

Оценка предельного состояния конструкционных сталей при асимметричном многоцикловом нагружении растяжением–сжатием, изгибом и кручением

В. И. Крижановский, В. В. Касперская, А. Д. Погребняк

Институт механики им. С. П. Тимошенко НАН Украины, Киев, Украина

Решается задача оценки сопротивления усталости при асимметричном многоцикловом нагружении конструкционных сталей растяжением–сжатием, изгибом и кручением. Расчеты базируются на моделях предельного состояния, позволяющих описать все известные формы предельных диаграмм. Получено удовлетворительное согласование результатов расчета с экспериментальными данными.

Ключевые слова: сопротивление усталости, асимметричное многоцикловое нагружение, растяжение–сжатие, изгиб, кручение, предельные диаграммы напряжений, конструкционные стали.

Введение. Одна из главных проблем, с которыми приходится сталкиваться конструктору, – оценка предельного состояния элементов конструкций, подверженных совместному воздействию статических и циклических нагрузок, т.е. асимметричному нагружению. В таких условиях работают многие детали машиностроительных конструкций (лопатки газовых и паровых турбин, сосуды различного назначения, трубопроводы и т.п.). При этом оценку предельного состояния конструкционных материалов осуществляют обычно на основе экспериментальных диаграмм предельных напряжений. Предложено достаточно большое количество аналитических соотношений, описывающих результаты экспериментальных исследований при различном соотношении статических и циклических напряжений.

Анализ экспериментальных данных показывает, что форма диаграмм предельных напряжений зависит от многих факторов и изменяется от выпуклой до вогнутой. В этих условиях ни одна из известных зависимостей не может быть универсальной для описания различных форм диаграмм предельных напряжений.

Ранее [1, 2] предложен принципиально иной подход к решению задачи оценки и прогнозирования долговечности и предельного состояния при асимметричном многоцикловом нагружении. Он апробирован при оценке предельного состояния металлических и композитных материалов при асимметричном растяжении–сжатии [3]. В данной работе этот метод рассматривается применительно к оценке предельного состояния конструкционных сталей при асимметричном растяжении–сжатии, изгибе и кручении.

Сопротивление усталости при асимметричном цикле. Оценка сопротивления усталости конструкционных сталей при асимметричном нагружении осуществляется на основе усталостных испытаний стандартных образцов при постоянной статической составляющей или при постоянном коэффициенте асимметрии для всей испытываемой партии образцов. Результаты испытаний представляются в виде кривых усталости в координатах

$\lg \sigma_a(\sigma_a) - \lg n_R$ по параметру составляющей σ_m либо в координатах $\lg \sigma_{\max}(\sigma_{\max}) - \lg n_R$ по параметру коэффициента асимметрии R .

В качестве примера на рис. 1 представлены результаты испытаний при асимметричном нагружении некоторых конструкционных сталей.

