

Предельное состояние углеродистых сталей в условиях многоциклового асимметричного нагружения растяжением–сжатием, изгибом и кручением

В. И. Крижановский, В. Н. Пелых, А. Д. Погребняк, М. Н. Регульский

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

Рассматривается проблема расчета сопротивления усталости углеродистых сталей в условиях совместного воздействия статических и циклических нагрузок при растяжении–сжатии, изгибе и кручении. Расчеты выполнены с использованием моделей предельного состояния, описывающих все известные формы диаграмм предельных напряжений. Получено удовлетворительное согласование расчетных данных с экспериментальными.

Ключевые слова: углеродистые стали, сопротивление усталости, диаграммы предельных напряжений.

Введение. Большая часть реальных режимов нагружения современных элементов конструкций характеризуется совместным воздействием статических и циклических нагрузок при одноосном или сложном напряженном состоянии. При относительно невысоких температурах ($\theta < 0,6\theta_{пл}$) в условиях взаимодействия циклической и статической компонент разрушение конструкционных металлических материалов, как правило, наступает вследствие усталости. Статическая компонента при этом снижает сопротивление усталости материала и соответственно долговечность конструкции. Особенно актуальна задача учета асимметрии цикла напряжений для случаев многоциклового усталости, когда циклическая нагрузка не влечет за собой накопления макроскопических деформаций, и разрушение происходит практически внезапно. Оценку предельного состояния осуществляют обычно на основе диаграмм предельных амплитуд напряжений, с помощью которых устанавливают взаимосвязь между предельными статическими и циклическими напряжениями для фиксированных значений долговечности. Для построения таких диаграмм базовыми являются результаты исследования кратковременной статической прочности и сопротивления усталости при симметричном и асимметричном цикле нагружения при нескольких значениях среднего напряжения. Стандартная методика построения диаграмм и основанные на них методы расчета сопротивления усталости изложены подробно в [1–6].

Сложность и большая трудоемкость экспериментальных исследований, необходимых для построения диаграмм предельных амплитуд напряжений, обусловили разработку различного рода эмпирических зависимостей. К настоящему времени предложено около двух десятков таких зависимостей, что позволяет рассчитывать предельное состояние конструкционных материалов по результатам стандартных испытаний на кратковременную прочность и усталость при симметричном цикле нагружения. Наибольшее распространение получили линейные, параболические и эллиптические зависимости.

Детальный анализ наиболее обоснованных эмпирических зависимостей для расчета диаграмм предельных напряжений представлен в [1–4].

Установлено, однако, что применение той или иной эмпирической зависимости ограничено конкретным классом материалов или условиями нагружения. Так, экспериментально показано, что линейная зависимость Гудмана хорошо описывает предельное состояние высокопрочных сталей при всех видах деформации, кроме кручения, а также серых и ковких чугунов. Параболическая зависимость Гербера обеспечивает адекватное описание опытных данных в основном для мягких сталей при всех видах деформации. По данным [3], большая часть результатов, полученных при испытаниях сталей в условиях растяжения–сжатия, лежит между зависимостями Гудмана и Гербера, в то время как результаты испытаний многих алюминиевых сплавов, некоторых чугунов – ниже зависимостей Гудмана и даже Зодерберга. Для построения ряда зависимостей необходимо проведение весьма сложных дополнительных экспериментов для определения входящих в них коэффициентов. Существенное влияние на их структуру оказывают изменение температуры, агрессивная среда и другие факторы. В некоторых случаях проявляется влияние также длительности испытаний. Таким образом, задача, по сути, сводится к подбору конкретной эмпирической зависимости для исследуемых материалов и режимов нагружения. Решение такой задачи предполагает получение дополнительных исходных экспериментальных данных.

Большинство исследований сопротивления усталости в условиях асимметричного нагружения проведено применительно к растяжению–сжатию. Однако многие узлы и детали машиностроительных конструкций подвержены влиянию напряжений изгиба и кручения при различной асимметрии цикла. Информация о поведении конструкционных материалов в этих условиях нагружения весьма ограничена, что практически исключает возможность прогнозирования их предельного состояния.

В работах [7, 8] предложен новый подход к построению диаграмм предельных амплитуд напряжений, основанный на использовании степенной трансцендентной функции. В рамках подхода экспериментально обосновано существование единой предельной диаграммы, инвариантной числу циклов до разрушения, которая включает всю совокупность результатов экспериментальных исследований при асимметричном нагружении. Методика построения диаграмм предельных амплитуд напряжений апробирована применительно к асимметричному нагружению растяжением–сжатием, изгибом и кручением различного рода конструкционных материалов [9, 10].

