

## Прогнозирование длительной прочности сталей и сплавов параметрическими методами и методом базовых диаграмм. Сообщение 2. Экстраполяционный анализ экспериментальных данных

**В. В. Кривенюк**

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

*Представлены результаты экстраполяционной обработки более 250 диаграмм длительной прочности методами Ларсона–Миллера, Мэнсона–Хэферда, Орра–Шерби–Дорна и методом базовых диаграмм. Установлено, что переход от интерполяционных расчетов к экстраполяционным может привести к увеличению погрешностей прогнозирования в два–четыре раза. Проанализированы причины значительного увеличения погрешностей прогнозирования и возможности их устранения.*

**Ключевые слова:** длительная прочность, экстраполяционная обработка, параметрические методы, базовые диаграммы.

**Введение.** Как уже отмечалось [1], при прогнозных расчетах наиболее широко используются параметрические методы Ларсона–Миллера (ЛМ) [2], Мэнсона–Хэферда (МХ) [3], Орра–Шерби–Дорна (ОШД) [4] и, несмотря на критические замечания, большая их часть до сих пор не учтена. Так, например, согласно данным о структурных схемах [5] (рис. 1), каждый из методов справедлив для неких ограниченных условий при отсутствии четких сведений о пределах их применимости. Авторы метода [2] показали, что зависимости  $\lg t = f(1/T)$ , построенные при  $\sigma = \text{const}$  в системе координат  $\lg t - 1/T$ , сходятся в точку с координатами  $\lg t = -20 = -C$ ;  $1/T = 0$  (рис. 1,а). В противоположность этому в [3] установлено, что зависимости  $\lg t = f(1/T)$  при  $\sigma = \text{const}$  могут иметь существенно нелинейный характер и сходятся в точку с координатами, отличающимися от указанных. Учитывая, что расстояния между графиками  $\lg t = \text{const}$  в системе координат  $T - \lg \sigma$  при отдельных значениях  $\sigma = \text{const}$  приблизительно равны, можно предположить, что между температурой и логарифмом времени до разрушения при  $\sigma = \text{const}$  существует линейная зависимость. Построение соответствующих диаграмм в системе координат  $T - \lg t$  подтвердило это предположение и определило структурную схему метода МХ (рис. 1,б). Зависимости  $\lg t = f(1/T)$  (рис. 1,а) имеют разный наклон и, следовательно, активационный параметр зависит от напряжений [2]. А согласно методу [4] (рис. 1,в) данные зависимости имеют равный наклон и, значит, активационный параметр не зависит от напряжений. Все это приводит к значительным неопределенностям, так как вышеупомянутые методы, включая [2–4], обладают принципиальными отличиями, что ограничивает пределы их применимости, однако оценить их, как показывает длительная практика, фактически невозможно.

Тщательный анализ широко используемых методов, периодическая оценка достижений и перспектив развития прогнозирования приобретают особое значение (например, [6]). Соответствующие исследования привели к

разработке более общего метода – метода минимума связей, который можно записать в виде

$$\lg t + (1 + \alpha \lg t)F(T) = f(\lg \sigma), \quad (1)$$

где  $F$ ,  $f$  – функции температуры и напряжений соответственно.

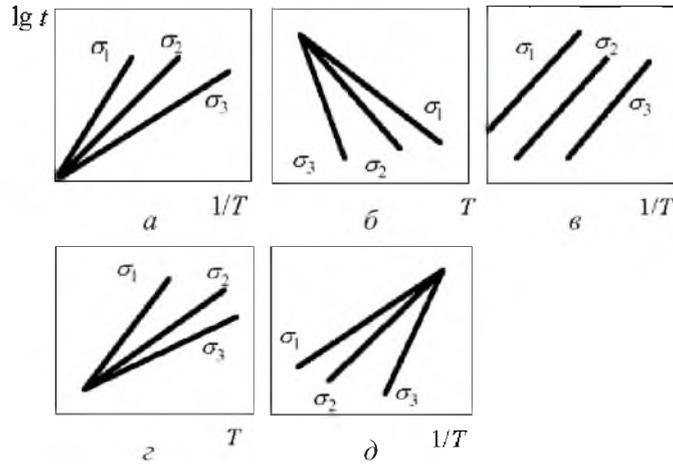


Рис. 1. Температурные зависимости долговечности при  $\sigma_i = \text{const}$  [5]: а – ЛМ; б – МХ; в – ОШД; г – Голдхоффа-Шерби; д – Уайт-Ле Мэй.

