

Прогнозирование длительной прочности сталей и сплавов параметрическими методами и методом базовых диаграмм. Сообщение 1. Интерполяционный анализ экспериментальных данных

В. В. Кривенюк

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

Представлены результаты интерполяционной обработки более 1000 диаграмм длительной прочности с помощью параметрических методов Ларсона–Миллера, Мэнсона–Хэферда, Орра–Шерби–Дорна и метода базовых диаграмм. Показано, что применение специального системного анализа известных экспериментальных данных может существенно повысить точность прогнозирования.

Ключевые слова: интерполяционная обработка, параметрические методы, системный анализ.

Введение. В мире существует более 100 методов прогнозирования длительной прочности. Однако лишь некоторые получили широкое распространение, в частности параметрические методы Ларсона–Миллера (ЛМ) [1], Мэнсона–Хэферда (МХ) [2], Орра–Шерби–Дорна (ОШД) [3], несмотря на многочисленные критические замечания, которые не учтены до настоящего времени, хотя предпринимались неоднократные попытки их уточнения [4, 5]. Это обусловлено тремя причинами: большинство практических задач сравнительно просты; изделия длительного пользования из конструкционных сталей и сплавов уже отработали десятки лет и в этом случае рассматриваемая задача прогнозирования упрощается; прогнозирование является весьма сложным процессом.

Многие исследователи [6, 7] считают, что проблема может быть решена путем взаимосвязанного и более полного учета достижений в области механики и физики, точнее – механики и материаловедения. Однако, как показывает практика, это важное научное положение так и не реализуется, в связи с чем особого внимания заслуживает следующее утверждение А. Д. Кеннеди [8]: “Появление более четких и детальных теорий твердого состояния позволило провести физическую оценку многих особенностей поведения кристаллов, что подтверждается предыдущим анализом поведения дислокаций. Однако в случае скопления дислокаций эта оценка оказывается менее успешной. Если законы, описывающие поведение малых групп дислокаций, можно оценивать физически, о чем свидетельствуют результаты специальных экспериментов, выполненных на монокристаллах, скопление дислокаций создает гораздо большие трудности. Далее оказывается, что законы, определяющие поведение скоплений дислокаций, пока что невозможно успешно вывести из законов, описывающих поведение единичных дислокаций. Для будущего технического материаловедения это очень серьезная проблема, на которую в настоящее время смотрят, вероятно, слишком легко. Дело в том, что понимание природы процесса деформирования, предлагаемое физической наукой,

само по себе является недостаточным. Для многих практических целей существовавший ранее эмпиризм гораздо более ценен". Это, по крайней мере, дает основание предположить, насколько разнообразна и сложна роль различного рода несовершенств кристаллической решетки в поведении жаропрочных сталей и сплавов при длительном высокотемпературном нагружении. При этом, несмотря на значительные достижения в области теории дислокаций, достаточные научные основы для решения рассматриваемой проблемы пока отсутствуют.

Цель настоящего исследования – обоснование возможности повышения эффективности расчетов путем решения как прямых, так и обратных задач прогнозирования. К первым относятся обычные методы моделирования состояния металлических материалов и происходящих в них изменений при нагружении, например, [1–3], ко вторым – метод базовых диаграмм (МБД) [9–11], обеспечивающий конкретизацию довольно общих закономерностей с последующим оперированием лишь отклонениями от них. Предпринята попытка показать, что первые позволяют учитывать только роль основных факторов, вторые – также роль второстепенных, что в значительной степени способствует уточнению прогнозирования.

Материалы и методы. Ниже приведены результаты обработки данных более 1000 диаграмм длительной прочности [12–45] с помощью параметрических методов и МБД.

Метод базовых диаграмм основан на использовании уравнения базовых диаграмм

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

где σ'_t – текущее напряжение, МПа; σ_1 – напряжение, которое вызывает разрушение в течение 1 ч, МПа; t – время до разрушения, ч.

Особенности отдельных участков экспериментальных диаграмм длительной прочности учитывают с помощью следующих характеристик:

$$\beta_e = \frac{\sigma_{at} - \sigma_{te}}{\sigma_{at} - \sigma'_t} = \frac{\Delta \sigma_{te}}{\Delta \sigma'_t}, \quad (2)$$

где σ_{at} – координата общей исходной точки сравниваемых участков диаграмм; σ_{te} и σ'_t – координаты правых границ сравниваемых участков экспериментальной и базовой диаграмм; $\Delta \sigma_{te}$ и $\Delta \sigma'_t$ – снижение длительной прочности на экспериментальной и базовой диаграммах за одно и то же время от at до $t = te$.

Если в формулу (2) вместо σ_{te} подставить искомое напряжение σ_t , то получим формулу для его прогнозирования в виде

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

Прогнозирование, например, значения $\sigma_{13886,5}$ по $\sigma_{1030,3} = 294$ МПа с помощью (3) выполняется следующим образом. Принимают $\sigma_{1030,3} = \sigma_{at}$; $\sigma_{13886,5} = \sigma_t$; $at = 1030,3$ ч; $t = 13886,5$ ч. В (1) вместо σ'_t и t подставляют

значения σ_{at} и at , что дает уравнение с одним неизвестным σ_1 . Подставив в (1) $t = 13886,5$ ч при полученном значении σ_1 , рассчитывают σ'_t . Затем при известном значении β по $\sigma_{1030,3}$ с помощью (3) рассчитывают, т.е. прогнозируют, $\sigma_{13886,5}$. Значения β в первом приближении можно оценивать на основе результатов выполненного обобщенного анализа известных экспериментальных данных по (1)–(3).

Установлено, что для сплавов с твердорастворным упрочнением в практически важном интервале температур наиболее вероятными являются значения $\beta = 0,9 \dots 1,3$, для дисперсно-упрочненных – $\beta = 1,4 \dots 1,7$, что объясняется увеличением экспериментальных значений β_e по мере повышения температуры и длительности нагружения. В целом значения β_e изменяются в пределах $0 \dots 2,3$. Когда временные процессы разупрочнения практически не проявляются и диаграммы длительной прочности близки к горизонтальным, $\beta_e \approx 0$.

Значения β можно достаточно эффективно уточнять с помощью интерполяционного анализа известных экспериментальных данных. Например, обрабатывают данные при длительностях нагружения $10^2 \dots 10^5$ ч. Для определения постоянных расчетных соотношений используются все экспериментальные данные, в то время как при экстраполяции для определения постоянных – только часть, например, при длительностях до 10^4 ч, после чего выполняется экстраполяция, т.е. прогнозирование, на время 10^5 ч. Исходя из представлений о преимущественном использовании упрощенных моделей прогнозирования, обладающих низкой чувствительностью к влиянию большого числа факторов на исследуемые закономерности, заметим, что результаты обобщенного интерполяционного анализа в данном случае могут быть эффективно использованы для уточнения прогнозирования на экстраполяционной основе.