Целью настоящей работы являются расчет и прогнозирование предельного состояния углеродистых сталей при асимметричном многоцикловом нагружении растяжением–сжатием, изгибом и кручением. Углеродистые стали, обладая широким спектром прочностных свойств, широко используются в самых разных машиностроительных конструкциях. В свою очередь, разнообразие их свойств, с одной стороны, и условий нагружения, с другой – определяют различную чувствительность к воздействию асимметрии нагружения, что и приводит к необходимости совершенствования методов оценки их сопротивления усталости в этих условиях.

Постановка задачи и исходные соотношения. Наиболее рациональные, на наш взгляд, решения задач прогнозирования предельного состояния конструкционных материалов в условиях асимметричного циклического нагружения предусматривают применение моделей предельного состояния, посредством которых рассчитывают диаграммы предельных амплитуд напряжений. Принципиальное их отличие от эмпирических зависимостей, упомянутых выше, состоит в том, что параметры таких моделей (коэффициенты, показатели степени и др.) определяют не на основе обширных и трудоемких экспериментальных исследований, а по результатам базового эксперимента приемлемого объема. Параметры моделей предельного состояния в этом случае могут рассматриваться как константы материала, а накопленные результаты экспериментальных исследований служат исходным материалом для апробации предложенных моделей. Следует подчеркнуть, что функции, на основе которых строятся модели, должны быть достаточно гибкими, т.е. при изменении параметров модели они должны отражать достаточно разнообразные формы диаграмм предельных амплитуд напряжений.

Воспользуемся следующими обозначениями для основных характеристик асимметричного цикла нагружения при растяжении–сжатии, изгибе и кручении. Выразим напряжения цикла через максимальные σ_{\max} , σ_{\max}^b , τ_{\max} и минимальные σ_{\min} , σ_{\min}^b , τ_{\min} значения. Для средних напряжений σ_m , σ_m^b , τ_m и амплитуд напряжений σ_a , σ_a^b , τ_a цикла соответственно получим.

При асимметричном растяжении–сжатии:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}; \quad \sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}. \quad (1)$$

При асимметричном циклическом изгибе:

$$\sigma_m^b = \frac{\sigma_{\max}^b + \sigma_{\min}^b}{2}; \quad \sigma_a^b = \frac{\sigma_{\max}^b - \sigma_{\min}^b}{2}. \quad (2)$$

При асимметричном циклическом кручении:

$$\tau_m = \frac{\tau_{\max} + \tau_{\min}}{2}; \quad \tau_a = \frac{\tau_{\max} - \tau_{\min}}{2}. \quad (3)$$

Степень асимметрии цикла при растяжении–сжатии, изгибе и кручении задается соответственно коэффициентом асимметрии R :

$$R_\sigma = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}; \quad R_\sigma^b = \frac{\sigma_{\min}^b}{\sigma_{\max}^b}; \quad R_\tau = \frac{\tau_{\min}}{\tau_{\max}} \quad (4)$$

или коэффициентом амплитуд A :

$$A_\sigma = \frac{\sigma_a}{\sigma_m} = \frac{1 - R_\sigma}{1 + R_\sigma}; \quad A_\sigma^b = \frac{\sigma_a^b}{\sigma_m^b} = \frac{1 - R_\sigma^b}{1 + R_\sigma^b}; \quad A_\tau = \frac{\tau_a}{\tau_m} = \frac{1 - R_\tau}{1 + R_\tau}. \quad (5)$$

Сфера применимости зависимостей и соотношений, описывающих сопротивление усталости исследованных углеродистых сталей при асимметричном циклическом нагружении, характеризуется следующим образом. В (1)–(5) примем, что амплитудные значения напряжений в процессе нагружения не изменяются. Рассмотрим многоцикловую усталость с высокими частотами нагружения ($f > 10$ Гц) и долговечностями $n_R > 10^4 \dots 10^5$ цикл. Углеродистые стали исследуются в области умеренных температур, когда реологические эффекты не проявляются, и сопротивление статическому разрушению задается соответствующим пределом кратковременной прочности.

С практической точки зрения непосредственно оценку предельного состояния удобнее осуществлять по изохронным диаграммам предельных напряжений, которые задают зависимость амплитуды цикла от среднего напряжения для фиксированной долговечности. Анализ экспериментальных результатов и адекватность их описания той или иной зависимостью целесообразно выполнять в нормированных безразмерных координатах, где могут быть нанесены данные для нескольких материалов. На рис. 1,а схематически в безразмерных координатах показаны границы возможных форм соответствующих диаграмм предельных амплитуд напряжений, построенных на основе анализа известных экспериментальных данных.

