

УСТАЛОСТЬ И НЕУПРУГОСТЬ МЕТАЛЛОВ

В. Т. Трощенко, Л. А. Хамаза

FATIGUE AND INELASTICITY OF METALS

V. T. Troshchenko, L. A. Khamaza

Институт проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины, Украина

Abstract. A method for the investigation of high-cycle fatigue and inelasticity of metals under conditions of symmetric cyclic loading in tension-compression, bending and torsion is described. A procedure for the calculation of true stresses and inelastic cyclic strains in surface layers under nonuniform stress conditions (bending, torsion) is proposed. A large group of steels has been studied and it is shown that the use of inelastic cyclic strains at the stage of stabilization of the deformation process as a measure of the fatigue damage accumulation intensity makes it possible to explain some general laws of high-cycle fatigue, including the influence of stress gradient, load biaxiality, frequency character of loading, loading frequency on the fatigue behaviour.

1. Вступление

Способность материала неупруго деформироваться при многоцикловом нагружении носит в литературе название циклическая неупругость или просто неупругость [1,2].

В области напряжений, соответствующих многоциклового усталости, неупругость металлов и сплавов связана с возникновением локальных зон пластического деформирования в перенапряженных объемах циклически деформируемого материала, т.е. с теми процессами, которые ответственны за зарождение усталостных трещин [3,4,5,6,7].

Протекание микропластических деформаций приводит к нелинейной (неупругой) зависимости между напряжениями и деформациями в процессе циклического нагружения, что сопровождается возникновением замкнутой петли гистерезиса в координатах “напряжение-деформация”, ширина которой равна неупругой деформации за цикл, а площадь – энергии неупругого деформирования за цикл.

В настоящей статье представлены результаты всестороннего изучения взаимосвязи между закономерностями неупругого деформирования, характеризующими рассеянное усталостное повреждение, и усталостного разрушения обширной группы сталей и сплавов, исследованных по единой методике при растяжении-сжатии, изгибе и кручении.

Особое внимание уделено влиянию таких факторов как неоднородность напряженного состояния (градиент напряжений), двухосность нагружения, программное и двухчастотное нагружение, частота нагружения, состояние поверхности, отличие действительных и номинальных напряжений в неоднородно напряженных конструктивных элементах, обусловленное нелинейной зависимостью между напряжениями и деформациями при циклическом нагружении.

2. Методики исследования

Неупругость металлов исследовалась на основе анализа сигналов напряжений и деформаций в процессе циклического нагружения.

В случае упругого деформирования (рис.1,а) имеет место линейная зависимость между напряжениями σ и деформациями ε .

Когда материал деформируется неупруго (рис.1,б) наблюдается замкнутая петля гистерезиса, ширина которой равна неупругой деформации за цикл $\Delta\varepsilon$ ($\Delta\gamma$ - для тонкостенного образца при кручении), а площадь – энергии, необратимо рассеянной за цикл ΔW .

Зная величину неупругой деформации за цикл, можно также построить диаграмму циклического деформирования в координатах “амплитуда напряжения, σ_a - амплитуда деформации, ε_a ”

$$\varepsilon_a = \frac{\sigma_a}{E} + \frac{\Delta\varepsilon}{2}, \quad (1)$$

где E – модуль упругости материала.

Частота нагружения при исследованиях варьировалась в пределах 20...50 Гц. В процессе исследования величина σ_a оставалась постоянной. Значения неупругих деформаций определялись путем сканирования сигналов напряжений и деформаций с последующей компьютерной обработкой полученной информации.

При таком методе исследования деформация, соответствующая нулевому значению напряжений (рис.1,б), равна половине ширины петли гистерезиса. При некоторых исследованиях неупругие деформации измерялись непосредственно по петлям гистерезиса, воспроизведенным на экране осциллографа.

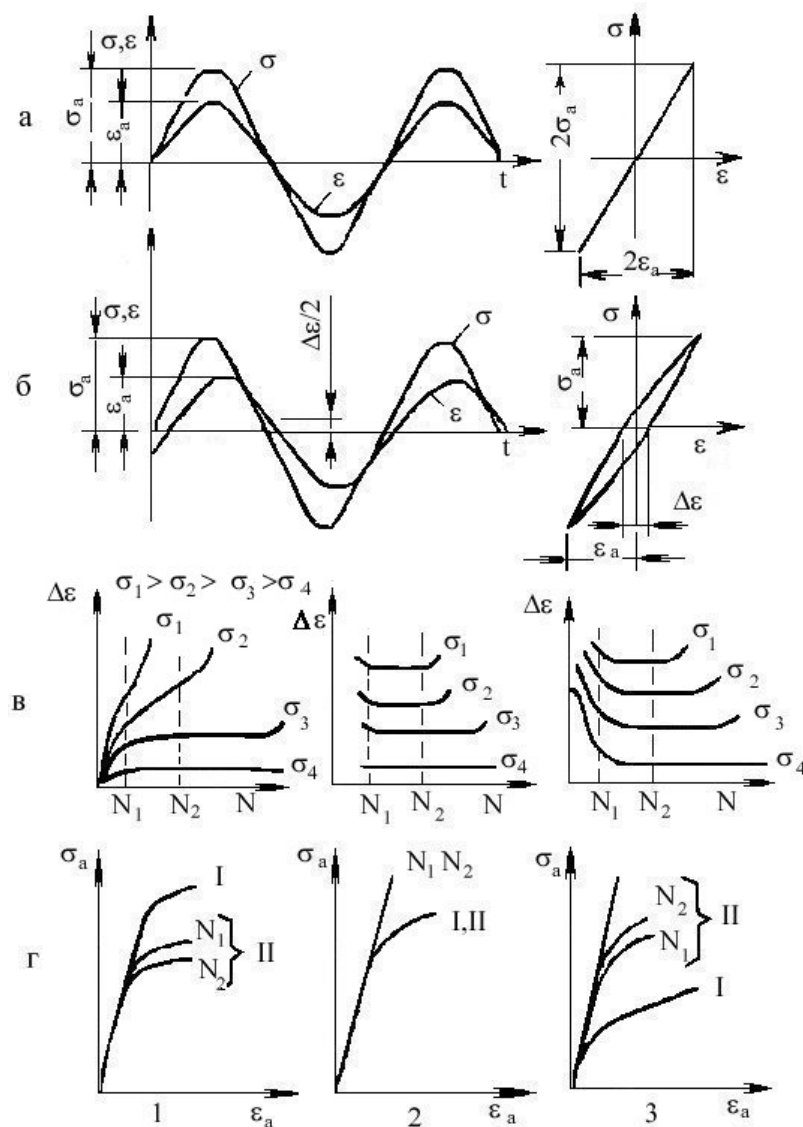


Рис.1. Изменение сигналов напряжения и деформации во времени при упругом (а) и неупругом (б) деформировании; (в) - изменение неупругой деформации от числа циклов для циклически разупрочняющихся (1), циклически стабильных (2) и циклически упрочняющихся материалов (3); (г) - соответствующие диаграммы циклического деформирования.

