

М.С. Беляев, С.Б. Кошкин, М.А. Горбовец

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛА УСТАЛОСТИ ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА СПОСОБОМ СТУПЕНЧАТОГО ИЗМЕНЕНИЯ НАГРУЗКИ

Описана процедура определения среднего значения предела выносливости материала способом ступенчатого изменения нагрузки (методом «лестницы») и методом наименьших квадратов. Отмечены различия между названными способами. Показана хорошая сходимостъ средних значений предела выносливости жаропрочного никелевого сплава, определенных двумя способами при температурах 850 и 1000°С. Для материалов, имеющих физический предел выносливости, применение способа ступенчатого изменения нагрузки является единственной возможностью определения данной характеристики с любой вероятностью неразрушения.

Ключевые слова: предел выносливости, уровень напряжения, база испытания, способ ступенчатого изменения нагрузки, среднее квадратическое отклонение (СКО).

Сопротивление материала усталости описывается рядом общепринятых основных характеристик, к числу которых относят: среднее значение предела выносливости, разброс значений числа циклов (или логарифма числа циклов) до разрушения, чувствительность к концентрации напряжений, а также в последнее время значение предела выносливости, соответствующее высокой вероятности неразрушения, – например, 90 или 99%.

Для того чтобы полученные характеристики усталости были достоверными, необходимо правильно спланировать испытания, связав эту процедуру с выбранным способом определения предела выносливости. Существует несколько способов определения среднего значения предела выносливости по результатам испытаний одной выборки образцов: в соответствии с процедурой, описанной в ГОСТ 25.502–79, и по способу наименьших квадратов.

Стандарт РФ ГОСТ 25.502–79 предусматривает построение кривой усталости и определение предела выносливости, соответствующих вероятности разрушения (неразрушения) 50%. При этом кривые усталости по результатам испытаний одной выборки образцов строят методом графического интерполирования экспериментальных результатов или по способу наименьших квадратов. Описанный способ в дальнейшем будем называть стандартным способом.

Метод построения средней линии усталости с использованием способа наименьших квадратов состоит в следующем: испытания образцов проводят на трех-четырёх уровнях напряжения в интервале долговечностей от $5 \cdot 10^5$ циклов до базового числа циклов, которое обычно устанавливают в интервале 10^7 – 10^8 циклов. При этом количество образцов, испытанных на каждом уровне напряжения, не должно существенно отличаться, и все образцы, в том числе имевшие долговечность выше базы испытаний, должны быть доведены до разрушения. Для обработки результатов испытаний используют способ наименьших квадратов. Суть способа состоит в получении минимальной суммы квадратов отклонений экспериментально полученных результатов испытаний от средней линии усталости. При этом изначально необходимо задать уравнение средней линии усталости, т. е. ее форму.

В данной работе результаты испытаний представлены в двойной логарифмической системе координат $\lg\sigma$ – $\lg N$ (где σ – напряжение; N – число циклов до разрушения). Для аппроксимации результатов испытаний использовано уравнение $\sigma^m N = \text{const}$,

которое в названной системе координат линеаризируется $\lg N = a + b \lg \sigma$ (где a и b – коэффициенты).

Применение линейного регрессионного анализа, который включает метод наименьших квадратов, позволяет для конкретной выборки результатов испытаний на усталость рассчитать коэффициенты уравнения $\lg N = a + b \lg \sigma$, построить среднюю линию регрессии и определить среднее значение предела выносливости при заданной базе испытания, а также определить характеристики разброса числа циклов до разрушения относительно средней линии регрессии – дисперсию S^2 – и среднее квадратическое отклонение S (СКО) [1]. При необходимости возможно определение других численных характеристик. Обоснованность линейной аппроксимации результатов испытаний жаропрочных сплавов на многоцикловую усталость показана ранее [2, 3].

Вместе с тем для определения среднего значения предела выносливости и значения СКО предела выносливости разработан и применяется способ ступенчатого изменения нагрузки, который еще называют методом «лестницы» [1, 4]. Важное отличие этого способа от стандартного заключается в том, что он предусматривает проведение испытаний образцов только в области значений напряжения, близких к предполагаемому среднему значению предела выносливости при установленной базе испытания.