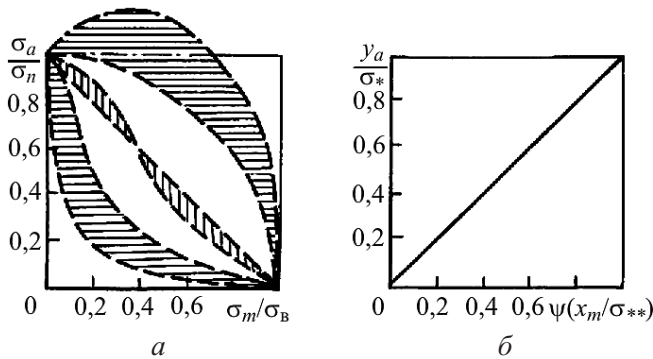


Рис. 1. Типовые формы нормированных предельных диаграмм (а) и линейризованная единая предельная диаграмма (б).

Как видно, форма диаграмм предельных амплитуд напряжений изменяется в довольно широких пределах и зависит от типа материала, условий нагружения и других факторов. В общем случае их условно можно разделить на три вида: линейная, близкая к ней S-образная, а также расположенные выше и ниже линейной (рис. 1,а).

Более общий анализ моделей предельного состояния с целью их апробации и обоснования целесообразно проводить посредством линейризованных предельных диаграмм (рис. 1,б). Основой для построения таких диаграмм являются результаты усталостных испытаний нескольких партий однотипных образцов при различных значениях коэффициентов асимметрии.

Таким образом, с целью адекватного описания результатов экспериментальных исследований и возможности прогнозирования предельного состояния необходимо выбрать и обосновать функцию, устанавливающую зависимость между напряжениями цикла и числом циклов n_R при асимметричном нагружении:

$$f_{\sigma}(\sigma_a, \sigma_m, n_R, c_{\sigma i}) = 0, \quad i = \overline{1, k}. \quad (6)$$

В нормированном виде запишем ее следующим образом:

$$g_{\sigma}\left(\frac{\sigma_a}{\sigma_n}, \frac{\sigma_m}{\sigma_B}, n_R, q_{\sigma j}\right) = 1, \quad j = \overline{1, r}. \quad (7)$$

Соотношение (7) описывает зависимость между напряжениями цикла и характеристиками кратковременной прочности σ_B и сопротивления усталости σ_n при симметричном цикле для $n_R = \text{const}$. Функции $f(\cdot)$ и $g(\cdot)$ включают также набор материальных констант $c_{\sigma i}$ и $q_{\sigma j}$.

Уравнения (6) и (7) записаны в обозначениях, соответствующих асимметричному растяжению–сжатию, и описывают диаграммы предельных амплитуд напряжений, построенные в естественной и нормированной системах координат. В качестве первичного в дальнейшем рассматривается уравнение (7), не зависящее от числа циклов до разрушения и соответствующее условию получения единой предельной диаграммы.

Если в уравнении (7) величина циклического напряжения равна нулю, разрушение материала происходит вследствие потери кратковременной прочности, если статическое напряжение равно нулю – в результате чистой усталости при симметричном цикле нагружения. Функция $g_{\sigma}(\cdot)$ в этом случае должна удовлетворять граничным условиям:

при $\sigma_a = 0$

$$g_{\sigma}\left(\frac{\sigma_m}{\sigma_B}\right) = 1, \quad (8)$$

при $\sigma_m = 0$

$$g_{\sigma}\left(\frac{\sigma_a}{\sigma_n}\right) = 1 \quad (9)$$

независимо от значений коэффициентов $q_{\sigma j}$.

Конкретизация функции $g_{\sigma}(\cdot)$ в уравнении (7) выполняется с использованием линеаризованной единой предельной диаграммы (рис. 1,б), которая задает зависимость между переменными асимметричного цикла в виде

$$\frac{y_a}{\sigma_*} - \psi\left(\frac{x_m}{\sigma_{**}}\right) = 0, \quad (10)$$

где y_a – переменная, соответствующая одной из циклических компонент σ_a , σ_a^b , τ_a ; x_m – переменная, соответствующая одной из статических компонент σ_m , σ_m^b , τ_m ; σ_* , σ_{**} – нормирующие материальные константы.

