

# НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

УДК 539.4

## Усталость и неупругость металлов при неоднородном напряженном состоянии

**В. Т. Трощенко**

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

*На основе анализа данных литературных источников и результатов оригинальных исследований показано, что при наличии градиентов напряжений при равных циклических напряжениях в поверхностном максимально напряженном слое материала неупругие деформации меньше, чем при однородном напряженном состоянии. В результате этого диаграммы циклического деформирования в таких условиях различаются. Предложено уравнение диаграммы циклического деформирования, учитывающее влияние градиента напряжений. Обоснована модель, позволяющая объяснить различие между характеристиками сопротивления усталостному разрушению в условиях однородного и неоднородного напряженных состояний.*

**Ключевые слова:** циклические деформации, циклический предел упругости, градиент напряжений, предел выносливости.

**Введение.** Циклическая неупругая деформация, так же как и энергия неупругого деформирования, является характеристикой процессов микропластического деформирования и разрушения в локальных объемах материала при циклическом нагружении.

Неупругие деформации имеют место даже при весьма малых уровнях циклических напряжений, что обнаруживается, например, при исследовании затухания колебаний образцов и другими методами, позволяющими исследовать различные эффекты, связанные с неупругим деформированием металлов и сплавов [1–3].

Следует полагать, что даже в том случае, когда неупругие деформации весьма малы, что отмечается при многоциклового усталости, основной причиной зарождения усталостных трещин в металлах и сплавах, приводящих к усталостному разрушению, являются процессы в локальных объемах материала. Интегральной характеристикой этих процессов служит петля гистерезиса в координатах напряжение–деформация [4–6].

В работе с использованием приведенных в литературных источниках данных, полученных с помощью методов оптической металлографии, рентгеноскопии, ультразвука, тензометрии и др. [7–13], рассматриваются особенности циклического деформирования металлов и сплавов при неоднородном напряженном состоянии.

Анализируются характеристики неупругости широкого круга материалов и показано, что действительные диаграммы циклического деформирования

при многоцикловом нагружении в условиях неоднородного напряженного состояния существенно отличаются от таковых в условиях однородного напряженного состояния, что позволяет объяснить различие между характеристиками сопротивления усталости при однородном и неоднородном напряженных состояниях [2, 5].

Методы оценки напряженного состояния и результаты исследования усталости металлов и сплавов при неоднородном напряженном состоянии рассмотрены ранее [14]. В работе [15] проанализированы различные методы, используемые при объяснении различия между характеристиками сопротивления усталости материалов в условиях однородного и неоднородного напряженных состояний.

**Особенности деформирования металлов и сплавов в условиях неоднородного напряженного состояния.** На рис. 1 в соответствии с работой [7] приведены зависимости величины  $\omega_k$ , равной отношению числа пластически деформированных локальных объемов (зерен) на поверхности образцов на стадии стабилизации процесса деформирования к суммарному числу зерен, от амплитуды напряжения  $\sigma_a$  для малоуглеродистой стали ( $\sigma_B = 421$  МПа,  $\sigma_{0,2} = 267$  МПа) и меди ( $\sigma_B = 268$  МПа,  $\sigma_{0,05} = 190$  МПа) при симметричном многоцикловом нагружении. Как видно, процесс циклического пластического деформирования поверхностного слоя металла существенно зависит от градиента напряжений.

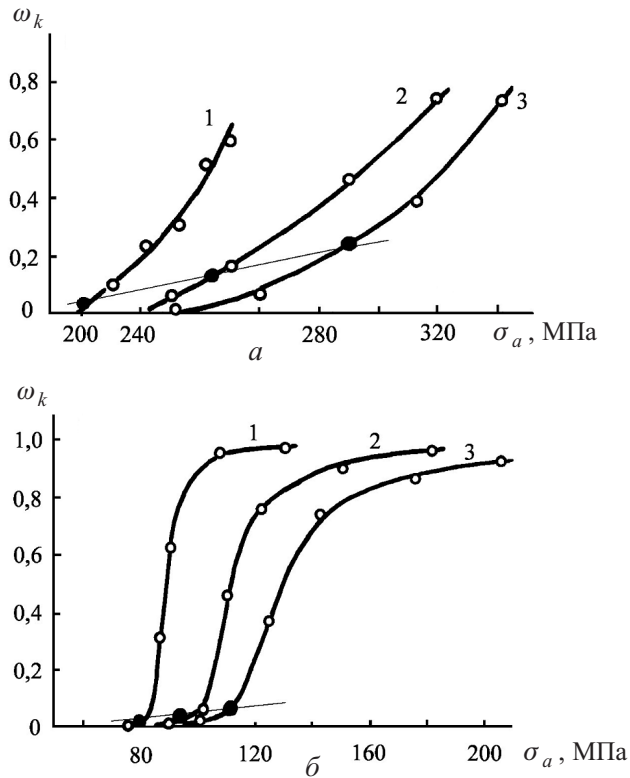


Рис. 1. Зависимость  $\omega_k$  от  $\sigma_a$  при осевом нагружении (кривая 1) и изгибе при относительных градиентах напряжения 0,2 (кривая 2) и 2,0  $\text{мм}^{-1}$  (кривая 3) малоуглеродистой стали (а) и меди (б). (Темные точки – величины пределов выносливости.)

С ростом градиента напряжений увеличивается величина напряжений, при которой достигается равная степень повреждения поверхности ( $\omega_k = \text{const}$ ).

Существующее расхождение между номинальными и действительными напряжениями не позволяет объяснить полученные результаты [15]. Это расхождение в области многоциклового усталости, как это следует из ранее приведенных результатов [15], несущественно.

Различие между процессами деформирования поверхности при разных градиентах напряжений исследовалось с использованием методов рентгено-скопии [8, 9, 12].

В работе [9] показано, что развитие усталостного повреждения в среднеуглеродистой стали ( $\sigma_B = 601$  МПа,  $\sigma_{0,2} = 383$  МПа), характеризуемое искажением кристаллической решетки поверхностного слоя материала, зависит от градиента напряжений.

В [12] исследовалось изменение остаточных напряжений в поверхностном слое образцов диаметром 10, 20 и 100 мм из той же среднеуглеродистой стали при циклическом изгибе при различных напряжениях и числах циклов нагружения.

