

УДК 539.376

А. В. ЖЕЛДУБОВСКИЙ, А. Д. ПОГРЕБНЯК, М. Н. РЕГУЛЬСКИЙ

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

РАСЧЕТ ПРЕДЕЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ КОМБИНИРОВАННОМ НАГРУЖЕНИИ

Исследовано предельное состояние ряда конструкционных материалов при разнородных видах нагрузок. Расчет предельного состояния осуществлен с использованием предложенных ранее обобщенных моделей. Сопоставление результатов расчета с экспериментальными данными продемонстрировало достаточно хорошее согласование – погрешность расчета, как правило, не превышает 10%.

Ключевые слова: предельное состояние, комбинированное нагружение, диаграммы предельного состояния, конструкционные материалы.

Введение. Проблема обеспечения надежности машиностроительных конструкций различного назначения в течение заданного ресурса связана с необходимостью решения широкого спектра задач. В первую очередь это относится к совершенствованию методов расчета на прочность элементов конструкций, к всестороннему исследованию свойств используемых материалов с учетом особенностей предполагаемой эксплуатации создаваемой конструкции.

Режимы нагружения элементов конструкций в реальных условиях зависят от назначения конкретного изделия. Их анализ свидетельствует о широком спектре комбинаций нагружения, включающем, как правило, циклические нагрузки в сочетании со статическими, что обычно приводит к разрушению от усталости материала. Опасность такого рода разрушения заключается, прежде всего, в том, что оно развивается при отсутствии заметных деформаций материала.

В качестве примеров деталей, подверженных одновременному действию циклических и статических нагрузок, можно привести зубчатые передачи, пружины, валы, элементы транспортных, судостроительных, авиационных конструкций, трубопроводы и др.

Постановка задачи. Расчет предельного состояния конструкционных материалов, подверженных асимметричному нагружению, формируемому действием однопиковых циклической и статической компонент цикла напряжений, осуществляется, как правило, на основе диаграммы Смита (или схематизированной диаграммы Смита) либо диаграммы предельных амплитуд (рис. 1) [1 – 4]. Указанные диаграммы строятся на основе линейной или параболической зависимости. Первая представляет собой зависимость максимальных (σ_{\max}) и минимальных (σ_{\min}) напряжений от статической компоненты σ_m (см. рис. 1, *a*). Вторая отражает зависимость амплитуды асимметричного цикла σ_a от статической компоненты σ_m (см. рис. 1, *b*). Оба вида диаграмм для их построения используют две экспериментально определяемые характеристики: предел усталости σ_{-1} при симметричном цикле и предел кратковременной прочности σ_B (или предел текучести σ_T). Построение таких диаграмм позволяет без проведения длительных и трудоемких экспериментальных исследований определять предельные усталостные характеристики (пределы усталости) в широком диапазоне изменения статической компоненты. Такие диаграммы строятся как для асимметричного растяжения-сжатия, так и для асимметричных изгиба и кручения.

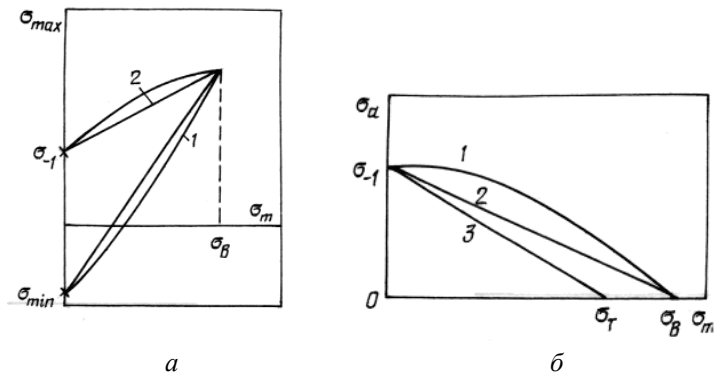


Рис. 1. Диаграммы предельных напряжений (а) и предельных амплитуд напряжений (б): 1 – парабола Гербера; 2 – видоизмененная зависимость Гудмана; 3 – зависимость Зодерберга

В реальных условиях многие детали конструкций подвергаются воздействию разнородных компонент циклической и статической составляющих цикла напряжений, например, циклической составляющей изгиба со статической растягивающей или циклической составляющей кручения со статической изгибом, циклической составляющей изгиба со статической кручения и др.

Перечисленные сочетания составляющих цикла усталостного нагружения назовем комбинированным нагружением. В работе [4] такой режим, представляющий собой совокупность разнородных видов нагружения, определяется как неоднородный. Подобный характер нагружения имеет место в деталях транспортного машиностроения – автомобилей, вагонов, сельскохозяйственных машин, металлорежущих станков. Определение предела усталости конструкционных материалов применительно к таким условиям нагружения имеет большое практическое значение.

