

*В. Н. Пельх, инженер II кат.,
А. Д. Погребняк, канд. техн. наук, старш. науч. сотруд.,
М. Н. Регульский, канд. техн. наук, старш. науч. сотруд.,
В. В. Касперская, канд. техн. наук, старш. науч. сотр.*

МЕТОДОЛОГИЯ ОЦЕНКИ ПРЕДЕЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ КОМБИНИРОВАННОГО МНОГОЦИКЛОВОГО АСИММЕТРИЧНОГО НАГРУЖЕНИЯ

Институт механики им. С.П. Тимошенко НАН Украины,
e-mail: govvp@imech.creep.kiev.ua

Разработана методика, на основе которой решена задача расчета усталостной прочности и построения диаграмм предельного состояния металлических конструкционных материалов в условиях комбинированного нагружения. Расчеты выполнены на основе моделей предельного состояния, которые дают возможность описать все известные формы диаграмм предельного состояния. Получено удовлетворительное согласование результатов расчета с экспериментом.

Введение. Детали и узлы многих машиностроительных конструкций в реальных условиях эксплуатации подвержены весьма широкому спектру разнородных нагрузок, включающему совместное воздействие циклического изгиба и статического растяжения, циклического изгиба и статического кручения, циклического кручения и статического изгиба. В связи с этим среди проблем, связанных с определением несущей способности элементов конструкций, весьма актуальной является задача оценки предельного состояния используемых материалов при совместном воздействии циклических и статических нагрузок. Предельное состояние материалов применительно к этим условиям нагружения оценивается по результатам экспериментальных исследований.

На основе полученной экспериментальной информации предложен ряд зависимостей, позволяющих оценивать и прогнозировать предельное состояние конструкционных материалов в этих условиях нагружения [1–4 и др.]. К сожалению, большинство зави-

симостей имеют определенные ограничения, исключающие возможность их широкого применения в практических расчетах.

В работах [5; 6] предложен новый подход к оценке предельного состояния конструкционных материалов для случаев одноосного асимметричного нагружения, когда цикл нагружения включает статическую и циклическую компоненту одного вида. На его основе экспериментально обосновано существование единой предельной диаграммы, инвариантной числу циклов до разрушения, задаваемой степенной трансцендентной функцией, показатель степени которой отражает чувствительность материала к асимметричному нагружению, и предложены модели, позволяющие осуществлять оценку и прогнозировать предельное состояние материалов с использованием ограниченной экспериментальной информации. Этот метод апробирован на решении задач расчета усталостной прочности металлических материалов, неориентированных полимеров и слоистых пластиков.

В данной статье разработанный подход используется для построения моделей предельного состояния применительно к сочетанию разнородных статических и циклических нагрузок и решения задач оценки и прогнозирования предельного состояния в этих условиях нагружения.

Постановка задачи и исходные соотношения. Партия однотипных гладких цилиндрических и тонкостенных трубчатых образцов из металлических материалов подвергается комбинированному нагружению, при котором его компонентами являются циклический изгиб и статическое растяжение, циклический изгиб и статическое кручение.

Рассматривается область многоциклового усталости ($f \geq 10$ Гц, $n \geq 10^4 \div 10^5$ циклов), когда максимальное напряжение в цикле не превышает макроскопический предел текучести материала. Усталостное разрушение в этом случае не сопровождается накоплением циклических пластических деформаций и является квазихрупким. Исследование проводится применительно к комнатным и низким гомологическим температурам, когда временные эффекты не проявляются.

В общем случае образцы нагружаются переменной комбинированной нагрузкой \tilde{p}^c

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

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

В исследуемых образцах в условиях нагружения (1) реализуется комбинированное переменное напряженное состояние при совместном действии разнородных циклических и статических компонент напряжений. Как правило, в большинстве случаев в них формируется плоское напряженное состояние за счет совместного воздействия циклического изгиба и статического растяжения, циклического изгиба и статического кручения.

Таким образом, задача заключается в разработке методики оценки и прогнозирования сопротивления усталости конструкционных материалов и построении расчетных диаграмм предельных напряжений при комбинированном циклическом нагружении.