Установлено, что чем меньше градиент напряжений, тем выше неупругие деформации при одном и том же уровне напряжений и тем более интенсивно снижаются остаточные напряжения.

Аналогичные, по существу, результаты получены в [13] при исследовании остаточных напряжений в сталях с использованием ультразвука.

Интересные результаты, свидетельствующие о существенной роли градиента напряжений, получены в работе [8], в которой с использованием рентгеновских методов исследовался предел текучести поверхностного слоя малолегированных сталей различного химического состава при осевом нагружении и изгибе.

В работах [10, 11, 16–19] проводилось сравнение деформаций, измеренных на поверхности образцов при циклическом нагружении в условиях однородного и неоднородного напряженных состояний.

В [10] для большой группы сталей показано, что отношение деформаций, соответствующих зарождению трещин при одном и том же числе циклов нагружения при изгибе  $(\varepsilon_a)_и$  и осевом нагружении  $\varepsilon_a$ , существенно больше единицы и увеличивается с ростом числа циклов до зарождения трещины (рис. 2).

Существенное различие между амплитудами деформаций при изгибе и осевом нагружении и их неупругими составляющими, соответствующими одному и тому же числу циклов до разрушения, наблюдалось при исследовании малоуглеродистой и нержавеющей сталей [20].

В то же время в работе [21] по результатам исследования меди и сплава меди с цинком при многоциклового осевом нагружении и изгибе ( $10^4 < N < 10^7$  цикл) было показано, что кривые усталости в координатах действительная амплитуда неупругой деформации за цикл – число циклов до разрушения совпадают.

Соотношение амплитуд циклических деформаций в гладких образцах и амплитуд деформаций, измеренных непосредственно в вершине concentra-

тора напряжений, соответствующих одному и тому же числу циклов до зарождения трещины глубиной 0,5 мм в области многоциклового усталости ( $10^4 < N < 10^7$  цикл), исследовалось в работе [11].

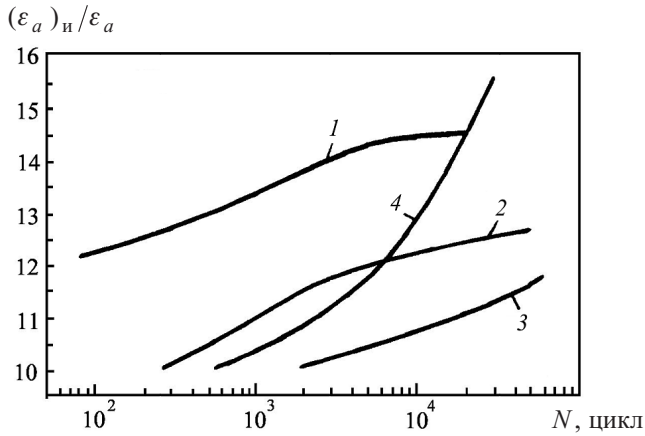


Рис. 2. Изменение отношения  $(\epsilon_a)_н/\epsilon_a$  в зависимости от числа циклов нагружения для различных сталей: 1 –  $\sigma_B = 472$  МПа; 2 –  $\sigma_B = 707$  МПа; 3 –  $\sigma_B = 946$  МПа; 4 –  $\sigma_B = 794$  МПа.

Результаты, полученные в данной работе при исследовании гладких плоских образцов различной толщины и плоских образцов с боковым круговым концентратором разных размеров из среднеуглеродистой стали при симметричном осевом нагружении, приведены на рис. 3. Градиент напряжений в концентраторе изменялся в пределах  $\bar{\eta} = 0,13 \dots 1,0 \text{ мм}^{-1}$ .

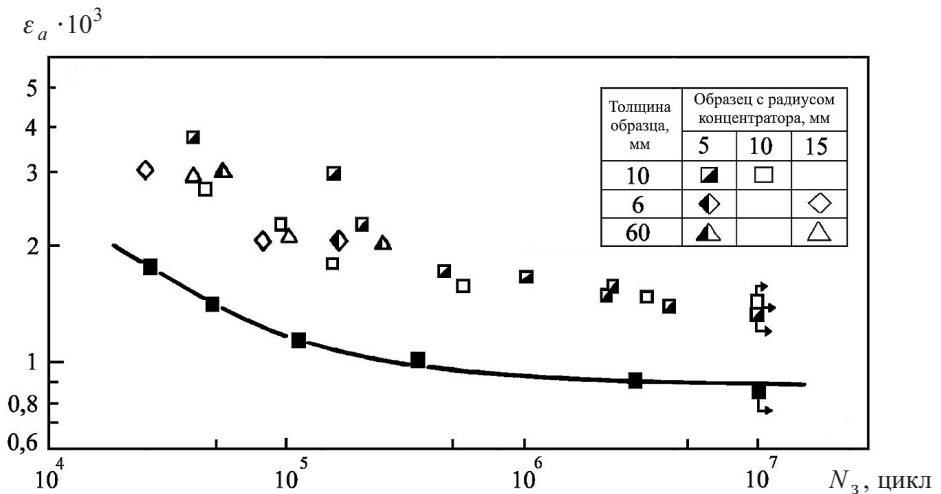


Рис. 3. Изменение амплитуды деформаций в зависимости от числа циклов до зарождения трещины (■ – данные для гладкого образца).

Полученные результаты однозначно показывают, что амплитуда циклических деформаций, соответствующая одному и тому же числу циклов до зарождения трещин в концентраторе, существенно выше, чем в гладких образцах (рис. 3).

Аналогичные данные (рис. 4) получены в работе [18], в которой исследовалась малоуглеродистая сталь с малым  $d = 6,7$  мкм ( $\sigma_B = 444$  МПа,  $\sigma_{0,2} = 295$  МПа) и крупным  $d = 56$  мкм ( $\sigma_B = 370$  МПа,  $\sigma_{0,2} = 183$  МПа) размером зерна при осевом симметричном нагружении.

