

## О применении принципа базовых соотношений для анализа закономерностей циклического деформирования металлов и сплавов

В. В. Кривенюк, Л. А. Заслоцкая

Институт проблем прочности НАН Украины, Киев, Украина

*На примере анализа более 112 диаграмм циклического деформирования сталей и сплавов показано, что использование универсальных характеристик наклонов для каждого из 12 интервалов изменения циклов нагружения позволяет уменьшить стандартное отклонение по сравнению с методом Мэнсона более чем в два раза.*

**Ключевые слова:** прогнозирование малоциклового усталости, принцип базовых соотношений, универсальные характеристики наклонов, стандартное отклонение.

В работах [1, 2] отмечались общие закономерности вида

$$y = C_i x^{n_i}, \quad i = 1, 2, 3 \quad (1)$$

между характеристиками нагружения и сопротивления нагружению металлических материалов при различных условиях термосилового воздействия, в частности при исследовании ползучести и длительной прочности, мало- и многоциклового усталости, трещиностойкости и т.п. Целью сравнительного анализа зависимостей (1) для таких условий нагружения является уточнение взаимосвязей между ними, степени их общности.

В настоящей работе предпринята попытка обосновать, что вывод в работах [1, 2], полученный на основе результатов обширных исследований, следует рассматривать как важное научное положение, которое, однако, требует некоторых уточнений и дополнений.

К выводу о необходимости уточнений и дополнений приводят результаты исследований длительной прочности на основе принципа базовых соотношений или метода базовых диаграмм (МБД) [3–5]. В работах [3–5] в противоположность обычному акцентированию внимания лишь на общих закономерностях обосновывается также необходимость дополнительного довольно тщательного учета отклонений от них. Более того, применение МБД показывает, что эффективность учета положения об общности закономерностей типа (1) находится по целому ряду причин в прямой зависимости от четкости учета таких отклонений.

В плане обоснования важности как утверждений авторов [1, 2], так и сделанных выше замечаний рассмотрим суть МБД и некоторые результаты исследований на его основе. Затем проиллюстрируем применимость принципа базовых соотношений для анализа закономерностей циклического деформирования, базирующуюся в основном на отмеченной авторами [1, 2] общности закономерностей.

Рассматриваемый метод основан на использовании базовых диаграмм, описываемых уравнением

$$\lg \sigma'_t = \lg \sigma_1 - \frac{3,6 - \lg \sigma_1}{12} (\lg t + 0,1 \lg^2 t), \quad (2)$$

где  $\sigma'_t$  – текущее напряжение по базовой диаграмме, МПа;  $\sigma_1$  – напряжение, которое вызывает разрушение в течение одного часа, МПа;  $t$  – долговечность, ч.

Величина  $\sigma_1$  в соответствии с зависимостью (2) определяет точку пересечения отдельной базовой диаграммы с осью ординат в системе координат  $\lg \sigma - \lg t$ .

Важная особенность МБД заключается в обеспечении эффективного анализа известных экспериментальных данных и последующего улучшения прогнозирования длительной прочности на основе учета результатов такого анализа. При этом как в одном, так и в другом случае рассматриваются лишь независимо отдельные участки диаграмм длительной прочности, каждый ориентировочно в пределах одного порядка по логарифмической шкале времени. Если необходимо выполнить прогнозирование на два порядка, то сначала оно выполняется на один порядок, а затем по полученному результату аналогично прогнозируется окончательный результат.

Одна из причин такого независимого рассмотрения отдельных участков объясняется частой локализацией нарушений монотонного хода закономерностей длительной прочности. Поэтому чем меньше временная продолжительность участков, тем четче выявляются так называемые “переломы” диаграмм длительной прочности.

Прогнозирование искомого значения  $\sigma_t$  по исходному  $\sigma_{at}$  производится по формуле

$$\sigma_t = \sigma_{at} - \beta(\sigma_{at} - \sigma'_t) = \sigma_{at} - \beta \Delta \sigma'_t, \quad (3)$$

где  $\beta$  – обобщенный показатель отклонений отдельных участков экспериментальных диаграмм от соответствующих участков базовых диаграмм в пределах  $at \dots t$  при  $t/at \approx 10$ ;  $\sigma'_t$  – рассчитываемая по (2) длительная прочность (для расчета предварительно необходимо определить  $\sigma_1$  путем подстановки в (2) вместо  $\sigma'_t$  и  $t$  исходных значений  $\sigma_{at}$  и  $at$ ).

Если в (3) вместо  $\sigma_t$  подставить экспериментальное значение  $\sigma_{t_3}$ , то получим формулу для определения экспериментального значения

$$\beta_3 = \frac{\sigma_{at} - \sigma_{t_3}}{\sigma_{at} - \sigma'_t} = \frac{\Delta \sigma_{t_3}}{\Delta \sigma'_t}, \quad (4)$$

где  $\Delta \sigma_{t_3}$  и  $\sigma'_t$  – понижения длительной прочности на участках экспериментальной и базовой диаграмм с общей исходной точкой  $(\sigma_{at}, at)$  за одно и то же время от  $at$  до  $t = t_3$ .