Решение поставленной задачи строится на основе моделей предельного состояния, сформулированных и экспериментально обоснованных в работах [5; 6], адаптированных под вышеуказанные условия нагружения.

Основные расчетные соотношения и диаграммы предельных напряжений. Анализ результатов многочисленных исследований продемонстрировал весьма широкий спектр форм диаграмм предельных амплитуд напряжений, обусловленных механическими свойствами исследуемых материалов и условиями нагружения. В данной работе при оценке предельного состояния для вышеуказанных видов комбинированного нагружения расчетные выражения строятся с учетом эффектов упрочнения и разупрочнения, возникающих под действием одной из нагрузок по отношению к линейной зависимости изменения амплитудной составляющей при воздействии статической компоненты. Построенные на основе предложенных моделей уравнения для расчета величины разрушающих напряжений при комбинированном нагружении апробировались применительно к широкому кругу конструкционных материалов. Апробация результатов расчета осуществлялась путем сопоставления с заим-

ствованными экспериментальными данными, полученными при различных видах комбинированного нагружения.

Циклический изгиб со статическим растяжением. Используя модели предельного состояния, предложенные в [5,6], применительно к малопластичным и хрупким материалам построены зависимости для точной и приближенной оценки предельного состояния в виде выражений

$$\sigma_a^b = \sigma_n^b \left[1 - \frac{2}{\pi} \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_B} \right)^\xi - \frac{1}{3\pi} \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_B} \right)^{3\xi} \right] \quad (2)$$

и

$$\sigma_a^b = \sigma_n^b \left[1 - \frac{2}{\pi} \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_B} \right)^\xi \right] \quad (3)$$

Здесь σ_a^b – амплитуда циклических напряжений; σ_m – статическая компонента растяжения. Выражения (2) и (3) получены путем разложения функции арккосинуса в исходной зависимости [6] в ряд, ограничиваясь тремя и двумя членами ряда.

Уравнения (2) и (3) удовлетворяют граничным условиям, соответствующим усталостной прочности при симметричном цикле и кратковременной прочности при растяжении. Действительно, полагая в (2) $\sigma_m = 0$, получаем $\sigma_a^b = \sigma_n^b$. Полагая $\sigma_a^b = 0$,

$$\frac{2}{\pi} \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_B} \right)^\xi + \frac{1}{3\pi} \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_B} \right)^{3\xi} = 1 \Rightarrow \sigma_m \cong (3\pi)^{\frac{1}{3\xi}} \cdot \sigma_B, \quad (4)$$

а из (3) в случае $\sigma_m = 0$ имеем также $\sigma_a^b = \sigma_n^b$, а в случае $\sigma_a^b = 0$ получаем равенство

$$\frac{2}{\pi} \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_B} \right)^\xi = 1 \Rightarrow \sigma_m \cong \left(\frac{\pi}{2} \right)^{\frac{1}{\xi}} \cdot \sigma_B. \quad (5)$$

Уравнения (4) и (5) свидетельствуют о том, что погрешность по пределу кратковременной прочности σ_B оценок (2) и (3) зависит от величины коэффициента ξ . Погрешность возрастает в области больших значений ξ , причем в большей степени при использовании уравнения (3). При значениях $\xi > 5$ она может составлять 40 % и более.

Уменьшение статической составляющей σ_m быстро снижает погрешность приближенных оценок и при значениях σ_m , характерных для эксплуатационных условий, она становится несущественной. В этом случае результаты расчета с использованием уравнений (2) и (3) практически совпадают.

Оценка предельного состояния при комбинированном нагружении пластичных материалов осуществляется с использованием следующих зависимостей

$$\sigma_a^b = \sigma_n^b \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\pi \sigma_m}{2 \sigma_B} \right)^2 + \frac{1}{24} \left(\frac{\pi \sigma_m}{2 \sigma_B} \right)^4 \right]^\lambda \quad (6)$$

и

$$\sigma_a^b = \sigma_n^b \left[1 - \frac{\pi}{8} \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_B} \right) \right]^\lambda \quad (7)$$

Здесь σ_a^b и σ_m – вышеуказанные компоненты цикла нагружения.