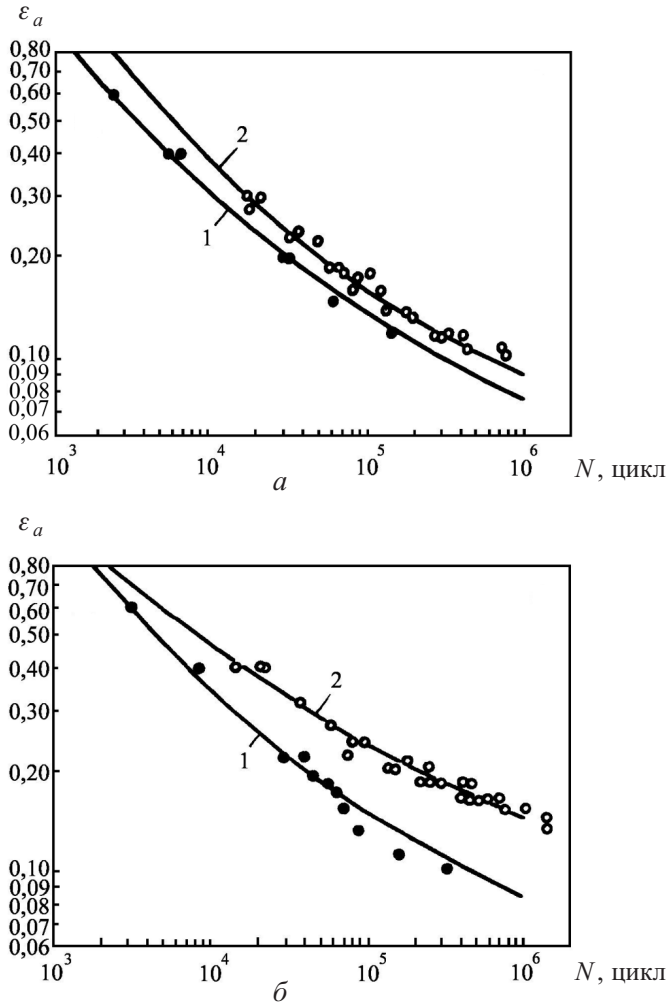


Рис. 4. Кривые усталости в координатах  $\epsilon_a - N$  для крупнозернистой (а) и мелкозернистой (б) стали: 1 – гладкие образцы; 2 – образцы с концентратором.

Различие между кривыми усталости гладких и надрезанных образцов в координатах  $\epsilon_a - N$  возрастает с увеличением числа циклов до разрушения. Не наблюдается существенного различия в кривых усталости при разных коэффициентах концентрации напряжений.

Анализ приведенных выше результатов свидетельствует о следующем.

Процессы деформирования поверхностных слоев материала в образцах в условиях однородного и неоднородного напряженных состояний существенно отличаются.

В условиях неоднородного напряженного состояния в максимально напряженных объемах материала процессы, характеризующие неупругое де-

формирование, развиваются менее интенсивно, чем в гладких образцах при тех же напряжениях. Это обнаруживается как физическими (оптическая металлография, рентгеноскопия, ультразвук и т.п.) методами, так и прямым измерением деформаций.

Зарождение усталостной трещины, или полное разрушение после заданного числа циклов нагружения в условиях неоднородного напряженного состояния имеет место при более высоких амплитудах деформаций, чем при однородном напряженном состоянии.

**Характеристики циклической неупругости при однородном и неоднородном напряженных состояниях.** *Однородное напряженное состояние.* О величине неупругих деформаций можно судить по данным, приведенным на рис. 5, где показаны типичные диаграммы статического и циклического деформирования сталей различной прочности [22]; штрихпунктирной линией представлена максимальная величина амплитуды неупругой деформации за цикл, определенная ранее [23] при исследовании усталости и неупругости различных металлов и сплавов при многоцикловом нагружении (табл. 1). Еще меньшие величины имеет неупругая деформация при напряжениях, равных пределам выносливости металлов и сплавов на базе  $10^7$  цикл.

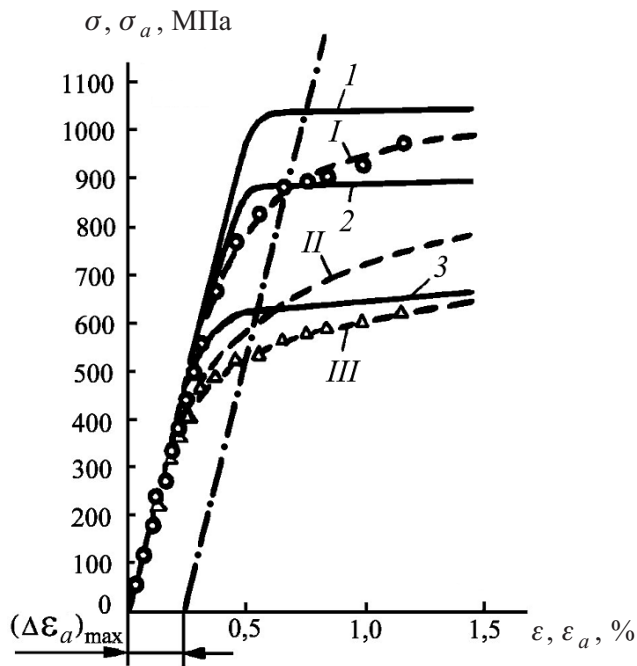


Рис. 5. Диаграммы статического (1-3) и циклического (I-III) деформирования сталей различной прочности и диапазон неоднородных деформаций при многоциклового усталости.

В оригинальных исследованиях, результаты которых используются при дальнейшем анализе, деформации измерялись с помощью тензодатчиков, наклеенных непосредственно на образец или тензопреобразователь. Частота нагружения изменяется в пределах 20...36 Гц, испытания проводились при режиме  $\sigma_a = \text{const}$ . Методика исследования детально описана ранее [1, 2].