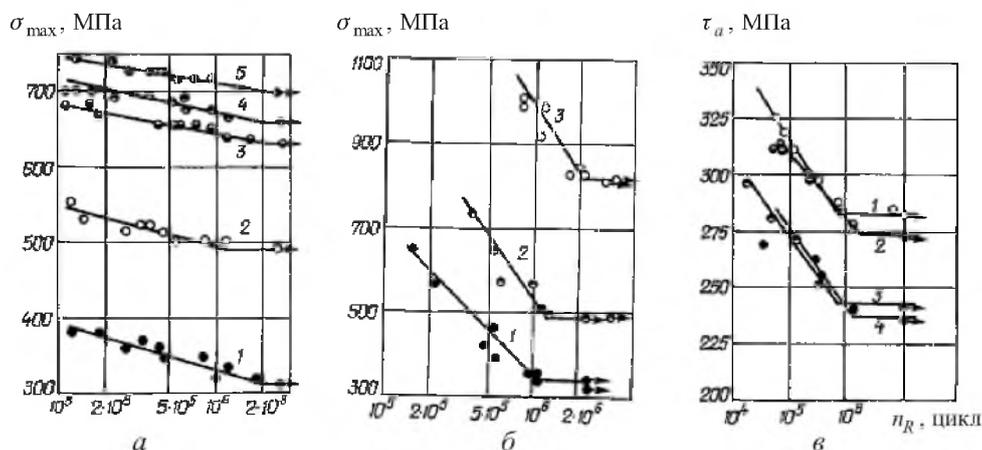


Рис. 1. Кривые усталости хромоникелевой стали 40XН (а), низколегированной стали 14X2ГМР (б) и хромоникелемолибденовой стали (в): а – растяжение–сжатие (1 – $R = -1$; 2 – $R = 0$; 3 – $R = 0,5$; 4 – $R = 0,65$; 5 – $R = 0,8$); б – плоский изгиб (1 – $R = 0$; 2 – $R = 0,5$; 3 – $R = 0,7$); в – кручение (1 – $\tau_m = 0$; 2 – $\tau_m = 77$; 3 – $\tau_m = 185$; 4 – $\tau_m = 240$ МПа).

Образцы хромоникелевой стали 40XН [4] испытывали в условиях асимметричного растяжения–сжатия, низколегированной стали 14X2ГМР [5] – при асимметричном изгибе, хромоникелемолибденовой стали [6] – при асимметричном кручении при комнатной температуре.

Как свидетельствуют результаты испытаний углеродистых и легированных сталей, кривые усталости при асимметричном нагружении, как и при симметричном, в принятой системе координат, как правило, состоят из наклонного и горизонтального участков независимо от вида нагружения. В некоторых случаях авторы отдают предпочтение описанию результатов испытаний более сложными зависимостями. Количественные показатели, отражающие положение кривой усталости на плоскости в принятой системе координат, представляют собой характеристики сопротивления усталости материала: предел выносливости и угол наклона левой ветви кривой к оси абсцисс.

Угол наклона левой ветви определяется процессами накопления усталостных повреждений, сопровождающими циклическое нагружение при действующих амплитудах напряжений. Существенное влияние на угол наклона кривой усталости при асимметричном нагружении, как и при симметричном, оказывают структурное состояние материала и его изменение под действием напряжений, вид нагружения, склонность материала к деформационному старению. Статическая составляющая цикла нагружения, в зависимости от природы материала, может изменять угол наклона кривой усталости. Угол наклона кривых усталости к оси абсцисс стали 40XН при асимметричном растяжении–сжатии и изменении коэффициента асиммет-

рии R в пределах от $-1...+0,8$ практически не изменяется: кривые усталости параллельны друг другу (рис. 1,а) [4]. Аналогичная закономерность получена при испытании хромоникелемолибденовой стали при кручении [6] (рис. 1,б). В то же время для стали 14Х2ГМР (рис. 1,б) увеличение статической составляющей при асимметричном изгибе приводит к некоторому изменению угла наклона кривых усталости.

В условиях асимметричного растяжения–сжатия статическая компонента цикла нагружения, как правило, снижает предел выносливости: чем больше значение статического напряжения или величина коэффициента асимметрии, тем значительно уменьшается предел выносливости. Асимметричный изгиб также приводит к уменьшению предела выносливости стали, однако в меньшей степени. Еще в меньшей степени наблюдается снижение предела выносливости в условиях асимметричного кручения. И лишь существенное повышение статических напряжений приводит к резкому его уменьшению при асимметричном кручении. Перелом кривых усталости с повышением статической составляющей происходит, как правило, примерно при одной и той же долговечности.

В связи с большой трудоемкостью усталостных испытаний при асимметричном нагружении для оценки его влияния на сопротивление усталости сталей в расчетной практике наибольшее распространение получили модификационная линейная зависимость Гудмана и параболическая зависимость Гербера [7]. Однако, как свидетельствуют многочисленные данные, в ряде случаев ни одна из них не позволяет описать сопротивление усталости некоторых материалов при асимметричном нагружении.