Уравнения (6) и (7) также удовлетворяют граничным условиям. Полагая в (6) $\sigma_m = 0$, получаем $\sigma_a^b = \sigma_n^b$, а полагая $\sigma_a^b = 0$, имеем

$$\frac{1}{2} \left(\frac{\pi \sigma_m}{2 \sigma_B} \right)^2 - \frac{1}{24} \left(\frac{\pi \sigma_m}{2 \sigma_B} \right)^4 = 1 \Rightarrow \sigma_m = 0.98 \sigma_B \quad (8)$$

В этом случае погрешность по пределу кратковременной прочности σ_B не превышает 2%.

Аналогично, принимая в (7) $\sigma_m = 0$, получаем $\sigma_a^b = \sigma_n^b$, а принимая $\sigma_a^b = 0$, находим

$$\frac{\pi^2}{8} \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_B} \right)^2 = 1 \Rightarrow \sigma_m = 0.90 \sigma_B, \quad (9)$$

и погрешность по пределу кратковременной прочности составляет 10%.

Решения на основе уравнений (2) и (6) рассматриваются в дальнейшем как точные, так как практически совпадают с решениями, полученными с использованием исходных зависимостей [6].

Выражения для определения коэффициентов λ и ξ , определяющих форму предельных диаграмм, могут быть получены путем

несложных преобразований зависимостей (2) и (6). В данной работе расчет указанных коэффициентов осуществляли, используя зависимости в виде

$$\xi = \frac{\lg \cos\left(\frac{y \pi}{\sigma_* 2}\right)}{\lg x - \lg \sigma_{**}}, \quad (10)$$

и

$$\lambda = \frac{\lg y - \lg \sigma_*}{\lg \left[\cos\left(\frac{\pi x}{2 \sigma_{**}}\right) \right]}, \quad (11)$$

полученных с использованием исходных соотношений [6]. Здесь y и x – амплитуда и статическая компонента комбинированного нагружения в базовом единичном эксперименте; σ_* – ограниченный предел выносливости при симметричном цикле, соответствующий долговечности n_R под действием напряжений y и x ; σ_{**} – предел кратковременной прочности при рассматриваемых нагружениях.

На рис. 1 нанесены в виде кривых рассчитанные диаграммы предельных напряжений (линии) и экспериментальные данные (точки) для нескольких конструкционных материалов различных по структуре и назначению, испытанных при сочетании циклического изгиба со статическим растяжением. Данные для стали 30ХГСА (а) получены при комнатной температуре, для сталей 22К (б) и 16ГНМА (в) при температуре 100 °С.

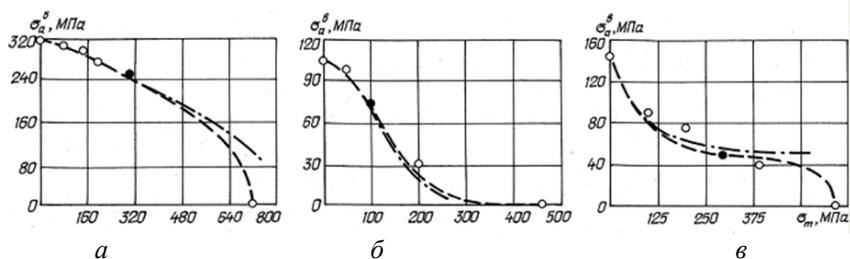


Рис. 1. Диаграммы предельных амплитуд напряжений сталей 30ХГСА (а), 22К (б) и 16ГНМА (в) для условий циклического изгиба со статическим растяжением

Темным кружком здесь и далее обозначена комбинация циклического и статического напряжений, используемых при расчете

коэффициентов λ и ξ . Экспериментальные данные заимствованы из работ [7; 8]. Штриховыми линиями нанесены результаты расчета с использованием уравнений (2) для стали 16ГНМА и (6) для стали 22К, штрихпунктирными – с использованием уравнений (3) и (7), соответственно. Применительно к стали 30ХГСА использование уравнений (2) и (6) (штриховая линия) при указанных в таблице значениях коэффициентов λ и ξ приводит к близким результатам штрихпунктирной линией нанесены результаты расчета с использованием зависимостей (3) и (7).

