

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

УДК 539.4

Рассеяние характеристик усталости сталей и его анализ с учетом циклических неупругих деформаций

В. Т. Трощенко, Ю. И. Коваль, Е. И. Митченко

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

Исследованы закономерности рассеяния характеристик усталости и неупругости сталей 45 и 1Х13 при стационарном, ступенчатом и блочном нагружении. Показано, что использование неупругой деформации за цикл в качестве меры интенсивности накопления усталостного повреждения позволяет учитывать рассеяние числа циклов до разрушения и пределов выносливости и обосновать гипотезу суммирования усталостного повреждения.

Ключевые слова: усталость, неупругая деформация за цикл, рассеяние механических свойств, число циклов до разрушения, гипотеза суммирования повреждения.

Введение. Известно, что число циклов до разрушения при многоцикловом нагружении, в частности при ступенчатом и блочном, величины пределов выносливости металлов и сплавов имеют значительное рассеяние [1–3 и др.]. Важно исследовать закономерности этого рассеяния и обосновать характеристики интенсивности накопления усталостного повреждения, что позволило бы представить результаты исследования усталости металлов и сплавов без существенного рассеяния.

Перспективной характеристикой оценки интенсивности накопления усталостного повреждения на стадии рассеянного усталостного повреждения, под которой понимается стадия, когда нельзя выделить магистральную усталостную трещину, приводящую к окончательному разрушению образца или детали, является циклическая неупругая деформация [4, 5 и др.].

Исследования циклической неупругости (циклическая пластичность) в основном проводятся в области малоциклового усталости при низких частотах нагружения. Основное внимание при этом уделяется исследованию взаимосвязи между структурными изменениями в металле, приводящими, в частности, к возникновению усталостной трещины, и характеристиками циклической неупругости [6–8 и др.], а также обоснованию деформационных и энергетических критериев усталости с учетом в первую очередь среднего напряжения цикла, сложного напряженного состояния, режима нагружения [9–13 и др.]. В то же время при анализе многих классических закономерностей многоциклового усталости металлов и сплавов, как, например, значительное рассеяние числа циклов до разрушения и пределов выносливости, несоответствие результатов испытания при ступенчатом и блоч-

ном нагружении линейной гипотезе суммирования повреждений и т.д., результаты исследования неупругости не всегда используются.

В последнее время большое внимание уделяется трактовке процесса усталости металлов и сплавов как процесса развития усталостной трещины [14–17 и др.]. При всей перспективности таких подходов следует учитывать, что стадия зарождения усталостной трещины размером около 0,05 мм при многоцикловом нагружении составляет до 90% и более общей долговечности гладких образцов [18], поэтому процессы, проходящие на стадии рассеянного усталостного повреждения, интегральной характеристикой которых является циклическая неупругость, могут быть определяющими в закономерностях, которые наблюдаются при многоцикловой усталости металлов и сплавов.

С учетом вышеизложенного цель данной работы заключалась в рассмотрении с использованием результатов исследования сталей 45 и 1Х13 закономерностей рассеяния характеристик усталостной прочности, основываясь на представлении кривых усталости (как это широко распространено в технике) в координатах напряжение – число циклов до разрушения с привлечением для этого характеристик циклического неупругого деформирования сталей, которые отображают процессы на стадии рассеянного усталостного повреждения.

Методика исследования. Исследование усталости и неупругости металлов и сплавов проводилось при симметричном цикле растяжения–сжатия с частотой 36 Гц на установке, механическое нагружение в которой осуществлялось посредством кривошипного механизма с регулируемым на ходу эксцентриситетом. Диаметр рабочей части образца составлял 5 мм. Установкой управляли с помощью автоматизированной системы с компьютером, позволяющей реализовать стационарное, ступенчатое и блочное нагружение с контролированием напряжения, деформации и неупругой деформации.

В настоящем исследовании проводилось контролирование амплитуды напряжения. “Мягкий” режим нагружения принимался с учетом того, что большинство экспериментальных данных, характеризующих рассеяние числа циклов до разрушения и пределов выносливости, было получено при испытаниях, когда контролировались усилия или напряжения. Этот вид испытания является наиболее распространенным в инженерной практике. Подробное описание испытательной установки приведено в работах [19–21].

В качестве характеристики неупругого деформирования сталей принималась неупругая деформация за цикл, равная ширине петли гистерезиса в координатах напряжение–деформация [22–27].

Изменение сигналов напряжений и деформаций в образце иллюстрирует рис. 1. В случае если образец деформируется упруго (рис. 1,а), зависимость между напряжениями и деформациями будет соответствовать прямой линии, при неупругом деформировании (рис. 1,б) имеет место сдвиг фаз между напряжениями и деформациями, и зависимость в координатах напряжение–деформация будет представлять замкнутую кривую (петля гистерезиса), ширина которой равна неупругой деформации за цикл $\Delta \epsilon_n$ [20].

Изменение напряжений и деформаций во времени при многоцикловом нагружении может быть записано в виде

$$\begin{aligned}\sigma &= \sigma_a \sin \omega t; \\ \varepsilon &= \varepsilon_a \sin(\omega t - \varphi),\end{aligned}\tag{1}$$

где σ_a и ε_a – амплитуды соответственно напряжений и деформаций; t – время; φ – сдвиг фаз.

Неупругая деформация за цикл равна

$$\Delta\varepsilon_H = 2\varepsilon_a \sin \varphi.\tag{2}$$

Из зависимости (2) следует, что половина ширины петли гистерезиса будет равна деформациям, соответствующим нулевому значению напряжений.

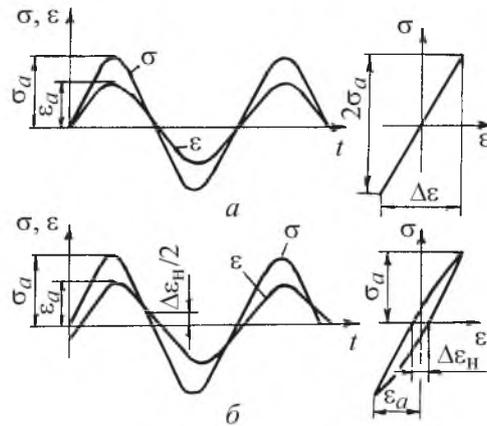


Рис. 1. Изменение сигналов напряжений и деформаций при упругом (а) и неупругом (б) деформировании.

Ранее была разработана система измерения неупругих деформаций путем сканирования с высокой частотой сигналов напряжений и деформаций во времени с использованием для их обработки соответствующих алгоритмов. Сигналы деформаций получали с тензодатчиков, наклеенных на преобразователь деформаций на рабочей части образца, сигналы напряжений – с тензодатчиков, расположенных на динамометре.