Ниже рассматривается задача построения моделей предельного состояния, устанавливающих зависимость между разрушающими напряжениями асимметричного цикла для фиксированной долговечности и позволяющих оценить влияние статической компоненты на сопротивление усталости сталей при циклическом растяжении–сжатии, изгибе и кручении.

Модели предельного состояния. Решение строится на основе моделей предельного состояния, сформулированных и экспериментально обоснованных ранее [1, 2]. Зависимость между амплитудными значениями циклической y_a и статической x_m компонент напряжений задается в общем виде уравнениями

$$\frac{y_a}{y_*} \left[\cos\left(\frac{\pi x_m}{2 x_*}\right) \right]^\lambda \Rightarrow \frac{y_a}{y_*} - \left[\cos\left(\frac{\pi x_m}{2 x_*}\right) \right]^\lambda = 0 \quad (1)$$

или

$$\left(\frac{y_a}{y_*}\right) = \frac{\pi}{2} \left[\arccos\left(\frac{x_m}{x_*}\right)^\xi \right] \Rightarrow \left(\frac{y_a}{y_*}\right) - \frac{\pi}{2} \left[\arccos\left(\frac{x_m}{x_*}\right)^\xi \right] = 0, \quad (2)$$

позволяющими описать все формы диаграмм предельных напряжений. Здесь y_* – ограниченный предел выносливости при симметричном цикле нагружения в условиях растяжения–сжатия, изгиба или кручения; x_* – предел кратковременной прочности при соответствующем виде нагружения;

λ , ξ – коэффициенты чувствительности к асимметрии цикла нагружения, определяющие форму диаграмм предельных напряжений. Уравнения (1) и (2) точно удовлетворяют граничным условиям, соответствующим сопротивлению усталости при симметричном цикле и кратковременной прочности: полагая $x_m = 0$, получаем $x_a = y_*$, а $y_a = 0 - x_m = x_*$.

Уравнение (1) в большей мере отражает эффекты разупрочнения по отношению к линейному закону, уравнение (2) – эффекты упрочнения. Расчеты предельного состояния выполняли с использованием обоих уравнений. Уравнение (1) интерпретируется в дальнейшем как модель предельного состояния с разупрочнением, уравнение (2) – с упрочнением. Однако подчеркнем, что такая интерпретация является условной, поскольку каждая из моделей, в зависимости от значений коэффициентов λ и ξ , может описать как эффекты упрочнения, так и разупрочнения.

Раскладывая функцию \cos в ряд и ограничиваясь тремя или двумя членами разложения, получаем выражения для приближенных оценок соответственно в виде

$$\left(\frac{y_a}{y_*}\right)^\xi + \frac{1}{2}\left(\frac{\pi x_m}{2 x_*}\right)^2 - \frac{1}{24}\left(\frac{\pi x_m}{2 x_*}\right)^4 = 1 \quad \text{и} \quad \left(\frac{y_a}{y_*}\right)^\xi + \frac{\pi^2}{8}\left(\frac{x_m}{x_*}\right)^2 = 1, \quad (3)$$

где принято $\xi = 1/\lambda$.

Аналогично, раскладывая функцию \arccos в ряд и ограничиваясь тремя или двумя членами разложения, получаем выражения для приближенных оценок соответственно в виде

$$\frac{y_a}{y_*} + \frac{2}{\pi}\left(\frac{x_m}{x_*}\right)^\xi + \frac{1}{3\pi}\left(\frac{x_m}{x_*}\right)^{3\xi} = 1 \quad \text{и} \quad \left(\frac{y_a}{y_*}\right) + \frac{2}{\pi}\left(\frac{x_m}{x_*}\right)^\xi = 1. \quad (4)$$