Для интерполяционного анализа кроме $\sigma_{at} = \sigma_{1030,3}$ используют также экспериментальное значение $\sigma_{te} = \sigma_{13886,5}$ вместо σ_t . Это позволяет с помощью (2) определять экспериментальные значения β_e , т.е. отклонение участка экспериментально полученной диаграммы от at до te от соответствующего участка базовой диаграммы от at до t при $t = te$. Предполагается, что обобщенный системный анализ качественно различных случаев прогнозирования на основании значений β весьма важен для принципиального развития прогнозирования.

Ниже обосновывается необходимость совместного учета погрешностей прогнозирования по логарифму времени Δ_1 и напряжениям Δ_2 , где

$$\Delta_1 = \lg t - \lg te, \quad (4)$$

$$\Delta_2 = \frac{\sigma_t - \sigma_{te}}{\sigma_{te}}, \quad (5)$$

$$S_m = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta_m^2)_i} \quad (6)$$

при $m=1$ для Δ_1 и $m=2$ для Δ_2 .

Выполнение прогнозирования на один порядок по логарифмической шкале времени на основании обработки больших объемов экспериментальных данных позволяет сделать вывод, что при неравенстве

$$\beta - 0,3...0,4 < \beta_e < \beta + 0,3...0,4 \quad (7)$$

в результате прогнозирования с помощью МБД справедливо

$$S_2 \leq 0,1...0,12. \quad (8)$$

Одна из задач систематизации известных экспериментальных данных с помощью МБД и заключается в определении отдельных значений β , которые обеспечивали бы выполнение условия (8) при обработке как можно больших объемов экспериментальных данных. При этом следует отметить, что условия (7) и (8) справедливы для прогнозирования на один порядок, т.е. при $\lg(te/at) = q \approx 1$ (МБД-1). В данном случае значительную часть исследований проводили с помощью МБД-2, который используется для прогнозирования на два, три и более порядков, т.е. при $q = 1...3$ и более.

Погрешность прогнозирования может повышаться по мере увеличения числа порядков прогнозирования (q) при одной и той же разности $\beta - \beta_e$ из-за зависимости значений β от напряжений. Для выполнения условия (8) при расчетах по МБД-2 вместо одного численного значения β при расчетах по МБД-1 используют три значения β_i , т.е. $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ соответственно при условно низких, средних и высоких температурах (рис. 1) [46]. Показано [46], что верхняя температурная граница для β_1 определяется интервалом между указанными схематически температурами $T'_в$ и $T_в$, однако необходимо более точное определение этой границы. Чтобы определить интервалы напряжений для значений $\beta_1, \beta_2, \beta_3$, используют результаты исходной обработки экспериментальных данных при одном общем значении β . Далее из условий минимизации погрешностей определяются значения $\beta_1, \beta_2, \beta_3$, а также соответствующие для них границы интервалов напряжений σ_α и σ_β .

В табл. 1 представлена в качестве примера обработка экспериментальных данных [29] для плавки 20G стали 0,5Cr–0,5Mo по МБД-2. Значения $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ равны соответственно 0,14; 0,74 и 1,34. При $\sigma_{at} < \sigma_\alpha = 300$ МПа используется значение β_3 , при $\sigma_\alpha \leq \sigma_{at} \leq \sigma_\beta - \beta_2$ и при $\sigma_{at} > \sigma_\beta = 380$ МПа – β_1 . В соответствии с этими условиями значение β_3 используется в строках 10–32, β_2 – в строках 4–9, β_1 – лишь в строках 1–3. Значения $S_1 = 0,229$; $S_2 = 0,102$.

Формулы (1) и (2) дают возможность представлять информацию об отдельном участке экспериментальной диаграммы длительной прочности точкой в системе координат $\beta_e - \sigma_{at}$. Это облегчает сравнительный анализ больших объемов экспериментальных данных и создает благоприятные условия для перехода к качественно новому системному анализу. Важными элементами такого анализа являются оценка и учет характеристик $\beta_e, \beta, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \Delta_1, \Delta_2, S_1, S_2$ для различных групп материалов.

Т а б л и ц а 1

Результаты обработки экспериментальных данных [29]
для плавки 20Г стали 0,5Cr–0,5Mo по МБД-2

№ п/п	T, °C	σ_{at} , МПа	σ_{te} , МПа	αt , ч	te , ч	$\lg\left(\frac{te}{\alpha t}\right)$	β_i	β_e	Δ_1	Δ_2
1	450	412,0	392,0	0,5	68,2	2,135	0,1	0,13	0,20	-0,005
2	450	412,0	373,0	0,5	3835,4	3,885	0,1	0,15	0,38	0,007
3	450	392,0	373,0	68,2	3835,4	1,750	0,1	0,14	0,06	-0,002
4	450	373,0	294,0	3835,4	48420,7	1,101	0,7	0,86	0,20	0,038
5	450	373,0	265,0	3835,4	93425,4	1,387	0,7	0,96	0,48	0,092
6	500	333,0	294,0	116,9	1030,3	0,945	0,7	0,54	0,27	-0,049
7	500	333,0	265,0	116,9	2783,7	1,377	0,7	0,67	0,15	-0,028
8	500	333,0	265,0	116,9	7790,7	1,824	0,7	0,52	0,60	-0,108
9	500	333,0	235,0	116,9	5533,9	1,675	0,7	0,81	0,18	0,035
10	500	294,0	196,0	1030,3	13886,5	1,130	1,30	1,23	0,11	-0,046
11	500	294,0	157,0	1030,3	35646,2	1,539	1,30	1,30	0,05	-0,025
12	500	294,0	137,0	1030,3	52982,6	1,711	1,30	1,36	0,04	0,020
13	500	265,0	157,0	2783,7	35646,2	1,107	1,30	1,47	0,13	0,061
14	500	265,0	137,0	2783,7	52982,6	1,280	1,30	1,53	0,22	0,117
15	550	294,0	196,0	77,8	496,2	0,805	1,30	1,73	0,25	0,112
16	550	294,0	157,0	77,8	1448,6	1,270	1,30	1,58	0,26	0,132
17	550	294,0	118,0	77,8	4006,2	1,712	1,30	1,56	0,34	0,209
18	550	294,0	88,0	77,8	11854,2	2,183	1,30	1,49	0,31	0,231
19	550	294,0	69,0	77,8	35165,5	2,655	1,30	1,39	0,14	0,122
20	550	294,0	69,0	77,8	45351,5	2,766	1,30	1,35	0,03	0,024
21	550	294,0	53,0	77,8	145440,1	3,272	1,30	1,28	0,21	-0,207
22	550	157,0	69,0	1448,6	35165,5	1,385	1,30	1,45	0,14	0,093
23	550	157,0	69,0	1448,6	45351,5	1,496	1,30	1,36	0,03	0,015
24	550	157,0	53,0	1448,6	145440,1	2,002	1,30	1,27	0,13	-0,101
25	550	118,0	69,0	4006,2	35165,5	0,943	1,30	1,38	0,04	0,023
26	550	118,0	69,0	4006,2	45351,5	1,054	1,30	1,26	0,08	-0,046
27	550	118,0	53,0	4006,2	145440,1	1,560	1,30	1,21	0,20	-0,135
28	550	88,0	53,0	11854,2	145440,1	1,089	1,30	1,10	0,23	-0,146
29	600	157,0	88,0	27,3	473,5	1,239	1,30	1,30	0,05	-0,027
30	600	157,0	69,0	27,3	1378,6	1,703	1,30	1,26	0,13	-0,081
31	600	157,0	53,0	27,3	3675,4	2,129	1,30	1,25	0,19	-0,145
32	600	88,0	53,0	473,5	3675,4	0,890	1,30	1,32	0,02	-0,009