Оценка предельного состояния исследуемого материала, подверженного комбинированному нагружению, может быть осуществлена на основе представленных на рис. 1 диаграмм. Однако опыт многочисленных исследований показал, что их использование может привести к большим погрешностям в связи с тем, что линейная и параболическая или иные зависимости лишь в частных случаях адекватно отражают реакцию материала на внешнее силовое воздействие.

В то же время разнообразие свойств конструкционных материалов приводит к широкому спектру экспериментальных предельных диаграмм, обусловленному их реакцией на комбинированное нагружение.

В работе [5] предложена методика оценки предельного состояния конструкционных материалов в условиях комбинированного нагружения, основанная на использовании модели построенной на предположении о возможности описания диаграммы с помощью тригонометрических функций [6–8]. Методика апробирована на примерах расчета и построения диаграмм предельных амплитуд цикла применительно к случаям нагружения циклическим изгибом и статическим растяжением, циклическим изгибом и статическим кручением. Ниже рассматривается её использование для более широкого круга материалов и условий нагружения.

Основные расчетные соотношения. Партия однотипных цилиндрических образцов подвергается комбинированному нагружению.

В общем случае условия нагружения нагрузкой \tilde{p}^c записываются в виде

$$\tilde{p}^c = p_a g(n) + p_m h(t), \quad (1)$$

где индексом a обозначена циклическая компонента, а индексом m – статическая компонента нагрузки; $g(n)$ – известная функция числа циклов n ($n = ft$) изменения циклической компоненты; $h(t)$ – единичная функция Хевисайда ($h=0$ при $t < 0$) и $h=1$ при $t \geq 0$); t – физическое время; f – частота изменения циклической нагрузки.

Исследования относятся к многоцикловой области усталости ($f \geq 10$ Гц, $n_R \geq 10^4 \div 10^5$ циклов), когда максимальные напряжения в цикле не превышают макроскопический предел текучести, а усталостное разрушение не сопровождается развитием и накоплением заметных пластических деформаций, являясь квазихрупким.

Используя модели предельного состояния, предложенные в [6–8], запишем в общем виде выражение для диаграмм предельных амплитуд цикла.

Опыт расчетной практики показал, что уравнения диаграмм предельных амплитуд существенно зависят от свойств пластичности исследуемого материала: для пластичных материалов в общем виде оно записывается следующим образом

$$p_a = p_n \left[\cos \left(\frac{\pi p_m}{2 p_B} \right) \right]^\lambda; \quad (2)$$

для хрупких материалов –

$$p_a = p_n \left\{ \frac{2}{\pi} \left[\arccos \left(\frac{p_m}{p_B} \right) \right]^\xi \right\}, \quad (3)$$

где p_a – амплитуда циклической компоненты; p_m – статическая компонента; p_n – характеристика сопротивления усталости материала при симметричном цикле нагружения; p_B – предел прочности при исследуемом виде статического нагружения.

Выражения (2) и (3) содержат неизвестные величины: p_n – предел усталости при симметричном цикле и p_B – предел прочности, определяемые экспериментально при исследуемых видах нагружения. Показатели степени λ и ξ определяются на основе единичного базового усталостного эксперимента, в котором реализуются равные величины циклической и статической компонент цикла нагружения – условно называемого отнулевым циклом, при котором $p_a^0 = p_m^0$.

Коэффициенты λ и ξ могут быть получены из соотношений (2) и (3) после несложных преобразований. В данной работе расчет коэффициентов осуществлялся с использованием соотношений

$$\lambda = \frac{\lg p_a^0 - \lg p_m^0}{\lg \left[\cos \left(\frac{\pi p_m^0}{2 p_B} \right) \right]} \quad (4)$$

и

$$\xi = \frac{\lg \cos \left(\frac{p_a^0}{p_m^0} \frac{\pi}{2} \right)}{\lg p_m^0 - \lg p_B}. \quad (5)$$

Здесь p_a^0 и p_m^0 – циклическая амплитуда и статическая компоненты комбинированного нагружения в базовом эксперименте; p_* – предел ограниченной усталости при симметричном цикле, соответствующий долговечности n_R^0 под действием напряжений p_a^0 и p_m^0 ; p_B – предел кратковременной прочности при рассматриваемом виде статической компоненты комбинированного нагружения.

Значения величин λ и ξ могут быть определены при наличии достаточной исходной информации на основе определения минимума функционала квадратов отклонения экспериментальных величин от линейной зависимости, как это изложено в работе [9].

Показатели степени λ и ξ , рассчитываемые по результатам базового эксперимента, являются, по сути, критерием чувствительности материала к комбинации нагружения через его свойства. Они определяют форму (вид) диаграмм предельных амплитуд цикла напряжений и практически могут рассматриваться как материальные константы материала.

Расчет диаграмм предельных амплитуд напряжений. Расчет и построение диаграмм для широкого круга материалов осуществляли применительно к нескольким вариантам комбинированного нагружения с использованием выражений (2) и (3) и исходных механических характеристик, отвечающих исследуемому варианту.