По методу «лестницы» первый образец испытывают при напряжении σ_1 , равном предполагаемому пределу выносливости. Если первый образец не разрушился до базового числа циклов, то следующий образец испытывают при более высоком уровне напряжения: $\sigma_2 = \sigma_1 + \Delta\sigma$, где $\Delta\sigma$ – интервал между уровнями напряжений. Если первый образец разрушился при числе циклов, меньшем установленной базы, то следующий образец испытывают при более низком уровне напряжения: $\sigma_2 = \sigma_1 - \Delta\sigma$.

Для каждого следующего образца напряжение увеличивают или уменьшают на величину $\Delta\sigma$ (в зависимости от результата испытания предыдущего образца). Интервал между уровнями напряжения $\Delta\sigma$ назначают постоянным для каждой выборки образцов. Его величина составляет приблизительно 5% от предполагаемой величины среднего значения предела выносливости.

В ходе испытаний должны быть определены максимальный уровень напряжения, при котором все испытанные образцы разрушаются, и минимальный уровень напряжения, при котором все испытанные образцы не разрушаются. При промежуточных уровнях напряжений имеются как разрушившиеся образцы, так и не разрушившиеся, т. е. прошедшие базу испытаний.

Обработка результатов испытаний заключается в расчетном определении среднего значения предела выносливости и СКО значений предела выносливости. С этой целью применяют соответствующие зависимости математико-статистического характера. Для определения среднего значения предела выносливости применяют зависимость

$$\overline{\sigma}_{-1} = \sigma_0 + d \left[\frac{\sum i \cdot n_i}{N_{\text{обр}}} \pm 0,5 \right], \quad (1)$$

где $\overline{\sigma}_{-1}$ – среднее значение предела усталости; σ_0 – величина минимального напряжения испытаний; d – интервал между уровнями напряжений ($\Delta\sigma$); $N_{\text{обр}}$ – меньшая сумма из числа разрушенных и неразрушенных образцов; $\sum i \cdot n_i$ – сумма произведений порядкового номера уровня напряжений на количество образцов, испытанных на каждом уровне напряжений.

По окончании испытаний подсчитывается число разрушенных и неразрушенных образцов при установленной базе испытания. В качестве $N_{\text{обр}}$ принимается минимальная из двух этих сумм. Ее составляют образцы, испытанные при всех уровнях напряжения в данной выборке, отобранные по признаку – разрушились или не разрушились ($\sum n_i = N_{\text{обр}}$). Знак

«плюс» в формуле (1) перед членом 0,5 ставят, когда меньше количество неразрушенных образцов, знак «минус» – когда меньше количество разрушенных образцов.

Для определения значения (СКО) предела выносливости $S_{\sigma_{-1}}$ применяют зависимость

$$S_{\sigma_{-1}} = 1,62d \left[\frac{N_{\text{обр}} \cdot \sum i^2 n_i - (\sum i \cdot n_i)^2}{N_{\text{обр}}^2} + 0,029 \right] \quad (2)$$

(условные обозначения – см. зависимость (1)).

Для надежного определения среднего значения предела выносливости и значения СКО, при использовании метода ступенчатого изменения нагрузки, необходимо испытать (по различным источникам [1, 4]) не менее 20–30 образцов. Таким образом, этот способ требует испытания существенно большего количества образцов, чем стандартный способ.

В работе представлены результаты испытаний на многоцикловую усталость при высоких температурах образцов никелевого жаропрочного сплава с монокристаллической структурой <001>. Проведены испытания гладких образцов без покрытия при температурах 850 и 1000°С, при чистом изгибе вращающегося образца (симметричный цикл нагружения, $R=-1$), контролируемый параметр – нагрузка. База испытания $N=2 \cdot 10^7$ циклов, частота нагружения $f=50$ Гц.

Испытания на усталость спланированы и проведены таким образом, что одна и та же выборка образцов использована для определения среднего значения предела выносливости двумя различными способами – методом наименьших квадратов, т. е. стандартным методом, и методом «лестницы» – способом ступенчатого изменения нагрузки. Пределы выносливости и другие характеристики сопротивления усталости определены для двух баз испытания $N=10^7$ и $N=2 \cdot 10^7$ циклов. Вычисление характеристик усталости выполнено с использованием ПК по программам, разработанным авторами.