Особенность представления (10) заключается в том, что искомая функция $\psi(\cdot)$, в отличие от функции $g_\sigma(\cdot)$ в (7), зависит только от одной переменной, что существенно облегчает процедуру ее идентификации. Структура функции $\psi(\cdot)$ выбирается исходя из наилучшего соответствия между экспериментальными данными и линейной зависимостью (10) и должна удовлетворять условиям (8) и (9).

В работе [9] в качестве функции $\psi(\cdot)$ выбраны и апробированы линейная, параболическая, эллиптическая, гиперболическая зависимости, а также зависимости вида

$$\psi\left(\frac{x_m}{\sigma_{**}}\right) = \left[\cos\left(\frac{\pi x_m}{2 \sigma_{**}}\right) \right]^\lambda \quad (11)$$

и

$$\psi\left(\frac{x_m}{\sigma_{**}}\right) = \frac{2}{\pi} \left[\arccos\left(\frac{x_m}{\sigma_{**}}\right) \right]^\xi, \quad (12)$$

λ и ξ – коэффициенты чувствительности материала к асимметрии нагружения, определяющие, как показал опыт, фактически форму диаграмм предельных амплитуд напряжений.

Обработка многочисленных экспериментальных данных показывает, что наиболее удовлетворительное их описание обеспечивает конкретизация функции $\psi(\cdot)$ в (10) зависимостями (11) и (12).

С использованием выражений (11) и (12) зависимость между амплитудными значениями циклической y_a и статической x_m составляющими цикла напряжений в обобщенной форме может быть представлена уравнениями

$$\frac{y_a}{\sigma_*} = \left[\cos\left(\frac{\pi x_m}{2 \sigma_{**}}\right) \right]^\lambda \Rightarrow \frac{y_a}{\sigma_*} - \left[\cos\left(\frac{\pi x_m}{2 \sigma_{**}}\right) \right]^\lambda = 0 \quad (13)$$

и

$$\frac{y_a}{\sigma_*} = \frac{2}{\pi} \left[\arccos\left(\frac{x_m}{\sigma_{**}}\right) \right]^\xi \Rightarrow \frac{y_a}{\sigma_*} - \frac{2}{\pi} \left[\arccos\left(\frac{x_m}{\sigma_{**}}\right) \right]^\xi = 0, \quad (14)$$

позволяющими описать разнообразие известных форм диаграмм предельных амплитуд напряжений, где в качестве нормирующих материальных констант используются пределы ограниченной выносливости при симметричном цикле нагружения и пределы кратковременной прочности.

Уравнения (13) и (14) точно удовлетворяют граничным условиям, а именно: при $x_m = 0$ разрушение происходит в результате усталости материала. В случае если $y_a = 0$, разрушение наступает вследствие потери кратко-

временной прочности. Уравнения содержат три характеристики, подлежащие определению из эксперимента: предел кратковременной прочности σ_{**} , предел ограниченной выносливости σ_* при симметричном цикле нагружения и коэффициенты чувствительности материала к асимметрии нагружения λ или ξ . По сути, указанные величины являются параметрами моделей (13) и (14), или материальными константами. Величины σ_{**} и σ_* определяются по результатам стандартных испытаний гладких цилиндрических образцов на кратковременную прочность и усталость при симметричном цикле нагружения при соответствующих видах нагружения.

Коэффициенты λ и ξ определяются по данным дополнительного базового эксперимента, содержащего информацию о чувствительности материала к асимметрии нагружения, т.е. при совместном воздействии статических и циклических напряжений. Как показывают предварительные исследования, это могут быть испытания при асимметричном отнулевом цикле, т.е. при равенстве статической и циклической компонент цикла нагружения. После несложных математических преобразований уравнений (13) и (14) для определения λ и ξ получим соответственно выражения в общем виде:

$$\lambda = \frac{\lg y_a^0 - \lg \sigma_*^0}{\lg \left[\cos \left(\frac{\pi}{2} \frac{x_m^0}{\sigma_{**}^0} \right) \right]} \quad \text{и} \quad \xi = \frac{\lg \left[\cos \left(\frac{y_a^0}{\sigma_*^0} \frac{\pi}{2} \right) \right]}{\lg x_m^0 - \lg \sigma_{**}^0}, \quad (15)$$

где x_m^0, y_a^0 – переменные, соответствующие одной из статических $\sigma_m^0, \sigma_m^{b0}, \tau_m^0$ и циклических $\sigma_a^0, \sigma_a^{b0}, \tau_a^0$ компонент отнулевого цикла; σ_*^0 – предел ограниченной выносливости при симметричном цикле нагружения, соответствующий долговечности при отнулевом цикле.