Расчеты и сопоставление с экспериментом выполнены для долговечности $n_R = 10^7$ циклов.

В табл. 1 приведены также характеристики исследованных материалов: значения пределов кратковременной прочности σ_B , текучести $\sigma_{0,2}$, выносливости σ_{-1}^b при изгибе, а также коэффициенты λ и ξ , использованных при выполнении расчетов. Коэффициенты рассчитывали по зависимостям(10) и (11). В данном случае $y = \sigma_a^b$; $x = \sigma_m$; $\sigma_* = \sigma_n^b$; $\sigma_{**} = \sigma_B$.

Таблица 1

Значения механических характеристик исследованных сталей и коэффициенты чувствительности их к асимметрии нагружения статическим нагружением

| Материал | σ_B , МПа | $\sigma_{0,2}$, МПа | σ_{-1}^b , МПа | λ | ξ |
|--------------|---------------------|-------------------------|--------------------------|-----------|-------|
| Сталь 30ХГСА | 717 | 550 | 314 | 1,06 | 1,26 |
| Сталь 22К | 463 | 226 | 103 | 5,23 | 0,12 |
| Сталь 16ГНМА | 590 | 490 | 142 | 3,43 | 0,17 |

Циклический изгиб со статическим кручением. По аналогии с вышеприведенной схемой запишем выражения применительно к нагружению циклическим изгибом со статическим кручением. Для случая малопластичных материалов получаем

$$\sigma_a^b = \sigma_n^b \left[1 - \frac{2}{\pi} \left(\frac{\tau_m}{\tau_B} \right)^\xi - \frac{1}{3\pi} \left(\frac{\tau_m}{\tau_B} \right)^{3\xi} \right] \quad (12)$$

и соответственно

$$\sigma_a^b = \sigma_n^b \left[1 - \frac{2}{\pi} \left(\frac{\tau_m}{\tau_B} \right)^\xi \right]. \quad (13)$$

Зависимости оценки предельного состояния применительно к пластичным материалам приобретают вид

$$\sigma_a^b = \sigma_n^b \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\pi \tau_m}{2 \tau_B} \right)^2 + \frac{1}{24} \left(\frac{\pi \tau_m}{2 \tau_B} \right)^4 \right]^\lambda \quad (14)$$

и соответственно

$$\sigma_a^b = \sigma_n^b \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\pi \tau_m}{2 \tau_B} \right)^2 \right]^\lambda. \quad (15)$$

Здесь σ_a^b и τ_m – циклическая и статическая компоненты цикла комбинированного нагружения.

Рассчитаны и построены диаграммы предельных напряжений (рис. 2) в координатах $\sigma_a^b - \tau_m$ для конструкционных сталей 45 (а) и 40Х (б) и алюминиевого сплава Д16Т (в). Результаты расчетов

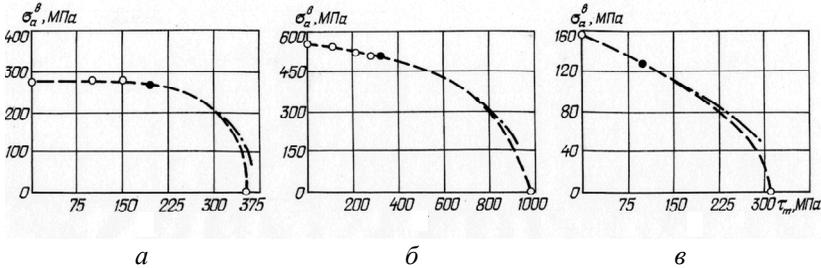


Рис. 2. Диаграммы предельных амплитуд напряжений сталей 45 (а), 40Х (б) и алюминиевого сплава Д16Т (в) для условий циклического изгиба со статическим кручением

для сталей и алюминиевого сплава Д16Т сопоставлены с экспериментальными данными, заимствованными из [3; 9]. Расчеты и сопоставление с экспериментом выполнены для долговечности $n_R = 2 \cdot 10^7$ циклов с использованием уравнений (12) (штриховые линии) и (13) (штрихпунктирные линии).