В качестве примера рассмотрим обработку с помощью формул (2)–(4) представленных в табл. 1 данных [6] о длительной прочности жаропрочной стали. В каждой строке табл. 1 приведены сведения об отдельном участке экспериментальной диаграммы длительной прочности, погрешности прогнозирования с помощью формулы (3) при общем значении  $\beta = 1,2$ , экспериментальные значения  $\beta_3$ . Если учесть, что  $\sigma_{\alpha t}$  и  $\sigma_{t_3}$  – это координаты левой и правой границы участка при соответствующих долговечностях  $\alpha t$  и  $t_3$ , то согласно данным первой строки координаты левой границы – напряжение  $\sigma_{\alpha t} = 137$  МПа и время  $\alpha t = 9970$  ч, координаты правой границы –  $\sigma_{t_3} = 78$  МПа и  $t_3 = 93460$  ч. Для этого случая с помощью формул (4) и (2) определяем  $\beta_3$  следующим образом. В формулу (2) вместо  $\sigma'_t$  и  $t$  подставляем координаты левой границы участка, т.е. значения  $\sigma_{\alpha t} = 137$  МПа и  $\alpha t = 9970$  ч. Получаем уравнение с одним неизвестным, из решения которого следует величина  $\sigma_1$ . Эта величина определяет диаграмму, проходящую через точку с указанными координатами  $\sigma_{\alpha t}, \alpha t$ . Зная  $\sigma_1$ , по формуле (2) рассчитываем  $\sigma'_t$  и затем по (4) –  $\beta_3$ . На рисунке в координатах  $\beta_3 - \sigma_{\alpha t}$  точками в соответствии с данными табл. 1 представлена информация об отдельном участке диаграммы длительной прочности. Аналогично все данные о  $\beta_3$  и  $\sigma_{\alpha t}$  (табл. 1) показаны на рисунке комплексом точек. Используемое в (3) значение  $\beta$  может в первом приближении рассматриваться как среднеарифметическое значений  $\beta_3$  и определяться по формуле

$$\beta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\beta_3)_i. \quad (5)$$

Более точная оценка  $\beta$  заключается в следующем. Для прогнозирования длительной прочности согласно формуле (3) необходимо знать лишь  $\beta$ . В связи с этим задается произвольный ряд значений  $\beta$  – обычно 2; 1,9; ...; 0,5. При каждом из таких значений  $\beta$  рассчитывается погрешность прогнозирования

$$\Delta = \frac{\sigma_t - \sigma_{t_3}}{\sigma_{t_3}} \cdot 100\% \quad (6)$$

для всех  $n$  рассматриваемых случаев (по данным табл. 1  $n = 27$ ). Затем по формуле

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \Delta_i^2} \quad (7)$$

определяется величина среднеквадратической погрешности. Зависимость  $S = f(\beta)$  имеет вид параболы, вершина которой четко определяет расчетную величину  $\beta$ .

В табл. 1 приведены также значения  $\Delta$ , т.е. погрешности прогнозирования длительной прочности по формуле (3) при значении  $\beta = 1,2$ , рассчитанном по приведенной уточненной методике. Однако, судя по данным рисунка, следует ожидать, что расчет по формуле (5) также приведет к величине  $\beta$ , равной примерно 1,2.