В работах [12–45] наряду с данными по длительной прочности представлены результаты их обработки с помощью одного из параметрических методов:

$$P_{\text{ЛМ}} = f(\sigma) = T(C + \lg t); \quad (9)$$

$$P_{\text{МХ}} = f(\sigma) = \frac{\lg t - \lg t_a}{T - T_a}; \quad (10)$$

$$P_{\text{ОШД}} = f(\sigma) = \lg t - (B/T); \quad (11)$$

$$f(\sigma) = b_0 + b_1 \lg \sigma + b_2 \lg^2 \sigma + \dots + b_n \lg^n \sigma. \quad (12)$$

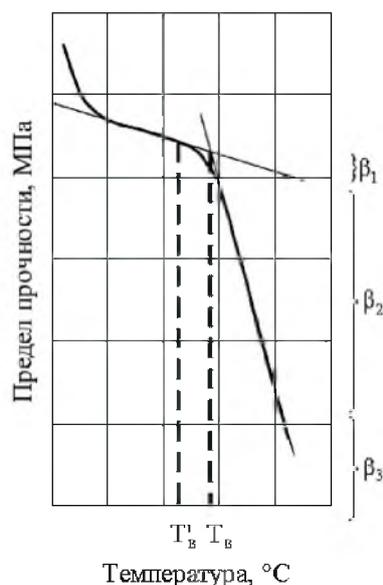


Рис. 1. Схематическая температурная зависимость предела прочности материала.

При использовании этих методов и анализе полученных результатов преимущественно учитываются основные постоянные C , $\lg t_a$, T_a , B , в то время как точность прогнозирования в значительной мере зависит также от описания полиномиальной функции (12) и значений постоянных b_n .

Результаты обработки данных по длительной прочности. Одной из важных задач системного анализа известных экспериментальных данных является формирование и постоянная работа с их достаточно представительным комплексом. Репрезентативность формируемого комплекса данных оценивается на основании концепции типовых структурных состояний. Согласно последней существует ограниченное число различных структурных состояний, к одному из которых с практически приемлемой точностью может быть приравнено любое из возможных структурных состояний. Предполагается, что каждая работа [12–45] содержит необходимый комплекс данных о свойствах одного типового структурного состояния. Ниже представлены и проанализированы результаты обработки экспериментальных данных Национального института материаловедения (Токио, Япония) [12–45] с помощью параметрических методов и МБД-2.

Работам [12–45] соответствуют номера 1В, 3В, 4В и т.д. Эти номера примем за номера отдельных состояний, каждое из которых представлено несколькими плавками. Например, работа [29] имеет № 20В и ее данные будут рассматриваться как данные для состояния 20, а для девяти плавков будут использованы соответствующие номера 20А, 20В, 20D, ..., 20М. В табл. 1 приведены такие данные для плавки 20G [29].

В табл. 1 содержатся данные 32 прогнозных оценок длительной прочности для одной плавки. Общее число проанализированных плавков составляет 277, число прогнозных оценок по данным [12–45] с помощью МБД-2 – 8500, из них 1850 на два порядка и более, в том числе 720 на 2,5; 189 на 3;

107 на 3,2; 28 на 3,5; 18 на 3,7; 8 на 4; 2 на 5 порядков. В табл. 2 приведены результаты обработки данных [29] по длительной прочности для девяти различных плавок состояния 20В.

Такие таблицы подготовлены для 34 рассматриваемых состояний. В них представлены результаты обработки экспериментальных данных одним из параметрических методов, описанным в соответствующей работе, в данном случае в [29], а также МБД-2. В табл. 2 приведены общие результаты обработки экспериментальных данных для всех плавок (ВП): $S_1 = 0,473$ (МХ); $S_1 = 0,459$ (МБД-2); $S_2 = 0,156$ (МБД-2), данные для каждой плавки, значения $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ и границы интервалов σ_α и σ_β для этих постоянных. По данным табл. 2 можно судить о том, насколько отличаются значения $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ для отдельных плавок от соответствующих общих значений.

Т а б л и ц а 2

Результаты прогнозирования длительной прочности
после интерполяционной обработки данных [29] для стали 0,5Сг–0,5Мо

Плавка	МХ			МБД-2						
	n	S_1	n'	β_1	β_2	β_3	σ_α : МПа	σ_β : МПа	S_1	S_2
ВП	234	0,473	283	0,30	1,10	1,40	340	480	0,459	0,156
А	27	0,348	34	0,23	1,10	1,37	420	480	0,225	0,121
В	25	0,447	34	0,11	1,00	1,40	300	400	0,208	0,110
Д	22	0,157	20	0,70	0,64	1,40	340	460	0,167	0,086
Е	26	0,113	32	0,70	1,20	1,55	340	460	0,154	0,125
Ф	27	0,426	34	0,14	1,04	1,42	340	480	0,260	0,143
Г	27	0,378	32	0,14	0,74	1,34	300	380	0,229	0,102
Н	27	0,380	37	0,10	1,07	1,48	340	460	0,182	0,112
Л	29	0,393	31	0,11	1,00	1,43	340	440	0,177	0,106
М	24	0,242	29	0,53	0,80	1,32	300	380	0,191	0,080

n – число результатов испытаний, n' – число прогнозных оценок.

На рис. 2 приведены данные [29] по длительной прочности в системе координат $\beta_e - \sigma_{at}$ для девяти плавок стали 0,5Сг–0,5Мо (состояние 20). Значениям β_e и σ_{at} в каждой строке табл. 1 соответствует одна точка на рис. 2. В результате данные рис. 2 и табл. 1, 2 обеспечивают подробный анализ процесса длительного разупрочнения каждой плавки и состояния в целом.

Данные табл. 3 и 4 характеризуют существенные особенности прогнозирования с помощью параметрических методов [15, 16, 22, 29, 32, 45] и МБД-2. Обработка данных для отдельного состояния (например, строки 1 в табл. 3 и 4, число результатов испытаний 207) или для отдельной плавки (строки 2, число результатов испытаний 18) параметрическими методами производилась при использовании в основном пяти–восьми численных значений постоянных, а МБД-2 – при использовании лишь трех постоянных $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ (в [45] не приведено значение S_1 для состояния в целом, поэтому в табл. 3 отсутствует одна строка, содержащая соответствующие данные).