Экспериментальная информация, необходимая для выполнения расчетов, заимствована из опубликованных работ отечественных и зарубежных исследователей.

На нижеприведенных графиках (рис. 2–7) пунктирными линиями нанесены результаты расчета в виде предельных диаграмм. Заимствованные экспериментальные данные представлены точками. В соответствующих таблицах приведены исходные характеристики исследованных материалов: значения пределов прочности, текучести, усталости при соответствующей комбинации рассматриваемого комбинированного нагружения, показатели λ и ξ , использованные при выполнении расчетов.

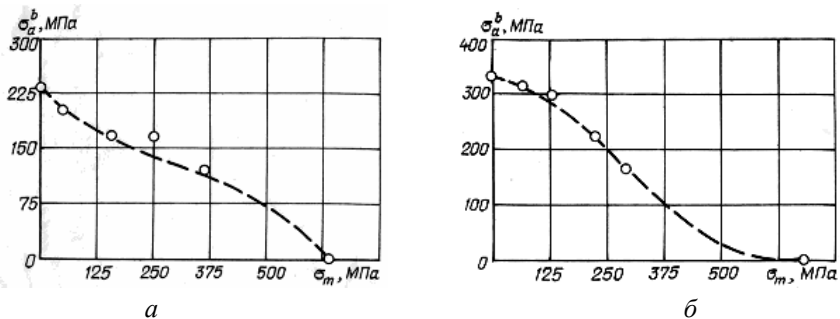


Рис. 2. Диаграммы предельных амплитуд напряжений углеродистой стали (0,53% C), нормализованной (а) и после термообработки на сорбит (б) при циклическом изгибе со статическим растяжением

Таблицы содержат также оценки погрешностей расчета пределов усталости (пределов ограниченной усталости) по сравнению с экспериментальными данными.

Циклический изгиб со статическим растяжением. Результаты исследований сопротивления усталости конструкционных материалов при данном виде нагружения широко представлены в литературе.

На рис. 2 нанесены рассчитанные диаграммы предельных амплитуд напряжений (линии) и экспериментальные данные (точки) для углеродистой стали (0,53% C), подвергнутой различным режимам термообработки.

Экспериментальные данные заимствованы из [10]. Испытывали гладкие корсетобразные образцы диаметром 7,52 мм.

В табл. 1 приведены характеристики исследованной стали: значения пределов кратковременной прочности σ_B , текучести $\sigma_{0,2}$, усталости при изгибе σ_{-1}^b , а также коэффициенты λ и ξ , использованные при расчетах. Последние в данном случае рассчитывались с использованием метода минимизации функционала квадратичных отклонений экспериментальных данных от линейной зависимости [9].

Таблица 1

Значения механических характеристик материалов, испытанных при циклическом изгибе со статическим растяжением, и параметров λ и ξ

Материал	σ_B	$\sigma_{0,2}$	σ_{-1}^b	λ	ξ	$\delta, \%$
	МПа					
Углеродистая сталь, 0,53% C, нормализованная	630,9	324,7	227,5	4,05	0,61	-13,1÷5,47
Углеродистая сталь, 0,53% C, сорбитная	668,1	480,6	330,1	2,68	0,66	-1,98÷2,25
Никелевая сталь, 3,5% Ni, термообработка А	850,1	749,5	414,0	1,13	1,24	-9,24÷2,47
Никелевая сталь, 3,5% Ni, термообработка В	770,9	628,1	413,7	2,04	0,77	-13,5÷6,15
Никелевая сталь, 3,5% Ni, термообработка Д	700,5	445,4	337,8	5,79	0,37	-12,3÷0,3

Анализ сопоставления результатов расчета предельных диаграмм с экспериментом свидетельствует о достаточно хорошем согласовании. Расхождение в основном не превышает 10%. Более высокие значения погрешности δ обусловлены, скорее всего, разбросом результатов, характерным для усталостных испытаний.

Обращает на себя внимание тот факт, что для нормализованной стали лучший результат получен при использовании уравнения (3) (рис. 2,а), для стали, подвергнутой термообработке по режиму Sorbit – при использовании уравнения (2) (рис. 2, б). Причиной установленных закономерностей можно считать повышение прочностных характеристик стали сорбитной структуры в результате принятой термообработки по сравнению со сталью в нормализованном состоянии. Предел прочности стали сорбитной структуры повысился относительно незначительно, однако предел текучести возрос почти в полтора раза; в такой же степени повысился и предел усталости (см. табл. 1). Таким образом, термообработка изменила прочностные свойства материала и его реакцию на комбинированное нагружение, проявившееся в изменении формы диаграммы предельных амплитуд напряжений. Этот вывод подтверждают и графики на рис. 3, где нанесены предельные диаграммы для никелевой стали, рассчитанные с использованием выражения (2) –

пунктирные линии, и выражения (3) – штрихпунктирные линии.