В табл. 2 приведены значения пределов кратковременной прочности σ_B , τ_B , текучести $\sigma_{0,2}$, предела выносливости σ_a^b при изгибе и коэффициентов λ и ξ , использованных в расчетах диаграмм. Коэффициенты рассчитывали по зависимостям (10) и (11), где $y = \sigma_a^b$; $x = \tau_m$; $\sigma_* = \sigma_n^b$; $\sigma_{**} = \tau_B$.

Таблица 2

Значения механических характеристик исследованных сталей алюминиевого сплава и коэффициенты чувствительности их к нагружению статическим кручением

| Материал | σ_B , МПа | $\sigma_{0,2}$, МПа | τ_B , МПа | σ_{-1}^b , МПа | λ | ξ |
|-----------|------------------|----------------------|----------------|-----------------------|-----------|-------|
| Сталь 45 | 638 | 390 | 350 | 275 | 0,04 | 6,13 |
| Сталь 40Х | 1206 | 1113 | 986 | 553 | 0,53 | 1,97 |
| Д16Т | 430 | 360 | 310 | 157 | 1,62 | 1,07 |

Обсуждение результатов. Анализ многочисленных экспериментальных данных, характеризующих предельное состояние конструкционных материалов в условиях комбинированного нагружения, свидетельствует о том, что форма предельных диаграмм может быть различной, что подтверждают также графики на рис. 1, 2. В этих условиях ни одна из известных эмпирических зависимостей, описывающих предельное состояние конструкционных материалов и включающая весьма ограниченную информацию об их свойствах, не может считаться универсальной. Каждая из них удовлетворительно описывает результаты испытаний конкретного материала в априори заданных условиях.

Предложенный подход к построению диаграмм предельных напряжений в этих условиях обеспечивает адекватное описание экспериментальных данных. Он обладает определенной гибкостью, определяемой постановкой дополнительного базового эксперимента, по результатам которого рассчитываются коэффициенты λ и ξ , определяющие форму диаграмм предельных напряжений.

Расчеты диаграмм предельного состояния в работе выполнены применительно к конструкционным сталям и сплавам. Анализ исследованных материалов показал, что для них характерен достаточно широкий диапазон характеристик кратковременной прочно-

сти и пластичности. Однако, несмотря на столь большое разнообразие по указанным характеристикам исследуемых материалов, предложенные подход и модели обеспечивают достаточно корректное описание их предельного состояния в условиях комбинированного нагружения, отражающего сочетание циклической и статической компонент, адекватно экспериментальным данным.

Сопоставление результатов расчета с многочисленными заимствованными экспериментальными данными с оценкой степени точности согласования расчетных и экспериментальных данных показало, что величина максимальной относительной погрешности δ не превышает в среднем 10%, что, учитывая обычный разброс результатов усталостных испытаний конструкционных материалов, позволяет считать, что полученное согласование расчета с использованием предложенных моделей и экспериментальных данных является вполне удовлетворительным.

Величина погрешности зависит, прежде всего, от структуры модели предельного состояния и её выбора. Наибольшую погрешность дает использование приближенных вариантов моделей. Определенное влияние на точность согласования расчетных и экспериментальных данных оказывает класс материала, а также условия реализации единичного базового эксперимента, в частности, выбор комбинации напряжений для расчета коэффициентов λ и ξ , определяющих форму предельных диаграмм.

Основное влияние на форму диаграмм предельных напряжений оказывают характеристики прочностных свойств исследуемого материала и, прежде всего его пластичность, способность сопротивляться воздействию исследуемой комбинации циклических и статических нагрузок. Вместе с тем, как показал анализ многочисленных экспериментальных данных, наиболее распространенной формой диаграмм предельных напряжений широкого круга металлических материалов при нагружении циклической и статической компонентами цикла является выпуклая. Для таких материалов, как правило, характерно относительно невысокие значения отношения предела текучести σ_T к пределу прочности σ_B . В этом случае отношение σ_T/σ_B находится в пределах 0,40–0,60. Выпуклая форма присуща как циклическому изгибу со статическим растяжением (сталь 30ХГСА, рис. 1, *a*), так и циклическому изгибу со статиче-