Анализ результатов исследований показал, что с использованием этих методик можно достаточно надежно измерять неупругие деформации, начиная с $(0,5 \div 1,0) \cdot 10^{-5}$ мм/мм [2,8,9].

Ширина петли гистерезиса может изменяться в зависимости от числа циклов нагружения. На рис.1,в показаны типичные зависимости ширины петли гистерезиса от числа циклов нагружения для циклически разупрочняющихся (1), циклически стабильных (2) и циклически упрочняющихся (3) материалов, испытанных в условиях $\sigma_a = \text{const}$. На рис.1,г показаны диаграммы статического (I) и циклического деформирования (II) для числа циклов нагружения N_1 и N_2 для различных классов материалов.

Испытания при растяжении-сжатии проводились на цилиндрических образцах диаметром 5 мм, при изгибе на образцах прямоугольного поперечного сечения 5 мм × 10 мм, при кручении на цилиндрических образцах наружным диаметром 14 мм и внутренним диаметром 12 мм для тонкостенных образцов.

Реализация каждого вида испытаний вносит свою специфику в обработку получаемых результатов.

2.1 Растяжение-сжатие

При испытаниях в условиях растяжения-сжатия используется специальное приспособление, позволяющее измерять деформацию образца по деформации упругих элементов, фиксируемых на утолщенных частях образца. Напряжения измеряются тензорезисторами, наклеиваемыми на динамометре [8,9].

Неупругие деформации рассчитывались по следующей формуле

$$\Delta \varepsilon = \frac{\sigma_a (1 + \beta_1)}{E(1/\beta - 1/2)} \quad (2)$$

где β - отношение сигналов, пропорциональных ширине петли гистерезиса и амплитуде деформаций ($\beta = \Delta x / x_a$); β_1 - параметр, учитывающий деформацию захватов и утолщенных частей образцов ($\beta_1 = 0,5 \dots 0,8$).

Энергия, необратимо рассеиваемая за цикл, равна

$$\Delta W = K \sigma_a \Delta \varepsilon, \quad (3)$$

где K - коэффициент формы петли гистерезиса, значение которого близко к $K = 1,33$.

2.2 Изгиб

При испытаниях на изгиб деформации измерялись непосредственно на поверхности рабочей части образца с использованием специально разработанного датчика (съемного преобразователя деформаций), обладающего высокой разрешающей способностью [10]. Изгибающий момент в расчетном сечении измерялся с использованием тензорезистора, наклеенного на динамометре.

Особенность испытаний при изгибе заключается в том, что петля гистерезиса и, соответственно, диаграмма циклического деформирования получают в координатах “номинальное напряжение, σ_a^H , - деформация поверхностного слоя материала, ε_a ”

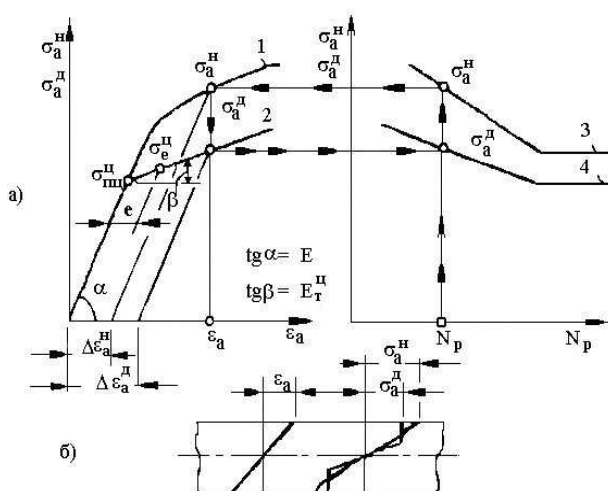


Рис.2. Схема построения истинных диаграмм деформирования и кривых усталости при изгибе.

$$\sigma_a^H = M_u / W,$$

где M_u - изгибающий момент, W - момент сопротивления

поперечного сечения образца.

Ширина петли гистерезиса в координатах " $\sigma_a^H - \varepsilon_a$ " может быть определена с использованием следующей зависимости

$$\Delta \varepsilon^H = \frac{\sigma_a^H}{E(1/\beta - 1/2)}.$$

Расчет действительных напряжений, σ_a^∂ , как напряжений в поверхностных слоях образца с учетом их упругопластического характера деформирования (рис.2,б) и соответствующих значений неупругих деформаций, $\Delta \varepsilon_a^\partial$, осуществляется в соответствии со схемой, представленной на рис.2,а.

На этом рисунке 1 – диаграмма циклического деформирования в координатах " $\sigma_a^H - \varepsilon_a$ ", полученная экспериментально, 2 – действительная диаграмма циклического деформирования поверхностных слоев материала в координатах " $\sigma_a^\partial - \varepsilon_a$ ". При построении линии 2 предполагался линейный характер упрочнения.

Приняв такое предположение и зная значения ε_a и параметры ε_{nc}^u ($\varepsilon_{nc}^u = \sigma_{nc}^u / E$) и $E_T^u = tg \beta$ действительной диаграммы (рис.2,а), выражение для напряжений σ_a^H будет иметь следующий вид [11]:

$$\sigma_a^H = \frac{1}{\varepsilon_a^2} \left[E_T^u \varepsilon_a^3 + (E - E_T^u)(3\varepsilon_a^2 - \varepsilon_{nc}^{u2}) \frac{\varepsilon_{nc}^u}{2} \right] \quad (4)$$

Записав уравнение (4) для двух точек на экспериментально построенной диаграмме " $\sigma_a^H - \varepsilon_a$ " (линия 1 на рис.2) и решив эту систему уравнений относительно ε_{nc}^u и E_T^u , мы получим необходимые параметры для построения линии 2.

Результаты проведенного анализа показали, что погрешность определения ε_{nc}^u и E_T^u при правильном использовании рассмотренной методики не превышает 5%.

С использованием действительной диаграммы деформирования и известного допуска на остаточную деформацию e (рис. 2,а) можно определить циклический предел упругости σ_y^u , соответствующий этому допуску, таким же образом как определяются σ_a^∂ и $\Delta \varepsilon_a^\partial$.

Используя номинальные и истинные диаграммы циклического деформирования (кривые 1 и 2 на рис. 2,а) и экспериментальные кривые усталости 3 в координатах $\sigma_a^H - \lg N_p$, можно построить кривые усталости 4 в координатах $\sigma_a^\partial - \lg N_p$, как это показано на рис.2.

Возможно также решать и обратную задачу, - по известной истинной диаграмме деформирования и кривой усталости, полученным при растяжении-сжатии, построить диаграмму деформирования в координатах $\sigma_a^H - \varepsilon_a$ и соответствующую ей кривую усталости в координатах $\sigma_a^H - \lg N_p$.

2.3 Кручение

При испытаниях на кручение угол закручивания измеряется на внешней поверхности образца. Крутящий момент измеряется тензорезистором на динамометре [2].