Методика определения материальных констант. Модели предельного состояния (1) и (2) содержат три характеристики материала: предел кратковременной прочности x_* , определяемый непосредственно по диаграмме растяжения; ограниченный предел выносливости y_* при симметричном цикле и коэффициенты чувствительности к асимметрии цикла нагружения λ и ξ . Значение y_* определяется из экспериментально полученного уравнения кривой усталости по результатам усталостных испытаний, устанавливающего зависимость между числом циклов до разрушения n_R и ограниченным пределом выносливости y_* при соответствующем виде нагружения:

$$n_R = \frac{1}{C(y_*)^q} \Rightarrow y_* = \left(\frac{1}{C n_R}\right)^{1/q}, \quad (5)$$

где C и q – коэффициенты, рассчитываемые по методу наименьших квадратов. Коэффициенты λ и ξ определяются по данным дополнительного базового эксперимента при отнулевом ($y_a = x_a$) асимметричном цикле нагружения при соответствующем виде нагружения.

Разрешая уравнение (1) относительно λ , а уравнение (2) относительно ξ , получаем выражения для определения соответствующих коэффициентов:

$$\lambda = \frac{\lg y_a^0 - \lg y_*^0}{\lg \left[\cos \left(\frac{\pi x_m}{2 x_*} \right) \right]} \quad \text{и} \quad \xi = \frac{\lg \left[\cos \left(\frac{\pi y_a^0}{2 y_*} \right) \right]}{\lg x_m^0 - \lg x_*}, \quad (6)$$

где y_a^0 и x_m^0 – амплитуда и среднее напряжение отнулевого цикла в базовом единичном эксперименте; y_*^0 – ограниченный предел выносливости при симметричном цикле, соответствующий долговечности n_R^0 при действии напряжений y_a^0 и x_m^0 . Под единичным базовым экспериментом следует понимать эксперимент при одном фиксированном соотношении напряжений y_a^0 и x_m^0 . С целью повышения точности оценок в единичном эксперименте могут быть испытаны несколько идентичных образцов.

Расчет сопротивления усталости и построение диаграмм предельных напряжений. Предельные напряжения при асимметричном нагружении рассчитывали по уравнениям (3), (4). В уравнениях используются характеристики материала, определенные при том виде нагружения, применительно к которому осуществляется расчет и построение диаграмм предельных напряжений. Расчеты показывают, что независимо от вида нагружения лучшее согласование с экспериментальными данными для углеродистых и легированных сталей дают уравнения (4), основанные на модели предельного состояния (2), поэтому в дальнейшем они использовались при расчете предельных диаграмм.

Вышеуказанные уравнения описывают зависимость между тремя переменными: амплитудой напряжения y_a , средним напряжением цикла x_m и числом циклов до разрушения n_R . Расчет проводили применительно к амплитуде циклического нагружения.

Асимметричное растяжение–сжатие. С помощью исходных выражений (4) для амплитуды напряжения σ_a с учетом (5) при растяжении–сжатии получим

$$\sigma_a = \left(\frac{1}{C n_R} \right)^{1/q} \left[1 - \frac{2}{\pi} \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_B} \right)^\xi - \frac{1}{3\pi} \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_B} \right)^{3\xi} \right] \quad (7)$$

и соответственно –

$$\sigma_a = \left(\frac{1}{C n_R} \right)^{1/q} \left[1 - \frac{2}{\pi} \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_B} \right)^\xi \right]. \quad (8)$$

В качестве примера на рис. 2,а представлены результаты сопоставления расчета с экспериментальными данными для исследуемых сталей. Рас-

чет и сопоставление с экспериментом проводили при долговечности $n_R = 2 \cdot 10^6$ цикл. Используемые в расчетах значения прочностных характеристик, а также коэффициентов λ и ξ приведены в таблице.