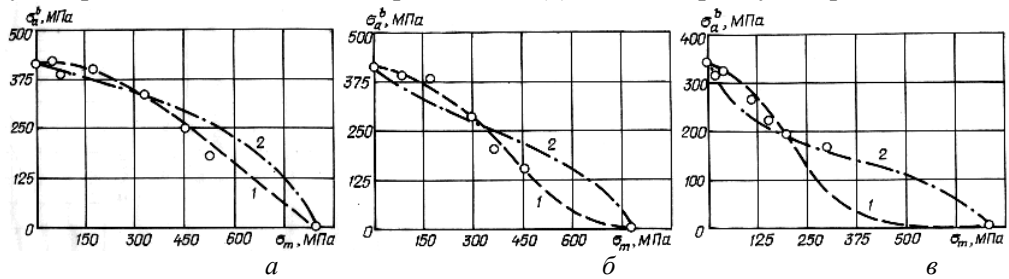


Рис. 3. Диаграммы предельных амплитуд напряжений никелевой стали (3,5% Ni), термообработанной по режимам А (а), В (б) и Д (в) при циклическом изгибе со статическим растяжением

Никелевая сталь (образцы $\varnothing 7,52$ мм), содержащая 3,5% никеля, испытывалась при тех же условиях нагружения, что и образцы стали с содержанием углерода 0,53% [10]. Сталь подвергали четырем видам термообработки. Рис. 3 отражает результаты расчета предельных диаграмм стали, термообработанной по трем режимам. Табл. 1 содержит данные, использованные при расчетах диаграмм. Анализ представленных графиков свидетельствует о том, что принятые режимы термообработки существенно изменили форму предельных диаграмм, что отразилось в изменении коэффициентов λ и ξ , которые практически и определяют вид диаграммы. В данном случае, однако, лучшие результаты получены при использовании уравнения (2) для образцов стали, термообработанной по указанным режимам А (см. рис. 3, а), В (см. рис. 3, б) и Д (см. рис. 3, в). Термообработка несколько изменила прочностные свойства стали, в частности предел прочности стали, термообработанной по режиму Д в 1,2 раза меньше, чем стали, термообработанной по режиму А. В той же степени снизился и предел усталости последней стали. Более существенно снизился для этой стали предел текучести – в 1,68 раза. Эти изменения свойств стали изменили форму предельных диаграмм (см. рис. 3). Изменение пластических свойств стали после термообработки по режиму Д обусловило возможность удовлетворительного согласования расчета предельной диаграммы с экспериментальными данными при использовании зависимости (3). Отсутствие данных испытания стали при больших значениях статической компоненты, затрудняют конкретизацию выбора модели для описания её предельного состояния.

В работе [5] представлены диаграммы предельных амплитуд напряжения сложнoleгированных сталей 30ХГСА, 22К и 16ГНМА, рассчитанные по аналогичной методике. Так же как и для углеродистых сталей, предложенные модели адекватно описывают реакцию материала на совместное воздействие циклического изгиба и статического растяжения.

Циклический изгиб со статическим кручением. Расчет предельных диаграмм при данной комбинации нагрузок также осуществляется с использованием уравнений (2) и (3). В этом случае значения p_a и p_n – амплитуда циклической компоненты при комбинированном нагружении и предел ограниченной усталости при симметричном нагружении; p_m и p_B представляют статическое напряженное кручение и предел прочности при кручении соответственно. Это же касается формул (4) и (5).

На рис. 4 представлены рассчитанные диаграммы предельных амплитуд напряжений углеродистых сталей с содержанием углерода 0,14 (а), 0,32 (б) и

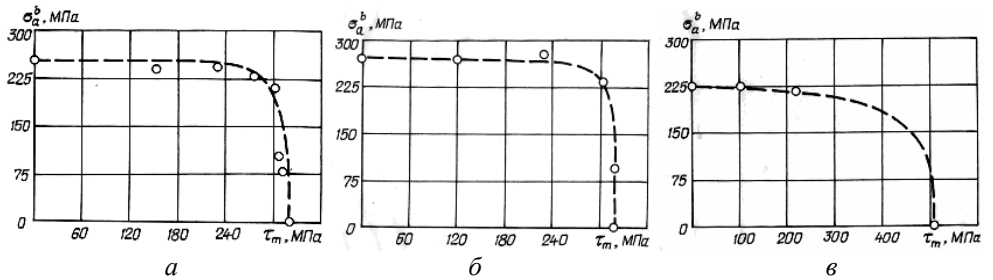


Рис. 4. Диаграммы предельных амплитуд напряжений углеродистых сталей с содержанием углерода 0,14% (а), 0,32% (б) и 0,45% (в) при циклическом изгибе со статическим кручением

0,45% (в), а на рис. 5 – легированных сталей: никелевой стали, содержащей 0,3% никеля (а), стали 40Х (б) и хромоникелевой стали (в). Экспериментальные данные заимствованы из работы [11].