При испытании тонкостенных образцов использовались следующие расчетные зависимости:

$$\Delta\gamma = \frac{\tau_a(1+\beta_1)}{G(1/\beta-1/2)} ; \quad \tau_a = M_{кр}/2bt ;$$

$$\gamma_a = \tau_a / G + \Delta\gamma / 2 ; \quad \Delta W = K \tau_a \Delta\gamma , \quad (5)$$

где $\Delta\gamma$, γ_a - неупругая часть и амплитуда относительного сдвига поверхностного слоя образца соответственно; $M_{кр}$ - крутящий момент; t - толщина стенки образца; b - площадь, охватываемая средней линией тонкостенного сечения; β , β_1 - параметры, подобные упомянутым выше; G - модуль сдвига.

При испытании сплошных образцов на кручение, также как и при изгибе, возникает необходимость рассчитывать истинные напряжения и истинные неупругие циклические деформации.

Методика расчета в этом случае подобна таковой при изгибе (рис.2), если на этом рисунке заменить нормальные напряжения на напряжения сдвига, а относительное удлинение на относительный сдвиг.

В этом случае зависимости (5) принимают вид

$$\Delta\gamma^H = \frac{\tau_a^H(1+\beta_1)}{G(1/\beta-1/2)} ; \quad \tau_a^H = M_{кр}/W_p ;$$

где W_p - полярный момент сопротивления сечения образца.

Выражение для номинальных напряжений, полученное на основе таких же подходов как и уравнение (4), принималось в следующем виде

$$\tau_a^H = \gamma_{ну}^H G \left[\frac{\gamma_a}{\gamma_{ну}^H} + \frac{4}{3} \left(1 - \frac{G_T^H}{G} \right) \left(1 - \frac{1}{4 \left(\gamma_a / \gamma_{ну}^H \right)^3} \right) \right] \quad (6)$$

где $\gamma_{ну}^H$ и G_T^H - деформация, соответствующая пределу пропорциональности, и модуль упрочнения истинной диаграммы циклического деформирования, соответственно.

Исследования многоциклового усталости проводились при симметричном цикле и режиме нагружения, обеспечивающем постоянство значений σ_a (растяжение-сжатие),

σ_a^H (изгиб), τ_a (кручение тонкостенного образца), τ_a^H (кручение сплошного образца). За критерий разрушения, за исключением специально оговариваемых случаев, принимался размер трещины в десятые доли миллиметра. Кривые усталости строились на базе 10^7 циклов.

3 Взаимозависимость между многоциклового усталостью и неупругостью металлов

3.1 Кривые усталости и неупругие деформации

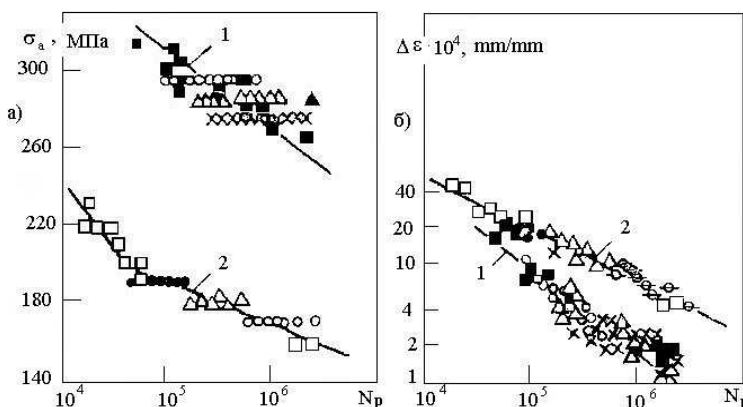


Рис.3. Кривые усталости для сталей 45 (1) и 15кп

Типичные зависимости неупругой деформации за цикл $\Delta\varepsilon$ от числа циклов нагружения N и соответствующие диаграммы циклического деформирования $\sigma_a - \varepsilon_a$ приведены на рис.1,в.

При анализе использовались неупругие деформации, соответствующие стадии стабилизации или их

значения при долго-вечности $0,5N_p$.

На рис.3 приведены кривые усталости сталей 15кп и 45 при растяжении-сжатии в координатах $\sigma_a - \lg N_p$ (а) и $\lg \Delta \varepsilon - \lg N_p$ (б) [12]. Одинаковые значки на этом рисунке соответствуют одним и тем же условиям испытания.

Из приведенных на рис.3 данных следует, что рассеяние результатов испытаний в координатах $\lg \Delta \varepsilon - \lg N_p$ существенно меньше, чем в координатах $\sigma_a - \lg N_p$. Это свидетельствует о том, что долговечность образцов зависит не только от действующего напряжения, но и от интенсивности накопления усталостного повреждения в индивидуальном образце, определяемой величиной $\Delta \varepsilon$.