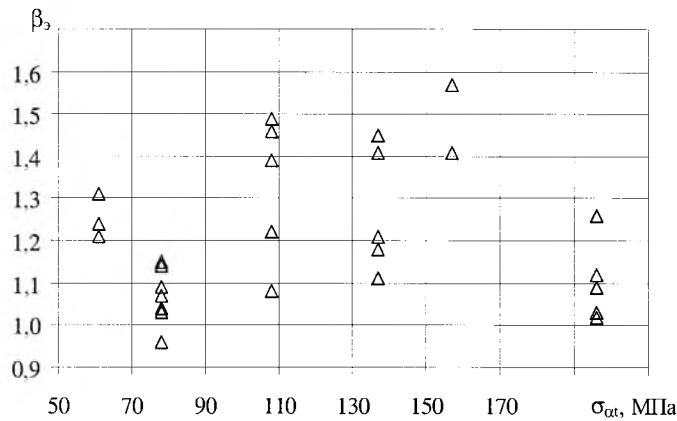
Т а б л и ц а 1

Значения  $\Delta$  и  $\beta_3$  для данных [6] о длительной прочности

$\sigma_{at}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$at$ , ч	$t_3$ , ч	$\Delta$ , %	$\beta_3$
137	78	9970	93460	12,97	1,45
157	88	5860	68390	11,71	1,41
157	88	8760	76760	18,57	1,57
196	137	12700	124614	-4,23	1,09
196	137	8340	98840	-7,66	1,02
196	137	6090	69700	-7,00	1,03
196	108	3281	70000	4,16	1,26
196	118	4500	95000	-4,50	1,12
137	83	8770	105080	0,59	1,21
137	83	8151	104059	-0,82	1,18
137	83	5435	84000	-4,97	1,11
108	53	5357	62617	20,44	1,49
108	53	6049	76320	18,22	1,46
137	61	2672	60626	18,39	1,41
108	69	9379	103324	-6,22	1,08
108	61	9607	89470	10,37	1,39
108	61	9660	128350	1,39	1,22
78	47	10762	110550	-3,61	1,14
78	47	10400	121860	-6,88	1,09
78	47	6070	82415	-10,43	1,04
61	33	6676	70249	2,89	1,24
61	33	9150	83540	7,01	1,31
78	47	4576	63980	-11,10	1,03
78	47	5160	64370	-8,35	1,07
78	37	5672	145970	-4,89	1,15
61	37	19458	145970	0,66	1,21
78	47	5188	90560	-16,37	0,96

**Примечание.** Установлено  $S = 10,3\%$  при  $\beta = 1,2$ .

Таким образом, одной из основных особенностей МБД является возможность по-новому представлять характеристики длительной прочности, как это показано на рисунке. В нашем случае общая закономерность длительного разрушения определяется базовыми диаграммами и величиной характеристики обобщенного отклонения от них  $\beta = 1,2$ , а затем уже изменения  $1,02 < \beta_3 < 1,45$  согласно данным табл. 1 и рисунку определяют частные отклонения от общей закономерности. Представление довольно больших массивов экспериментальных данных о длительной прочности на одном рисунке в координатах  $\beta_3 - \sigma_{at}$  дает возможность, в свою очередь, эффективно систематизировать известные экспериментальные данные, сравнительно четко конкретизировать как общее в закономерностях длительного разрушения, так и особенное или характерное для отдельных случаев.



Данные о длительной прочности стали 18Cr-10Ni-Ti.

С использованием рассмотренной системы анализа данных о длительной прочности удалось получить целый ряд новых, интересных и весьма неожиданных результатов. Если учесть сложность и трудоемкость ее формирования, то выводы авторов [1, 2] об общности закономерностей деформирования и разрушения металлических материалов при различных условиях нагружения, отмеченные результаты использования МБД свидетельствуют о целесообразности аналогичного анализа закономерностей циклического деформирования.

Рассмотрим в этой связи зависимости Лэнджера [7] и Мэнсона [8] между размахом и составляющими полной деформации при циклическом нагружении, с одной стороны, числом циклов до разрушения – с другой.

Лэнджер для оценки влияния составляющих полной деформации  $\Delta\varepsilon$  на долговечность  $N$  при циклическом нагружении предложил уравнение

$$\Delta\varepsilon = \frac{2\sigma_{-1}}{E} + \frac{1}{2\sqrt{N}} \ln \frac{1}{1-\psi}, \quad (8)$$

где  $\sigma_{-1}$  – предел выносливости, МПа;  $E$  – модуль упругости, МПа;  $\psi$  – относительное сужение после разрушения;  $N$  – число циклов нагружения.

Первый член этого уравнения отражает влияние упругой деформации, которая принимается не зависящей от числа циклов и равной деформации на пределе выносливости, второй – пластической.

Основываясь на обобщении экспериментальных данных для металлов и сплавов, Мэнсон разработал метод универсальных наклонов, в соответствии с которым было обосновано уравнение для размаха полной деформации в виде

$$\Delta\varepsilon = 3,5 \frac{\sigma_B}{E} N^{-0,12} + \left( \ln \frac{1}{1-\psi} \right)^{0,6} N^{-0,6}, \quad (9)$$

где  $\sigma_B$  – предел прочности, МПа.

В переходе от уравнения (7) к (8) отражается обычное стремление к обоснованию и получению возможно более общих или универсальных соотношений. Однако с точки зрения учета разработанного принципа базовых соотношений и в первом и во втором случае практически не принимались во внимание возможные отклонения от таких закономерностей. Рассмотрим способ и результаты обработки приведенных в [9] 112 кривых малоцикло-вой усталости на основе положений МБД.

Опыт применения МБД показывает, что уравнение вида (9) необходимо уточнить. В соответствии с уточнениями, полагая

$$K \frac{\sigma_B}{E} = \Delta \varepsilon_{y1}, \quad \left( \ln \frac{1}{1-\psi} \right)^m = \Delta \varepsilon_{п1}, \quad (10)$$

где  $\Delta \varepsilon_{y1}$  и  $\Delta \varepsilon_{п1}$  – составляющие соответственно упругой и пластической деформации при  $N=1$  цикл, уравнение (9) представим в виде

$$\Delta \varepsilon = \Delta \varepsilon_{y1} f(\Delta \varepsilon_{yN}, N) + \Delta \varepsilon_{п1} f(\Delta \varepsilon_{пN}, N). \quad (11)$$