**Характеристики механических свойств, усталости и циклической неупругости металлов и сплавов**

Материал	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_{-1}$ , МПа	$(\Delta \varepsilon_a)_{\sigma_{-1}} \cdot 10^5$ , мм/мм	$(\Delta \varepsilon_a)_{\max} \cdot 10^5$ , мм/мм
1	2	3	4	5	6
<b>Углеродистые стали</b>					
25	518	–	167	1,50	80,0
30	726	414	340	0,83	14,0
45 (I)	668	408	230	6,70	190,0
45 (II)	716	468	270	9,30	130,0
60	937	622	177	2,60	22,0
<b>Легированные стали</b>					
20X	500	–	157	1,30	40,0
40X (I)	994	899	360	1,80	28,0
40X (II)	873	590	300	3,30	45,0
40X (III)	840	675	330	0,02	90,0
1X13 (I)	638	429	283	0,23	14,0
1X13 (I) (773 К)	–	–	140	2,30	115,0
1X13 (II)	620	390	270	2,00	15,0
1X13 (III)	746	614	350	0,4	15,0
12ХН3	624	317	270	0,38	100,0
09X14Н19В2БР1 (ЭИ726)	560	–	147	1,10	50,0
1X17Н2Ш	912	707	390	1,60	21,0
ХН35ВТ (I)	1000	595	300	0,45	41,0
ХН35ВТ (I) (873 К)	850	450	290	2,10	28,0
15ХН35ВТ (II)	896	582	260	0,15	9,0
<b>Высокопластичные аустенитные и другие стали</b>					
1X18Н10Т	650	250	190	16,8	100,0
30X10Г10	815	397	320	11,6	103,0
0X14АГ12М	1018	435	310	14,3	125,0
15Г2АФДпс (I)	520	420	260	14,0	14,0
15Г2АФДпс (II)	532	410	250	11,5	11,5
<b>Никелевые сплавы</b>					
ХН77ТЮР (ЭИ437Б)	1240	670	360	–	22,3
ХН77ТЮР (ЭИ437Б) (933 К)	980	480	360	1,40	26,0
ХН70ВМТЮФ (ЭИ826)	960	650	620	0,03	11,0
ХН70ВМТЮФ (ЭИ826) (1153 К)	610	570	210	0,17	17,0
<b>Сплавы на основе алюминия</b>					
Д16Т	538	398	120	2,40	13,0
Д20	410	250	60	2,50	11,0
Д20 (77 К)	523	340	80	1,20	17,0

1	2	3	4	5	6
Медь и сплавы на ее основе					
Медь	232	70	100	0,43	48,0
Лагунь Л62	449	371	150	0,78	146,0
Бронза Бр АЖ9	688	315	260	0,59	80,0225
Чугуны					
СЧ 21-40	225	–	100	2,80	6,0

Проведенный анализ показывает, что используемые методики и аппаратура позволяют измерять неупругие деформации, начиная с  $1 \cdot 10^{-5}$  мм/мм.

В табл. 1 для исследованных материалов приведены характеристики механических свойств, пределы выносливости при осевом симметричном нагружении  $\sigma_{-1}$ , амплитуды неупругих деформаций, соответствующие пределам выносливости на базе  $10^7$  цикл  $(\Delta \varepsilon_a)_{\sigma_{-1}}$ , и максимальные значения амплитуд неупругой деформации  $(\Delta \varepsilon_a)_{\max}$  в наиболее напряженных образцах. Некоторые материалы испытывали также при высоких температурах.

Для повышения точности определения величины  $(\Delta \varepsilon_a)_{\sigma_{-1}}$  результаты, полученные при испытании нескольких образцов при разных напряжениях, представляли, как это показано на рис. 6, в координатах  $\lg \Delta \varepsilon_a - \sigma_a$  и обрабатывали по методу наименьших квадратов, величина  $(\Delta \varepsilon_a)_{\sigma_{-1}}$  определялась как абсцисса точки пересечения аппроксимированной прямой и горизонтальной линии, соответствующей пределу выносливости.

Несмотря на большой диапазон значений неупругих деформаций, соответствующих пределам выносливости на базе  $10^7$  цикл различных металлов и сплавов, можно путем систематизации всей совокупности металлов и сплавов по группам установить довольно четкую взаимосвязь между пределами выносливости и пределами упругости, найденными по диаграммам циклического деформирования при определенных допусках на неупругую деформацию.

Ранее [23] было показано, что если принять для углеродистых и легированных сталей  $\sigma_{-1} = \sigma_{0,002}^H$ , для высокопластичных аустенитных сталей –  $\sigma_{-1} = \sigma_{0,015}^H$ , для меди и сплавов –  $\sigma_{-1} = \sigma_{0,0005}^H$ , то отклонения в определении пределов выносливости указанных материалов по величине циклических пределов упругости не будут превышать  $\pm 10\%$ .

Близкие к рассмотренным выше результаты приведены в работах [24–26].

*Неоднородное напряженное состояние.* При неоднородном напряженном состоянии, например при изгибе, диаграммы циклического деформирования строятся в координатах  $(\sigma_a)_{\text{ном}} - \varepsilon_a$  (на рис. 7 кривая 1), где  $(\sigma_a)_{\text{ном}}$  – амплитуда номинальных напряжений, равная  $(\sigma_a)_{\text{ном}} = (M_a)_H / W$ ;  $\varepsilon_a$  – амплитуда деформации поверхностного слоя. Диаграмма деформирования при



осевом циклическом нагружении представлена кривой 2. Анализ соответствия диаграмм 1 диаграммам 2 осуществляется либо путем построения диаграммы 1 с использованием диаграммы циклического деформирования при осевом нагружении 2, либо, наоборот, путем нахождения диаграммы 2, соответствующей кривой 1, с помощью, например, метода Надаи–Кармана [27] с последующим сравнением расчетных результатов с экспериментальными.

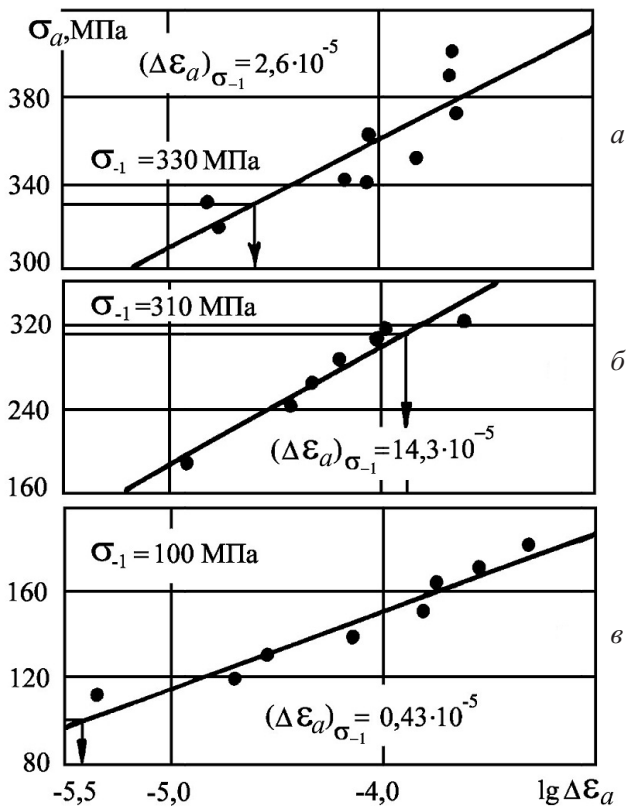


Рис. 6. Зависимость неупругой деформации  $\lg \Delta \epsilon_a$  от амплитуды напряжений  $\sigma_a$ : а – сталь 60; б – сталь 1X14AG12M; в – медь.