Преимуществом этого метода измерения неупругих деформаций при многоцикловом нагружении с высокой частотой является сравнительно простая обработка информации и возможность измерения неупругой деформации за цикл для исследуемых сталей в реальном масштабе времени при стационарном, ступенчатом и блочном нагружении.

Достоверность результатов измерения неупругих деформаций таким методом оценивалась путем их сравнения с данными, полученными при воспроизведении петель гистерезиса на экране осциллографа. Совпадение результатов было достаточно хорошим. Проведенный анализ погрешностей в измерении неупругих деформаций с учетом возможных погрешностей в оборудовании и аппаратуре показал, что они зависят от величины измеряемой деформации, при измерении неупругих деформаций $1 \cdot 10^{-4}$ погрешность составляет 5%.

Реализованные режимы нагружения ($a-z$) показаны на рис. 2, где $a - \sigma_a = \text{const}$; $b -$ многоступенчатое нагружение с непрерывным увеличением напряжений на ступенях с целью построения диаграмм циклического деформирования, что будет рассмотрено ниже; $в -$ двухступенчатое нагружение; $г -$ блочное нагружение с изменением в некоторых случаях неупругих деформаций на контрольной ступени K .

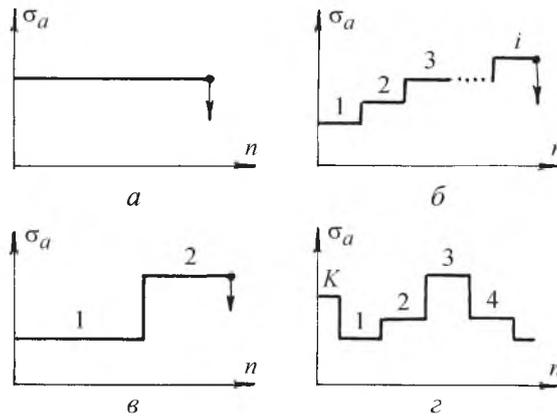


Рис. 2. Режимы нагружения образцов.

Материалы исследования. Исследовались углеродистая сталь 45 в состоянии поставки и после нормализации и хромистая сталь 1X13 после закалки и отпуска. Данные стали широко используются в машиностроении. Их механические свойства приведены в табл. 1. Образцы изготовляли по режиму, исключающему инициирование значительных остаточных напряжений в поверхностном слое. Особое внимание уделялось идентичности материала отдельных образцов исследуемых сталей при изготовлении больших партий образцов.

Т а б л и ц а 1

Механические свойства исследуемых сталей

Материал	Термическая обработка	$E \cdot 10^{-4}$, МПа	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %
Углеродистая сталь 45(I) (C – 0,42...0,50%, Mn – 0,25...0,50%)	Нормализация при 1113...1133 К, 30 мин	20,9	580	316	25,6	47,4
Углеродистая сталь 45(II) (C – 0,42...0,50%, Mn – 0,25...0,50%)	Состояние поставки	21	716	468	22,8	46,9
Хромистая сталь 1X13 (Cr – 12...14%, C – 0,09...0,15%)	Закалка при 1273 К, 2 часа, воздух, отпуск при 1033 К, 2 часа, воздух	21,6	620	390	25,8	67,3

Кинетика изменения неупругих деформаций. Типичные диаграммы изменения неупругих деформаций $\Delta\varepsilon_n$ от числа циклов нагружения n при различных амплитудах напряжений σ_a для сталей 45(I), 45(II) и 1X13 приведены на рис. 3. При анализе диаграмм следует учитывать, что на них не представлены значения неупругих деформаций, которые имели место в процессе повышения напряжений от нуля до заданной величины в течение нескольких тысяч циклов.

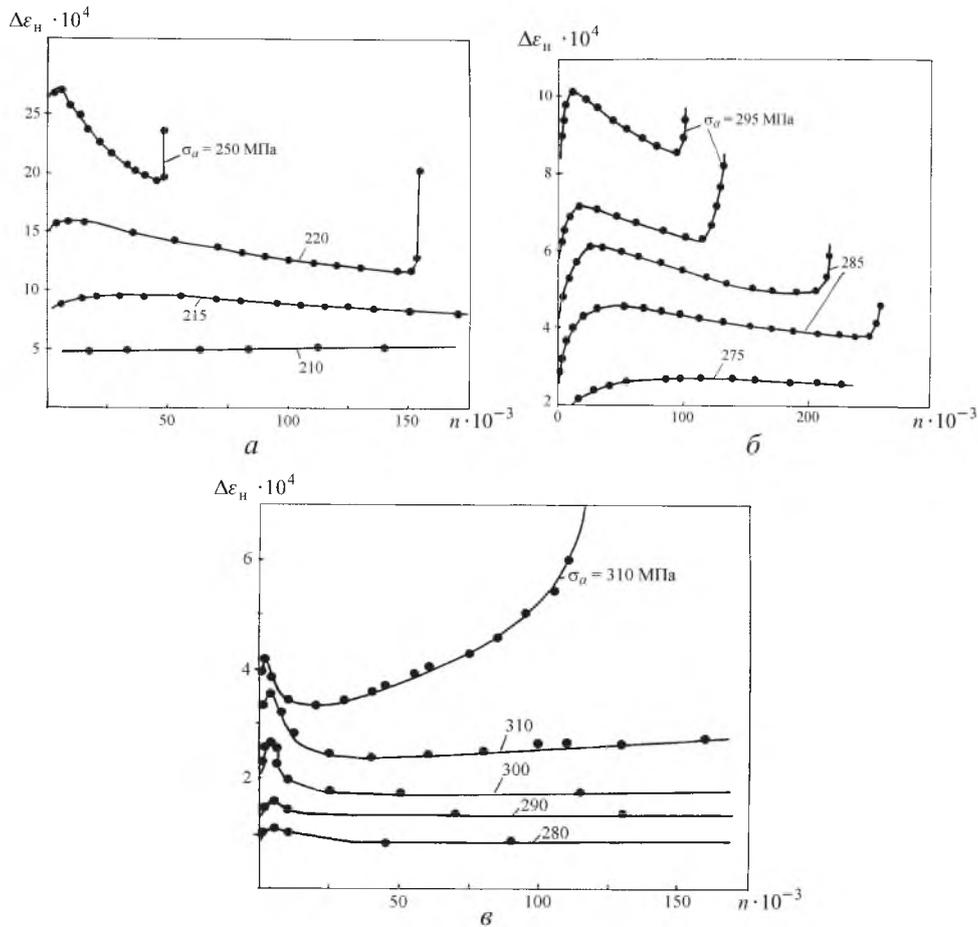


Рис. 3. Изменение неупругих деформаций при циклическом нагружении для сталей 45(I) (а), 45(II) (б) и 1X13 (в).

