

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ УСТАЛОСТНЫХ ИСПЫТАНИЙ

Рожнов Андрей Борисович

Старший преподаватель кафедры стандартизации, метрологии и

технического сервиса

ФГБОУ ВО Мичуринский ГАУ,

г. Мичуринск, Россия

smart-68@yandex.ru

Горелова Ю.Н.

Студентка 4 курса Инженерного института

ФГБОУ ВО Мичуринский ГАУ

г. Мичуринск, Россия

Аннотация: Статья посвящена методике проведения усталостных испытаний

Ключевые слова: усталость, МЦУ, высокоцикловая усталость

Усталостные испытания делятся на две большие группы: высокоцикловые и малоцикловые. Первые характеризуются большой частотой нагружения ($10^1 - 10^3$ Гц), вторые – низкой частотой, не более 10 Гц.

Основным первичным результатом высокоциклового усталостного испытания одного образца является число циклов до разрушения (циклическая долговечность) при заданных характеристиках цикла. По результатам испытаний серии образцов бывают определены различные характеристики сопротивления усталости. Главной из них является предел усталости σ_R – наибольшее значение максимального напряжения цикла, при действии которого не происходит усталостного разрушения образца после произвольно большого или заданного числа циклов нагружения.

Для того чтобы оценить предел усталости, крайне важно испытывать целую серию образцов, как правило, не меньше 15. Каждый образец испытывают при определенном значении максимального напряжения цикла. При этом циклы для всех образцов одной серии должны быть подобны, т.е. иметь одинаковую форму и отношение различных характеристик цикла. [1]

По результатам испытания отдельных образцов строят кривую усталости в координатах максимальное напряжение цикла σ_{max} – циклическая долговечность N (рис. 1). Максимальное напряжение для первого образца обычно задают на уровне $\frac{2}{3} \sigma_B$. Нижний предел используемых напряжений составляет $0,3 - 0,5 \sigma_B$. Из-за относительно большого разброса экспериментальных точек строить эти кривые рекомендуется методом наименьших квадратов. Наиболее наглядны кривые усталости в логарифмических координатах (см. рис. 1, б). [2]

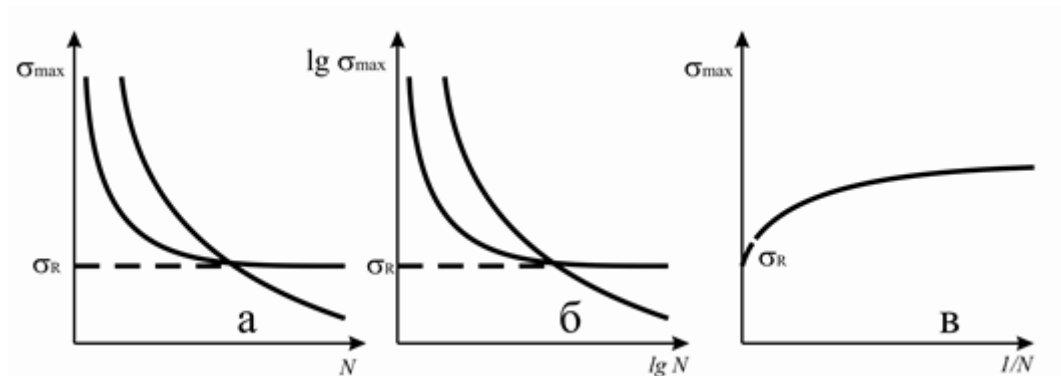


Рисунок 1 – Кривые усталости в различных координатах

По мере уменьшения максимального напряжения цикла циклическая долговечность всех материалов возрастает. При этом у сталей и некоторых цветных сплавов, склонных к динамическому деформационному старению, кривая усталости асимптотически приближается к прямой, параллельной оси абсцисс (см.рис. 1, а, кривая 1). Ордината, соответствующая постоянному значению σ_{\max} , и есть предел усталости таких материалов σ_R – наибольшее напряжение, которое не вызывает разрушения при любом числе циклов N (его иногда называют физическим пределом выносливости). Наиболее просто определяется σ_R при использовании логарифмического масштаба (см.рис. 1, б). Удобно оценивать σ_R и по кривым в координатах $\sigma_{\max} - 1/N$ (см.рис. 1, в). Здесь предел усталости определяют, экстраполируя кривую в точку ее пересечения с осью ординат, где $1/N = 0$. Этот способ особенно целесообразен для приближенной оценки σ_R по результатам испытания небольшого числа образцов.