Для учета статистических характеристик рассеяния свойств материалов и более надежного определения коэффициентов λ и ξ могут быть испытаны несколько идентичных образцов при одной комбинации напряжений.

Расчет диаграмм предельного состояния. При обработке экспериментальных данных и построении диаграмм предельных амплитуд напряжений установлено, что выбор той или иной модели для адекватного описания результатов эксперимента определяется механическими характеристиками исследуемого материала, в первую очередь пластичностью.

Ниже решается задача расчета напряжений асимметричного цикла, приводящих к разрушению призматических образцов в условиях растяжения–сжатия, асимметричных изгиба и кручения. С помощью предложенных моделей можно установить зависимость между тремя величинами: амплитудой напряжения y_a , средним напряжением x_m и числом циклов до разрушения n_R . Пределы ограниченной σ_* и кратковременной σ_{**} прочности входят в соотношения моделей в качестве констант материала. Задаваясь двумя величинами, можно рассчитать значение третьей.

С целью оценки предельного состояния решение в дальнейшем строится посредством соотношений, разрешенных относительно амплитуды асимметричного цикла при соответствующем виде нагружения. Применительно к конкретному виду нагружения в расчете используются значения σ_* и σ_{**} , определенные при этом виде нагружения.

Асимметричное растяжение–сжатие. Конкретизируя выражения (13) и (14) для случая нагружения растяжением–сжатием, получаем уравнения для расчета предельных амплитуд циклического нагружения с помощью величин σ_* , σ_{**} , λ и ξ , определенных при данных условиях нагружения.

Для асимметричного растяжения–сжатия можно записать

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_n} = \left[\cos\left(\frac{\pi \sigma_m}{2 \sigma_B}\right) \right]^\lambda \Rightarrow \frac{\sigma_a}{\sigma_n} - \left[\cos\left(\frac{\pi \sigma_m}{2 \sigma_B}\right) \right]^\lambda = 0 \quad (16)$$

и

$$\left(\frac{\sigma_a}{\sigma_n}\right) = \frac{2}{\pi} \left[\arccos\left(\frac{\sigma_m}{\sigma_B}\right)^\xi \right] \Rightarrow \left(\frac{\sigma_a}{\sigma_n}\right) - \frac{2}{\pi} \left[\arccos\left(\frac{\sigma_m}{\sigma_B}\right)^\xi \right] = 0. \quad (17)$$

Соответственно для определения λ и ξ имеем

$$\lambda = \frac{\lg \sigma_a^0 - \lg \sigma_n^0}{\lg \left[\cos\left(\frac{\pi \sigma_m^0}{2 \sigma_B}\right) \right]} \quad \text{и} \quad \xi = \frac{\lg \left[\cos\left(\frac{\pi \sigma_a^0}{2 \sigma_n^0}\right) \right]}{\lg \sigma_m^0 - \lg \sigma_B}. \quad (18)$$

На рис. 2 представлены результаты сопоставления расчетных данных по уравнениям (16) и (17) с экспериментальными [1, 11] для малоуглеродистых и осевых сталей при $n_R = 10^7$ цикл. Как свидетельствуют данные расчетов, уравнение (16) более точно описывает результаты экспериментов в отличие от (17). При этом диаграммы располагаются выше линейной зависимости Гудмана.

Используемые в расчетах необходимые величины (характеристики сопротивления усталости σ_n , кратковременной прочности σ_B , коэффициенты λ и ξ) приведены в таблице.

Асимметричный изгиб. При совместном воздействии статического и циклического изгибающих моментов с учетом (11)–(14) получим соответствующие уравнения для данных условий нагружения, где $x_m \Rightarrow \sigma_m^b$, $y_a \Rightarrow \sigma_n^b$.

Показатели λ и ξ определяли по выражениям (15) с учетом прочностных характеристик (пределов кратковременной прочности и ограниченной выносливости, полученных при данном виде нагружения).

На рис. 3 представлены результаты расчетов с использованием уравнений, аналогичных (16) и (17), в сопоставлении с экспериментальными данными для углеродистых сталей.