Применение МБД подтвердило важность концепции универсальных наклонов. Вместе с тем выполненные исследования позволили заключить, что универсальные значения наклонов должны устанавливаться для возможно более узких интервалов продолжительности или числа циклов нагружения. Соответственно необходимо было обосновать, что общий интервал  $10^0 \dots 10^6$  циклов целесообразно рассматривать в виде отдельных интервалов:  $10^0 \dots 3 \cdot 10^0$ ;  $3 \cdot 10^0 \dots 10^1$ ;  $10^1 \dots 3 \cdot 10^1$ ;  $3 \cdot 10^1 \dots 10^2$ ;  $10^2 \dots 3 \cdot 10^2$ ;  $3 \cdot 10^2 \dots 10^3$ ;  $10^3 \dots 3 \cdot 10^3$ ;  $3 \cdot 10^3 \dots 10^4$ ;  $10^4 \dots 3 \cdot 10^4$ ;  $3 \cdot 10^4 \dots 10^5$ ;  $10^5 \dots 3 \cdot 10^5$ ;  $3 \cdot 10^5 \dots 10^6$  с определением для каждого из них универсального значения  $\beta$ , т.е. в целом характеристик  $\beta_i$ , о чем можно будет судить по приведенным ниже конечным результатам.

Обоснование проводилось на основе экспериментальных данных [9] о составляющих упругой и пластической деформации в основном при  $N = 10^2 \dots 10^5$  цикл. Прогнозировались значения таких составляющих деформации, как и по методу Мэнсона, на основе данных о пределе прочности, модуле упругости и относительном сужении после разрушения. Заметим, что при  $N = 100$  цикл часто величина пластической составляющей деформации была на уровне около 2%, а исходное ее значение при  $N = 1$  цикл колебалось от 50 до 100%. В таком случае лишь две характеристики наклона, определяемые двумя величинами 0,6 и 0,12 в уравнении (9), как и следовало ожидать, являются весьма уязвимым элементом реализации довольно важной концепции универсальных наклонов Мэнсона. Об этом можно более четко судить по результатам применения МБД.

По аналогии с МБД уравнение (2) используется в виде

$$\lg \Delta \varepsilon'_N = \lg \Delta \varepsilon_1 - \frac{3,6 - \lg \Delta \varepsilon_1}{12} (\lg N + 0,1 \lg^2 N), \quad (12)$$

где  $\Delta \varepsilon'_N$  – составляющая пластической или упругой деформации для правой границы соответствующего участка базовой диаграммы;  $\Delta \varepsilon_1$  – значение соответствующей составляющей деформации при  $N = 1$  цикл. Следует подчеркнуть, что при работе с каждым отдельным интервалом значений  $N$  необходимо устанавливать величину  $\Delta \varepsilon_1$  путем подстановки в (12) данных о деформации и числе циклов для левой границы рассматриваемого участка, т.е. данных о  $\Delta \varepsilon_{\alpha N}$ ,  $\alpha N$ , и последующего решения получаемого уравнения с одним неизвестным.

Прогнозирование  $\Delta \varepsilon_N$  по исходному значению  $\Delta \varepsilon_{\alpha N}$  в пределах отдельного участка выполняется по аналогичной формуле (3):

$$\Delta \varepsilon_N = \Delta \varepsilon_{\alpha N} - \beta_i (\Delta \varepsilon_{\alpha N} - \Delta \varepsilon'_N), \quad (13)$$

где  $\beta_i$  – универсальное значение  $\beta$ , устанавливаемое для каждого из 12 указанных интервалов значений  $N$ ;  $\Delta \varepsilon_{\alpha N}$ ,  $\Delta \varepsilon_N$  – исходное и прогнозируемое значения упругой или пластической составляющих деформации для граничных значений числа циклов каждого отдельного интервала  $\alpha N$  и  $N$ .

Универсальное значение  $\beta_i$  для каждого отдельного интервала определялось так же, как для данных табл. 1. Так, например, для интервала  $\alpha N \dots N$ , составляющего  $3 \cdot 10^3 \dots 10^4$  цикл, из данных [9] о 112 кривых малоциклового усталости выбирались все экспериментальные значения упругой и пластической составляющей деформации: для  $3 \cdot 10^3$  цикл – это  $\Delta \varepsilon_{\alpha N}$ , для  $10^4$  цикл –  $\Delta \varepsilon_{N_3}$ . Полученные таким образом комплексы значений  $\Delta \varepsilon_{\alpha N}$ ,  $\Delta \varepsilon_N$ ,  $\alpha N$ ,  $N$  обрабатывались аналогично данным, приведенным в табл. 1. Выбирался произвольный ряд значений  $\beta_n$ , и при каждом отдельном  $\beta_n$  прогнозировалось  $\Delta \varepsilon_N$  по  $\Delta \varepsilon_{\alpha N}$  с помощью формулы (13). Аналогично рассчитывалось значение  $\Delta'$  по формуле

$$\Delta' = \lg N - \lg N_3, \quad (14)$$

затем  $S$  – по формуле (7) при замене  $\Delta$  на  $\Delta'$ , и по зависимости  $S = f(\beta_n)$  получали универсальное значение  $\beta_i$  для соответствующего интервала значений  $\alpha N \dots N$ . Сглаживание зависимости  $\beta_i = f(N)$  привело к окончательным универсальным значениям  $\beta_i$  (табл. 2) для упругих и пластических составляющих деформации.