ским кручением (стали 45, 40X, рис. 2, а, б). В этом случае для расчета усталостной долговечности и построения диаграмм предельных напряжений целесообразно использовать модели предельного состояния, построенные на основе уравнений (6), (7), (14), (15) и отображающие эффект упрочнения при комбинированном нагружении при относительно небольшой компоненте. В то же время достаточно распространенными формами диаграмм являются линейные, s-образные и даже вогнутые, как это характерно для некоторых легированных сталей, например, для сталей 22К, 16ГНМА (рис. 1, б, в), никелевых сплавов и др. В этом случае материал проявляет повышенную чувствительность к воздействию определенных комбинаций компонентов нагружения, особенно при небольших значениях статической компоненты. Причина такой реакции материала на комбинированное нагружение также обусловлена конкретными свойствами материала, и в частности их характеристиками прочности и пластичности. В этом случае для конструктивных материалов характерны весьма высокие значения отношения σ_T/σ_B – они колеблются в пределах 0,75–0,95. При этом расчет диаграмм предельных напряжений целесообразно осуществлять на основе моделей предельного состояния, построенных на использовании уравнений (2), (3), (12), (13) и отражающих эффекты разупрочнения.

Отметим, однако, что один и тот же материал, в зависимости от условий комбинированного нагружения или его состояния, может изменять свое сопротивление такому виду нагружения и, следовательно, форму предельных диаграмм напряжений. В этих условиях для выбора модели предельного состояния целесообразно повторное проведение единичного базового эксперимента при данном комбинированном нагружении и расчет на основе его результатов уточненных коэффициентов λ и ξ с использованием соответствующих формул.

Выбор соотношения напряжений компонентов комбинированного нагружения в базовом эксперименте для расчета коэффициентов формы диаграмм во многом определяет возможную погрешность при последующем расчете диаграмм предельных напряжений. Выполненные расчеты свидетельствуют о том, что соотношение напряжений в базовом эксперименте для случая цикли-

ческих изгибных и статических напряжений растяжения должно находиться в пределах 1,30–1,60. Для остальных возможных вариантов комбинированного нагружения соотношения реализуемых в эксперименте напряжений близко к единице (0,80–0,95).

Таким образом, опыт использования предложенного подхода к оценке предельного состояния при комбинированном нагружении показал, что выбор напряжений, реализуемых в базовом эксперименте, близких по величине, минимизирует возможную погрешность при оценке и прогнозировании предельного состояния. При этом в тех случаях, когда по результатам базового эксперимента применительно к исследуемым видам нагружения получены значения коэффициента $\xi > 0,5$, а отношение $\sigma_T / \sigma_B = 0,75 \div 0,95$, при проведении расчетов могут быть использованы модели, построенные на основе уравнений (2), (3), (12), (13). При значении коэффициентов $\lambda > 2,0$ и отношении $\sigma_T / \sigma_B = 0,40 \div 0,60$ лучшее соответствие расчета и эксперимента демонстрируют модели, построенные с использованием уравнений (6), (7), (14), (15).

В области $\xi \approx 0,5$ и $\lambda \approx 2,0$ модели предельного состояния, построенные на основе любого из вышеуказанных уравнений, приводят практически к одинаковым результатам.

Заключение. Расчет усталостной долговечности, оценка и прогнозирование предельного состояния применительно к нагружению циклической и статической компонентами осуществляются на основе общеизвестных подходов и зависимостей. Их структура, как правило, не отражает реальную реакцию конструкционных материалов на тот или иной вид комбинированного нагружения. В большинстве случаев они применимы лишь в частных случаях – для конкретного сочетания компонентов комбинированного нагружения, и распространение их на другие случаи может привести к существенным ошибкам.

Предложенный в настоящей работе подход к решению задачи оценки предельного состояния применительно к комбинированному нагружению базируется на существовании единой предельной диаграммы, инвариантной числу циклов нагружения [5,6]. Сформулированные модели на его основе описывают практически все известные формы диаграмм предельных напряжений примени-

тельно к различным видам комбинированного нагружения широкого круга конструкционных материалов при удовлетворительном согласовании расчета с известными экспериментальными данными.