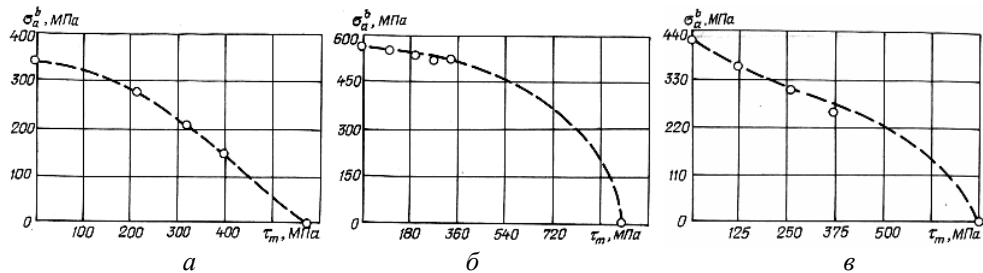


Рис. 5. Диаграммы предельных амплитуд напряжений никелевой стали, 0,3% Ni (а), стали 40Х (б) и хромоникелевой стали (в) при циклическом изгибе со статическим кручением

Табл. 2 содержит характеристики прочности исследованных материалов и значения коэффициентов λ и ξ , использованные при расчете предельных диаграмм. Значения λ и ξ рассчитывали с использованием зависимостей (4) и (5).

Таблица 2

Значения механических характеристик материалов, испытанных при циклическом изгибе со статическим кручением, и параметров λ и ξ

Материал	τ_B	σ_{-1}^b	λ	ξ	$\delta, \%$
	МПа				
Углеродистая сталь, 0,14% C	320,8	253,0	0,011	15,95	1,56÷5,90
Углеродистая сталь, 0,32% C	314,5	266,3	0,035	12,90	-0,37÷7,06
Углеродистая сталь, 0,45% C	509,0	224,2	0,18	3,18	1,02÷2,19
Никелевая сталь, 0,3% Ni	570,0	340,9	1,07	1,18	-2,96÷0,67
Сталь 40Х	985,9	553,3	0,49	2,19	-3,72÷-0,53
Хромоникелевая сталь	750,0	420,8	1,60	0,91	-7,56÷-0,38

Так же, как и в предыдущих случаях, предложенные модели позволяют достаточно точно описать предельное состояние исследованных материалов в условиях совместного воздействия циклического изгиба и статического кручения.

Лучший результат расчета предельного состояния углеродистых сталей обеспечивает использование модели (2). В случае легированных сталей точность расчета предельного состояния зависит от их пластичности.

Циклическое кручение со статическим изгибом. Расчет диаграмм предельных амплитуд напряжений осуществляли используя уравнения (2) и (3). В данном случае p_a и p_n представляли собой амплитуду напряжения кручения при комбинированном нагружении и характеристику сопротивления усталости материала при симметричном цикле нагружения кручением; p_m и p_B – статическая компонента напряжения изгиба и предел прочности при изгибе соответственно. Аналогичным образом претерпели изменения значения напряжений в уравнениях (4) и (5).

Рис. 6 представляет рассчитанные предельные диаграммы (линии) углеродистых сталей 15 (а), 35 (б) и 50 (в) в сопоставлении с экспериментальными данными (точки), заимствованными из [12].

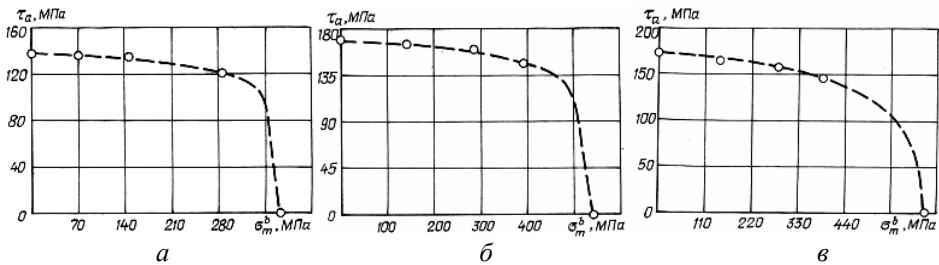


Рис. 6. Диаграммы предельных амплитуд напряжений углеродистых сталей 15 (а), 35 (б) и 50 (в) при циклическом кручении со статическим изгибом

На рис. 7 представлены предельные диаграммы ряда легированных сталей – стали 40Х (а) и хромоникелевой стали (б), содержащей 3,06% никеля и 1,29% хрома [11].