В случае если диаграммы, рассчитанные по той или иной методике, совпадают с экспериментально найденными, то различие между диаграммами 1 и 2 определяется отличием номинальных напряжений от действительных.

Если же рассчитанная с использованием экспериментально построенной кривой 1 диаграмма деформирования 3 проходит выше экспериментальной кривой 2, то, очевидно, кроме этого фактора имеет место влияние градиента напряжений.

В дальнейшем диаграмму 3 будем называть действительной диаграммой циклического деформирования материала при неоднородном напряженном состоянии, а напряжения  $\sigma_a^д$  и неупругие деформации  $\Delta \epsilon_a^д$ , найденные с ее использованием – действительными напряжениями и действительными неупругими деформациями соответственно.

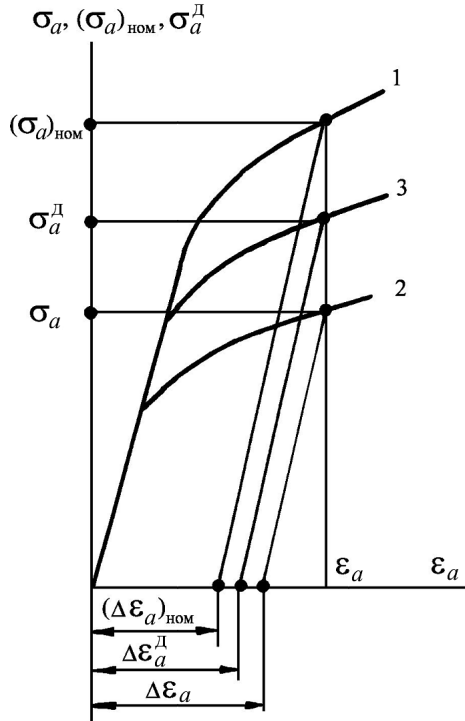


Рис. 7. Циклические диаграммы деформирования при изгибе (1), осевом нагружении (2) и действительная диаграмма деформирования при изгибе (3).

Напряжения, соответствующие точке пересечения упругого и начального неупругого участка диаграммы деформирования при линейной его аппроксимации, могут быть названы циклическим пределом пропорциональности  $\sigma_{п.ц}^н$ .

С учетом того что разрешающая способность аппаратуры для измерения неупругих деформаций составляет обычно около  $1 \cdot 10^{-5}$  мм/мм, величина  $\sigma_{п.ц}^н$  может быть принята равной пределу упругости при допуске на остаточную деформацию  $\Delta \varepsilon_a = 1 \cdot 10^{-5}$  мм/мм.

Величины  $(\varepsilon_{п.ц}^н)^д = (\sigma_{п.ц}^н)^д / E$  и  $(E_T^н)^д$  могут быть найдены из решения системы двух уравнений, связывающих номинальные напряжения  $(\sigma_a)_{ном}$  и деформацию  $\varepsilon_a$  на поверхности образца и записанных для двух точек на нелинейном участке диаграмм. Система этих двух уравнений может быть решена графически путем построения кривых в координатах  $(E_T^н)^д - (\varepsilon_{п.ц}^н)^д$ , точка пересечения которых дает искомый результат.

Проверку достоверности получаемых таким методом результатов осуществляли посредством принятия типичных диаграмм циклического деформирования для металлов в области многоциклового усталости в предположении, что  $\varepsilon_{п.ц}^н = 0,15 \cdot 10^{-2} = \text{const}$ .

Для таких металлов с использованием данных диаграмм и уравнений  $(\sigma_a)_{ном} = f(\varepsilon_a)$  определяли, как это показано в работе [2], номинальные диаграммы деформирования, по которым в соответствии с рассмотренным

выше методом строили зависимости в координатах  $\bar{E}_T^{\text{II}} - (\varepsilon_{\text{п.ц}}^{\text{II}})^{\text{II}}$ , где  $\bar{E}_T^{\text{II}} = E_T^{\text{II}}/E$  (рис. 8).

На рис. 8 цифры на кривых соответствуют различным величинам амплитуд деформаций (в порядке возрастания), которые использовали при расчетах в соответствии с описанной выше методикой.

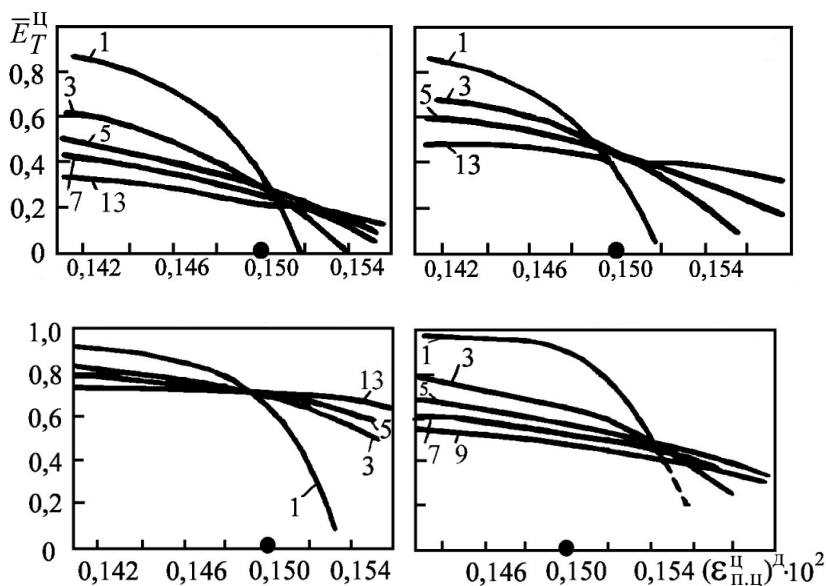


Рис. 8. Определение пределов пропорциональности и модулей упрочнения при изгибе (результаты для номинальных диаграмм деформирования с различным упрочнением).