Рассмотренные формулы позволили выполнить следующие исследования. С учетом (10) принималось

$$3,5 \frac{\sigma_B}{E} = \Delta \varepsilon_{y1} = \Delta \varepsilon_{\alpha 1}; \quad \left( \ln \frac{1}{1-\psi} \right)^{0,45} = \Delta \varepsilon_{п1} = \Delta \varepsilon_{\alpha 1}. \quad (15)$$

Значения  $\Delta \varepsilon_{\alpha 1}$  – это соответственно левая граница первого участка диаграмм циклической упругой и пластической составляющих. При этом, как следует из табл. 2, для упругой составляющей величина  $\beta_1 = 0,8$ , для пластической –  $\beta_1 = 4,4$ . Если предположить, что с помощью (15) для

упругой деформации при  $N = 1$  цикл получен ряд исходных значений  $\Delta\varepsilon_{y1}$ , равных 2; 1,9; ...; 0,6 в процентах, а для пластической деформации – ряд исходных значений  $\Delta\varepsilon_{п1}$ , равных 140; 130; ...; 30 в процентах, то в табл. 3 и 4 приведены соответствующие полные диаграммы циклической упругой и пластической составляющих деформации, рассчитанные МБД.

Т а б л и ц а 2

Значения  $\beta_i$  для указанных интервалов  $\alpha N \dots N$  упругой  $\Delta\varepsilon_y$  и пластической  $\Delta\varepsilon_{п}$  составляющих циклической деформации

$\alpha N \dots N$	$\beta_i$	$\Delta\varepsilon_y$	$\Delta\varepsilon_{п}$
$10^0 \dots 3 \cdot 10^0$	$\beta_1$	0,80	4,4
$3 \cdot 10^0 \dots 10^1$	$\beta_2$	0,70	3,5
$10^1 \dots 3 \cdot 10^1$	$\beta_3$	0,60	2,6
$3 \cdot 10^1 \dots 10^2$	$\beta_4$	0,50	2,1
$10^2 \dots 3 \cdot 10^2$	$\beta_5$	0,45	1,8
$3 \cdot 10^2 \dots 10^3$	$\beta_6$	0,40	1,7
$10^3 \dots 3 \cdot 10^3$	$\beta_7$	0,30	1,6
$3 \cdot 10^3 \dots 10^4$	$\beta_8$	0,30	1,5
$10^4 \dots 3 \cdot 10^4$	$\beta_9$	0,30	1,4
$3 \cdot 10^4 \dots 10^5$	$\beta_{10}$	0,30	1,3
$10^5 \dots 3 \cdot 10^5$	$\beta_{11}$	0,30	1,2
$3 \cdot 10^5 \dots 10^6$	$\beta_{12}$	0,30	1,1

Расчеты для различных интервалов  $\alpha N \dots N$ , за исключением первого, идентичны. Первый интервал:  $\alpha N = 1$ ,  $N = 3$ ,  $\Delta\varepsilon_{y1} = \Delta\varepsilon_1 = \Delta\varepsilon_{\alpha N}$  и  $\Delta\varepsilon_{п1} = \Delta\varepsilon_1 = \Delta\varepsilon_{\alpha N}$ . При  $N = 3$  с помощью формулы (12) рассчитывается значение  $\Delta\varepsilon'_3$ , затем по (13) –  $\Delta\varepsilon_N = \Delta\varepsilon_{y2}$  и  $\Delta\varepsilon_N = \Delta\varepsilon_{п2}$ . Второй интервал:  $\alpha N = 3$ ,  $N = 10$ ,  $\Delta\varepsilon_{y2} = \Delta\varepsilon_{\alpha N}$  и  $\Delta\varepsilon_{п2} = \Delta\varepsilon_{\alpha N}$ . При  $N = 10$  по формуле (12) рассчитываются значения  $\Delta\varepsilon'_{10}$  при  $\beta_2$ , равных 0,7 и 3,5 (табл. 2). Для этого и последующего интервалов каждый раз предварительно рассчитывается новое значение  $\Delta\varepsilon_1$ , которое используется в формуле (12). При таком расчете величины  $\Delta\varepsilon_{\alpha N}$  и  $\alpha N$  подставляются в формулу (12) вместо  $\Delta\varepsilon'_N$  и  $N$ , что приводит к уравнению с одним неизвестным, в результате решения которого определяется  $\Delta\varepsilon_1$  и затем с помощью (12) –  $\Delta\varepsilon'_{10}$ . Далее по формуле (13) рассчитываются соответствующие значения  $\Delta\varepsilon_{10}$ . Расчеты повторяются для каждого из последующих интервалов (табл. 3 и 4). Таким образом проводился анализ 112 диаграмм малоциклового усталости, приведенных в каталоге [9].