Характеристики прочности исследуемых сталей и значения коэффициентов λ и ξ

Сталь	Вид нагружения	$\sigma_{в}$, МПа	$\sigma_{н}$, МПа	λ	ξ	Литературный источник
Малоуглеродистая, 0,1% С	Растяжение–сжатие	409	190	0,99	1,39	[11]
То же, 0,13% С		388	201	0,94	1,45	[1]
Осевая		618	162	0,82	1,68	[1]
Углеродистая (для осей)	Изгиб	802	216	0,71	1,77	[1]
Незакаленная пружинная		888	210	1,01	1,56	[1]
Ст. 2		354	282/157	1,18	0,99	[12]
Нормализованная малоуглеродистая, 0,13% С	Кручение	465	152	0,19	3,71	[2]
Термообработанная углеродистая, 0,6% С		1192	358	0,56	1,92	[2]
Нормализованная углеродистая, 0,6% С		836	218	0,17	2,98	[2]

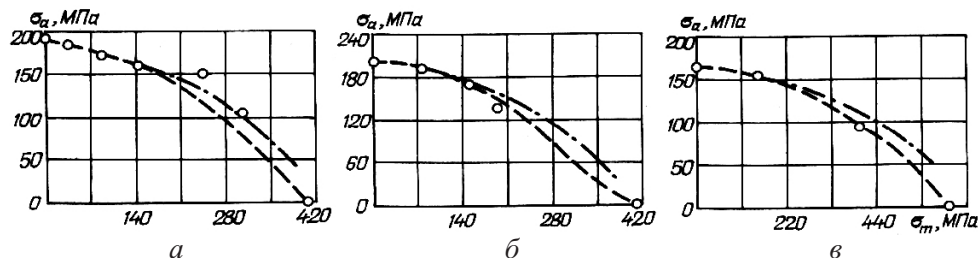


Рис. 2. Диаграммы предельных амплитуд напряжений для малоуглеродистых (а – 0,1% С; б – 0,13% С) и осевой (в) сталей в условиях асимметричного растяжения–сжатия. (Штриховые линии – по (16), штрихпунктирные – по (17).)

При совместном воздействии статического и циклического изгибающих моментов результаты расчетов, выполненных по зависимости, аналогичной (16), лучше согласуются с экспериментальными данными, чем при использовании зависимости вида (17), независимо от уровня пластичности. В данном случае диаграммы также располагаются выше линейной зависимости Гудмана. Выполненные расчеты свидетельствуют о хорошем согласовании полученных диаграмм предельных амплитуд напряжений с экспериментами для различных долговечностей (рис. 3,в). Это позволяет заключить, что коэффициенты λ и ξ , рассчитанные на малых базах испытания, могут быть использованы для расчета диаграмм, отвечающих большей долговечности, т.е. решения задач прогнозирования предельного состояния.

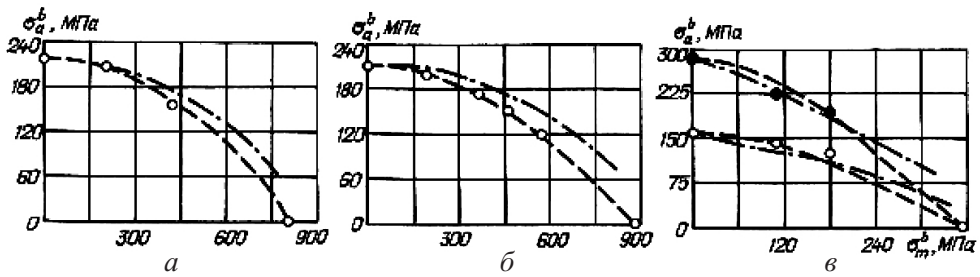


Рис. 3. Диаграммы предельных амплитуд напряжений для углеродистой осевой (а), незакаленной пружинной (б) и стали Ст. 2 (в) в условиях асимметричного изгиба: а, б – $n_R = 10^7$ цикл; в – $n_R = 10^5$ (●) и 10^7 цикл (○). (Штриховые линии – расчет по уравнению (16), штрихпунктирные – по уравнению (17). Экспериментальные данные использованы из [1, 12].)

Асимметричное кручение. Расчет диаграмм предельных напряжений при совместном действии статического и циклического крутящих моментов был выполнен на основе уравнений (11)–(14), конкретизированных для данного вида нагружения, применительно к углеродистым сталям с содержанием углерода 0,13 и 0,6%. Стали обладают достаточно высокой пластичностью, в частности для стали, содержащей 0,13% С, $\delta = 40\%$. Для асимметричного циклического кручения в (11)–(14) имеем $x_m \rightarrow \tau_m$, $y_a \rightarrow \tau_a$. Неизвестные коэффициенты λ и ξ определим по выражениям (15) с учетом исходных характеристик, полученных при кручении образцов из исследуемых материалов.