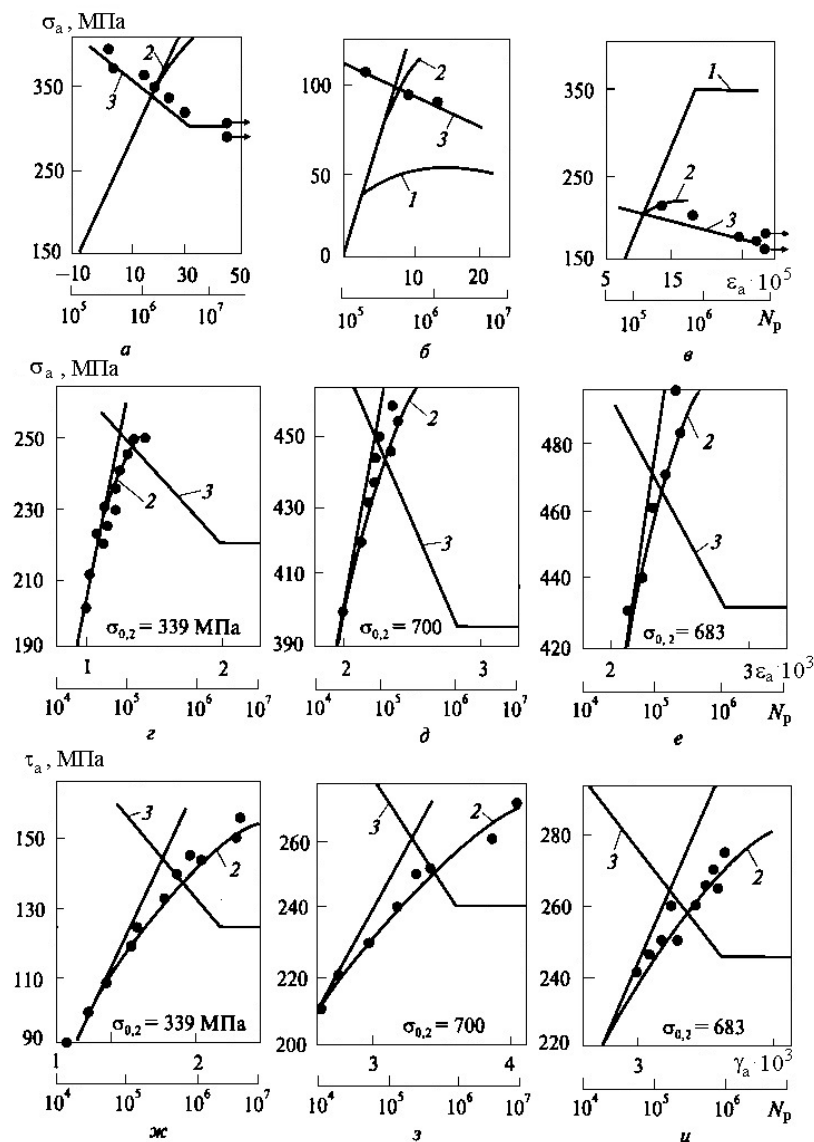


Рис.4. Диаграммы деформирования и кривые усталости

На рис.4 приведены диаграммы статического (1), циклического (2) деформирования и кривые усталости (3) для монокристаллов молибдена (а), крупнозернистого никеля (б) и различных сталей (в,г,д,е,ж,з,и) при растяжении-сжатии (а,б,в,г,д,е) и кручении (ж,з,и) тонкостенных образцов [2,13]. В случае отсутствия статических диаграмм деформирования на соответствующих рисунках указаны пределы текучести $\sigma_{0,2}$ исследованных материалов. Как следует из этого рисунка, диаграммы циклического деформирования при многоцикловом нагружении существенно отличны от диаграмм статического деформирования, при этом кривые многоциклового усталости соответствуют зоне перехода от упругого к неупругому

деформированию на диаграммах циклического деформирования, независимо от механических свойств и вида нагружения (кручение, растяжение-сжатие).

Таблица 1.

Величины $(\Delta\varepsilon)_{\sigma_{-1}}$ для различных классов материалов

Металлы и сплавы	$(\Delta\varepsilon)_{\sigma_{-1}} \cdot 10^5$
Пластичные аустенитные стали	23,2 ... 50,0
Углеродистые и малолегированные стали	0,35 ... 13,4
Алюминий и алюминиевые сплавы	5,0 ... 6,0
Медь и ее сплавы в деформированном состоянии	0,86 ... 1,56
Никелевые сплавы при комнатной температуре	0,2 ... 0,5
Никелевые сплавы при высоких температурах	0,34 ... 2,8
Серый чугун	5,6
Высокопрочные стали и сплавы	$\leq 0,2$

Табл.1 содержит систематизированные значения неупругих деформаций $(\Delta\varepsilon)_{\sigma_{-1}}$, соответствующие пределам выносливости на базе 10^7 циклов материалов различных классов, полученные по результатам испытаний большого количества металлов и сплавов при симметричном растяжении-сжатии. Эти результаты показывают, что при многоцикловом нагружении при напряжениях, равных пределу выносливости, наблюдаются неупругие циклические деформации, величина которых для различных материалов различна. Для некоторых материалов, как например, аустенитных сталей, циклические неупругие деформации достигают значительных величин.

3.2 Градиент напряжений

Влияние градиента напряжений на многоцикловую усталость и неупругие циклические деформации анализировалось на основании результатов, полученных при растяжении-сжатии (относительный градиент $\eta=0$), изгибе ($\eta=2h=0,2\text{мм}^{-1}$, где h – высота образца) и кручении тонкостенных и сплошных образцов ($\eta=2/d=1/7\text{мм}^{-1}$, где d – диаметр образца) [10,14,15].

На рис.5 представлены кривые усталости при растяжении-сжатии в координатах $\sigma_a - \lg N_p$ (1) и изгибе в координатах $\sigma_a^H - \lg N_p$ (2) для сталей 15Г2АФДпс (а), 45 (б), 1Х13 (в), 40Х (г) и ЭИ612 (д).

Штриховыми линиями 3 на этом рисунке представлены кривые усталости в координатах $\sigma_a^H - \lg N_p$, рассчитанные с использованием методики, показанной на рис.2 (обратная задача). Эти кривые были построены с использованием экспериментальных диаграммы циклического деформирования и кривой усталости при растяжении-сжатии и уравнения (4).

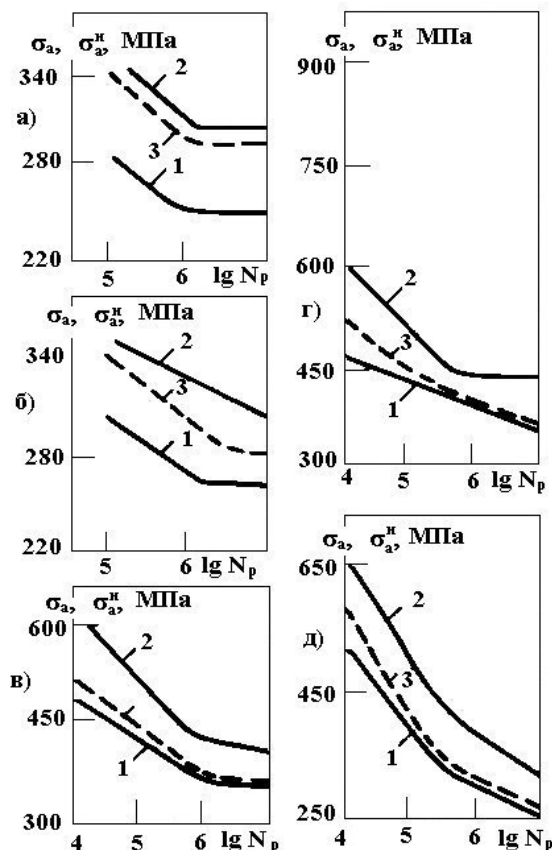


Рис.5. Экспериментальные и расчетные кривые усталости.

Как видно из рис.5, лишь только для сталей 15Г2АФДпс и 45 основное отличие кривых многоциклового усталости при изгибе и растяжении-сжатии определяется отличием номинальных σ_a^H и истинных σ_a^d напряжений (см. рис.2). Для всех остальных сталей влияние этого фактора, особенно в области больших долговечностей, несущественно и основной причиной, как это было показано в работах [2,10,15,16], является собственно влияние градиента напряжений.

Этот эффект объясняется тем, что при неоднородном напряженном состоянии на процесс разупрочнения поверхностных слоев материала при циклическом нагружении оказывают существенное влияние менее напряженные внутренние слои материала. Эти слои тормозят развитие неупругих деформаций на поверхности. Это подтверждается также результатами, представленными в табл.2, где приведены циклические пределы упругости σ_e^H и пределы выносливости при растяжении-сжатии σ_{-1} и изгибе $(\sigma_{-1})_u$, $(\sigma_e^H)_u$ в сравнении с неупругими деформациями при напряжениях, равных пределу выносливости $(\Delta\varepsilon)_{\sigma_{-1}}$.