Многие цветные металлы и сплавы не имеют горизонтального участка на кривых усталости (см.рис. 1, а, б, кривые 2). В этом случае определяют предел ограниченной усталости – наибольшее напряжение σ_{\max} , которое материал выдерживает, не разрушаясь в течение определенного числа циклов нагружения. Это число циклов называют базой испытания, обычно 10^8 циклов (когда на кривой усталости имеется горизонтальный участок, испытания продолжают не более чем до 10^7 циклов).

Кривые усталости, построенные при использовании цикла с $R = -1$, для многих металлических материалов хорошо описываются уравнением Вейбулла:

$$\sigma_{\max} = \sigma_{-1} + a (N + B)^{-\alpha}, (1)$$

где σ_{-1} – предел усталости; N – долговечность; a, B, α – коэффициенты.

Для усталостных испытаний характерен значительный разброс экспериментальных данных, в связи с этим особенно важна их правильная статистическая обработка, регламентируемая ГОСТ. При ограниченном числе образцов предел выносливости определяется с 50 %-ной вероятностью. Для этого, строя кривую усталости, крайне важно при напряжениях, равных $0,95 - 1,05 \sigma_R$, провести испытание нескольких (не менее трех) образцов, половина которых должна остаться неразрушенной по достижении заданной базы испытаний.

Как уже говорилось выше, по результатам усталостных испытаний для каждого образца определяют циклическую долговечность N – число циклов нагружения, которое выдерживает материал перед разрушением при определенном напряжении. Циклическая долговечность – вторая по важности после σ_R характеристика сопротивления высокоцикловой усталости металлических материалов. [3]

Предел усталости и циклическую (или усталостную) долговечность можно определять и по результатам испытаний на малоцикловую усталость (МЦУ). При этом в них эти характеристики не являются основными. Испытания на МЦУ проводят с использованием относительно высоких напряжений и малой частоты циклов напряжений, имитируя условия эксплуатации конструкций, к примеру, самолетных, которые подвергаются воздействию относительно редких, но значительных по величине циклических нагрузок. База испытания на малоцикловую усталость не превышает $5 \cdot 10^4$ циклов. Таким образом, малоцикловая усталость относится к левой ветви кривых усталости (см. рис. 1, а, б) до их выхода на горизонталь или появления перегиба. [4]

Границей между мало – и многоциклового усталостью является зона перехода от упругопластического к упругому деформированию в условиях циклического нагружения. Названная выше база ($5 \cdot 10^4$ циклов) является такой условной границей, характеризующей среднее число циклов нагружения для этой переходной зоны у пластичных сталей и сплавов цветных металлов. Для высокопластичных сплавов переходная зона смещается в сторону большего числа циклов, а для хрупких – в сторону меньшего.

Малоцикловые испытания чаще всего проводят по схеме растяжение – сжатие. При этом по ГОСТ 25.502 – 79 крайне важно обеспечить непрерывное измерение и регистрацию деформирования рабочей части образца. В отличие от испытаний на многоцикловую усталость, где в основном используют цилиндрические образцы, в малоцикловых испытаниях предпочитают образцы с прямоугольным сечением, в частности пластины с концентратором напряжений.

Важнейшим первичным результатом испытаний на МЦУ является скорость роста трещины при усталости dl/dN (СРТУ). Ее удобно определять на больших по размеру образцах шириной $B = 200 \div 500$, длиной $L = 3B$ и длиной исходной щели $2l_0 = 0,3 - 4$ мм, при этом $2l/B \approx 0,3$, где $l = l_0 + \Delta l$, а Δl – длина предварительно выращенной усталостной трещины от 1,5 до 2 мм. В этом случае легко проводить замеры величины l на поверхности образца и рассчитывать dl/dN с достаточно высокой точностью.

Все большее развитие в последние годы получают испытания на МЦУ, базирующиеся на концепциях механики разрушения. Эти испытания получили название испытаний на циклическую трещиностойкость. Их основным результатом является построение диаграммы усталостного разрушения – зависимости СРТУ от наибольшего значения K_{max} или размаха ΔK коэффициента интенсивности напряжений цикла (рис. 2). При этом

$$\lg K_{max} = \lg[\Delta K/(1 - R_\sigma)].(2)$$

Диаграмма усталостного разрушения состоит из трех участков. Первый, соответствующий низким скоростям роста усталостных трещин (менее 10^{-

⁵ мм/цикл), характеризуется затуханием СРТУ с увеличением K_{max} или ΔK . Величина K_{max} на участке 1 близка к пороговому значению K_s , за которое принимают величину K_{max} , при которой трещина не развивается на протяжении заданного числа циклов нагружения.