Все исследованные материалы относятся к циклически разупрочняющимся сталям, т.е. их циклические диаграммы деформирования по сравнению со статическими смещаются в область более низких напряжений.

На зависимостях $\Delta\varepsilon_n - n$ (рис. 3) можно выделить три периода: в первом периоде для всех сталей с увеличением числа циклов нагружения отмечается рост неупругих деформаций, часть этого периода реализуется в процессе увеличения нагрузки, во втором периоде может наблюдаться как разупрочнение, так и циклическое упрочнение, в третьем периоде при напряжениях выше предела выносливости на базе 10^7 цикл для всех исследуемых сталей.

двумя стаями имеет место рост неупругих деформаций. При дальнейшем анализе в качестве характерной величины принималась неупругая деформация, соответствующая переходу от первого ко второму периоду [21, 23–27].

Этот выбор основывался на следующих соображениях. Во-первых, данные, приведенные на рис. 3, свидетельствуют, что в области напряжений выше предела выносливости процесс изменения неупругих деформаций весьма сложный, и в этом случае трудно говорить о стадии стабилизации. Во-вторых, наиболее четко выражены величины неупругих деформаций, соответствующие переходу от первого ко второму периоду. И, в-третьих, принятая характерная неупругая деформация за цикл проявляется после сравнительно небольшого числа циклов нагружения, что важно при измерении величины неупругой деформации при ступенчатом и блочном нагружении.

Испытания нескольких партий идентичных образцов при одинаковых напряжениях показали существенное рассеяние неупругих деформаций за цикл. В качестве примера на рис. 4 показано рассеяние неупругих деформаций за цикл для стали 45(I). Как видно, для одного и того же материала при одних и тех же напряжениях величина неупругой деформации за цикл может изменяться в два-три раза. Такой результат свидетельствует о специфике неупругого деформирования металлов и сплавов при многоцикловом нагружении и ее отличии от процессов, проходящих при малоцикловом нагружении, когда роль локального неупругого деформирования снижается, и определяющими являются процессы циклической пластичности, охватывающие, по существу, весь объем металла. Это приводит к существенно меньшему рассеянию величины циклической пластичности и числа циклов до разрушения, чем это имеет место при многоцикловой усталости.

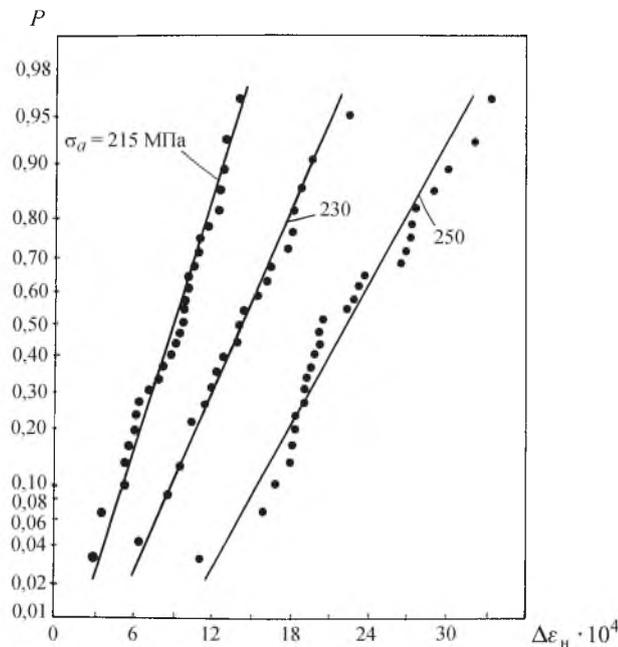


Рис. 4. Распределение величин неупругих деформаций для стали 45(I) при различных напряжениях.

Рассеяние числа циклов до разрушения при стационарном нагружении. Кривые усталости исследуемых сталей строили в координатах $\sigma_a - \lg N$ по результатам испытания партий образцов (до 25 образцов) при нескольких уровнях напряжений (рис. 5). За число циклов до разрушения принимали число циклов при полном разрушении образца. В процессе этих испытаний измеряли также неупругие деформации, что дало возможность построить кривые усталости в координатах $\lg \Delta \varepsilon_n - \lg N$ (рис. 5). На рис. 5 нанесены не все экспериментальные точки в связи с трудностью их графического представления [21, 23–27].

Уравнения кривых усталости в координатах $\sigma_a - \lg N$ и $\lg \Delta \varepsilon_n - \lg N$, соответствующие 50%-ной вероятности разрушения, пределы выносливости на базе 10^7 цикл σ_{-1} и неупругие деформации $(\Delta \varepsilon_n)_{\sigma_{-1}}$, соответствующие пределам выносливости исследуемых сталей, приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Результаты исследования усталости сталей 45 и 1X13

Сталь	Количество испытанных образцов при построении кривой усталости	σ_{-1} , МПа	Уравнение кривой усталости	$(\Delta \varepsilon_n)_{\sigma_{-1}}$, мм/мм
45(I)	51	210	$\lg N = 10,42 - 0,023\sigma_a$ $\lg N = -0,15 - 1,85 \lg \Delta \varepsilon_n$	$5,00 \cdot 10^{-4}$
45(II)	77	270	$\lg N = 13,24 - 0,02677\sigma_a$ $\lg N = -0,558 - 1,47 \lg \Delta \varepsilon_n$	$1,85 \cdot 10^{-4}$
1X13	47	270	$\lg N = 17,29 - 0,038\sigma_a$ $\lg N = -2,42 - 2,20 \lg \Delta \varepsilon_n$	$0,70 \cdot 10^{-4}$

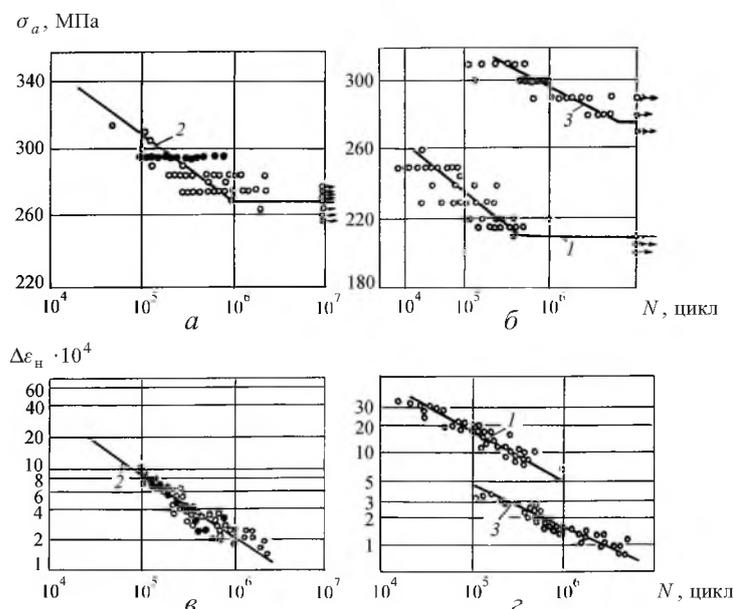


Рис. 5. Кривые усталости сталей 45(I) (1), 45(II) (2) и 1X13 (3) в координатах $\sigma_a - \lg N$ (а, б) и $\lg \Delta \varepsilon_n - \lg N$ (в, г).