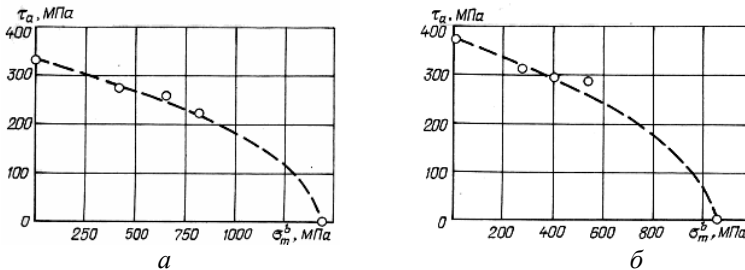


Рис. 7. Диаграммы предельных амплитуд напряжений легированных сталей 40Х (а) и хромоникелевой стали (б) при циклическом кручении со статическим изгибом

Значения коэффициентов для углеродистых сталей определяли с использованием процедуры минимизации функционала суммы квадратичных отклонений данных эксперимента от линеаризованной кривой [9], для легированных сталей с использованием зависимостей (4) и (5).

Табл. 3 содержит характеристики исследованных материалов и значения величин λ и ξ , использованные в расчетах диаграмм.

Результаты расчета предельных диаграмм, представленные на рис. 6 и 7, также подтверждают работоспособность предложенных моделей для адекватного описания предельного состояния исследованных материалов при данной комбинации

Таблиця 3

Значения механических характеристик материалов, испытанных при циклическом кручении со статическим изгибом, и параметров λ и ξ

Материал	σ_B	τ_{-1}	λ	ξ	$\delta, \%$
	МПа				
Углеродистая сталь 15	373,0	137,3	0,13	6,00	-1,48÷4,89
Углеродистая сталь 35	540,0	168,7	0,16	4,88	-2,17÷0,80
Углеродистая сталь 50	628,0	170,6	0,26	3,04	-6,17÷-4,03
Сталь 40X	1448,0	332,6	1,19	1,19	-3,65÷5,92
Сталь с 3,06% Ni и 1,29% Cr	1050,0	337,8	1,61	1,12	-1,62÷8,80

силового воздействия, причем лучшее соответствие для углеродистых сталей имеет место при использовании модели (2), для легированных – модели (3).

Следует отметить, что исследования сопротивления усталости при данной комбинации напряжений весьма ограничены. Еще в большей степени ограничены сведения о результатах исследований по циклическому кручению со статическим растяжением, циклическому растяжению-сжатию со статическим изгибом и статическим кручением. Авторам не известны результаты исследований, которые позволили бы осуществить апробацию разработанных моделей для описания диаграмм предельного состояния для этих случаев нагружения.

Обсуждение результатов. Анализ многочисленных экспериментальных данных применительно к условиям комбинированного нагружения свидетельствует о достаточно широком спектре форм диаграмм предельных амплитуд цикла напряжений, определяемых во многом свойствами материала. В этих условиях ни одна из известных зависимостей (линейная, параболическая, эллиптическая и др.) не может описать разнообразие форм предельных диаграмм и обеспечить корректное определение характеристик сопротивления усталости в условиях комбинированного нагружения, что не гарантирует необходимой точности прочностных расчетов.

Что же касается результатов экспериментальных исследований, то они, как выше отмечалось, весьма ограничены, в связи с большой трудоемкостью их проведения и отсутствием необходимого оборудования. В работах [6–8, 13] предложены обобщенные модели, успешно используемые для расчета диаграмм предельных амплитуд цикла напряжений для однородных видов нагружения – асимметричного растяжения-сжатия, асимметричных изгиба и кручения. В данной работе обобщенные модели предельного состояния использованы для оценки предельных характеристик сопротивления усталости широкого спектра конструкционных материалов при нагружении разнородными видами нагрузок.

Апробация предложенного подхода на основе расчета и построения диаграмм предельных амплитуд напряжений продемонстрировала его эффективность при достаточно высокой точности согласования результатов расчета с экспериментальными данными. Более того, опыт использования моделей предельного состояния показал, что они обладают достаточно большой гибкостью и

универсальностью при оценке предельного состояния конструкционных материалов в условиях комбинированного нагружения.

Практически во всех случаях расхождения между результатами расчета пределов (ограниченных пределов) усталости и экспериментальными данными не превышает 10% (см. табл. 1–3). Отдельные более высокие значения обусловлены, как правило, случайными причинами либо относятся к области предразрушения.

В условиях нагружения при воздействии однородных видов нагрузок выбор модели определяется, как правило, пластичностью материала: для пластичных материалов удовлетворительный результат обеспечивает использование модели (2), для хрупких – модели (3).

Выбор модели – (2) или (3) для оценки предельного состояния при комбинированном нагружении требует учета следующих положений.

В условиях нагружения разнородными видами нагрузок весьма существенное влияние на выбор модели изначально оказывает их комбинация. При этом, безусловно, следует учитывать и свойства исследуемых материалов. Исследования в этих условиях свидетельствуют о возможности развития пластических деформаций, которые способствуют процессам упрочнения и, следовательно, снижению роли статической компоненты в реакции материала на комбинацию разнородных компонентов нагружения.