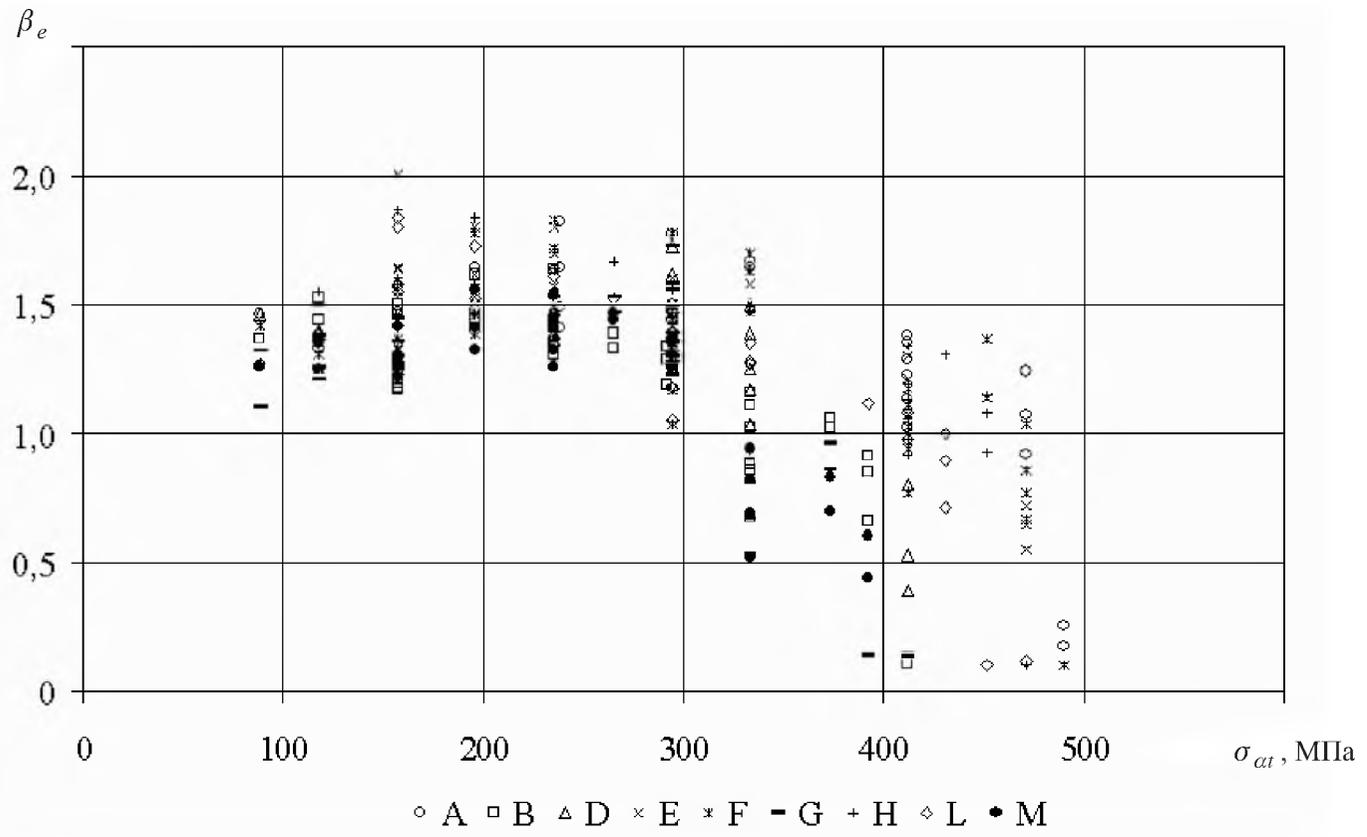


Рис. 2. Данные [29] по длительной прочности для девяти плавки (A, ..., M – плавки) стали 0,5Cr–0,5Mo в координатах $\beta_e - \sigma_{0.01}$.

Т а б л и ц а 3

Результаты обработки данных [15, 16, 22, 29, 32, 45] параметрическими методами для состояний 7, 23, 41, 5, 20, 13

Плавка	Метод	n	S_1	C	$Q,$ кДж/моль	T_a	$\lg t_a$	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5
ВП7	ЛМ	207	0,414	15,70				$1,23 \cdot 10^5$	$-1,47 \cdot 10^5$	$0,68 \cdot 10^5$	$-1,07 \cdot 10^4$		
7G	»	18	0,074	24,20				$4,11 \cdot 10^6$	$-0,95 \cdot 10^7$	$8,88 \cdot 10^7$	$-4,12 \cdot 10^6$		
7M	»	25	0,118	18,60				$7,50 \cdot 10^5$	$1,50 \cdot 10^6$	$-1,08 \cdot 10^6$	$3,44 \cdot 10^5$	$-0,40 \cdot 10^5$	
ВП23	»	86	0,162	18,60				$2,95 \cdot 10^3$	$3,91 \cdot 10^4$	$-2,05 \cdot 10^4$	$0,30 \cdot 10^4$		
23A	»	29	0,023	18,60				$-1,50 \cdot 10^5$	$3,40 \cdot 10^5$	$-2,40 \cdot 10^5$	$0,75 \cdot 10^5$	$-0,08 \cdot 10^5$	
41B	»	24	0,416	8,94				$3,36 \cdot 10^4$	$-3,06 \cdot 10^4$	$1,54 \cdot 10^4$	$-2,85 \cdot 10^3$		
ВП5	МХ	312	0,283			360	14,10	0,700	-2,000	2,260	-1,240	0,33	-0,03
5B	»	26	0,092			230	19,50	-0,020	-0,010	-0,005			
5M	»	77	0,091			420	13,40	13,400	1,250	-3,400	3,600	-1,900	-0,05
ВП20	»	234	0,473			340	18,08	-0,047	0,918	-0,692	0,229	-0,028	
20G	»	27	0,378			0	30,10	-1,090	2,110	-1,550	0,506	-0,061	
ВП13	ОШД	230	0,513		354,9			32,200	-74,500	38,300	-6,910		
13D	»	26	0,281		452,3			$5,79 \cdot 10^3$	$-1,46 \cdot 10^4$	$1,46 \cdot 10^4$	$-0,72 \cdot 10^4$	$1,80 \cdot 10^3$	$-0,17 \cdot 10^3$
13H	»	21	0,047		430,5			66,800	-128,700	64,200	-11,100		

Т а б л и ц а 4

Результаты обработки данных [15, 16, 22, 29, 32, 45] по МБД-2
для состояний 7, 23, 41, 5, 20, 13

Плавка	n	S_1	S_2	β_1	β_2	β_3
ВП7	370	0,335	0,099	0,80	1,00	1,10
7G	30	0,123	0,027	0,70	0,90	0,90
7М	46	0,159	0,051	0,70	1,00	1,10
ВП23	182	0,144	0,039	1,06	1,02	0,96
23А	65	0,061	0,021	1,10	1,10	1,00
ВП41	148	0,406	0,208	1,16	1,08	0,94
41В	24	0,335	0,196	1,20	1,40	1,00
ВП5	459	0,206	0,099	0,90	1,20	1,10
5В	46	0,132	0,056	1,00	1,10	1,10
5М	60	0,153	0,075	1,00	1,16	1,12
ВП20	283	0,459	0,156	0,30	1,10	1,40
20G	32	0,229	0,102	0,14	0,74	1,34
ВП13	267	0,433	0,166	0,60	1,00	1,10
13D	23	0,122	0,046	0,40	0,40	1,00
13Н	26	0,132	0,032	0,60	0,80	1,00