Результаты, представленные на рис. 5, показывают, что если их записать в координатах $\lg \Delta \varepsilon_n - \lg N$, а не в $\sigma_a - \lg N$, то рассеяние числа циклов до разрушения существенно ниже. Интересно отметить, что экспериментальные точки, полученные при $\sigma_a = \text{const}$ и $\sigma_a \neq \text{const}$, ложатся на единую кривую в координатах $\lg \Delta \varepsilon_n - \lg N$. В качестве примера для стали 45(II) темные точки, соответствующие условиям испытания $\sigma_a = \text{const}$, нанесены на кривую $\lg \Delta \varepsilon_n - \lg N$.

То, что все экспериментальные точки, полученные при испытании каждой из исследуемых сталей при $\sigma_a = \text{const}$ и $\sigma_a \neq \text{const}$, ложатся, с весьма малым рассеянием, на единые кривые в координатах $\lg \Delta \varepsilon_n - \lg N$ дает основание полагать, что циклические неупругие деформации как критерий интенсивности накопления повреждений при многоцикловом нагружении учитывают не только величину действующих напряжений, но и свойства индивидуальных образцов, которые, как было показано выше, имеют существенное рассеяние, с одной стороны, числа циклов до разрушения при заданном напряжении (рис. 5) и, с другой – величины неупругих деформаций при постоянном напряжении (рис. 3).

Рассеяние пределов выносливости. Методика определения пределов выносливости по характеристикам неупругих деформаций базируется на установлении соответствия между пределами выносливости и неупругими деформациями, соответствующими пределам выносливости $(\Delta \varepsilon_n)_{\sigma_{-1}}$ исследуемого материала. Для реализации методики необходимо располагать диаграммами циклического деформирования в координатах $\Delta \varepsilon_n - \sigma_a$ и величинами $(\Delta \varepsilon_n)_{\sigma_{-1}}$ для исследуемого материала.

Диаграммы циклического деформирования могут быть построены по результатам испытания нескольких образцов при $\sigma_a = \text{const}$ и представлении их в координатах $\Delta \varepsilon_n - n$ (рис. 3) с последующим установлением по этим диаграммам характерных значений $\Delta \varepsilon_n$ и соответствующих им напряжений σ_a [25, 27]. Возможно построение диаграмм циклического деформирования также по результатам испытания одного образца при многоступенчатом нагружении [20]. В этом случае важно выбрать режим нагружения, чтобы на каждой ступени обнаружить характерные значения неупругих деформаций и исключить, по возможности, влияние истории нагружения.

Такой режим нагружения (рис. 2,б) был разработан для стали 45(II) [25]. Величины напряжений на каждой из ступеней для этого режима приведены в табл. 3, число циклов нагружения на ступени составляло $5 \cdot 10^4$. В соответствии с данным режимом каждый из 25 исследуемых образцов ступенчато нагружали с фиксированием на каждой ступени величины напряжений σ_a и характерных неупругих деформаций $\Delta \varepsilon_n$.

Результаты испытаний в виде диаграмм $\sigma_a - \Delta \varepsilon_n$ приведены на рис. 6 для стали 45(II), где показаны лишь некоторые из 25 полученных зависимостей. Пределы выносливости каждого из образцов согласно изложенной выше методике равны напряжениям на диаграммах $\sigma_a - \Delta \varepsilon_n$, для которых неупругая деформация соответствует характерной величине $(\Delta \varepsilon_n)_{\sigma_{-1}}$ исследуемого материала.

Т а б л и ц а 3

Результаты исследования при ступенчатом и блочном нагружении

Сталь	Режим нагружения	Количество образцов	Напряжение, МПа	$\frac{a_{\min} \dots a_{\max}}{a_{\text{ср}}}$	$\frac{a_{\min}^* \dots a_{\max}^*}{a_{\text{ср}}^*}$	σ_k , МПа	
45(I)	Двухступенчатый (рис. 2,б)	7	215/250	$\frac{0,80 \dots 5,95}{2,74}$	$\frac{1,02 \dots 1,51}{1,28}$	–	
		4	215/230	$\frac{0,69 \dots 3,24}{1,79}$	$\frac{1,08 \dots 1,48}{1,27}$	–	
		7	230/250	$\frac{0,93 \dots 2,43}{1,79}$	$\frac{0,95 \dots 1,95}{1,27}$	–	
		7	250/215	$\frac{1,26 \dots 2,24}{1,60}$	$\frac{0,67 \dots 0,99}{0,88}$	–	
		11	250/230	$\frac{0,89 \dots 3,64}{1,86}$	$\frac{1,03 \dots 1,55}{1,34}$	–	
		4	230/215	$\frac{0,83 \dots 2,56}{1,78 \dots 3,70}$	$\frac{0,80 \dots 1,17}{1,03 \dots 1,44}$	–	
	Трехступенчатый (рис. 2,б)	4	215/230/250	$\frac{1,32 \dots 3,64}{1,78 \dots 3,70}$	$\frac{1,13 \dots 1,40}{1,03 \dots 1,44}$	–	
		3	250/230/215	$\frac{1,08 \dots 2,87}{1,78 \dots 3,70}$	$\frac{0,99 \dots 1,55}{1,03 \dots 1,44}$	–	
		4	215/250/230	$\frac{1,78 \dots 3,70}{1,78 \dots 3,70}$	$\frac{1,03 \dots 1,44}{1,03 \dots 1,44}$	–	
	1X13	Двухступенчатый (рис. 2,б)	4	280/290	$\frac{0,37 \dots 2,09}{0,71}$	$\frac{1,17 \dots 1,45}{0,78}$	–
3			280/300	$\frac{0,74 \dots 1,99}{0,71}$	$\frac{1,04 \dots 1,50}{0,78}$	–	
3			280/310	$\frac{1,39 \dots 4,07}{0,71}$	$\frac{0,79 \dots 1,50}{0,78}$	–	
3			290/300	$\frac{1,38 \dots 2,78}{0,71}$	$\frac{0,68 \dots 1,10}{0,78}$	–	
2			310/280	$\frac{0,55 \dots 1,38}{0,71}$	$\frac{0,70 \dots 0,80}{0,78}$	–	
7			300/280	$\frac{0,33 \dots 2,78}{0,71}$	$\frac{0,68 \dots 1,10}{0,78}$	–	
Блочный (рис. 2,з)		13	280/300	$\frac{0,35 \dots 1,02}{0,71}$	$\frac{0,65 \dots 1,20}{0,78}$	–	
		3	280/310	$\frac{0,80 \dots 0,91}{0,71}$	$\frac{0,68 \dots 0,74}{0,78}$	–	
		4	290/310	$\frac{1,57 \dots 2,11}{0,71}$	$\frac{0,59 \dots 0,68}{0,78}$	–	
		3	280/290/310	$\frac{0,76 \dots 1,72}{0,71}$	$\frac{1,20 \dots 1,49}{0,78}$	–	
45(II)		Много-ступенчатый (рис. 2,б)	25	240/245/255/265 ...	$\frac{0,32 \dots 7,77}{2,19}$	$\frac{0,60 \dots 2,17}{0,93}$	0
			25	275/285/295/285	$\frac{0,43 \dots 3,77}{1,40}$	$\frac{0,85 \dots 2,85}{1,42}$	295
		Блочный (рис. 2,з)	25	275/285/295/285	$\frac{0,32 \dots 6,90}{2,18}$	$\frac{0,87 \dots 3,88}{1,94}$	275