Таблица 2.

Соотношения между пределами выносливости и циклическими пределами упругости

Сталь	Растяжение-сжатие			Изгиб	
	σ_{-1} (МПа)	$(\Delta\varepsilon)_{\sigma_{-1}}$ (мм/мм)	σ_e^H (МПа)	$(\sigma_{-1})_u$ (МПа)	$(\sigma_e^H)_u$ (МПа)
15Г2АФДпс	250	23	240	300	275
45	260	25	243	305	285
1Х13	250	0,7	385	400	432
ЭИ612	260	0,35	275	310	336

Циклические пределы упругости при изгибе определялись по истинной диаграмме деформирования по описанной выше методике.

На рис.6 даны логарифмические зависимости между неупругой деформацией за цикл $\Delta\varepsilon$ и числом циклов до разрушения N_p для ряда сталей по результатам испытаний при растяжении-сжатии и изгибе.

Приведенные в табл.2 и на рис.6 результаты показывают, что циклические пределы упругости существенно зависят от градиента напряжений и их величины близки к величинам пределов выносливости соответствующих сталей и что неупругая деформация за цикл определяет, как правило, число циклов до разрушения независимо от градиента напряжений.

Влияние градиента напряжений на многоцикловую усталость при кручении иллюстрируют результаты, представленные в табл.3, где τ_{-1} , τ_{-1}^d , τ_{-1}^H - пределы выносливости тонкостенного и сплошного образца в терминах истинных и номинальных напряжений, соответственно; τ_e^H - циклический предел упругости, определенный с использованием описанной выше методики.

Таблица 3.

Сравнение пределов выносливости при кручении

Сталь	T (К)	τ_{-1} (МПа)	τ_{-1}^d (МПа)	τ_{-1}^H (МПа)	τ_e^H (МПа)
40Х	293	205	205	235	200
1Х17Н2Ш	293	295	295	305	-
ЭИ612	293	180	215	235	209
ЭИ612	873	165	225	240	201

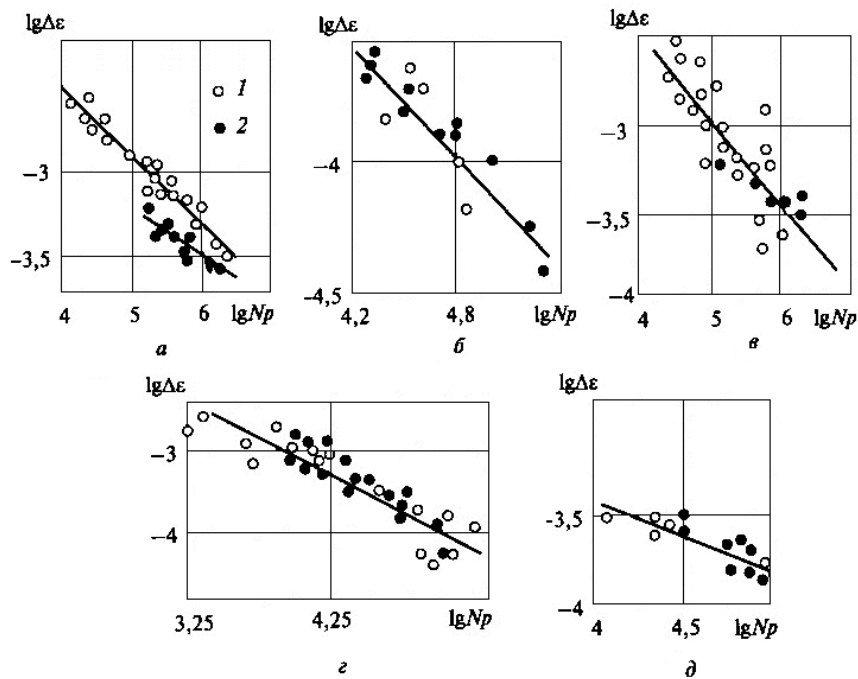


Рис.6. Зависимости $\lg \Delta \varepsilon - \lg N_p$ при растяжении-сжатии (1) и изгибе (2): а – сталь 15Г2АФДпс, б – сталь 1Х13, в – сталь 45, г – сталь 40Х, д – сталь ЭИ612.

Из табл.3 следует, что если для сталей 40Х и 1Х17Н2Ш влияние градиента напряжений незначительно (об этом свидетельствует равенство τ_{-1} и τ_{-1}^{∂}), то для стали ЭИ612 при комнатной и высокой температурах значение τ_{-1}^{∂} значительно выше, чем τ_{-1} .

3.3 Программное нагружение

Знание закономерностей неупругого деформирования металлов дает возможность повысить достоверность прогнозирования долговечности при программном нагружении. Рассмотрим эти возможности на примере линейной гипотезы суммирования повреждений [12].

$$\sum_1^s \frac{N_i}{(N_p)_i} = 1 \quad \text{или } a; \quad (7)$$

$$\sum_1^s \frac{N_i}{b_i (N_{pi})_i} = 1 \quad (8)$$

Формула (7) соответствует классической линейной гипотезе, где s – число ступеней нагружения; N_i – число циклов наработки при σ_{ai} ; $(N_p)_i$ – число циклов до разрушения при σ_{ai} , найденное, как правило, по кривой усталости, соответствующей 50% вероятности разрушения. В формуле (8) $(N_{pi})_i$ – число циклов до разрушения, соответствующее кривой усталости индивидуального образца, испытываемого при программном нагружении; b_i – величина, учитывающая изменение неупругой деформации в процессе длительного программного нагружения. Кривая усталости индивидуального образца строилась с использованием значений неупругой деформации индивидуального образца, измеренных на начальной стадии программных испытаний, по методике, описанной в работе [19].

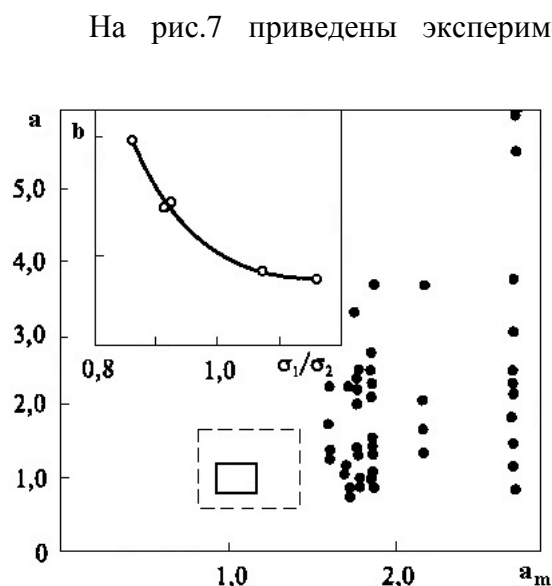


Рис.7. Результаты испытания при блочном нагружении стали 45.