Условия испытаний, характеристики исследуемых материалов и значения коэффициентов λ и ξ

Сталь	Вид нагружения	Пределы, МПа		λ	ξ	Литературный источник
		прочности	выносливости			
18ХНВА	Растяжение–сжатие	1128	392	1,01	1,42	[8]
18ХНМ (Э16)	»	1324	569	1,62	1,04	[9]
Углеродистая	Изгиб	500	128	0,59	1,89	[10]
09Г2	»	518	225	0,80	1,49	[5]
Углеродистая, термообработанная	Кручение	687	358	0,17	3,63	[11]
40ХНМА, азотированная	»	650	380	0,74	1,31	[12]

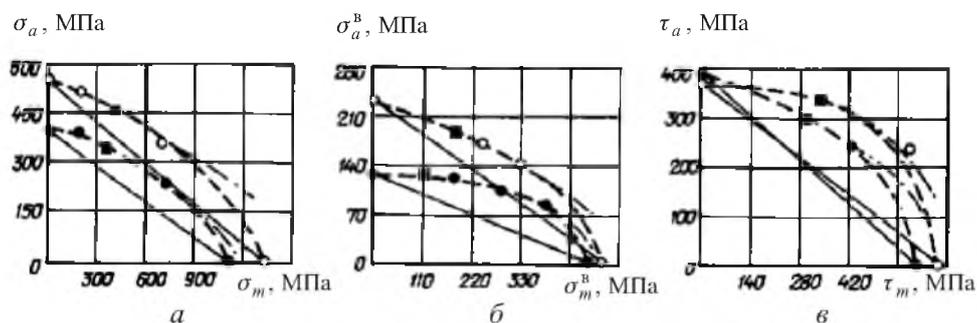


Рис. 2. Расчетные диаграммы предельных напряжений (линии) и экспериментальные данные (точки) для сталей 18ХНМ (○), 18ХНВА (●) при растяжении–сжатии (а), стали 09Г2 (○) и углеродистой стали, содержащей 22% С, (●) при изгибе (б), углеродистой стали, содержащей 0,6% С, (○) и стали 40ХНМА (●), подвергнутой азотированию, при кручении (в). (Штриховые линии – расчет по (7), штрихпунктирные – по (8), сплошные – зависимость Гудмана; ■ – соотношение напряжений в базовом эксперименте для определения коэффициентов λ и ξ .)

Асимметричный изгиб. Расчет амплитуд предельных напряжений и построение соответствующих диаграмм применительно к асимметричному изгибу осуществляли с использованием выражений, аналогичных (7), (8) с той лишь разницей, что исходными характеристиками служили данные, полученные в условиях плоского изгиба. Сопоставление расчета с экспериментом выполнено для долговечностей $n_R = 2 \cdot 10^6$ (○) и 10^7 (●) цикл (рис. 2,б). Значения материальных констант, использованных в расчетах, приведены в таблице.

Асимметричное кручение. Расчет амплитуд асимметричного цикла и построение диаграмм предельных напряжений проводили также с помощью выражений, аналогичных (7), (8). В качестве исходных характеристик использовали данные, полученные в условиях кручения. В тех случаях, когда необходимые характеристики отсутствовали, их значения определяли, основываясь на известных соотношениях между характеристиками при растяжении и кручении. Сопоставление расчета с экспериментом выполнено для долговечности $n_R = 10^7$ цикл (рис. 2, в). Значения используемых в расчетах материальных констант приведены в таблице.

Степень точности согласования результатов расчета с заимствованными экспериментальными данными оценивалась по величине максимальной относительной ошибки δ . Выполненный анализ показывает, что величина погрешностей δ зависит от природы материала, структуры модели предельного состояния, условий реализации единичного базового эксперимента. Существенное влияние на величину δ оказывает выбор модели предельного состояния и прежде всего вариант модели, по которому осуществляется расчет: точный или приближенный. Для углеродистых и легированных сталей максимальное значение δ составляет 25% при выполнении расчетов по приближенным моделям применительно к анализируемым видам нагружения.