Для стали 45(II), как это следует из данных табл. 2, неупругая деформация, соответствующая пределу выносливости на базе 10^7 цикл, равна $(\Delta \epsilon_n)_{\sigma_{-1}} = 1,85 \cdot 10^{-4}$ мм/мм. На рис. 6 этот уровень неупругой деформации обозначен вертикальной штриховой линией. В соответствии с методикой согласно приведенным на рис. 6 результатам имеем 25 значений пределов

выносливости для стали 45(II). Значение предела выносливости, полученное для одного из образцов, обозначено $(\sigma_{-1})_1$ – рис. 6. Определенные таким образом средние значения пределов выносливости $\bar{\sigma}_{-1}$ и их среднеквадратические отклонения $s_{\sigma_{-1}}$ сравнивали с результатами исследования пределов выносливости стали 45(II) с использованием метода “вверх–вниз” [1] и метода Литтла [28] (табл. 4). Из данных, приведенных в табл. 4, следует, что о средней величине предела выносливости и его рассеянии можно судить по результатам выполненного выше анализа.

Т а б л и ц а 4

Параметры распределения пределов выносливости стали 45(II)

Метод	Количество образцов	Параметры распределения предела выносливости		Среднеквадратические ошибки оценок	
		$\bar{\sigma}_{-1}$, МПа	$s_{\sigma_{-1}}$, МПа	$\delta_{\sigma_{-1}}$, МПа	δ , МПа
Деформационный	25	271,9	11,9	2,38	1,68
“Вверх–вниз”	16	272,5	7,2	3,04	4,74
Литтла	5	269,2	–	–	–

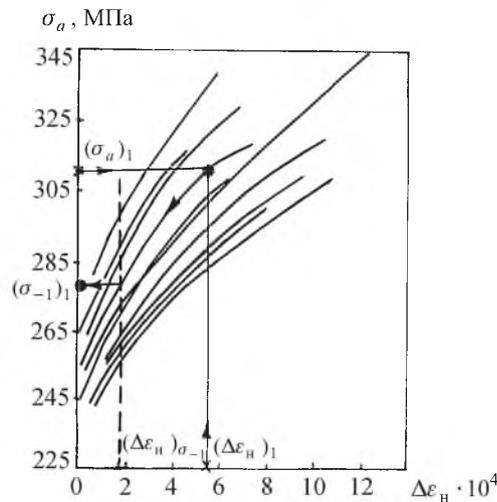


Рис. 6. Зависимости $\sigma_a - \Delta\epsilon_n$, полученные при ступенчатом нагружении образцов стали 45(II).

Идентификация усталостных свойств индивидуальных образцов.

Приведенные выше результаты позволяют обосновать методику определения предела выносливости и построения наклонного участка кривой усталости в координатах $\sigma_a - \lg N$ для индивидуального образца, в том числе испытываемого при ступенчатом или блочном нагружении, по результатам замера неупругой деформации на первой или контрольной ступени нагружения, если ее уровень на первой ступени незначителен. Естественно, эта

кривая усталости будет характеризовать не среднюю кривую усталости (кривую 50%-ной вероятности разрушения) исследуемого материала, а лишь одну из них, расположенную в зоне рассеяния.

Методика определения предела выносливости состоит в следующем. По заранее построенной для исследуемого материала совокупности кривых в координатах $\sigma_a - \Delta\epsilon_n$ (рис. 6) с использованием значений $(\sigma_a)_1$ и $(\Delta\epsilon_n)_1$, полученных на первой ступени нагружения образца, выбирается кривая, которая соответствует этим значениям. Предел выносливости $(\sigma_{-1})_1$ будет соответствовать напряжениям пересечения полученной кривой с такой (обозначена на рис. 6 вертикальной штриховой линией $(\Delta\epsilon_n)_{\sigma_{-1}} = \text{const}$), соответствующей данному материалу.

Число циклов до разрушения при соответствующих напряжениях для рассматриваемого индивидуального образца может быть определено также с использованием представленной на рис. 6 информации и тех же замеров на первой ступени нагружения. В этом случае по найденной для рассматриваемого образца зависимости $\sigma_a - \Delta\epsilon_n$ для выбранных значений σ_a определяются величины $\Delta\epsilon_n$ и для них, в соответствии с уравнениями $\lg \Delta\epsilon_n - \lg N$ (табл. 2), – число циклов до разрушения.

Ранее было показано [26], что идентификация усталостных свойств индивидуальных образцов может быть выполнена также на основе анализа результатов измерения неупругой деформации партий образцов при нескольких уровнях напряжений. На рис. 7 приведены зависимости $\Delta\epsilon_n - \sigma_a$, построенные по результатам таких измерений, каждая из которых соответствует одним и тем же вероятностям P неупругой деформации при разных напряжениях. Измерив величины $\Delta\epsilon_n$ и σ_a на контрольной ступени нагружения, можно выбрать соответствующую исследуемому образцу зависимость и по рассмотренным методикам найти число циклов до разрушения, соответствующее заданным напряжениям. По сути два метода являются идентичными.