На рис.7 приведены экспериментальные данные в координатах “ $a - a_m$ ” (a_m – среднее значение накопленного повреждения партии одинаковых образцов, испытанных при одном и том же блочном нагружении) для стали 45, исследованной при различных режимах двух- и трехступенчатого блочного нагружения. Затемненные точки соответствуют результатам, подсчитанным по формуле (7). Данные, подсчитанные по формуле (8), ложатся в пределах очерченного сплошной линией прямоугольника. Результаты, полученные по формуле (8) в предположении $b=1$, ложатся в пределах прямоугольника, очерченного штриховыми линиями. На этом рисунке показана также зависимость величины b от отношения напряжений σ_1/σ_2 при двухступенчатом блочном нагружении.

Согласно приведенным результатам, учет особенностей накопления усталостного повреждения в индивидуальных образцах и учет изменения интенсивности накопления повреждения в процессе блочного нагружения, дает возможность существенно повысить достоверность прогнозирования долговечности при блочном нагружении.

3.4. Двухосное нагружение

При рассмотрении представленных выше результатов, анализирующих влияние двухосности нагружения, принимался во внимание возможный вклад градиента напряжений. С этих позиций влияние двухосности проанализировано по результатам испытаний, полученных при растяжении-сжатии и кручении тонкостенных образцов [17,18].

В таблице 4 представлены выражения для приведенных напряжений и деформаций по теориям максимальных относительных деформаций (II), максимальных касательных напряжений (III), энергии формоизменения (IV), а также октаэдрических напряжений и соответствующих деформаций.

Таблица 4.

Приведенные напряжения и деформации

Тип нагружения	Выражения для приведенных напряжений и деформаций			
	II	III	IV	Октаэдрические напряжения и деформации
Растяжение-сжатие	$\sigma_{II} = \sigma_a$	$\sigma_{III} = \sigma_a / 2$	$\sigma_{IV} = \sigma_a$	$\tau_{окт} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sigma_a$
	$\varepsilon_{II} = \varepsilon_a$	$\gamma_{III} = \frac{\sigma_a}{E'} (1 + \mu')$	$\varepsilon_{IV} = \varepsilon_a$	$\gamma_{окт} = \frac{\sigma_a 2\sqrt{2}(1 + \mu')}{3E'}$
Кручение	$\sigma_{II} = \tau_a (1 + \mu')$	$\sigma_{III} = \tau_a$	$\sigma_{IV} = \sqrt{3} \tau_a$	$\tau_{окт} = \sqrt{\frac{2}{3}} \tau_a$
	$\varepsilon_{II} = \gamma_a / 2$	$\varepsilon_{III} = \gamma_a$	$\varepsilon_{IV} = \frac{\sqrt{3} \tau_a}{G'(1 + \mu')}$	$\gamma_{окт} = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{\tau_a}{G'}$

В этих формулах E' и G' - секущие модули, определенные по экспериментально построенным диаграммам $\sigma_a - \varepsilon_a$, $\tau_a - \gamma_a$ (рис.4), μ' - коэффициент, определяемый по следующей формуле [19]:

$$\mu' = 0,5 - \frac{\sigma}{Ee} (0,5 - \mu),$$

где μ - коэффициент Пуассона ($\mu = 0,25$), σ и e - истинные напряжения и деформации, соответственно.

На рис.8 приведены начальные участки диаграмм циклического деформирования для стали 45 при растяжении-сжатии (кривые 2) и кручении (кривые 1), построенные с использованием выражений, приведенных в табл.4. Аналогичные результаты были получены для сталей 12ХН3А и 40Х. Из этих результатов следует, что наилучшее соответствие между диаграммами циклического деформирования имеет место в координатах $\tau_{окт} - \gamma_{окт}$.

На рис.9 приведены кривые усталости при растяжении-сжатии (кривые 2) и кручении тонкостенных образцов (кривые 1) для исследованных материалов, построенные для числа циклов нагружения до зарождения поверхностной трещины размером 0,1 мм (светлые точки) и окончательного разрушения (темные точки).

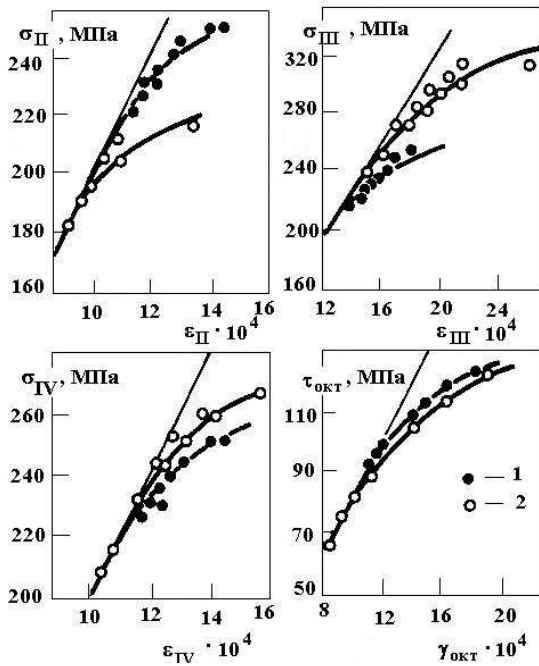


Рис.8. Начальные участки диаграмм циклического деформирования для стали 45.

циклов нагружения до зарождения поверхностной трещины размером 0,1 мм (светлые точки) и окончательного разрушения (темные точки).

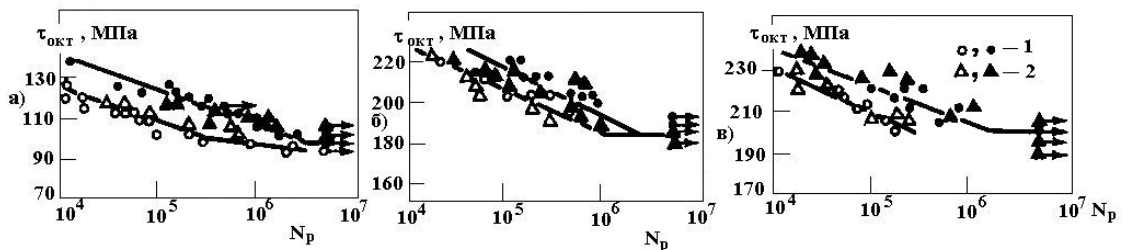


Рис.9. Кривые усталости сталей 45 (а), 12ХН3А (б) и 40Х (в).

Из рис.9 следует, что экспериментальные точки однозначно ложатся на кривые усталости в координатах $\tau_{окт} - \lg N_p$. Лучшее соответствие наблюдается для кривых усталости, построенных для долговечностей, соответствующих зарождению трещины.

Из представленных выше результатов следует также, что отношение предела выносливости при кручении тонкостенных образцов к таковому при растяжении-сжатии равно $\tau_{окт} / \sigma_{-1} = 0,577$. Эти значения могут иметь существенный разброс, если принять во внимание данные, полученные на образцах, при испытании которых градиент напряжений отличен от нуля (изгиб, кручение сплошных образцов). Для рассматриваемых сталей отношение τ_{-1} / σ_{-1} изменяется в пределах 0,45 ... 0,83.