Все 34 состояния [12–45] разделены на восемь групп: 1) состояния 7, 8, 17, 18, 25 – низколегированные стали; 2) состояния 1, 20, 35 – низколегированные стали 1Cr-0,5Mo, 0,5Cr-0,5Mo, 1Cr-0,5Mo соответственно; 3) состояния 3, 11, 36 – стали с идентичным составом 2,25Cr-1Mo; состояния 9, 31 – стали с идентичным составом 1Cr-1Mo-0,25V; состояние 21 – сталь 1,25Cr-0,5Mo-Si; 4) состояния 4, 5, 14, 15, при этом состояние 4 – сталь 18Cr-8Ni, состояние 5 – сталь 18Cr-10Ni-Ti, состояния 14, 15 – сталь 18Cr-12Ni-Mo; 5) состояния 10, 12, 13, 19 – хромомолибденовые стали; 6) состояния 16, 38, 30 – хромоникелевые стали; 7) состояния 22, 23, 26, 33 – высоколегированные стали; 8) состояния 24, 29, 34, 39, 41 – высоколегированные сплавы на основе никеля.

Общие результаты обработки более 1000 диаграмм длительной прочности для этих сталей и сплавов приведены на рис. 3 и в табл. 5. Обработка с помощью МБД-2 выполнялась при использовании одного численного значения постоянной β (рис. 3, табл. 5) и трех значений постоянных β_1 , β_2 , β_3 (рис. 3, табл. 4, 5).

Обсуждение результатов. Исходя из основных постоянных параметрических соотношений (9)–(11), содержащих, в частности, постоянные C , часто близкую к 20, и B , пропорциональную активационному параметру, данных табл. 3 и анализа этих соотношений в [11] можно отметить, что параметрические методы обеспечивают преимущественно учет главных факторов и довольно общих закономерностей длительного разрушения исследуемых материалов, в то время как проблема прогнозирования определяется в значительной мере отклонениями от таких закономерностей и ролью

Результаты интерполяционной обработки данных [12–45]

№ п/п	Метод	S_1	n_1	МБД-2											Литературный источник
				n_2	β	S_1	S_2	β_1	β_2	β_3	σ_{α} , МПа	σ_{β} , МПа	S_1	S_2	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	МХ	0,095	315	405	1,32	0,257	0,146	1,10	1,42	1,24	140	340	0,172	0,099	[12]
2	МХ	0,244	284	360	1,00	0,430	0,189	1,00	0,83	1,30	100	200	0,257	0,093	[13]
3	МХ	0,307	289	351	0,92	0,293	0,112	0,88	0,94	0,96	100	200	0,284	0,110	[14]
4	МХ	0,283	312	459	1,14	0,249	0,115	0,90	1,20	1,10	150	300	0,206	0,099	[15]
5	ЛМ	0,414	207	370	1,00	0,352	0,109	0,80	1,00	1,30	100	330	0,335	0,099	[16]
6	ОШД	0,397	244	289	1,26	0,750	0,287	0,60	1,30	1,60	270	380	0,560	0,192	[17]
7	МХ	0,145	229	238	1,26	0,602	0,296	0,70	1,10	1,60	180	300	0,366	0,183	[18]
8	–	–	258	307	1,34	0,444	0,225	1,00	1,40	1,40	100	470	0,384	0,202	[19]
9	–	–	160	255	1,00	0,330	0,130	0,90	1,00	1,10	140	220	0,285	0,117	[20]
10	ОШД	0,205	237	298	0,96	0,272	0,098	0,87	0,92	1,00	100	140	0,209	0,073	[21]
11	ОШД	0,513	230	267	1,00	0,517	0,193	0,60	1,00	1,10	100	330	0,433	0,166	[22]
12	МХ	0,124	60	68	1,10	0,259	0,110	0,63	1,09	1,03	110	200	0,200	0,097	[23]
13	МХ	0,135	166	177	1,08	0,173	0,077	0,70	1,00	1,10	90	240	0,167	0,079	[24]
14	ЛМ	0,205	267	270	1,07	0,248	0,153	1,09	1,07	1,05	60	90	0,244	0,150	[25]
15	ОШД	0,845	132	157	0,80	0,914	0,200	0,30	0,60	1,00	290	380	0,517	0,136	[26]
16	МХ	0,221	111	144	1,20	0,460	0,162	0,70	0,90	1,30	300	400	0,327	0,122	[27]
17	–	–	270	358	0,80	0,200	0,067	0,80	0,80	1,00	40	140	0,163	0,052	[28]

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
18	МХ	0,473	234	283	1,40	0,524	0,189	0,30	1,10	1,40	340	480	0,459	0,156	[29]
19	–	–	307	382	1,35	0,408	0,253	1,50	1,40	1,30	140	330	0,355	0,221	[30]
20	ОШД	0,196	79	122	1,25	0,447	0,147	0,70	1,20	1,40	340	540	0,272	0,091	[31]
21	ЛМ	0,162	83	182	1,00	0,123	0,042	1,06	1,02	0,96	240	270	0,114	0,039	[32]
22	МХ	0,100	62	100	1,28	0,178	0,085	1,21	1,14	1,36	270	420	0,126	0,062	[33]
23	–	–	386	445	1,00	0,591	0,184	0,70	1,00	1,30	160	410	0,442	0,131	[34]
24	–	–	162	259	0,90	0,272	0,101	0,96	0,94	0,88	120	250	0,251	0,094	[35]
25	МС	0,328	187	314	1,20	0,294	0,161	1,20	1,20	1,10	100	300	0,284	0,149	[36]
26	МХ	0,176	123	139	1,00	0,408	0,160	0,80	1,00	1,40	60	210	0,336	0,134	[37]
27	МХ	0,411	196	231	1,00	0,612	0,202	0,60	1,00	1,40	200	480	0,459	0,130	[38]
28	–	–	149	208	0,90	0,520	0,125	1,15	0,80	0,94	310	500	0,486	0,117	[39]
29	МС	0,256	209	224	1,30	0,263	0,151	1,30	1,30	1,30	200	480	0,263	0,151	[40]
30	ЛМ	0,343	158	230	1,30	0,725	0,213	0,20	1,20	1,30	270	400	0,540	0,157	[41]
31	ЛМ	0,403	245	450	1,20	0,550	0,220	0,90	1,10	1,30	270	330	0,396	0,154	[42]
32	МХ	0,190	96	93	0,90	0,312	0,137	0,80	0,90	1,00	25	60	0,292	0,126	[43]
33	МХ	0,299	100	93	1,30	0,520	0,206	0,80	1,40	1,20	90	590	0,308	0,136	[44]
34	–	–	103	148	1,10	0,460	0,243	1,16	1,08	0,94	50	210	0,406	0,208	[45]

Примечание. n_1 – число результатов испытаний; n_2 – число прогнозных оценок по МБД-2.