Рассеяние долговечностей при ступенчатом и блочном нагружении.

Результаты исследования при ступенчатом и блочном нагружения приведены в табл. 3. Там же указаны режимы нагружения в соответствии с рис. 2, количество образцов, испытанных при конкретном режиме нагружения, амплитуды напряжения и их последовательность при ступенчатом и блочном нагружении. Число циклов при ступенчатом и блочном нагружении выбиралось исходя из того, чтобы, во-первых, на ступени нагружения можно было определить характерную величину неупругой деформации, во-вторых, при ступенчатом нагружении число циклов до разрушения было приблизительно одинаковым и, в-третьих, при блочном нагружении число блоков до разрушения было не меньше десяти.

По результатам испытаний рассчитывали величины относительного накопленного повреждения a в соответствии с модифицированной линейной гипотезой суммирования повреждений:

$$\sum_1^s \frac{n_i}{N_i} = a, \quad (3)$$

где n_i – число циклов нагружения при напряжении σ_{a_i} ; N_i – число циклов до разрушения при напряжении σ_{a_i} , определенное по кривой усталости при 50%-ной вероятности разрушения; s – число ступеней нагружения. Для линейной гипотезы суммирования повреждений $a = 1$.

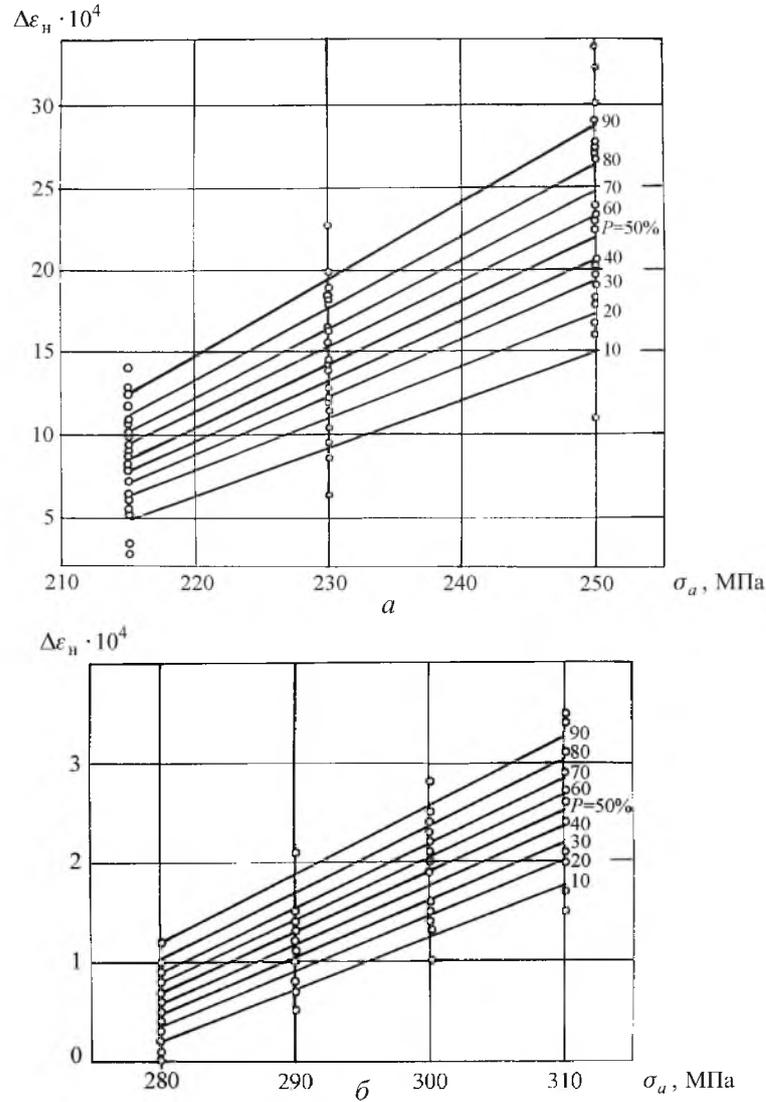


Рис. 7. Зависимости $\Delta \epsilon_n - \sigma_a$ для сталей 45(I) (а) и 1X13 (б).

В табл. 3 для исследуемых материалов и режимов нагружения приведены интервалы величин a , рассчитанные в соответствии с формулой (3). Для партий образцов, когда испытывалось семь и более образцов, под чертой даны значения средних величин $a_{ср}$. Кроме того, приведены интервалы значений относительных повреждений a^* , а также $a_{ср}^*$, рассчитанные по формуле

$$\sum_1^s \frac{n_i}{(N_i)_д} = a^* , \quad (4)$$

где $(N_i)_д$ – число циклов до разрушения при σ_{a_i} , полученное для индивидуального образца при ступенчатом или блочном нагружении. При расчете величины $(N_i)_д$ для сталей 45(I) и 1X13 использовали результаты, приведенные на рис. 7, для стали 45(II) – на рис. 6.

На рис. 8 более подробно представлены результаты исследования стали 45(II) (табл. 3) при многоступенчатом (А) и блочном ($\sigma_k = 295$ МПа (Б) и $\sigma_k = 275$ МПа (В)) нагружении [27].

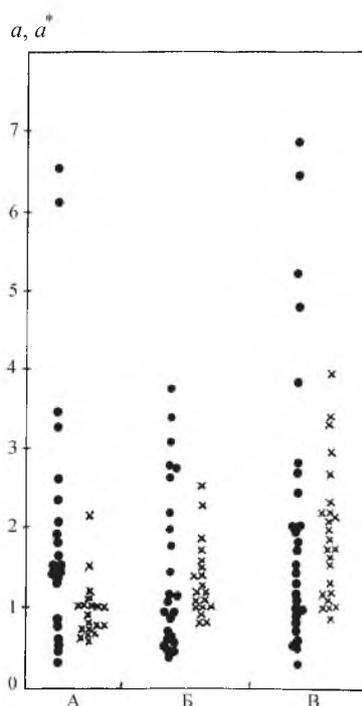


Рис. 8. Рассеяние величин a (●) и a^* (×) для стали 45(II).

Анализ данных, приведенных в табл. 3 и на рис. 8, показал, что значительное несоответствие между экспериментальными результатами и полученными по линейной гипотезе суммирования повреждений объясняется несоответствием 50%-ной кривой усталости кривым усталости индивидуальных образцов. Учет этого фактора позволяет существенно уменьшить диапазон рассеяния величин относительного накопленного повреждения и приблизить их среднее значение к единице.