3.4 Двухчастотное нагружение

На рис.10,а приведены диаграммы циклического деформирования аустенитной стали различной термической обработки, а на рис.10,б - соответствующие им кривые при усталости при одночастотном (1) и двухчастотном (2) нагружении [20]. Частоты

нагрузки были равны 0,082 и 32 Гц, амплитуда напряжений низкой частоты была постоянна и составляла $\sigma_a = 50$ МПа. При построении диаграмм циклического деформирования (рис.10,а) и кривых выносливости (рис.10,б) использовались амплитуды напряжения и долговечности, соответствующие высокочастотной составляющей двухчастотного цикла.

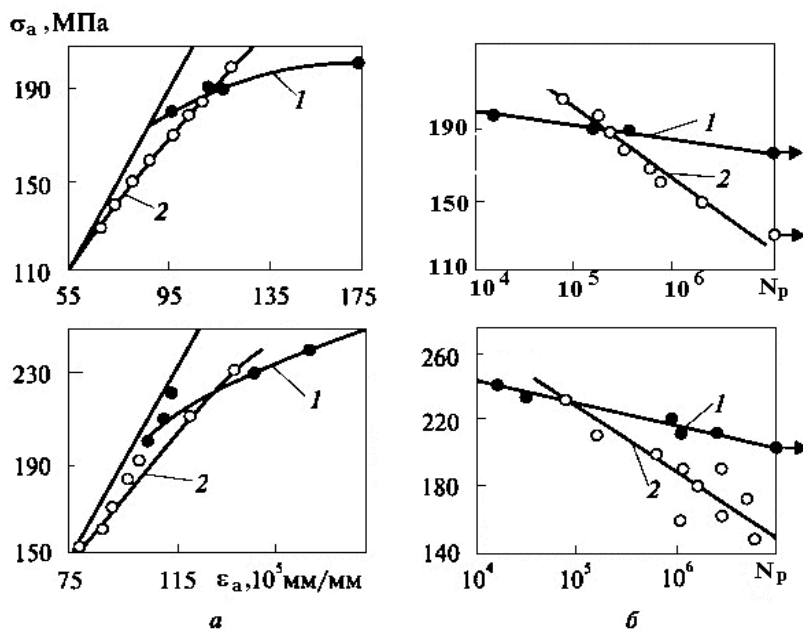


Рис.10. Циклические диаграммы деформирования (а) и кривые усталости (б) при двухчастотном нагружении.

зависимости, позволяющие прогнозировать долговечность при двухчастотном нагружении.

3.5 Частота нагружения

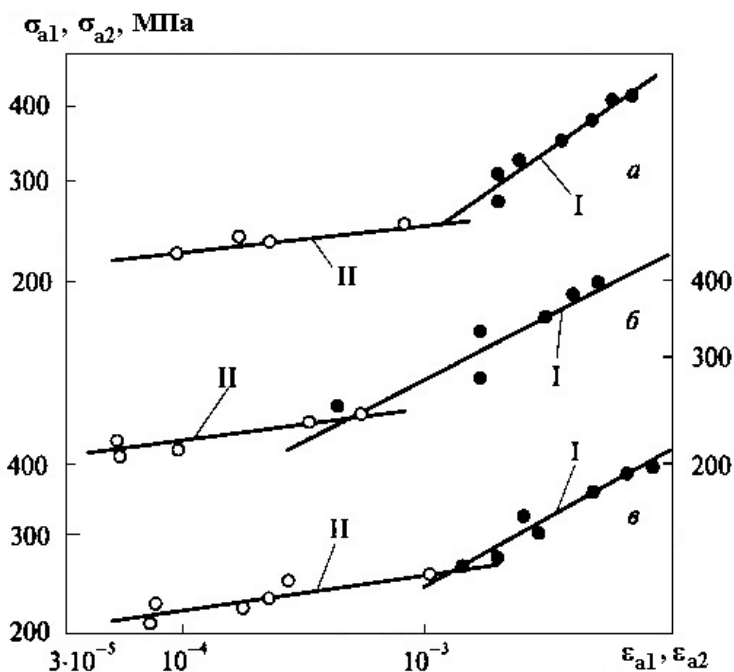


Рис.11. Циклические диаграммы деформирования при мало- (I) и много- (II) цикловом нагружении.

Как следует из этих рисунков, при двухчастотном нагружении переход от упругого к неупругому деформированию смещается в область более низких напряжений. Аналогичным образом смещаются и кривые усталости. Учитывая взаимосвязь усталости и неупругости при двухчастотном нагружении и используя гипотезу спектрального суммирования повреждений при двухчастотном нагружении с учетом гипотезы независимого распределения амплитуды по частотам, в работе [20] были получены

В работе [21] показано, что с увеличением частоты нагружения неупругие деформации при одних и тех же напряжениях уменьшаются, а пределы выносливости увеличиваются. Увеличение частоты нагружения приводит не только к уменьшению циклических пластических деформаций с увеличением частоты нагружения, но и к отличию параметров уравнения, связывающего напряжения (σ_{a1} , σ_{a2}) и неупругие деформации ($\Delta\epsilon_{a1}$, $\Delta\epsilon_{a2}$). Зависимости $\sigma_{a1}(\sigma_{a2})$ и $\Delta\epsilon_{a1}(\Delta\epsilon_{a2})$ для аустенитной стали двух термических обработок и углеродистой стали приведены на рис.11 [20].

3.6 Состояние поверхности

В работе [22] было показано, что циклические неупругие деформации образцов из углеродистой и легированной сталей при кручении уменьшаются при иницировании в поверхностном слое, путем поверхностного пластического деформирования, значительных остаточных напряжений сжатия. При этом пределы выносливости

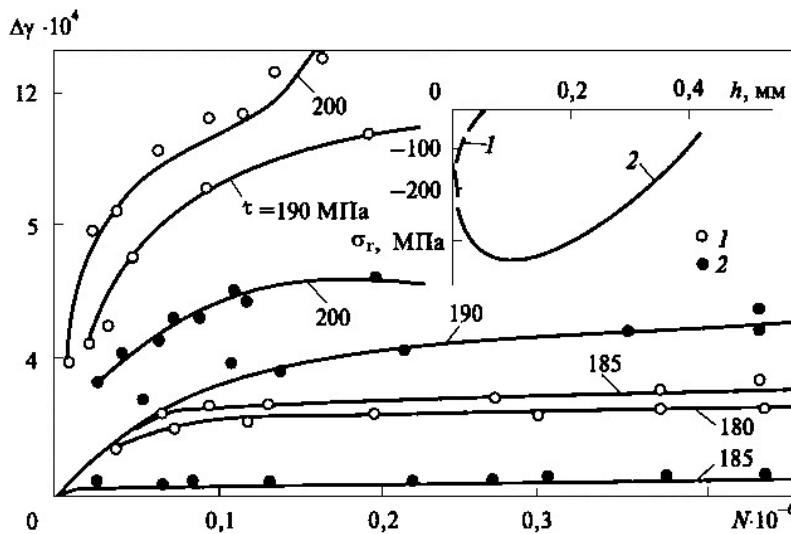


Рис.12. Циклические деформации после полировки (1) и поверхностного пластического деформирования (2).