Заключение. Выбор модели предельного состояния на стадии проектной оценки сопротивления усталости конструкционных сталей при асимметричном нагружении может быть осуществлен на основе коэффициентов λ и ξ , определяемых из простого единичного базового эксперимента при отнулевом цикле нагружения. Выполненные расчеты свидетельствуют, что при значениях коэффициентов $\xi > 0,5$ и $\lambda < 2$ могут быть использованы модели, построенные на основе уравнения (2), при $\xi < 0,5$ и $\lambda > 2$ – модели, построенные по уравнению (1). В переходной области ($\xi \approx 0,5$ и $\lambda \approx 2$) модели, построенные на основе уравнений (1) и (2), приводят практически к одинаковым результатам.

Предложенные модели предельного состояния обладают определенной гибкостью, что позволяет описывать все известные формы диаграмм предельных напряжений, присущие углеродистым и легированным сталям, и решать задачу расчета сопротивления усталости при асимметричном растяжении–сжатии, изгибе и кручении при минимальной трудоемкости дополнительных экспериментальных исследований.

Резюме

Розв'язується задача щодо оцінки опору втомі за асиметричного багаточиклового навантаження конструкційних сталей розтягом–стиском, згином та крутінням. Розрахунки базуються на моделях граничного стану, що дозволяє описати всі відомі форми граничних діаграм. Отримано задовільну збіжність між результатами розрахунку та експерименту.

1. Голуб В. П., Погребняк А. Д. Высокотемпературное разрушение материалов при циклическом нагружении. – Киев: Наук. думка, 1994. – 228 с.

2. Голуб В. П., Крижановский В. И. К оценке предельного состояния материалов при асимметричном многоцикловом нагружении // Пробл. прочности. – 1994. – № 4. – С. 3 – 15.
3. Голуб В. П., Крижановский В. И., Погребняк А. Д., Кочеткова Е. С. Усталостная прочность металлических и композитных материалов при асимметричном многоцикловом нагружении растяжением–сжатием // Прикл. механика. – 2006. – 42, № 1. – С. 48 – 58.
4. Мамед-Заде О. А. Влияние асимметрии нагружения на усталостную прочность конструкционных сталей // Изв. вузов. Нефть и газ. – 1992. – № 5-6. – С. 77 – 81.
5. Дегтярев В. А. Влияние коэффициента асимметрии цикла нагружения на усталость и циклическую ползучесть низколегированных сталей. Сообщ. 1 // Пробл. прочности. – 1991. – № 2. – С. 24 – 27.
6. Chodorowski W. T. Fatigue strength in shear of an alloy steel with particular reference to the effect of mean stress and directional properties // Proc. Int. Conf. on Fatigue of Metals. – London, 1956. – P. 122 – 131.
7. Форрест П. Усталость металлов / Пер. с англ. под ред. С. В. Серенсена. – М.: Машиностроение, 1968. – 352 с.
8. Гордеев Н. И. О предельной циклической прочности при асимметричных циклах // Прочность металлов при переменных напряжениях / Под ред. И. А. Одингга. – М.: Изд-во АН СССР, 1963. – С. 119 – 126.
9. Ужик Г. В. Прочность сталей при одновременном действии постоянных и переменных нагрузок // Изв. АН СССР. Отд-ние техн. наук. – 1949. – № 5. – С. 657 – 665.
10. Nishihara T. and Yamada T. Fatigue life of metals under varying repeated stresses // Proc. 6th Japan National Congress for Applied Mechanics. – 1956. – P. 61 – 64.
11. Одинг И. А. Прочность металлов. Металловедение. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.; М., 1935. – 624 с.
12. Еленевский Д. С., Шнеерсон Л. М. Выносливость стальных деталей с химико-термическим упрочнением при асимметричных циклах нагрузки // Вестн. машиностроения. – 1960. – № 10. – С. 17 – 22.

Поступила 25. 10. 2007