В условиях циклического изгиба со статическим растяжением процессы упрочнения как в углеродистых, так и в сложнoleгированных сталях заторможены, в связи с чем повышение уровня статического растяжения приводит к заметному снижению предельных характеристик сопротивления усталости. В данном случае выбор модели в основном определяется свойствами материала: предельное состояние более пластичных и менее прочных материалов описывает модель (2), менее пластичных и более прочных модель (3) (см. рис. 2, 3).

При переменном симметричном изгибе и постоянном кручении предельные характеристики углеродистых сталей с содержанием углерода 0,14–0,32% (см. рис. 4, а, 4, б), как правило, сохраняются практически постоянными в широком диапазоне действия постоянного кручения, вследствие заметного упрочнения структурных составляющих стали в связи с развитием пластических деформаций в процессе нагружения, как установлено автором работы [11]. Для стали 45 степень упрочнения меньше в связи с меньшей склонностью к упрочнению в этих условиях нагружения (см. рис. 4, в). Отсутствие пластических деформаций и, следовательно, процессов упрочнения в сталях 40Х, никелевой и хромоникелевой, приводит в этих условиях к заметному снижению предельных характеристик сопротивления усталости при увеличении статического кручения.

В итоге можно отметить, что поведение углеродистых сталей в условиях циклического изгиба со статическим кручением удовлетворительно описывает модель (2) (см. рис. 4). Выбор модели для описания предельного состояния легированных сталей зависит в основном от пластичности материала, т.е. для менее прочных материалов лучшее согласование с экспериментом обеспечивает модель (2), более прочных – модель (3) (см. рис. 5). В некоторых случаях удовлетворительное согласование расчета с экспериментом могут обеспечить обе зависимости, особенно в области небольших значений статической компоненты. Следовательно, процессы, сопутствующие нагружению циклическим изгибом со статическим кручением, определяют реакцию материала на данную разновидность комбинированного нагружения и, в конечном итоге, форму предельных диаграмм.

Исследования сопротивления усталости конструкционных материалов в условиях совместного воздействия циклического кручения и статического изгиба продемонстрировали отмеченную выше закономерность – развитие пластических деформаций способствует упрочнению материала в этих условиях нагружения и приводит к менее интенсивному снижению предельных усталостных характеристик. Для углеродистых сталей (более пластичных) эффект упрочнения выше, чем для легированных (см. рис. 6, 7).

Таким образом, процессы, сопровождающие комбинированные нагружения, находят отражение в особенностях сопротивления усталости материала, а это естественно отражается на форме предельных диаграмм. Тем не менее, обобщенные модели обеспечивают достаточно точное описание предельных диаграмм и позволяют при минимальном объеме экспериментальных данных оценивать характеристики сопротивления усталости конструкционных материалов при комбинированном нагружении.

Заключение. Оценка предельного состояния конструкционных материалов при комбинированном нагружении, включающем разнородные циклические и статические компоненты, базируется традиционно на общеизвестных зависимостях, отражающих взаимосвязь статической и циклической составляющих цикла нагружения – линейной, параболической, эллиптической и др. Однако опыт многочисленных исследований сопротивления усталости конструкционных материалов в указанных условиях нагружения с использованием известных зависимостей не всегда обеспечивает надежную оценку их предельного состояния. Удовлетворительные результаты удается получить лишь в частных случаях.

В данной работе применительно к комбинированному нагружению апробируется ранее предложенный подход расчета диаграмм предельных амплитуд цикла напряжений применительно к однородным видам нагружения – циклическому растяжению-сжатию и статическому растяжению, циклическому и статическому изгибу, циклическому и статическому кручению. В основе подхода – использование обобщенных моделей предельного состояния, базирующихся на трансцендентных функциях косинуса и арккосинуса.

Использование данного подхода применительно к комбинированному нагружению, включающему циклический изгиб и статическое растяжение, циклический изгиб и статическое кручение, циклическое кручение и статический изгиб, продемонстрировало возможность достаточно точно описать реакцию конструкционных материалов на указанные виды нагружения. Погрешность расчета предельного состояния по отношению к результатам экспериментальных исследований, как правило, не превышает 10%.

Разработанный подход позволяет оценить предельное состояние материала при минимальном объеме экспериментальных исследований.

Список литературы

1. Серенсен С. В. Определение запаса прочности при расчете деталей машин / С. В. Серенсен // Вестник машиностроения. – 1943. – №6. – С. 6–14.
2. Форрест П. Усталость металлов // Пер. с англ. под ред. С.В.Серенсена. – М.: Машиностроение, 1968. – 352 с.
3. Сопротивление материалов деформированию и разрушению. Справочное пособие. В 2 ч. Ч. 2. / В.Т. Трошенко, А.Я. Красовский, В.В. Покровский и др. – К.: Наук. думка, 1994. – 704 с.