возрастают. Результаты этих исследований для углеродистой стали иллюстрирует рис.12, где даны зависимости неупругих деформаций сдвига от числа циклов нагружения N для полированных образцов (1) и образцов после поверхностного пластического деформирования (2). Здесь дано также распределение по глубине образца остаточных напряжений σ_r для исследованных состояний поверхности.

4 Заключение

Предложена и обоснована методика исследования циклических неупругих деформаций в области многоциклового усталости при растяжении-сжатии, изгибе и кручении. Особое внимание уделено обоснованию определения истинных неупругих циклических деформаций и напряжений при неоднородном напряженном состоянии (изгиб, кручение).

Изучена многоцикловая усталость и неупругость большого количества углеродистых и легированных сталей и показано, что использование циклических неупругих деформаций на стадии стабилизации процесса неупругого деформирования, как меры интенсивности накопления усталостного повреждения при многоциклового усталости, дает возможность оценить изменение свойств материала в течение циклического нагружения и влияние на эти изменения таких факторов, как неоднородное напряженное состояние (градиент напряжений), двухосность, двухчастотность и нестационарность нагружения, учесть рассеяние результатов испытаний, установить зависимость предела выносливости и числа циклов до разрушения от уровня циклических неупругих деформаций.

Показано существенное влияние градиента напряжений на процесс деформирования поверхностных слоев при изгибе и кручении, что приводит к увеличению циклического предела упругости (пропорциональности) этих слоев по сравнению с таковыми при растяжении-сжатии и кручении тонкостенных образцов. Установлена корреляция между пределом выносливости и циклическим пределом упругости (пропорциональности) при растяжении-сжатии, изгибе и кручении.

Показано, что диаграммы циклического деформирования исследованных сталей при растяжении-сжатии и кручении тонкостенных образцов могут быть описаны единой зависимостью в координатах $\tau_{окт} - \gamma_{окт}$.

Результаты исследования многоциклового усталости при растяжении-сжатии и кручении соответствуют единым кривым усталости в координатах “октаэдрическое напряжение – число циклов до зарождения трещины (окончательного разрушения)”. С учетом этого, отношение пределов выносливости при кручении и растяжении-сжатии

равно 0,577. Показано, что это отношение может изменяться в широких пределах, если в расчетах принимаются пределы выносливости сплошных образцов при кручении и изгибе, когда имеет место влияние градиента напряжений.

Литература

1. Трошенко В.Т. Усталость и неупругость металлов. – Киев: Наук. думка, 1971. – 271 с.
2. Трошенко В.Т. Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом нагружении. – Киев: Наук. думка, 1981. – 343 с.
3. Терентьев В.Ф. Усталость металлических материалов. – Москва: Наука, 2002. – 248 с.
4. Klesnil M., Lukas P. Fatigue of Metallic Materials. – Prague: Academia, 1980. – 239 p.
5. Головин С.Н., Пушкар А. Микропластичность и усталость металлов. – Москва: Металлургия, 1980. – 240 с.
6. Basic Mechanisms in Fatigue of Metals. Edited by Lukas P. and Polak J. – Prague: Academia, 1988. – 440 p.
7. Troshchenko V.T., Khamaza L.A., Pokrovsky V.V. et al. Cyclic Deformation and Fatigue of Metals. Edited by M.Bily. – Elsevier, Amsterdam: 1993. – 500 p.
8. Методы исследования сопротивления материалов деформированию и разрушению при циклическом нагружении / Трошенко В.Т., Грязнов Б.А., Стрижало В.А. и др. – Киев: Наук. думка, 1974. – 256 с.
9. Трошенко В.Т., Хамаза Л.А., Цыбанев Г.В. Методы ускоренного определения пределов выносливости металлов на основе деформационных и энергетических критериев. – Киев: Наук. думка, 1979. – 175 с.
10. Трошенко В.Т., Жабко Н.И. Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом нагружении в условиях неоднородного напряженного состояния. – Пробл. прочности, 1981, № 9, с. 3-11; № 11, С. 3-10.
11. Иванов Г.Т., Скорый И.А. К вопросу об аппроксимации диаграмм деформирования. – В кн.: Вопросы сопротивления материалов. М.: Оборонгиз, 1959, С. 13-32.
12. Трошенко В.Т., Митченко Е.И. Прогнозирование долговечности при программном циклическом нагружении с учетом рассеяния свойств // Пробл. прочности. – 1984. - № 10. – С. 3-8.
13. Troshchenko V.T. Interrelation between inelasticity and high-cycle fatigue of metals. Advances in Fracture Research. Proc. Of the Ninth Int. Conf. On Fract. – Pergamon. – 1997. – P. 1261-1272.
14. Трошенко В.Т., Хамаза Л.А., Николаев И.А., Драган В.И. Деформационные критерии усталостного разрушения, учитывающие вид напряженного состояния // Пробл. прочности. – 1984. - №1. С. 6-10.
15. Трошенко В.Т., Хамаза Л.А. Исследование влияния циклических неупругих деформаций на предел выносливости металлов при изгибе // Пробл. прочности. – 1976. - № 4. – С. 3-9.
16. Cyclic Deformation and Fatigue of Metals. Edited by M.Bily. – Elsevier, Amsterdam, 1993. – 500 p.
17. Трошенко В.Т., Хамаза Л.А., Шестопап Л.Ф. Исследование деформационных критериев усталостного разрушения металлов при растяжении-сжатии и кручении. – В кн.: Усталость металлов и сплавов. – М.: Наука, 1971, С. 31-41.
18. Трошенко В.Т., Шестопап Л.Ф. К вопросу о критериях усталостной прочности металлов // Strojnicky casopis. – 1974. - № 1. – С. 4-16.
19. Черняк Н.И. Механические свойства стали в области малых пластических деформаций. – Киев: Изд-во АН УССР, 1962. – 104 с.
20. Хамаза Л.А., Коваленко В.А. Сопротивление металлов усталостному разрушению и деформированию при двухчастотном нагружении // Пробл. прочности. – 1989. - № 10. – С. 7-18.
21. Трошенко В.Т., Афонин А.И., Хамаза Л.А. Исследование энергетических критериев усталостного разрушения некоторых металлов на низкой и высокой частотах нагружения // Пробл. прочности. – 1973. - № 6. – С. 3-7.
22. Ляликов С.М. Влияние поверхностного пластического деформирования на характеристики неупругости и предел усталости сталей Ст20 и 15Х17Н2 при циклическом нагружении // Пробл. прочности. – 1989. - № 10. – С. 108-110.