Улучшения соответствия этих данных можно достичь, если учитывать изменение интенсивности накопления усталостного повреждения на различных ступенях ($\sigma_a = \text{const}$) ступенчатого и блочного нагружения.

Проведенные исследования свидетельствуют, что неупругая деформация за цикл, которая в данной работе рассматривается как характеристика

интенсивности накопления усталостного повреждения, значительно зависит от истории нагружения. На рис. 9 показано изменение величины $\Delta\epsilon_n$ для стали 45(II) на разных ступенях блочного нагружения для различных блоков нагружения. Существенно сказывается история нагружения и при ступенчатом нагружении.

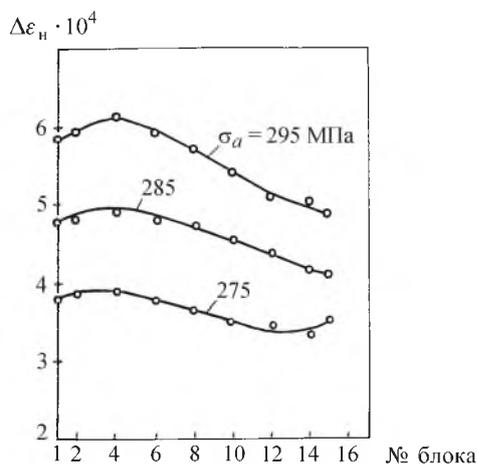


Рис. 9. Изменение неупругих деформаций на разных ступенях блочного нагружения стали 45(II).

В качестве характеристики изменения интенсивности накопления усталостных повреждений на ступени принято отношение

$$b = \frac{(\Delta\epsilon_n)_n}{(\Delta\epsilon_n)_в}, \quad (5)$$

где $(\Delta\epsilon_n)_n$ – неупругая деформация при напряжении σ_a при стационарном нагружении; $(\Delta\epsilon_n)_в$ – то же с учетом истории нагружения.

С учетом приведенных результатов гипотеза суммирования повреждений может быть записана в виде [21]

$$\sum_1^s \frac{n_i}{b_i(N_i)_д} = a^{**}, \quad (6)$$

Анализ результатов исследования показал, что величины a^{**} , рассчитанные в соответствии с формулой (6), для рассматриваемых сталей и режимов нагружения близки к единице. Наилучшее соответствие получено при ступенчатом нагружении.

На рис. 10 приведены результаты исследования стали 45(I) при различных режимах однократных перегрузок в координатах a , a^* , a^{**} – $a_{ср}$, $a_{ср}^*$, $a_{ср}^{**}$. Видно, что использование при расчетах относительного повреждения зависимости (6), которая учитывает рассеяние свойств индивидуальных образцов и историю нагружения, позволяет существенно уменьшить

рассеяние и получить значения относительного повреждения при разрушении, близкие к единице. Число циклов до разрушения при ступенчатом и блочном нагружении можно найти, как это анализировалось в работах [29–31 и др.], с использованием линейной гипотезы суммирования повреждений, если в формулу (3) подставлять числа циклов до разрушения N_i , определенные по зависимостям $\lg \Delta \epsilon_n - \lg N$ (рис. 5) с помощью значений неупругих деформаций, измеренных на каждой ступени ступенчатого или блочного нагружения.

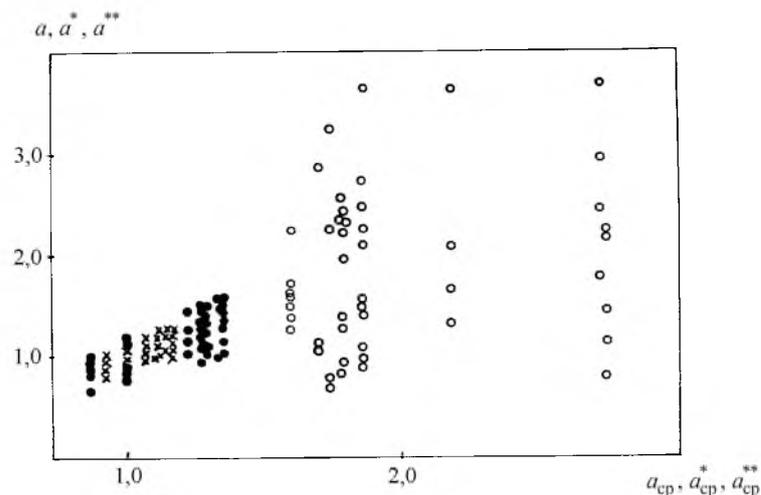


Рис. 10. Величины a (○), a^* (●) и a^{**} (×) для стали 45(I) при испытаниях при различных режимах однократной перегрузки.

Такой подход в данной работе детально не рассматривался.

Выводы

1. Разработана методика исследования и обработки в реальном масштабе времени результатов исследования неупругой деформации металлов и сплавов при стационарном, ступенчатом и блочном нагружении с использованием в качестве характеристики неупругости величины деформации, соответствующей нулевому значению напряжений, которая равна половине ширины петли гистерезиса в координатах напряжение–деформация.

2. Исследованы характеристики усталости и неупругости углеродистой и хромистой сталей при стационарном, ступенчатом и блочном нагружении с учетом рассеяния этих характеристик.

3. Показано, что если представлять результаты исследования в координатах $\lg \Delta \epsilon_n - \lg N$, а не в $\sigma_a - \lg N$, то рассеяние числа циклов до разрушения существенно меньше, при этом экспериментальные точки в координатах $\lg \Delta \epsilon_n - \lg N$, полученные при испытаниях по режимам $\sigma_a = \text{const}$ и $\sigma_a \neq \text{const}$, ложатся на единые кривые. Это свидетельствует о том, что неупругая деформация за цикл позволяет учитывать влияние на число циклов до разрушения не только уровня действующих напряжений, но и особенностей сопротивления усталости материала индивидуальных образцов.

4. Разработана методика определения пределов выносливости по диаграммам циклического деформирования в координатах $\sigma_a - \Delta \epsilon_n$ при ступенчатом нагружении. Показано, что средние значения пределов выносливости стали 45(II) и их рассеяние, определенные по диаграммам циклического деформирования, соответствуют результатам, которые получены для этой же стали по известному методу “вверх–вниз”.

5. Разработана и обоснована методика построения кривых усталости индивидуальных образцов по результатам замера неупругих деформаций на первой (контрольной) ступени ступенчатого или блочного нагружения.

6. Показано, что рассеяние величин относительного накопленного повреждения при разрушении при ступенчатом и блочном нагружении, рассчитанных в соответствии с формулой (3), может быть существенно меньше, если в расчетах по этой формуле использовать не кривую усталости, соответствующую 50%-ной вероятности разрушения, как это делается обычно, а кривые усталости индивидуальных образцов, построенные по разработанной методике.