Список литературы

1. *Гаф Г.Дж.* Усталость металлов // Пер. с англ.– М.– Л.: Гл. ред. Лит. по черной металлургии.– 1935.– 304 с.

2. *Кудрявцев И.В.* Испытания котельных сталей на усталость при асимметричном нагружении / И.В.Кудрявцев, Л.Н.Бурмистрова, А.С.Маминов, И.Н.Шканов // Пробл. прочности.– 1970.– №2.– С. 77–80.

3. *Одинг И.А.* Допускаемые напряжения в машиностроении и циклическая прочность металлов / И.А. Одинг.– М.: Машгиз. – 1962. – С. 101–138.

4. *Форрест П.* Усталость металлов. /П. Форрест; пер. с англ. под ред. С.В.Серенсена. – М.: Машиностроение, 1968. –352 с.

5. *Golub V.P.* A Method for Fatigue Analysis of Metallic and Composite Materials under Asymmetric High-Cycle Loading / V.P.Golub, V.I.Kryzhanovskii, A.D. Pogrebniak// – Int. Appl. Mech. – 2004. – Том 40, N11. – P. 1281–1289.

6. *Golub V.P.* Fatigue Strength of Metallic and Composite Materials under repeated Tension-Compression/ *V.P.Golub, V.I.Kryzhanovskii, A.D.Pogrebniak, E.S. Kochetkova* // Int. App. Mech. – 2006. – Том 42. – N1. – P. 40–50.

7. *Кожевников Ю.Л.* К вопросу о расчете усталостной прочности сталей при двухосном растяжении / Ю.Л.Кожевников, И.Н. Шканов // В кн.: Труды Казанского авиационного ин-та. – Казань. – 1969. – Вып. 105. – С. 59–67.

8. *Кудрявцев И.В.* Внутренние напряжения как резерв прочности в машиностроении/ И.В. Кудрявцев. – М.: Машгиз, 1951. –280 с.

9. *Земсков Г.В.* О пределе выносливости некоторых материалов при переменном изгибе и постоянном кручении / Г.В. Земсков // Усталостная прочность и долговечность авиационных конструкций. Межвуз. сборник. – Куйбышев : КуАИ. – 1974. – Вып. 1. – С. 61–64.

10. *Щеглов Н.Н.* Предел выносливости и пластические деформации сталей в некоторых случаях совместного действия изгиба и кручения / Н.Н. Щеглов // Труды Таллиннского политехнического института. – 1957, №.113, серия 1. – 35 с.

Пелих В.М., Погребняк А.Д., Регульський М.М., Касперська В.В.
Методологія оцінки граничного стану конструкційних матеріалів за умов комбінованого багаточиклового

асиметричного навантаження // Проблеми тертя та зношування: наук.- техн. зб. – К.: НАУ, 2011. – Вип.56. – С.113–126.

Розроблено методику, на підставі якої розв'язано задачу розрахунку втомної міцності та побудови діаграм граничного стану металевих конструкційних матеріалів за умов комбінованого навантаження. Розрахунки виконано на основі моделей граничного стану, які дають можливість описати всі відомі форми діаграм граничних напружень. Отримано задовільне узгодження результатів розрахунку з експериментом.

Рис. 2, табл. 2, список літ.: 10 найм.

Pelykh V.M., Pogrebniak A.D., Regulskyi M.M., Kasperska V.V.
The methodology of estimation of ultimate state of constructive materials under combined multicycling asymmetrical loading

The new concept of constructing of the stress-range diagrams is proposed. The fatigue strength for steels and aluminium alloy under combined action of static and cyclic loading is studied. An analysis is carried out based on models of ultimate state, allowing the description of all forms of stress-range diagrams. The fatigue strength is calculated. A satisfactory agreement of results of calculation and experimental data is obtained.

Ключевые слова: диаграммы предельных амплитуд напряжений, усталостная прочность, циклический изгиб, статическое растяжение, статическое кручение.

Стаття надійшла до редакції 24.10.2011