По исходным значениям  $\sigma_b, E, \psi$  с помощью (15) рассчитывались значения  $\Delta\varepsilon_{y1}$  и  $\Delta\varepsilon_{п1}$ , равные  $\Delta\varepsilon_{\alpha 1}$ . Затем прогнозировались диаграммы упругой и пластической составляющих циклической деформации, как и



приведенные в табл. 3 и 4. Устанавливались зависимость суммарной деформации от  $N$ , значение  $N$ , при котором такая суммарная деформация равна суммарной деформации начала экспериментальной кривой ( $N_0$ ).

Т а б л и ц а 3

Рассчитанные по МБД универсальные диаграммы циклической упругой деформации при указанных исходных значениях  $\Delta\varepsilon_{y1}$

№ п/п	N, цикл												
	1·10 <sup>0</sup>	3·10 <sup>0</sup>	1·10 <sup>1</sup>	3·10 <sup>1</sup>	1·10 <sup>2</sup>	3·10 <sup>2</sup>	1·10 <sup>3</sup>	3·10 <sup>3</sup>	1·10 <sup>4</sup>	3·10 <sup>4</sup>	1·10 <sup>5</sup>	3·10 <sup>5</sup>	1·10 <sup>6</sup>
1	2,0	1,566	1,222	0,996	0,8235	0,6996	0,5959	0,5327	0,4709	0,4195	0,3696	0,3283	0,2887
2	1,9	1,485	1,157	0,943	0,7780	0,6603	0,5618	0,5020	0,4435	0,3111	0,2732	0,2419	0,2120
3	1,8	1,405	1,093	0,889	0,7328	0,6213	0,5281	0,4715	0,4163	0,2920	0,2562	0,2268	0,1985
4	1,7	1,324	1,029	0,835	0,6878	0,5825	0,4947	0,4414	0,3894	0,2731	0,2395	0,2118	0,1853
5	1,6	1,244	0,965	0,782	0,6431	0,5441	0,4615	0,4115	0,3627	0,2544	0,2229	0,1970	0,1722
6	1,5	1,164	0,900	0,729	0,5988	0,5060	0,4289	0,3819	0,3364	0,2359	0,2065	0,1823	0,1592
7	1,4	1,084	0,837	0,677	0,5547	0,4681	0,3962	0,3527	0,3103	0,2175	0,1903	0,1679	0,1465
8	1,3	1,004	0,774	0,625	0,5110	0,4307	0,3640	0,3237	0,2846	0,1995	0,1743	0,1536	0,1340
9	1,2	0,925	0,711	0,572	0,4677	0,3936	0,3321	0,2951	0,2592	0,1817	0,1586	0,1396	0,1216
10	1,1	0,845	0,648	0,521	0,4247	0,3569	0,3007	0,2669	0,2341	0,1641	0,1431	0,1259	0,1095
11	1,0	0,766	0,586	0,470	0,3822	0,3206	0,2697	0,2391	0,2095	0,1468	0,1278	0,1123	0,0976
12	0,9	0,687	0,524	0,420	0,3402	0,2848	0,2391	0,2117	0,1853	0,1298	0,1129	0,0991	0,0860
13	0,8	0,609	0,462	0,369	0,2986	0,2494	0,2090	0,1849	0,1615	0,1131	0,0982	0,0861	0,0746
14	0,7	0,531	0,401	0,319	0,2576	0,2147	0,1795	0,1585	0,1382	0,0968	0,0839	0,0734	0,0635
15	0,6	0,453	0,341	0,270	0,2172	0,1805	0,1506	0,1327	0,1155	0,0809	0,0700	0,0611	0,0528

Т а б л и ц а 4

Рассчитанные по МБД универсальные диаграммы циклической пластической деформации при указанных исходных значениях  $\Delta\varepsilon_{п1}$

№ п/п	N, цикл												
	1·10 <sup>0</sup>	3·10 <sup>0</sup>	1·10 <sup>1</sup>	3·10 <sup>1</sup>	1·10 <sup>2</sup>	3·10 <sup>2</sup>	1·10 <sup>3</sup>	3·10 <sup>3</sup>	1·10 <sup>4</sup>	3·10 <sup>4</sup>	1·10 <sup>5</sup>	3·10 <sup>5</sup>	1·10 <sup>6</sup>
1	140,0	59,817	21,601	9,748	4,3011	2,1381	0,9306	0,4264	0,1745	0,0779	0,0323	0,0151	0,0068
2	130,0	54,010	18,749	8,214	3,5132	1,7025	0,7175	0,3191	0,1260	0,0545	0,0219	0,0099	0,0044
3	120,0	48,332	16,046	6,799	2,8075	1,3219	0,5371	0,2309	0,0875	0,0366	0,0141	0,0062	0,0026
4	110,0	42,790	13,500	5,506	2,1839	0,9950	0,3877	0,1602	0,0579	0,0232	0,0085	0,0036	0,0015
5	100,0	37,399	11,120	4,340	1,6422	0,7202	0,2671	0,1054	0,0361	0,0138	0,0048	0,0019	0,0007
6	90,0	32,171	8,918	3,303	1,1818	0,4954	0,1732	0,0647	0,0207	0,0074	0,0024	0,0009	0,0003
7	80,0	27,126	6,904	2,400	0,8017	0,3180	0,1033	0,0361	0,0106	0,0035	0,0010	0,0003	0,0001
8	70,0	22,283	5,095	1,635	0,5003	0,1850	0,0547	0,0175	0,0046	0,0014	0,0003	0,0001	0
9	60,0	17,672	3,507	1,012	0,2749	0,0926	0,0240	0,0068	0,0015	0,0004	0,0001	0	0
10	50,0	13,329	2,161	0,535	0,1216	0,0356	0,0075	0,0017	0,0003	0	0	0	0
11	40,0	9,306	1,085	0,206	0,0339	0,0077	0,0010	0,0001	0	0	0	0	0
12	30,0	5,681	0,314	0,029	0,0012	0,0001	0	0	0	0	0	0	0