второстепенных факторов. Повышенный интерес к параметрическим методам свидетельствует, что даже учет отмеченных факторов позволяет успешно решать многие практические задачи прогнозирования. В противоположность этому МБД обеспечивает довольно четкую конкретизацию особенностей каждого отдельного участка диаграммы длительной прочности с помощью характеристик β_e . Таким образом, соответствующий системный анализ данных создает качественно новые возможности уточнения прогнозирования.

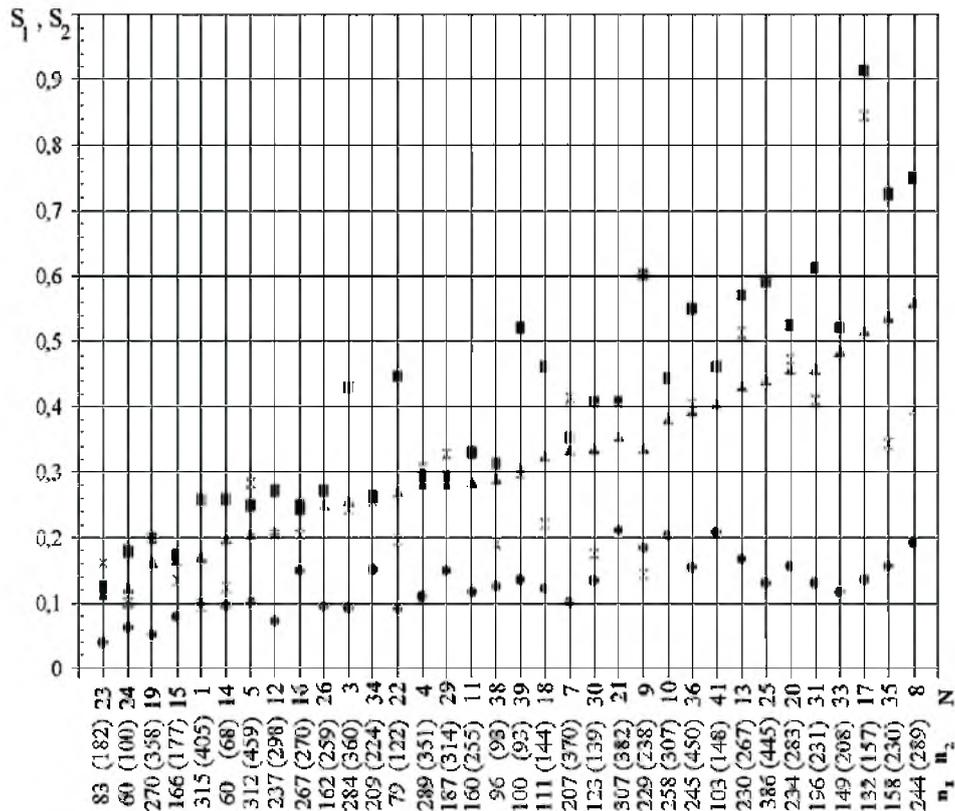


Рис. 3. Результаты интерполяционной обработки данных [12–45] параметрическими методами (\times – S_1) и МБД-2 (\blacksquare – S_1, β ; \blacktriangle – $S_1, \beta_1, \beta_2, \beta_3$; \bullet – $S_2, \beta_1, \beta_2, \beta_3$) (n_1 – число результатов испытаний; n_2 – число прогнозных оценок, N – номер состояния).

Предположим, что на рис. 3 и в табл. 5 приведены результаты обработки данных для всех типовых структурных состояний. Для этих состояний может системно решаться задача постепенного уточнения прогнозирования путем обоснования и выполнения мероприятий, приводящих к постепенному общему уменьшению значений S_1 и S_2 . При выборе оптимальных вариантов такого решения целесообразно ориентироваться на предлагаемые в качестве практически приемлемых значения $S_1 \approx 0,25 \dots 0,30$, $S_2 \approx 0,10 \dots 0,12$. Например, согласно данным рис. 3 и табл. 5 условие прак-

тически приемлемого значения $S_1 \approx 0,25$ обеспечивается для состояний 5, 16, 19, 23, 24 прогнозированием с помощью МБД-2 при использовании для каждого из указанных состояний одной расчетной постоянной β , равной соответственно 1,14; 1,07; 0,8; 1,28; 1,0. Условие $S_2 \approx 0,12$ при использовании трех расчетных значений постоянных β_i оказывается приемлемым для значительно большего числа состояний: 1, 3, 4, 5, 7, 10, 11, 14, 15, 19, 22, 23, 24, 26, 33. В результате на основании интерполяционного анализа определяют значения $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ (рис. 3, табл. 4, 5) для значительной части состояний, которые обеспечивают практически приемлемое прогнозирование и, следовательно, могут использоваться как ориентировочные для обычного прогнозирования на экстраполяционной основе.

Как видно из рис. 3 и табл. 5, значения S_1 и S_2 для близких по составу сталей и сплавов могут существенно отличаться. Например, для состояний 1, 20, 35 группы 2 значения S_1 и S_2 охватывают почти весь интервал изменений для всех групп исследованных сталей и сплавов, что характерно для групп 2, 3, 5, 7, 8 и несколько в меньшей степени для групп 1, 4, 6. Это свидетельствует о влиянии довольно большого числа факторов на закономерности длительного разрушения, а также позволяет предположить, что состояние материала играет более существенную роль, чем его принадлежность к тому или иному классу.

Дальнейшее уточнение прогнозирования с помощью параметрических методов практически невозможно из-за неизбежных неопределенностей, связанных с использованием большого числа эмпирических постоянных (табл. 3), что подтверждается пятидесятилетним опытом использования этих методов без каких-либо изменений. Вместе с тем переход к обычному прогнозированию длительной прочности, как будет показано в следующем сообщении, приводит к увеличению значений S_1 и S_2 в два–четыре раза и соответственно к необходимости существенного улучшения прогнозирования. Исключение эмпирических постоянных (табл. 4) делает предпочтительным применение МБД для этой цели. Здесь можно воспользоваться характеристиками $\beta, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_e$, которые определяют с помощью интерполяционного анализа соответствующих данных. Кроме того, появляются дополнительные возможности уточнения прогнозирования, связанные прежде всего с уточнением интервалов изменения значений $\beta_1, \beta_2, \beta_3$.

Выполненный анализ показал, что при быстром увеличении значений β_e от 0,1 до $\sim 0,7 \dots 0,9$ могут возникать значительные затруднения при выполнении прогнозирования. Такое увеличение происходит в узком интервале изменения температур и может уточняться по значениям σ_{ct} (табл. 1). Для различных плавок (рис. 2) значения σ_{ct} , при которых $\beta_e = 0,1$, существенно отличаются. Установлено, что эти значения хорошо коррелируют со значениями предела прочности, таким образом их можно уточнять с помощью последних, что способствует существенному повышению точности прогнозирования.