Следует отметить, что не все испытанные образцы, которые включены в выборку для определения средних значений характеристик усталости методом наименьших квадратов, могут быть включены в выборку для определения средних значений характеристик усталости методом «лестницы». В нее не входят образцы, испытанные при напряжениях вне области, примыкающей к значению предела выносливости, т. е. образцы, испытанные при высоких уровнях напряжения и малых долговечностях. Во всех случаях вторая выборка меньше по количеству испытанных образцов, чем первая.

Результаты испытаний методом ступенчатого изменения нагрузки можно представить в виде табл. 1.

Таблица 1

Результаты испытаний на усталость (метод ступенчатого изменения нагрузки) образцов никелевого жаропрочного сплава с монокристаллической структурой <001> (база испытания $N=10^7$ циклов, температура $T=850^\circ\text{C}$)

σ_{-1} , МПа	Номера испытанных образцов* по порядку											Сумма	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	×	0
370	×		×				×					3	
360		0		×		0		×				2	2
350					0				×		0	1	2
340										0			1
											$\sum n_i$	6	5

* × – разрушенные образцы; 0 – неразрушенные образцы.

С использованием математических процедур, соответствующих методу наименьших квадратов и методу «лестницы», рассчитаны средние значения многоцикло-

вой усталости никелевого жаропрочного сплава с монокристаллической структурой <001>. Результаты расчетов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Средние значения предела выносливости никелевого жаропрочного сплава с монокристаллической структурой <001>, определенные различными способами

Параметры испытаний		Значения параметров, полученных методами			
		стандартным		«лестницы»	
Температура испытания, °С	База испытания N , циклов	10^7	$2 \cdot 10^7$	10^7	$2 \cdot 10^7$
850	Количество образцов в выборке	18	18	11	8
	Предел выносливости σ_{-1} , МПа	355	335	357	358
1000	Количество образцов в выборке	17	17	13	12
	Предел выносливости σ_{-1} , МПа	285	260	280	278

Данные, приведенные в табл. 2, показывают, что имеет место высокая степень сходимости пределов выносливости, определенных стандартным способом и способом ступенчатого изменения нагрузки. Максимальное отклонение не превышает 7% и наблюдается только при базе испытания $2 \cdot 10^7$ циклов. При этом более высокое значение имеет предел выносливости, определенный способом ступенчатого изменения нагрузки. При базе испытания 10^7 циклов отклонение между значениями предела выносливости, определенного различными способами, фактически отсутствует. Причиной некоторого отклонения значений предела выносливости на базе испытаний $2 \cdot 10^7$ циклов является недостаточное количество образцов, образовавших выборку для расчета по способу ступенчатого изменения нагрузки, – как было указано, выборка должна включать 20–30 образцов.

Применение способа ступенчатого изменения нагрузки позволяет решить одну важную задачу. Многие металлические материалы при испытаниях на усталость в условиях комнатной и повышенных температур имеют физический предел выносливости. В этом случае способ определения среднего значения предела выносливости устанавливает стандарт (ГОСТ 25.502–79). Однако определить значение предела выносливости с вероятностью разрушения, отличающейся от 50%, не представляется возможным. Сделать это позволяет проведение испытаний способом ступенчатого изменения нагрузки, дающим возможность статистической обработки результатов испытаний и определения характеристик дисперсии и СКО среднего значения предела выносливости. Затем, приняв гипотезу о нормальном (логарифмически нормальном) распределении значений предела выносливости, можно определить минимальные значения этой характеристики с любой заданной вероятностью неразрушения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Степнов М.Н., Шаврин А.В. Статистические методы обработки результатов механических испытаний: Справочник. М.: Машиностроение. 2005. 400 с.
2. Биргер И.А., Балашов Б.Ф., Дульнев Р.А. Конструкционная прочность материалов и деталей газотурбинных двигателей. М.: Машиностроение. 1981. 222 с.
3. Серенсен С.В., Когаев В.П., Шнейдерович Р.М. Несущая способность и расчет деталей машин на прочность: Руководство и справочное пособие. М.: Машиностроение. 1975. 488 с.
4. Школьник Л.М. Методика усталостных испытаний: Справочник. М.: Metallurgy. 1978. 304 с.