Максимальная погрешность определения величины  $(\varepsilon_{\text{п.ц}}^{\text{II}})^{\text{II}}$  соответствует расчетным точкам в области больших деформаций для существенно нелинейных диаграмм деформирования и составляет 3...5%.

Аналогичный подход может быть реализован также при анализе результатов испытания на кручение [1, 2].

Методы перехода от линеаризированной диаграммы деформирования к нелинейной диаграмме были обоснованы в работах [16, 17, 28].

Результаты определения циклических пределов пропорциональности для сталей 25, 20Х, 45 и ЭИ726 в соответствии с рассмотренной выше методикой приведены в табл. 2 [1]. Видно, что переход от упругого к неупругому деформированию при неоднородном напряженном состоянии (изгиб) имеет место при более высоких напряжениях, чем при осевом нагружении.

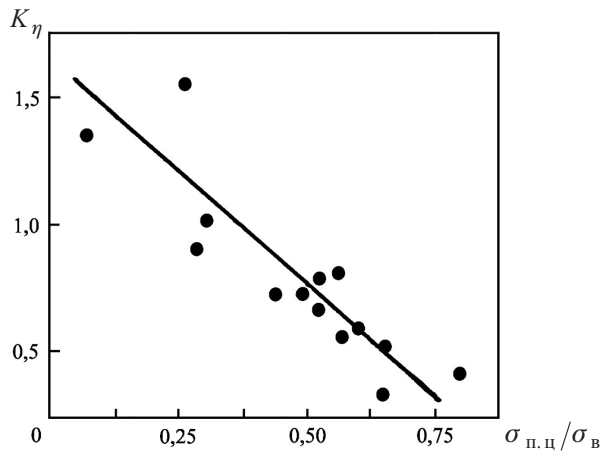
Для исследованных сталей при осевом нагружении и изгибе ( $\bar{\eta} = 0,13 \text{ мм}^{-1}$ ) наблюдается удовлетворительное согласование между соответствующими пределами выносливости и циклическими пределами пропорциональности. Это, очевидно, обусловлено тем, что предел выносливости соответствует циклическому пределу упругости при допуске на остаточную деформацию, равном примерно  $1 \cdot 10^{-5} \text{ мм/мм}$ , при котором циклические пределы упругости и циклические пределы пропорциональности близки (табл. 2).

Т а б л и ц а 2

## Характеристики усталости и циклической неупругости

Сталь	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{п.ц.}$ , МПа	$\sigma_{п.ц.}^H$ , МПа	$(\sigma_{п.ц.}^H)^H$ , МПа	$\sigma_{-1}$ , МПа	$(\sigma_{-1})_H$ , МПа	$(\Delta \varepsilon_a)_{\sigma_{-1}} \cdot 10^5$ , мм/мм
25	518	274	184	260	167	255	1,50
20Х	500	240	173	245	157	245	1,30
45	650	—	201	280	177	282	1,05
ЭИ726	560	167	152	215	147	205	1,10

Анализ результатов, приведенных выше и в работах [1, 4], показывает, что несмотря на их существенное рассеяние, имеет место четкая зависимость между отношением циклического предела пропорциональности при изгибе к циклическому пределу пропорциональности при осевом нагружении  $K_\eta$  и отношением  $\sigma_{п.ц.}/\sigma_B$  (рис. 9), согласно которой влияние градиента напряжений увеличивается с уменьшением отношения  $\sigma_{п.ц.}/\sigma_B$ .

Рис. 9. Зависимость  $K_\eta$  от  $\sigma_{п.ц.}/\sigma_B$  для исследованных материалов.

Ранее [1] было показано, что для исследованных материалов независимо от вида нагружения (растяжение–сжатие, изгиб,  $\bar{\eta} = 0,13 \text{ мм}^{-1}$ ) экспериментальные точки в координатах  $\lg \Delta \varepsilon_n - \lg N$  ложатся на единую прямую.

**Обобщение результатов.** Данные, полученные в основном при исследовании гладких образцов при осевом нагружении и изгибе и плоских образцов с концентраторами напряжений, в вершине которых напряженное состояние близко к линейному, свидетельствуют о следующем.

1. Величины неупругих деформаций, соответствующих пределам выносливости при осевом нагружении на базе  $10^7$  цикл, существенно различаются для разных металлов и сплавов [1, 23]. Возможна систематизация металлов и сплавов по величине неупругой деформации, соответствующей их пределам выносливости. На основании такого подхода можно установить связь между пределами выносливости и циклическими пределами упругости при условии, что для каждой анализируемой группы материалов при определении предела упругости принимается свой допуск на остаточную деформацию [23].

2. Для большинства конструкционных сплавов величина неупругих деформаций при напряжениях, равных пределу выносливости при  $10^7$  цикл до разрушения, весьма мала. При таких неупругих деформациях различие между действительными и номинальными напряжениями незначительно, что не позволяет объяснить разницу между пределами выносливости при однородном и неоднородном напряженных состояниях [23, 25, 26, 29].

3. Интенсивность процесса циклического деформирования максимально напряженных объемов одного и того же материала в условиях однородного и неоднородного напряженных состояний разная.

При наличии градиента напряжений развитие неупругих деформаций в поверхностном слое материала происходит менее интенсивно при одних и тех же напряжениях [1, 7–9, 30].

4. В условиях неоднородного напряженного состояния (изгиб, концентраторы напряжений) полная амплитуда деформации поверхности, соответствующая одному и тому же числу циклов до разрушения, или до зарождения трещины определенных размеров, существенно выше, чем при осевом нагружении [10, 11, 18].

5. В работах [1, 21, 31, 32] было установлено, что действительные неупругие деформации за цикл, соответствующие одному и тому же числу циклов до разрушения, а следовательно, и величина неупругой деформации за цикл, соответствующая пределу выносливости при определенном числе циклов до разрушения, не зависят от градиента напряжений.

В то же время в других работах, например в [20], получено, что кривые усталости при изгибе как в координатах  $\varepsilon_a - N$ , так и  $(\Delta\varepsilon_a)^D - N$  расположены выше, чем аналогичные кривые при осевом нагружении.