Результаты расчетов по уравнениям, которые аналогичны (16) и (17) и конкретизированы применительно к данному виду нагружения, сопоставляли с экспериментальными результатами для углеродистых сталей при комнатной температуре [2] и $n_R = 10^7$ цикл (рис. 4). Экспериментальные данные для стали, содержащей 0,6% С, которую испытывали в двух состояниях (термообработанном и нормализованном), показаны на рис. 4, б, в соответственно.

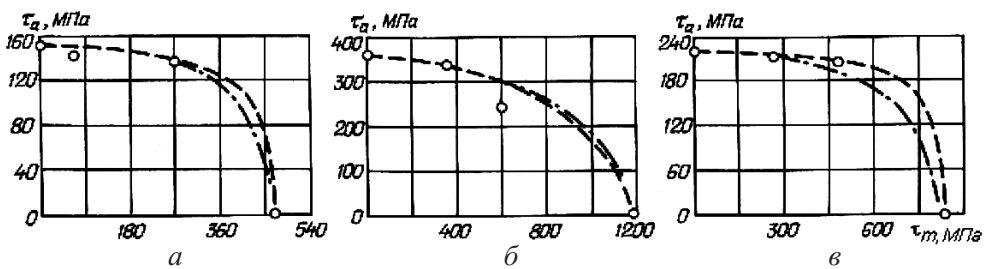


Рис. 4. Диаграммы предельных амплитуд напряжений для углеродистых сталей в условиях асимметричного кручения: а – 0,13% С; б, в – 0,6% С. (Штриховые линии – по уравнению, аналогичному (16), штрихпунктирные – по аналогичному (17).)

Испытания при асимметричном кручении показывают, что, как и в условиях растяжения–сжатия, расчетные диаграммы, построенные по уравнению, аналогичному (16), лучше согласуются с экспериментальными. Характерной для этого случая нагружения является форма диаграмм, свидетельствующая о том, что статические напряжения кручения слабо или вообще не влияют на

величину амплитуды напряжения до тех пор, пока сумма статической и циклической компонент остается ниже напряжения сдвига. Автор [13] предположительно связывает это с пластическим перераспределением напряжений и наклепом, который легко возникает при этом напряженном состоянии.

Обсуждение результатов. Анализ выполненных расчетов и их сопоставление с экспериментальными данными показывает, что предложенные модели достаточно хорошо описывают предельное состояние углеродистых сталей как при растяжении–сжатии, так и асимметричном нагружении изгибом и кручением. При их использовании для расчета предельного состояния требуется минимальное количество исходных экспериментальных данных: значений пределов прочности, пределов ограниченной выносливости при симметричном цикле, коэффициентов λ и ξ , определяемых при соответствующем виде нагружения. Максимальная погрешность между расчетом и экспериментом не превышает 15%, что, учитывая обычно достаточно большой разброс экспериментальных данных, характерный для усталостных испытаний, можно считать вполне приемлемым.

Анализ расчетных оценок предельного состояния пластичных углеродистых сталей свидетельствует о том, что для них характерна форма диаграмм предельных амплитуд напряжений, располагающихся выше линейной диаграммы. В этом случае величины λ и ξ , используемые в качестве показателя формы диаграмм и характеризующие чувствительность сталей к асимметрии нагружения, изменяются в пределах 0,1...1,0 и 1...10 соответственно. Расчеты с помощью коэффициента λ лучше отражают экспериментальные данные. Уменьшение пластичности углеродистой стали, как правило, приводит к увеличению коэффициента λ , при $\delta = 10...15\%$ при растяжении–сжатии следует использовать коэффициент ξ . При асимметричном изгибе пластичность оказывает меньшее влияние на форму диаграмм предельных амплитуд напряжений. Основным фактором, определяющим степень снижения предельных амплитуд, является статическая компонента цикла нагружения.

В условиях асимметричного кручения статическая компонента, как правило, слабо влияет на снижение амплитуды напряжения вплоть до максимальных напряжений, не превышающих предела текучести.

К сожалению, выбор модели, описывающей предельное состояние конкретной стали, из-за ограниченности экспериментальных данных по сопротивлению усталости, полученных лишь при одном-двух значениях статической компоненты, порой затруднен. В таком случае выбор модели основывается на общей статистике закономерностей, отражающих предельное состояние конкретного класса или группы материалов в тех или иных условиях нагружения. Следует также отметить, что погрешность при оценке предельных амплитуд на основе расчета по предложенным моделям существенно зависит от выбора комбинации напряжений в базовом эксперименте. Как показывает опыт, использование отнулевого цикла нагружения в базовом эксперименте для определения коэффициентов λ и ξ обеспечивает наиболее корректные оценку и прогнозирование предельного состояния исследуемого класса сталей.

