторых случаях выполняют натурные испытания готовых изделий (деталей, узлов), например, коленчатых валов ДВС.

Рис. 12. Форма бесконцентраторного образца

В настоящей работе использовались гладкие образцы с цилиндрической рабочей частью диаметром 10 мм, переходящей в резьбовые головки М18 посредством галтели радиусом 50 мм. Коэффициент концентрации напряжений в таких образцах близок к единице, их называют бесконцентраторными.

3. Экспериментальная часть

Поскольку продолжительность испытаний на усталость велика и может составить несколько месяцев, то настоящая лабораторная работа основана на обработке полученных ранее результатов испытаний на усталость и выполняется несколькими бригадами, каждая из которых состоит из двух студентов. Порядок выполнения следующий.

3.1. Ознакомиться с процессом испытаний лабораторного образца на усталость. Отразить в отчете тип образца, тип испытательной машины и схему нагружения образца в соответствии с приведенными вариантами в пункте 2. Изучить характер усталостного разрушения образца и схематично представить в отчете вид усталостного разрушения.

3.2. По табличным данным усталостных испытаний лабораторных образцов для конкретного материала и заданного коэффициента асимметрии цикла напряжений, полученным от преподавателя, построить кривую усталости в координатах σ_{max} – lg N.

3.3. Выделить на кривой усталости характерные области (в соответствие с пунктом 1.2) и оценить уровень действующих напряжений (в сравнении с пределом текучести) и долговечность для каждой характерной области.

3.4. Определить на кривой усталости величину предела выносливости исследуемого материала при заданной асимметрии цикла (базовое число циклов $5 \cdot 10^6$) и занести полученные результаты обработки экспериментальных данных в таблицу

Состав бригады	R_σ	σ_{max}, МПа	σ_m, МПа	σ_a, МПа	tg β
Иванов Д., Петрова Н.	-0,5	400	100	300	3
....	...	..	...	...	...

3.5. В таблицу также занести значения пределов выносливости образцов из этого же материала, полученные другими студентами при заданных им коэффициентах асимметрии цикла. По рассчитанным данным построить диаграмму предельных амплитуд.

3.6. Выполнить анализ диаграммы предельных амплитуд, выделив такие области напряжений, при которых:

а) не возникают пластические деформации, и циклы могут повторяться сколько угодно раз;

б) опасность разрушения исключена, но возникают пластические деформации при осуществлении первого цикла,

в) пластические деформации не возникают, но разрушение наступит при достаточно большом числе циклов (область ограниченной выносливости);

г) возникают пластические деформации, и разрушение наступает при некотором числе циклов (область ограниченной выносливости);

д) область неосуществимых циклов.

3.7. Сопоставить полученные результаты с известными данными (см. Приложение) и указать какому материалу ближе всего соответствует полученная Вами экспериментально диаграмма предельных амплитуд.

Выводы

1. Привести значение предела выносливости с указанием коэффициента асимметрии цикла напряжений.
2. По результатам анализа диаграммы предельных амплитуд выделить область безопасных напряжений для элемента конструкции, работающего в диапазоне изменений коэффициента асимметрии цикла напряжений $-1 < R_\sigma < +1$.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