С учетом вышеизложенного диаграмма циклического деформирования материала при неоднородном напряженном состоянии может быть представлена в виде

$$\varepsilon_a = \frac{\sigma_a}{E} + \left( \frac{\sigma_a - \sigma_{п.ц}^n(\bar{\eta})}{K} \right)^n \quad \text{при } \sigma_a > \sigma_{п.ц}^n(\bar{\eta});$$

$$\varepsilon_a = \frac{\sigma_a}{E} \quad \text{при } \sigma_a < \sigma_{п.ц}^n(\bar{\eta}),$$
(1)

где  $\sigma_{п.ц}^n(\bar{\eta})$  – циклический предел пропорциональности при градиенте напряжений  $\bar{\eta}$ ;  $K$  и  $n$  – постоянные материала.

Пределы выносливости при различных градиентах напряжения  $\sigma_{-1}(\bar{\eta})$  будут равны напряжениям на соответствующих циклических диаграммах деформирования при величине неупругой деформации  $\Delta\varepsilon_n$ , характерной для данного материала (рис. 10). Формулы, учитывающие влияние градиента напряжений на величину предела выносливости, представлены в работе [14].

Приведенная на рис. 10 схема позволяет объяснить то, что в условиях неоднородного напряженного состояния полная амплитуда деформации при одинаковом числе циклов до разрушения при неоднородном напряженном состоянии выше, чем при осевом нагружении.

При таком подходе номинальная диаграмма деформирования должна рассчитываться не с использованием диаграммы деформирования при осевом нагружении, а с помощью диаграммы, учитывающей влияние градиента напряжений. В этом случае различие между действительными и номинальными напряжениями, соответствующими кривой усталости в условиях неоднородного напряженного состояния при одноосном нагружении, будет иметь место только при  $\sigma_a^H > \sigma_{п.ц}^H(\bar{\eta})$ , что можно учесть с использованием приведенных выше результатов.

Величина  $\sigma_{п.ц}^H(\bar{\eta})$  будет равна пределу выносливости тех металлов и сплавов, для которых, как было показано выше, он совпадает с циклическим пределом упругости при допуске на остаточную деформацию, равном примерно  $1 \cdot 10^{-5}$  мм/мм. Эта величина деформации, которая схематически показана штриховой линией на рис. 10, соответствует современным возможностям надежного измерения неупругих деформаций.

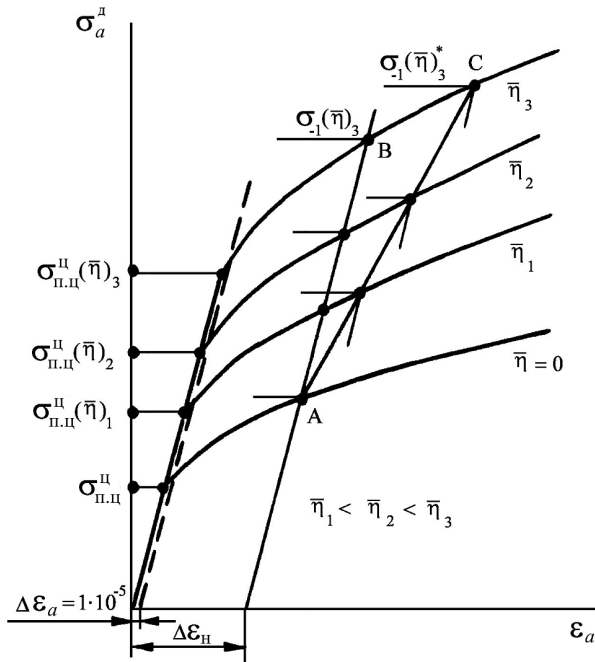


Рис. 10. Действительные диаграммы циклического деформирования при различных относительных градиентах напряжений.

Величины неупругих деформаций, соответствующих пределам выносливости различных металлов и сплавов при осевом нагружении, приведены в табл. 1.

Схема взаимозависимости величин циклической неупругости и пределов выносливости (рис. 10) может быть уточнена с целью учета результатов, приведенных на рис. 1 и в работе [20]. Согласно последним с ростом градиента напряжений неупругие деформации, соответствующие пределу выносливости на базе  $10^7$  цикл, увеличиваются, а кривые усталости в условиях однородного и неоднородного напряженных состояний не совпадают ни в

координатах  $\varepsilon_a - N$ , ни  $(\Delta\varepsilon_a)^D - N$ . Это можно учесть, если предположить, что неупругая деформация, соответствующая пределу выносливости, увеличивается с ростом градиента напряжений (на рис. 10 кривая AC).

Очевидно, что при анализе различия между характеристиками сопротивления усталостному разрушению металлов и сплавов при однородном и неоднородном напряженных состояниях наряду с подходами, предложенными ранее [15], необходимо учитывать также подход, изложенный выше.

**Заключение.** Рассмотрено различие между закономерностями неупругого циклического деформирования поверхностных (наиболее напряженных) слоев металлов и сплавов в условиях однородного и неоднородного напряженных состояний при многоцикловом нагружении, установленными с использованием методов оптической металлографии, рентгеноскопии, ультразвука и тензометрии.

Приведены результаты оригинальных исследований циклических неупругих деформаций при однородном и неоднородном напряженных состояниях большой группы металлов и сплавов.

Анализ полученных результатов показывает, что действительные диаграммы циклического деформирования металлов и сплавов в неупругой области зависят от градиентов напряжений и с их увеличением смещаются в область более высоких напряжений.

Предложено и обосновано уравнение диаграммы циклического деформирования, учитывающее влияние градиента напряжений. Дано объяснение зависимости пределов выносливости от градиента напряжений, основанное на учете зависимости циклических диаграмм деформирования от градиента напряжений и соответствии пределов выносливости циклическим пределам упругости, определенным при характерных для исследуемого материала допусках на остаточную деформацию.

## Резюме

На основі аналізу даних літературних джерел та результатів оригінальних досліджень показано, що за наявності градієнтів напружень за рівних циклічних напружень у поверхневому максимально напруженому шарі матеріалу непружні деформації менші, ніж при однорідному напруженому стані. У результаті цього діаграми циклічного деформування в таких умовах відрізняються між собою. Запропоновано рівняння діаграми циклічного деформування, яке враховує вплив градієнта напружень. Обґрунтовано модель, що дозволяє пояснити різницю між характеристиками опору втомному руйнуванню в умовах однорідного і неоднорідного напружених станів.