4. Киммельман Д.Н. Расчёт деталей машин на прочность при переменных напряжениях / Д.Н. Киммельман. – М.-Л.: Машгиз, 1950. – 128 с.
5. Пелих В.М. Методология оценки предельного состояния конструкционных материалов / В.М. Пелих, А.Д. Погребняк, М.Н. Регульский // Проблемы тертя та зношування. – 2011. – № 56. – С. 113–126.
6. Голуб В.П. К оценке предельного состояния материалов при асимметричном многоцикловом нагружении / В.П. Голуб, В.И. Крижановский // Проблемы прочности. – 1994. – № 4. – С. 3–15.
7. Голуб В.П. К оценке предельного состояния материалов при асимметричном циклическом нагружении и сложном напряженном состоянии // В.П. Голуб, В.И. Крижановский // Прикладная механика. – 1995. – Том 31, № 2. – С. 67–79.
8. Голуб В.П. Высокотемпературное разрушение материалов при циклическом нагружении / В.П. Голуб, А.Д. Погребняк. – К.: Наук. думка, 1994. – 228 с.
9. Регульский М.Н. Определение параметров модели предельного состояния конструкционных материалов при асимметричном многоцикловом нагружении / М.Н. Регульский, А.Д. Погребняк, В.Н. Пельх // Проблемы прочности. – 2012. – №1. – С. 47–57.
10. Moore H. F. An investigation of the fatigue of metals / H. F. Moore T. M. Jasper // A report of the investigation. University of Illinois. Engineering Experiment Station. – Bulletin N136, May 1923. – 100 p.
11. Щеглов Н. Н. Предел выносливости и пластические деформации сталей в некоторых случаях совместного действия изгиба и кручения / Н. Н. Щеглов // Труды Таллинского политехнического института. – 1957. – № 113, серия 1. – 35 с.
12. Одинг И.А. Допускаемые напряжения в машиностроении и циклическая прочность металлов / И.А. Одинг – М.: Машгиз. – 1962. – 260 с.
13. Крижановский В. И. Оценка предельного состояния конструкционных сталей при асимметричном многоцикловом нагружении растяжением-сжатием, изгибом и кручением / В. И. Крижановский, В. В. Касперская, А. Д. Погребняк // Проблемы прочности. – 2008, №5. – С. 81–88.

Стаття надійшла до редакції 02.10.2014

О. В. ЖЕЛДУБОВСЬКИЙ, А. Д. ПОГРЕБНЯК, М. М. РЕГУЛЬСЬКИЙ

РОЗРАХУНОК ГРАНИЧНОГО СТАНУ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ПРИ КОМБІНОВАНОМУ НАВАНТАЖЕННІ

Досліджено граничний стан ряду конструкційних матеріалів при різномірних видах навантажень. Розрахунок граничного стану здійснений з використанням запропонованих раніше узагальнених моделей. Зіставлення результатів розрахунку з експериментальними даними продемонструвало досить гарне узгодження – погрішність розрахунку, як правило, не перевищує 10%.

Ключові слова: граничний стан, комбіноване навантаження, діаграми граничного стану, конструкційні матеріали.

O. V. ZHELDUBOVSKIY, A. D. POHREBNIAK, M. M. REHULSKIY

CALCULATION OF THE LIMITING STATE OF CONSTRUCTION MATERIALS AT THE COMBINED LOADING

The limiting condition of a number of structural metallic materials under combined loading was investigated. The combinations of loads included the next: cyclic bending and static tension, cyclic bending and static torsion, cyclic torsion and static bending. Calculation of the ultimate state was done using the previously proposed generalized models. Comparison of the calculated results with the experimental data showed a fairly good conformation – error in the calculations, as a rule, does not exceed 10%.

Keywords: ultimate state, combined loading, cyclic and static loading, diagram of ultimate state, structural materials.

Желдубовский Александр Владимирович – канд. техн. наук, старший научный сотрудник, Институт механики им. С. П. Тимошенко НАН Украины, ул. Нестерова, 3, г. Киев, Украина, 03057, тел.: +38 044 456 54 67, E-mail: geav@inmech.kiev.ua.

Погребняк Анатолий Дмитриевич – канд. техн. наук, старший научный сотрудник, Институт механики им. С. П. Тимошенко НАН Украины, ул. Нестерова, 3, г. Киев, Украина, 03057, тел.: +38 044 456 53 15, E-mail: geav@inmech.kiev.ua.

Регульський Михайл Николаевич – канд. техн. наук, старший научный сотрудник, Институт механики им. С. П. Тимошенко НАН Украины, ул. Нестерова, 3, г. Киев, Украина, 03057, тел.: +38 044 454 77 34, E-mail: geav@inmech.kiev.ua.