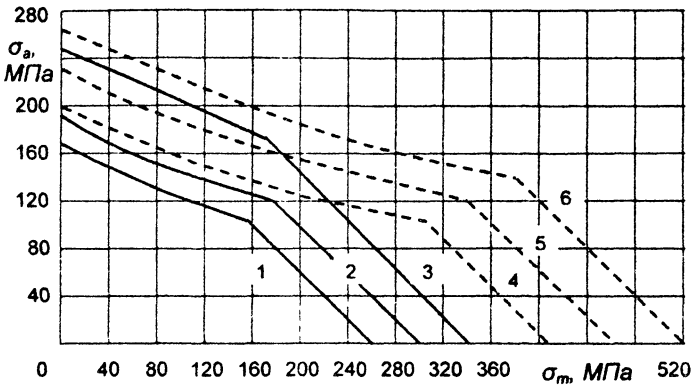
1. Что называется усталостью металлов ?
2. Какова методика построения кривой усталости ?
3. В чем отличие малоцикловой усталости от многоцикловой ?
4. Какой вид имеет кривая усталости при асимметричном нагружении ?
5. Сколько участков имеет кривая усталости ? Какими причинами обусловлено появление нескольких участков ?
6. Что называется пределом выносливости ?
7. Каким параметром оценивается асимметрии цикла ?
8. Нарисуйте (в пропорции) график изменения напряжений во времени для заданного вам коэффициента асимметрии цикла
9. Нарисуйте схемы нагружения образцов на испытательных машинах разных типов и эпюры распределения внутренних усилий по длине образца.
10. Какова необходимость применения бесконцентраторных образцов ?
11. С какой целью строят диаграмму предельных амплитуд цикла ?
12. Какие точки на диаграмме предельных амплитуд можно назвать характерными?
13. Какие факторы влияют на предел выносливости материала ?
14. Как определяется коэффициент запаса усталостной прочности с использованием диаграммы предельных амплитуд ?
15. Существует ли эмпирическая связь между пределами выносливости при разных коэффициентах асимметрии цикла напряжений ?
16. Чему равен коэффициент асимметрии цикла напряжений для которого $\sigma_a = \sigma_m$?
17. Два образца из одного материала испытывают при переменных нагрузках. Напряжения одинаковы. Первый образец подвержен изгибу, второй – растяжению-сжатию. Долговечность какого из образцов будет больше ? Из-за чего?
18. По справочнику найден предел прочности металла σ_b = 500 МПа. Каково примерное значение предела выносливости при круговом изгибе ? А при растяжении-сжатии?
19. Если сравнить амплитудные составляющие пределов выносливости при симметричном и отнулевом циклах, то какие значения будут больше ?
20. Чему равны σ_a, σ_m, σ_{max}, σ_{min}, R_σ, если представить статические испытания, как частный случай циклического нагружения ?
21. Известен предел прочности металла σ_b = 600 МПа. Каково примерное значение предела выносливости при кручении ?

ЛИТЕРАТУРА

1. Золоторевский В. С. Механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1983. – 350 с.
2. Бернштейн М. Л., Займовский В. А. Механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1983. – 252 с
3. Трощенко В. Т. Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом нагружении. – Киев: Наук. думка, 1981. – 344 с.
4. Школьник Л. М. Методика усталостных испытаний. Справочник. – М.: Металлургия, 1978. – 304 с.

5. ГОСТ 25.502-72. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость. – Введ. 01.01.81.
6. ГОСТ 23207-78. Сопротивление усталости. Основные термины, определения и обозначения. Введ. 01.01.79.

ПРИЛОЖЕНИЕ*



Диаграммы предельных амплитуд при растяжении-сжатии (сплошные линии) и изгибе (пунктирные): 1, 4 – сталь 30; 2, 5 – сталь 40; 3, 6 – сталь 50

* Одинг И. А. Допускаемые напряжения в машиностроении и циклическая прочность металлов. М., Свердловск: Машгиз, 1944. – 184 с.

Составители:
Вячеслав Петрович Багмутов
Валентин Иванович Водопьянов
Олег Викторович Кондратьев

ИСПЫТАНИЯ МЕТАЛЛОВ НА УСТАЛОСТЬ
Методические указания к лабораторной работе

Редактор А. К. Саютина
Темплан 2001 г., поз. № 96

Подписано в печать 31.01.01. Формат 60 x 84 1/16.
Бумага газетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,16.
Уч.- изд. л. Тираж 200 экз. Заказ 65. Бесплатно.

Волгоградский государственный технический университет.
400131 Волгоград, просп. им. В. И. Ленина, 28.

РПК «Политехник» Волгоградского государственного технического университета.
400131 Волгоград, ул. Советская, 35.