По значениям  $N$  и  $N_3$  с помощью формулы (14) рассчитывалась погрешность  $\Delta'$ . Затем по зависимости суммарной циклической деформации от  $N$  устанавливалось значение  $N$ , при котором суммарная деформация равна суммарной деформации при максимальном значении  $N_3$ . Снова рассчитывалось значение  $\Delta'$ . В табл. 5 приведены результаты анализа двух комплексов диаграмм малоциклового усталости.

Т а б л и ц а 5

Результаты прогнозирования малоциклового усталости

№ п/п	Литературный источник	Экспериментальные данные	Расчет по Мэнсону			Расчет по МБД		
		$\frac{1}{n} \lg N$	$\frac{1}{n} \lg N$	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta'_i$	$S$	$\frac{1}{n} \lg N$	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta'_i$	$S$
1	[9]	2,43	3,28	0,91	0,95	2,30	-0,13	0,33
2	[9]	4,85	6,20	1,35	2,08	4,79	-0,06	0,63
3	[10–23]	2,58	3,51	0,93	0,98	2,52	-0,06	0,36
4	[10–23]	4,77	6,02	1,25	1,33	4,54	-0,23	0,56

Неожиданными оказались результаты обработки данных [9], согласно которым переход от метода Мэнсона к системе универсальных наклонов по МБД привел к уменьшению величины стандартного отклонения  $S$  при прогнозировании начала и конца экспериментальной кривой соответственно в 2,9 и 3,3 раза. При анализе экспериментальных данных [10–23] эти значения оказались ниже, т.е. 2,76 и 2,35, но также значительными.

Однако, несмотря на столь существенное улучшение прогнозирования, опыт применения МБД для анализа более 2000 диаграмм длительной прочности, полученных при статических условиях нагружения, дает основания для дополнительного акцентирования особого внимания на важности систематического анализа отклонений отдельных участков экспериментальных диаграмм малоциклового усталости от соответствующих участков универсальных диаграмм, рассчитываемых по МБД. Характеристики отклонений могут рассчитываться по формуле (4) в виде

$$\beta_{zi} = \frac{\varepsilon_{\alpha N} - \varepsilon_{N_3}}{\varepsilon_{\alpha N} - \varepsilon'_N} = \frac{\Delta\varepsilon_{N_3}}{\Delta\varepsilon'_N}, \quad (16)$$

где  $\Delta\varepsilon_{N_3}$  и  $\Delta\varepsilon'_N$  – понижения суммарной деформации в пределах, идентичных по числу циклов нагружения отдельных участков экспериментальной и расчетной диаграмм малоциклового усталости.

Примеры таких отклонений для произвольно выбранных шести расчетных диаграмм из рассмотренных 112 [9] приведены в табл. 6. Отклонения для участков диаграммы 2 (вторая строка) в целом хорошо определяются величиной  $\beta_{zi} \approx 1$ , т.е. эти отклонения малы, наклоны отдельных участков экспериментальной и расчетной диаграмм близки. Значения  $\beta_{zi}$  отдельных участков диаграмм 3 и 4 по мере роста  $i$  увеличиваются, а затем несколько уменьшаются, диаграмм 5 и 6 также незначительно уменьшаются.

Т а б л и ц а 6

Значения  $\beta_{\beta_i}$ , рассчитанные с помощью формулы (16)  
по экспериментальным данным [9]

Материал	$\beta_{\beta_i}$								№ стр. в [9]
	$\beta_{\beta_5}$	$\beta_{\beta_6}$	$\beta_{\beta_7}$	$\beta_{\beta_8}$	$\beta_{\beta_9}$	$\beta_{\beta_{10}}$	$\beta_{\beta_{11}}$	$\beta_{\beta_{12}}$	
0,15C–0,7Cr	1,13	1,06	1,12	1,16	1,250	1,33	1,36	1,39	31
0,15C–0,7Cr	1,12	1,03	1,03	1,01	1,017	1,03	1,02	1,03	35
0,13C–7Ni–V	1,25	1,33	1,70	1,90	2,030	2,08	2,06	2,06	39
0,13C–1,2Mn	2,11	2,31	2,95	2,85	2,740	2,66	2,58	2,53	73
0,16C–0,5Cr–0,4Mo–27V	0,75	0,73	0,74	0,73	0,720	0,72	0,69	0,68	367
0,16C–0,5Cr–0,4Mo–27V	0,89	0,84	0,82	0,78	0,720	0,63	0,52	0,42	371

Однако, несмотря на сравнительно малый объем таких данных, они позволяют обратить внимание на следующее. Значения  $\beta_{\beta_3}$ , устанавливаемые по данным о длительной прочности, изменяются преимущественно от 0,4 до 2,2...2,3. Согласно же данным табл. 6, значения  $\beta_{\beta_i}$  изменяются в несколько более широких, но довольно близких интервалах. Результаты применения МБД приводят к выводу, что это создает важную основу для существенного расширения возможностей конкретизации особенностей закономерностей циклического деформирования металлов и сплавов.