7. Дополнительное снижение рассеяния величин относительного накопленного повреждения при разрушении может быть достигнуто, если учитывать изменение интенсивности накопления усталостного повреждения на различных ступенях нагружения ($\sigma_a = \text{const}$), используя в качестве меры интенсивности накопления усталостного повреждения неупругую деформацию за цикл.

8. Предложена и обоснована гипотеза суммирования повреждений, учитывающая рассмотренные выше факторы.

Резюме

Досліджено закономірності розсіювання характеристик втоми і непружності сталей 45 та 1X13 при стаціонарному, східчастому і блочному навантаженні. Показано, що використання непружної деформації за цикл як міри інтенсивності накопичення пошкодження від втоми дозволяє враховувати розсіювання числа циклів до руйнування і границь витривалості та обґрунтувати гіпотезу підсумовування пошкодження від втоми.

1. Вейбулл В. Усталостные испытания и анализ их результатов. – М.: Металлургия, 1965. – 312 с.
2. Schijve J. Statistical distribution functions and fatigue of structures // Int. J. Fatigue. – 2005. – 27, No. 9. – P. 1033 – 1039.
3. Schijve J. Fatigue predictions and scatter // Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct. – 1994. – 17. – P. 381 – 396.
4. Klesnil M. and Lukas P. Fatigue of Metallic Materials. – Prague: Academia, 1980. – 239 p.
5. Троценко В. Т. Рассеянное усталостное повреждение металлов и сплавов // Пробл. прочности. Сообщ. 1. – 2005. – № 4. – С. 5 – 32; Сообщ. 2. – № 5. – С. 5 – 29; Сообщ. 3. – 2006. – № 1. – С. 5 – 31.

6. *Basic Mechanism in Fatigue of Metals* // Eds. P. Lukas and J. Polak. – Prague: Academia, 1988. – 440 p.
7. *Mughrabi Y. and Wang R.* Cyclic Stress-strain response and high-cycle fatigue behavior of copper polycrystals // *Basic Mechanism in Fatigue of Metals* / Eds. P. Lukas and J. Polak. – Prague: Academia, 1988. – P. 1 – 14.
8. *Buque C.* Persistent slip bands in cyclically deformed nickel polycrystals // *Int. J. Fatigue*. – 2001. – **23**. – P. 459 – 466.
9. *Brown M. W. and Miller K. J.* Biaxial cyclic deformation behavior of steels // *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* – 1979. – **1**, No. 1. – P. 93 – 106.
10. *Glinka G., Shen G., and Plumtree L.* A multiaxial fatigue strain energy density parameter related to the fracture plane // *Ibid.* – 1995. – **18**. – P. 37 – 96.
11. *Morrow J.* Cyclic plastic energy and fatigue of metals // *ASTM STP 378*. – P. 45 – 87.
12. *Purk J. and Nelson D.* Evaluation of an energy-based approach and critical plane approach for predicting constant amplitude multiaxial fatigue life // *Int. J. Fatigue*. – 2000. – **22**, No. 1. – P. 23 – 39.
13. *Han C., Cgen X., and Kim K. S.* Evaluation of multiaxial fatigue criteria under irregular loading // *Ibid.* – 2002. – **24**, No. 9. – P. 913 – 922.
14. *Разрушение*. В 7 т. / Под ред. Г. Либовица. – М.: Мир, 1973.
15. *Handbook of Fatigue Crack Propagation in Metallic Structures* / Ed. A. Carpinteri. – Amsterdam: Elsevier, 1994. – 1764 p.
16. *Механика разрушения и прочность материалов*. Справочное пособие. В 4 т. / Под ред. В. В. Панасюка. – Киев: Наук. думка, 1988.
17. *Черепанов Г. П.* Механика хрупкого разрушения. – М.: Наука, 1974. – 640 с.
18. *Manson S. S.* Fatigue. A complex subject – some simple approximations // *Exp. Mech.* – 1965. – No. 7. – P. 193 – 226.
19. *Трощенко 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.
20. *Трощенко В. Т.* Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом нагружении. – Киев: Наук. думка, 1981. – 343 с.
21. *Трощенко В. Т., Коваль Ю. И.* Закономерности накопления усталостного повреждения в сталях 45 и 1Х13 в условиях программного изменения нагрузки // *Пробл. прочности*. – 1973. – № 12. – С. 9 – 15.
22. *Troshchenko V. T. and Dragan V. I.* Laws of plastic strain and fatigue fracture of metals in torsion // *Strength Mater.* – 1982. – **14**, No. 5. – P. 569 – 576.
23. *Troshchenko V. T.* High-cycle fatigue and inelasticity of metals // *Multiaxial Fatigue and Design (ESIS21)* / Eds. A. Pineau, G. Cailletaud, and T. E. Lindley. – London, 1996. – P. 335 – 348.

24. *Troshchenko V. T.* Interrelation between inelasticity and high-cyclic fatigue of metals. *Advances in fracture research // Proc. of the Ninth Int. Conf. on Fracture (ICF-9)*. – Sydney, 1997. – **3**. – P. 1261 – 1273.
25. *Коваль Ю. И., Митченко Е. И.* Ускоренная оценка параметров распределения пределов выносливости // *Пробл. прочности*. – 1984. – № 1. – С. 15 – 19.
26. *Коваль Ю. И.* Кинетика изменения неупругих циклических деформаций в сталях 45 и 1Х13 при стационарном и программном нагружении // *Там же*. – 1974. – № 3. – С. 14 – 19.
27. *Трощенко В. Т., Митченко Е. И.* Прогнозирование долговечности при программном нагружении с учетом рассеяния свойств // *Там же*. – 1984. – № 10. – С. 3 – 8.
28. *Little R. E.* Estimating the median fatigue limit for very small up-and-down quantal response tests and for S-N data with runouts. – *Probabilistic Aspects of Fatigue, ASTM STP*. – 1972. – No. 511. – P. 29 – 47.
29. *Fameti A. and Yang L.* Cumulative fatigue damage and life prediction theories: A survey of the state of the art for homogeneous materials // *Int. J. Fatigue*. – 1998. – **20**, No. 1. – P. 9 – 34.
30. *Polak J. and Klesnil M.* Cyclic fatigue life in variable amplitude loading // *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* – 1979. – **1**, No. 1. – P. 123 – 133.
31. *Kliman V.* Fatigue life prediction for materials under programmable loading using the cyclic stress-strain properties // *Mater. Sci. Eng.* – 1984. – **68**. – P. 1 – 10.

Поступила 24. 11. 2006