Для разных плавок состояния 20 значения S_1 при общем значении $S_1 = 0,459$ изменяются в интервале 0,154...0,260. Это изменение для отдельных плавок определяется различием соответствующих значений β_i . Представляют интерес малый интервал изменения значений β_3 для разных

плавков, равный 1,32...1,55 (табл. 2), при больших интервалах изменения β_2 от 0,64 до 1,2 и β_1 от 0,1 до 0,7, а также сравнительно высокие значения Δ_1 при $\sigma_{ст}$ более 300 МПа (табл. 1) и при существенно более низких значениях Δ_2 . В результате можно говорить о целесообразности совместного учета и анализа значений Δ_1 и Δ_2 . Таким образом общие значения S_1 и S_2 для отдельных плавков можно рассматривать как практически приемлемые (табл. 2). Подобный анализ выполнялся для всех рассмотренных состояний.

При использовании параметрических методов значения S_1 (рис. 3 и табл. 5) повышались до 0,513 (состояние 13), при МБД-2 – до 0,560 (состояние 8). С точки зрения оценки возможностей и сложности прогнозирования данные для состояний 7, 20, 35, 41 можно рассматривать как репрезентативные. Значения S_1 , полученные МБД-2, составили 0,335; 0,459; 0,54; 0,406, с помощью параметрических методов – 0,414; 0,473; 0,343 (для состояния 41 общие результаты прогнозирования в [45] не приведены). Для отдельных плавков эти значения могут существенно уменьшаться. Поэтому в качестве примера интересно более подробно рассмотреть наряду с данными для плавки 20G данные для плавков 7G, 35A, 41B.

Целесообразность более подробного системного анализа результатов прогнозирования на интерполяционной основе подтверждается тем, что при довольно высоких значениях S_1 и S_2 для отдельных состояний, например для состояния 20 (табл. 5), S_1 составляет 0,473 (МХ) и 0,459 (МБД-2), S_2 – 0,156 (МБД-2); S_1 и S_2 для отдельных плавков являются более низкими и соответственно значения β и β_i для них могут служить важной информацией для уточнения экстраполяции. Например, для плавки 20G (табл. 1 и 2) значения $S_1 = 0,378$ (МХ) и 0,229 (МБД-2), $S_2 = 0,102$ (МБД-2). Это характерно также для плавков состояния 7. Например, для состояния 7 (табл. 5) $S_1 = 0,414$ (ЛМ) и 0,335 (МБД-2), $S_2 = 0,099$ (МБД-2), для плавки 7G [16] после выполнения 30 прогнозных оценок, в том числе 11 оценок на два порядка и более, сравнительно низкими оказались значения $S_1 = 0,123$, $S_2 = 0,027$, а также $S_1 = 0,074$ (ЛМ).

Следует отметить, что высокие значения S_1 могут определяться отдельными значениями Δ_1 . Чем больше Δ_1 , тем проще выявить причину погрешностей. Поэтому обращали внимание на уменьшение четырех максимальных погрешностей для каждой плавки. Например, для плавки 20G это уменьшение составило 0,60; 0,48; 0,38; 0,34, в то время как в других случаях прогнозирование на 2,13; 3,88; 2,18; 2,65; 2,76; 3,27; 2,12 порядка было выполнено при значениях $\Delta_1 = 0,2$; 0,38; 0,31; 0,14; 0,03; 0,21; 0,19 и $\Delta_2 = 0,005$; 0,007; 0,231; 0,12; 0,024; 0,207; 0,145 соответственно.

В результате обработки данных по ЛМ и МБД-2 для плавки 35A получено $S_1 = 0,205$ и 0,296. После применения МБД-2 резко выделяются два значения $\Delta_1 = 0,71$ (прогнозирование на 1,9 порядка) и 0,65 (на 1,6 порядка), другие два 0,33 (на 2,3 порядка) и 0,22 (на 2,4 порядка) существенно ниже.

Для плавки 41B применение ЛМ и МБД-2 привело к $S_1 = 0,416$ и 0,335. В результате расчетов МБД-2 четыре максимальных значения Δ_1 составили 0,87 при прогнозировании на 3,0 порядка; 0,68 – на 1,7; 0,58 – на 1,18 и

1,5 порядка. Если исключить эти четыре случая из 31, то величина S_1 уменьшится с 0,335 до 0,237. Соответственно четыре максимальных значения Δ_2 равны 0,5 при прогнозировании на 1,7 порядка; 0,405 – на 2,98; 0,383 – на 1,46; 0,303 – на 0,96. Если исключить эти четыре случая из 31, то значение S_2 уменьшится с 0,196 до 0,14, т.е. до близкого к допустимому для прогнозирования на один порядок. В данном случае из 31 прогнозной оценки девять выполнено на 1,9 порядка и более, включая четыре оценки на 2,6; 2,9; 3,0; 3,3 порядка. Следует подчеркнуть, что результаты получены при анализе уникальных данных при максимальных температурах (до 1000°C) и длительности нагружения до 100000 ч. В этом случае значения Δ_1 и Δ_2 оказываются близкими, тогда как при минимальных температурах эти значения могут различаться в десять раз и более.

На основании выполненного анализа можно заключить, что общие значения основных расчетных характеристик, а также общие результаты прогноза в виде S_1 и S_2 не дают достаточно полного представления как об исследуемых закономерностях длительного разрушения, так и возможностях уточнения прогнозирования. Эффективность прогнозирования может быть значительно улучшена благодаря использованию более конкретных характеристик, например значений β_e , при исследованиях с помощью МБД.

Заключение. Результаты интерполяционной обработки более 1000 диаграмм длительной прочности МБД сопоставлены с таковыми, полученными параметрическими методами. Обосновывается, что четкая конкретизация характеристик наклонов отдельных участков диаграмм длительной прочности МБД и ее прогнозирование по одному исходному значению создают благоприятные условия для значительного улучшения и развития прогнозирования.

Резюме

Представлено результати інтерполяційної обробки більш ніж 1000 діаграм тривалої міцності за допомогою параметричних методів Ларсона–Міллера, Менсона–Хеферда, Орра–Шербі–Дорна та методу базових діаграм. Показано, що використання спеціального системного аналізу відомих експериментальних даних може суттєво підвищити точність прогнозування.

1. *Larson F. R. and Miller J.* Time-temperature relationship for rupture and creep stresses // Trans. ASME. – 1952. – **74**, No. 5. – P. 765 – 775.
2. *Manson S. S. and Haferd A. M.* A linear time-temperature relation for extrapolation of creep and stress rupture data // NASA TN 2890. – 1953.
3. *Orr R. L., Sherby O. D., and Dorn J. E.* Correlation of rupture data for metals at elevated temperatures // Trans. ASM. – 1954. – **46**. – P. 113 – 128.
4. *Prnka T. and Foldyna V.* The creep properties of low-alloy Cr–Mo–V steels with low carbon content // High-Temperature Properties of Steels: Proc. of the Joint Conf. – Eastbourne, 1966. – P. 115 – 130.
5. *Нукитин В. И.* Расчет жаростойкости металлов. – М.: Металлургия, 1976. – 208 с.