Линейный участок 2 диаграммы усталостного разрушения (см.рис. 2) описывается степенной зависимостью

$$d / d = C(\Delta K)^m \text{ или } dl / dN = C(K_{max})^m, (3)$$

где для различных материалов $m = 2 \div 10$, $m = 2 \div 6$. Зависимости обычно реализуются в диапазоне СРТУ от 10^{-5} до 10^{-3} мм/цикл.

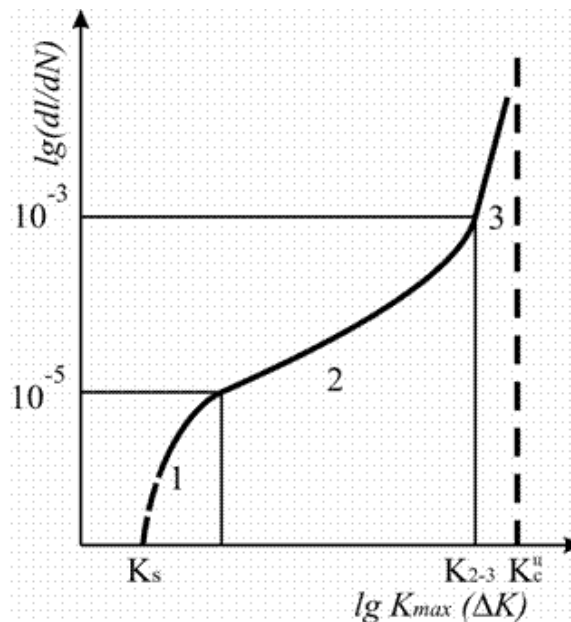


Рисунок 2 – Диаграмма усталостного разрушения

На участке 3 скорость роста трещины возрастает с увеличением K_{max} . По диаграмме усталостного разрушения определяют еще несколько характеристик циклической трещиностойкости. Наиболее важными из них считают: коэффициенты C и m в уравнении степенной зависимости пороговый коэффициент интенсивности напряжений K_s . Оценивают также величины K_{max} и ΔK при заданной СРТУ и, напротив – величину СРТУ при определенных значениях K_{max} и ΔK , коэффициенты интенсивности напряжений K_{1-2} и K_{2-3} ,

соответствующие началу и концу второго участка диаграммы усталостного разрушения (см. рис. 2 и др.) [5]

В статье были рассмотрены высокоцикловые и малоцикловые усталостные испытания и различия между ними. Реализованная методика усталостных испытаний металлов и сплавов позволяет сделать выводы о сопротивлении усталостному разрушению металлов и сплавов, а также пределе их выносливости.

Список литературы

1. Пирогов Е.Н., Гольцев В.Ю. Сопротивление материалов / Е.Н. Пирогов, В.Ю. Гольцев. – Учебное пособие. – М.: МИФИ, 2008.
2. Багмутов В.П., Водопьянов В.И., Кондратьев О.В. Испытания металлов на усталость / В.П. Багмутов, В.И. Водопьянов, О.В. Кондратьев. – Волгоград: Изд-во ВолгГТУ, 2001.
3. Вахромеев А.М. Определение циклической долговечности материалов и конструкций транспортных средств / А.М. Вахромеев. – Методические указания. – М.: МАДИ, 2015.
4. Махутов Н.А., Зацаринный В.В., Базарас Ж.Л. Статистические закономерности малоциклового разрушения / Н.А. Махутов, В.В. Зацаринный, Ж.Л. Базарас. – М.: Наука, 1989.
5. Трощенко В.Т., Покровский В.В., Прокопенко А.В. Трещиностойкость металлов при циклическом нагружении / В.Т. Трощенко, В.В. Покровский, А.В. Прокопенко. – Киев: Наукова Думка, 1987.

METHODS OF FATIGUE TESTING

Rozhnov Andrey Borisovich

Senior Lecturer Department of Standardization,
metrology and technical service
Michurinsk State Agrarian University,
Michurinsk, Russia
smart-68@yandex.ru

Gorelova Y.N.

4th year student
Engineering Institute
Michurinsk State Agrarian University
Michurinsk, Russia

Annotation. The article is devoted to the method of conducting fatigue tests.

Keywords: Fatigue, low cycle fatigue, high-cycle fatigue