Обработка многочисленных экспериментальных данных позволяет утверждать, что расчет предельного состояния высокопластичных углеродистых

сталей с использованием модели, сформированной на основе выражения (13), адекватно отражает их поведение в условиях асимметричного растяжения–сжатия. Предельное состояние высокопрочных малопластичных углеродистых сталей удовлетворительно описывает модель, построенную на зависимости (14).

Заключение. Большинство известных методов построения диаграмм предельных амплитуд напряжений базируется на применении линейных или нелинейных соотношений, содержащих только характеристики статической прочности и сопротивления усталости при симметричном цикле. Предложенный подход основан на разработке более универсальных исходных соотношений и использовании дополнительных параметров материала, в результате чего уравнения диаграмм предельных амплитуд напряжений становятся более гибкими. Используется методика построения диаграмм предельных амплитуд напряжений, основанная на гипотезе о существовании единой предельной диаграммы, инвариантной времени до разрушения. Единая диаграмма задается степенной функцией косинуса или арккосинуса, где показатели степени рассматриваются как дополнительные материальные константы, характеризующие интенсивность взаимодействия статической и циклической компонент. Материальные константы определяются из единичного базового эксперимента при асимметричном отнулевом цикле. Предложенная методика апробирована при расчете диаграмм предельных амплитуд напряжений для углеродистых сталей. Уравнения, построенные на основе степенной функции косинуса и арккосинуса, позволяют охватить широкий спектр форм диаграмм предельных амплитуд напряжений и могут быть рекомендованы для оценки предельного состояния углеродистых сталей при минимальных объеме базового эксперимента и количестве используемых в расчетах необходимых характеристик.

Резюме

Розглянуто проблему розрахунку опору втомі вуглецевих сталей за умов сумісної дії статичних і циклічних навантажень розтягом–стиском, згинном та крученням. Розрахунки виконано з використанням моделей граничного стану, які описують усі відомі форми діаграм граничних напружень. Отримано задовільний збіг розрахункових даних з експериментальними.

1. Гаф Г. Дж. Усталость металлов: Пер. с англ. – М.; Л.: Гл. ред. лит. по черной металлургии, 1935. – 304 с.
2. Одинг И. А. Прочность металлов. – М.; Л.: ОНТИ-НКТП, 1935. – 624 с.
3. Форрест П. Усталость металлов: Пер. с англ. под ред. С. В. Серенсена. – М.: Машиностроение, 1968. – 352 с.
4. Хэйвуд Р. Б. Проектирование с учетом усталости: Пер. с англ. под ред. И. Ф. Образцова. – М.: Машиностроение, 1969. – 504 с.
5. Серенсен С. В., Когаев В. П., Шнейдерович Р. М. Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность. Руководство и справочное пособие. – М.: Машиностроение, 1975. – 488 с.

6. Троценко В. Т., Красовский А. Я., Сосновский Л. А., Стрижало В. А. Сопротивление материалов деформированию и разрушению. Справочное пособие. – Киев: Наук. думка, 1994. – Ч. 2. – 704 с.
7. Голуб В. П., Крижановский В. И. К оценке предельного состояния материалов при асимметричном многоцикловом нагружении // Пробл. прочности. – 1994. – № 4. – С. 3 – 15.
8. Golub V. P. Experimental analysis of high-temperature creep, fatigue and damage. 1. Analysis methods // Int. Appl. Mech. – 2001. – **37**, No. 4. – P. 425 – 455.
9. Голуб В. П., Крижановский В. И., Погребняк А. Д. Метод расчета усталостной прочности металлических и композитных материалов при асимметричном многоцикловом нагружении // Прикл. механика. – 2004. – **40**, № 11. – С. 106 – 115.
10. Голуб В. П., Крижановский В. И., Погребняк А. Д., Кочеткова Е. С. Усталостная прочность металлических и композитных материалов при асимметричном растяжении–сжатии // Там же. – 2006. – **42**, № 1. – С. 48 – 58.
11. Cough H. J. and Wood W. A. Deformation and fracture of mild steel under cyclic stresses in relation to crystalline structure // Proc. Inst. Mech. Eng. – 1939. – **141**. – P. 175 – 193.
12. Афанасьев Н. Н. Усталость судостроительной стали // Сб. тр. Ин-та строит. механики АН УССР. – 1948. – **9**. – С. 37 – 65.
13. Серенсен С. В. Несущая способность и расчет на прочность деталей при статических и переменных напряжениях // Вестн. машиностроения. – 1954. – № 4. – С. 3 – 14.

Поступила 28. 09. 2010