6. Шерби О. Д., Миллер А. К. Комбинированный феноменологический и физический подход к описанию механического поведения кристаллических тел при высоких температурах // Теорет. основы инж. расчетов. Сер. Д. – 1979. – № 4. – С. 92 – 101.
7. Creep Strength in Steel and High-Temperature Alloys // Proc. of the Iron and Steel Institute. – University of Sheffield, 1972. – 273 p.
8. Кеннеди А. Д. Ползучесть и усталость в металлах. – М.: Metallurgiya, 1965. – 312 с.
9. Кривенюк В. В. Прогнозирование длительной прочности тугоплавких металлов и сплавов. – Киев: Наук. думка, 1990. – 248 с.
10. Писаренко Г. С., Кривенюк В. В. Новый подход к прогнозированию длительной прочности металлов // Докл. АН СССР. Механика. – 1990. – **312**, № 3. – С. 558 – 562.
11. Троценко В. Т., Лебедев А. А., Стрижало В. А. и др. Механическое поведение материалов при различных видах нагружения. – Киев: Логос, 2000. – 571 с.
12. Data sheets on the elevated-temperature properties of 1Cr–0.5Mo steel tubes // NRIM Creep Data Sheet. – 1996. – No. 1B. – 35 p.
13. Data sheets on the elevated-temperature properties of 2.25Cr–1Mo steel // Ibid. – 1986. – No. 3B. – 30 p.
14. Data sheets on the elevated-temperature properties of 18Cr–8Ni steel // Ibid. – 1986. – No. 4B. – 32 p.
15. Data sheets on the elevated-temperature properties of 18Cr–10Ni–Ti stainless steel // Ibid. – 1987. – No. 5B. – 32 p.
16. Data sheets on the elevated-temperature properties of 0.2C Steel // Ibid. – 1992. – No. 7B. – 24 p.
17. Data sheets on the elevated-temperature properties of 0.5Mo Steel // Ibid. – 1991. – No. 8B. – 24 p.
18. Data sheets on the elevated-temperature properties of 1Cr–1Mo–0.25V steel // Ibid. – 1990. – No. 9B. – 45 p.
19. Data sheets on the elevated-temperature properties of 12Cr–1Mo–1W–0.3V steel // Ibid. – 1998. – No. 10B. – 44 p.
20. Data sheets on the elevated-temperature properties of 2.25Cr–1Mo steel // Ibid. – 1997. – No. 11B. – 29 p.
21. Data sheets on the elevated-temperature properties of 5Cr–0.5Mo steel // Ibid. – 1992. – No. 12B. – 25 p.
22. Data sheets on the elevated-temperature properties of 12Cr steel // Ibid. – 1994. – No. 13B. – 44 p.
23. Data sheets on the elevated-temperature properties of 18Cr–12Ni–Mo steel // Ibid. – 1988. – No. 14B. – 28 p.
24. Data sheets on the elevated-temperature properties of 18Cr–12Ni–Mo steel // Ibid. – 1988. – No. 15B. – 37 p.

25. *Data sheets on the elevated-temperature properties of 25Cr–20Ni–0.4C steel // Ibid. – 1990. – No. 16B. – 35 p.*
26. *Data sheets on the elevated-temperature properties of 0.3C steel // Ibid. – 1994. – No. 17B. – 39 p.*
27. *Data sheets on the elevated-temperature properties of 1.3Mn–0.5Mo–0.5Ni steel // Ibid. – 1987. – No. 18B. – 28 p.*
28. *Data sheets on the elevated-temperature properties of 9Cr–1Mo steel // Ibid. – 1997. – No. 19B. – 29 p.*
29. *Data sheets on the elevated-temperature properties of 0.5Cr–0.5Mo steel // Ibid. – 1994. – No. 20B. – 28 p.*
30. *Data sheets on the elevated-temperature properties of 1.25Cr–0.5Mo–Si steel // Ibid. – 1994. – No. 21B. – 32 p.*
31. *Data sheets on the elevated-temperature properties of 15Cr–26Ni–1.3Mo–2.1Ti–0.3V // Ibid. – 1993. – No. 22B. – 31 p.*
32. *Data sheets on the elevated-temperature properties of 20Cr–20Ni–20Co–4W–4Mo–4(Nb+Ta) // Ibid. – 1989. – No. 23B. – 28 p.*
33. *Data sheets on the elevated-temperature properties of nickel based 15Cr–28Co–4Mo–2.5Ti–3Al superalloy // Ibid. – 1989. – No. 24B. – 34 p.*
34. *Data sheets on the elevated-temperature properties of high strengths steel (class 590 MPa) // Ibid. – 1989. – No. 25B. – 34 p.*
35. *Data sheets on the elevated-temperature properties of 21Cr–32Ni–Ti–Al // Ibid. – 1998. – No. 26B. – 42 p.*
36. *Data sheets on the elevated-temperature properties of nickel based 13Cr–4.5Mo–0.75Ti–6Al–2.3(Nb+Ta)–Zr–B superalloy // Ibid. – 1990. – No. 29B. – 43 p.*
37. *Data sheets on the elevated-temperature properties of 25Cr–10Ni–7.5W–B // Ibid. – 1988. – No. 30B. – 38 p.*
38. *Data sheets on the elevated-temperature properties of 1Cr–1Mo–0.25V steel // Ibid. – 1994. – No. 31B. – 41 p.*
39. *Data sheets on the elevated-temperature properties of 21Cr–20Ni–20Co–3Mo–2.5W–(Nb+Ta)–N // Ibid. – 1999. – No. 33B. – 58 p.*
40. *Data sheets on the elevated-temperature properties of nickel based 19Cr–18Co–4Mo–3Ti–3Al–B superalloy // Ibid. – 1993. – No. 34B. – 62 p.*
41. *Data sheets on the elevated-temperature properties of 1Cr–0.5Mo steel // Ibid. – 1990. – No. 35A. – 22 p.*
42. *Data sheets on the elevated-temperature properties of 2.25Cr–1Mo steel // Ibid. – 1991. – No. 36A. – 22 p.*
43. *Data sheets on the elevated-temperature properties of 25Cr–35Ni–0.4C // Ibid. – 1991. – No. 38A. – 29 p.*
44. *Data sheets on the elevated-temperature properties of nickel based 15.5Cr–2.5Ti–0.7Al–1Nb–7Fe // Ibid. – 1992. – No. 39A. – 26 p.*

45. *Data sheets on the elevated-temperature properties of nickel based 15.5Cr–8Fe // Ibid. – 1999. – No. 41A. – 38 p.*
46. *Кривенюк В. В. Особливі співвідношення характеристик короткочасної та тривалої міцності // Металознавство та обробка металів. – 2006. – № 1. – С. 63 – 66.*

Поступила 11. 05. 2004