Таким образом, выполненные исследования подтверждают важность положения авторов [1, 2] о проявлении довольно общих степенных зависимостей при различных условиях нагружения. Кроме того, обоснована возможность значительного улучшения прогнозирования малоциклового усталости при переходе от метода универсальных наклонов Мэнсона к системе универсальных наклонов МБД.

## Резюме

На прикладі аналізу понад 112 діаграм циклічного навантаження сталей і сплавів показано, що використання універсальних характеристик нахилів для кожного з 12 інтервалів зміни циклів навантаження дозволяє зменшити стандартне відхилення в порівнянні з методом Менсона більш як у два рази.

1. Красовский А. Я., Тот Л. Физическая природа эмпирических зависимостей характеристик прочности и разрушения материалов от времени // Пробл. прочности. – 1994. – № 6. – С. 3 – 9.
2. Красовский А. Я., Тот Л. Термодинамическая природа степенных эмпирических зависимостей характеристик прочности и разрушения материалов от времени. Сообщ. 1. Ползучесть и длительная прочность // Там же. – 1996. – № 2. – С. 5 – 24.
3. Кривенюк В. В. Прогнозирование длительной прочности тугоплавких металлов и сплавов. – Киев: Наук. думка, 1990. – 248 с.
4. Писаренко Г. С., Кривенюк В. В. Новый подход к прогнозированию длительной прочности металлов // Докл. АН СССР. Механика. – 1990. – 312, № 3. – С. 558 – 562.

5. Троценко В. Т., Лебедев А. А., Стрижало В. А. и др. Механическое поведение материалов при различных видах нагружения. – Киев: Логос, 2000. – 571 с.
6. Data sheets on the elevated-temperature properties of 18Cr–10Ni–Ti // National Research Institute for Metals (NRIM). – Tokyo, 1987. – No. 5B.
7. Langer B. F. Design of pressure vessels for low-cycle fatigue // Trans. ASME, D. – 1962. – **84**, No. 3. – P. 389 – 402.
8. Manson S. S. A simple procedure for estimating high-temperature low-cycle fatigue // Exp. Mech. – 1968. – **8**, No. 8. – P. 349 – 355.
9. Каталог данных по механическим свойствам и расчетным характеристикам конструкционных материалов в области малоциклового усталости / МЦНТИ АН СССР, Ин-т машиноведения им. А. А. Благонравова. – М., 1990. – 400 с. – (Международ. науч.-техн. комплекс «Надежность машин»).
10. Data sheets on low-cycle fatigue properties of 2,25Cr–1Mo steel // NRIM. – Tokyo, 1978. – No. 7.
11. Data sheets on low-cycle fatigue properties of 0,25C steel // Ibid. – 1984. – No. 38.
12. Data sheets on low-cycle fatigue properties of 0,35C steel // Ibid. – 1984. – No. 39.
13. Data sheets on low-cycle fatigue properties of 0,45C steel // Ibid. – 1985. – No. 44.
14. Data sheets on low-cycle fatigue properties of 0,4C–1Cr steel // Ibid. – 1985. – No. 45.
15. Data sheets on low-cycle fatigue properties of 18Cr–8Ni steel // Ibid. – 1985. – No. 49.
16. Data sheets on low-cycle fatigue properties of Al–4,5Mg–0,6Mn alloy // Ibid. – 1989. – No. 61.
17. Data sheets on low-cycle fatigue properties of 2,25Cr–1Mo steel // Ibid. – 1989. – No. 62.
18. Data sheets on low-cycle fatigue properties of carbon steel // Ibid. – 1991. – No. 67.
19. Data sheets on low-cycle fatigue properties of 12Cr–1Mo–1W–0,3V steel // Ibid. – 1991. – No. 68.
20. Data sheets on low-cycle fatigue properties of Al–4,6Zn–1,2Mg alloy // Ibid. – 1992. – No. 70.
21. Data sheets on low-cycle fatigue properties of Al–4,5Zn–1,5Mg alloy // Ibid. – 1993. – No. 74.
22. Data sheets on low-cycle fatigue properties of 1Cr–0,5Mo steel // Ibid. – 1993. – No. 77.
23. Data sheets on low-cycle fatigue properties of 9Cr–1Mo steel // Ibid. – 1993. – No. 78.

Поступила 18. 04. 97