1. Троценко В. Т. Усталость и неупругость металлов. – Киев: Наук. думка, 1971. – 267 с.
2. Троценко В. Т. Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом нагружении. – Киев: Наук. думка, 1981. – 343 с.
3. Klesnil M. and Lukas P. Fatigue of Metallic Materials. – Prague: Academia, 1980. – 239 p.

4. Троценко В. Т. Рассеянное усталостное повреждение металлов и сплавов. Сообщ. 2. Взаимосвязь между усталостью и неупругостью // Пробл. прочности. – 2005. – № 5. – С. 5 – 29.
5. Троценко В. Т. Рассеянное усталостное повреждение металлов и сплавов. Сообщ. 3. Деформационные и энергетические критерии // Там же. – 2006. – № 1. – С. 5 – 31.
6. Троценко В. Т., Покровский В. В., Прокопенко В. В. Трещиностойкость металлов при циклическом нагружении. – Киев: Наук. думка, 1987. – 252 с.
7. Holzman R. B. Vliv nehomogeni napjatosti na mezni stav pri cyklickem zatezavani // Strojnický Casopis. – 1964. – No. 5. – P. 419 – 442.
8. He J., Wang H., and Nan J. Fatigue strength evaluation from surface yielding data // Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct. – 1993. – **16**, No. 6. – P. 591 – 596.
9. Taira S. X-ray approach the study on machanical behavior of metals // Proc. Int. Conf. on Mechanical Behavior of Materials. – Kyoto, 1971. – Special Volume, P. 111–128.
10. Iida K. Comparison of fatigue strengths of steel under deflection controlled bending and strain controlled axial load cycling // Proc. of the Second Int. Conf. on Mechanical Behavior of Materials. – Boston, 1976. – P. 759 – 764.
11. Kotani S., Koibuchi K., and Kasai K. The effect of notches on cyclic stress-strain behavior and fatigue crack initiation // Proc. of the Second Int. Conf. on Mechanical Behavior of Materials. – Boston, 1976. – P. 606 – 610.
12. Ohuchida H., Nishioka A., and Nagao M. X-ray detection of fatigue damage in machine parts // Proc. Int. Conf. on Mechanical Behavior of Materials. – Kyoto, 1972. – **2**. – P. 100 – 110.
13. Новиков В. Ф., Тихонов В. Ф. К изучению усталостных изменений в металле при изгибных колебаниях магнитными и магнито-упругими методами // Пробл. прочности. – 1981. – № 5. – С. 109 – 112.
14. Троценко В. Т. Усталость металлов при неоднородном напряженном состоянии. Сообщ. 1. Методы оценки напряженного состояния и результаты исследования // Там же. – 2010. – № 2. – С. 5 – 24.
15. Троценко В. Т. Усталость металлов при неоднородном напряженном состоянии. Сообщ. 2. Методы анализа результатов исследования // Там же. – 2010. – № 3. – С. 5 – 28.
16. Троценко В. Т., Жабко Н. И. Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом нагружении в условиях неоднородного напряженного состояния. Сообщ. 1 // Там же. – 1981. – № 9. – С. 3 – 10.
17. Троценко В. Т., Жабко Н. И. Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом нагружении в условиях неоднородного напряженного состояния. Сообщ. 2 // Там же. – № 11. – С. 3 – 9.
18. Lane S. and Bomas H. Spectrum fatigue assessment of notched specimens based on the initiation and propagation of short cracks // Int. J. Fatigue. – 2006. – **28**, No. 9. – P. 1011 – 1021.



19. *McClafflin D. and Fatemi A.* Torsional deformation and fatigue of hardened steel including mean stress and stress gradient effects // *Ibid.* – 2004. – **26**, No. 7. – P. 773 – 784.
20. *Horwood G. P. and White D. J.* Strain localization in beams under cyclic plastic straining at room and elevated temperatures // *J. Strain Analysis.* – 1971. – **6**, No. 2. – P. 108 – 120.
21. *Karjlainen L. P.* Fatigue-hardening and high-cycle fatigue life of copper and Cu–Zn alloy under reversed bending // *Metal Sci.* – 1979. – Dec. – P. 571 – 575.
22. *Kwun S. I. and Fine M. E.* Fatigue macro crack growth in tempered HY80, HY130, and 4140 steels threshold and mid- $\Delta K$  range // *Fatigue Eng. Mater. Struct.* – 1980. – **3**, No. 4. – P. 367 – 382.
23. Троценко В. Т., Хамаза Л. А., Цыбанев Г. В. Методы ускоренного определения пределов выносливости металлов на основе деформационных и энергетических критериев. – Киев: Наук. думка, 1979. – 174 с.
24. Хэйвуд Р. Б. Проектирование с учетом усталости / Пер. с англ. – М.: Машиностроение, 1969. – 504 с.
25. *Forrest P. G. and Tapsell H. J.* Some experiment on the alternating stress fatigue of a mild steel and an aluminium alloy at elevated temperatures // *Proc. Inst. Mech. Eng.* – 1954. – **168**, No. 29. – P. 763 – 774.
26. *Forrest P. G.* Influence of plastic deformation on notch sensitivity in fatigue // *Proc. Int. Conf. on Fatigue of Metals.* – London, 1956. – P. 171 – 183.
27. *Nadai A.* Theory of Flow and Fracture of Solids. – New York; London: McGraw-Hill Book Co. Inc., 1950. – 359 p.
28. Сиднев В. И., Троценко В. Т. Методики приближенного построения диаграмм деформирования в условиях неоднородного напряженного состояния // *Завод. лаб.* – 1968. – № 7. – С. 859 – 862.
29. Троценко В. Т., Хамаза Л. А. Исследование влияния циклических неупругих деформаций на предел выносливости металлов при изгибе // *Пробл. прочности.* – 1976. – № 4. – С. 3 – 9.
30. Сиднев В. И., Писаренко Г. С., Троценко В. Т. Методика исследования деформаций в металле в процессе повторно-переменного ударного нагружения // *Завод. лаб.* – 1968. – № 4. – С. 469 – 471.
31. *James M. N., Dimitriou C., and Chandler H. D.* Low cycle fatigue lives of notched components // *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* – 1989. – **12**, No. 3. – P. 213 – 225.
32. *Troshchenko V. T.* Inelastic strain and hysteresis energy criteria for fatigue fracture of metals // *Proc. Int. Conf. on Mechanical Behavior of Materials.* – Kyoto, 1971. – **2**. – P. 420 – 430.

Поступила 23. 02. 2009