Разработка такого подхода предполагает использование не одного метода, а некоторого их комплекса, который аналитически может быть обобщен с помощью (1), после чего в каждом конкретном случае выбор одного из методов должен осуществляться на основании специальных критериев. Эта вполне логичная модель решения рассматриваемой проблемы так и не была в полной мере реализована. Однако параметрические методы [2–4], основные положения которых, как отмечалось выше, далеко не безупречны, по-прежнему оставались наиболее широко используемыми. В связи с этим цель настоящего исследования – более тщательный анализ принципиальных недостатков общепринятых методов прогнозирования и обоснование возможности существенного развития прогнозирования лишь в результате перехода к специальному системному анализу известных экспериментальных данных. Его основой должно стать совместное развитие интерполяционных и экстраполяционных расчетов.

**Материалы и методы.** В этом исследовании на примере анализа более 250 диаграмм длительной прочности [7–14] оценивались экстраполяционные возможности параметрических методов ЛМ, ОШД, а также метода базовых диаграмм [15–17] (МБД-1 – прогнозирование на один порядок, МБД-2 – прогнозирование на 1–3 порядка по логарифмической шкале времени). Для выполнения такого анализа сначала целесообразно более четко охарактеризовать некоторые особенности преобразований данных с помощью параметрических методов, используя в качестве примера диаграммы длительной прочности (рис. 2) с произвольно нанесенными на них точками [18]. Результаты обработки этих данных по методу ЛМ представлены на рис. 3.

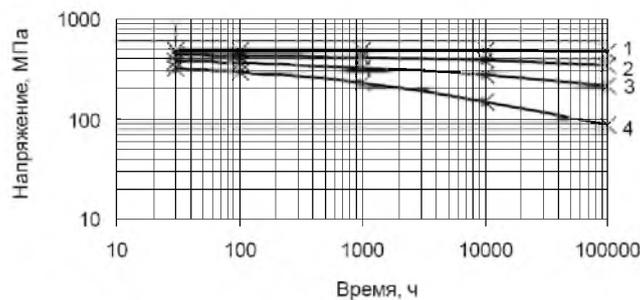


Рис. 2. Диаграммы длительной прочности сплава Cr–Mo–V при температурах 400 (1), 450 (2), 500 (3) и 550°С (4) [18].

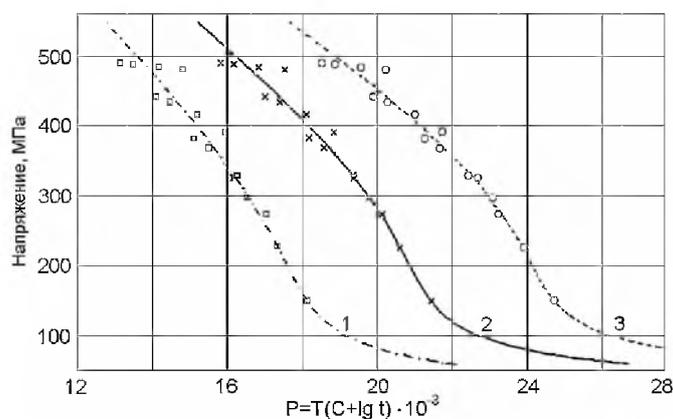


Рис. 3. Параметрические кривые ЛМ при значениях  $C$ , равных 18 (1); 22 (2); 26 (3) [18].

При минимальных температурах наклон диаграмм длительной прочности часто близок к горизонтальному, и соответственно  $\beta_e \approx 0$ , при максимальных температурах длительная прочность приближается к значениям порядка нескольких МПа. Обработка таких достаточно полных данных по длительной прочности чаще приводит к значительным погрешностям, на которые указывали авторы [18] и о которых можно судить по некоторым особенностям обработки диаграмм длительной прочности с помощью параметрических методов.

Заметим, что взаимный наклон этих диаграмм мало изменяется после параметрического преобразования (рис. 3). Диаграмма длительной прочности при минимальной температуре (рис. 2), близкая к горизонтальной, резко отклоняется от параметрической кривой (рис. 3), что часто приводит к увеличению погрешностей. В свою очередь, причина возможных значительных погрешностей при максимальных температурах заключается в следующем.

При построении участка параметрической кривой (рис. 3) в интервале напряжений диаграмм 2 и 3 (рис. 2) его переходная часть преимущественно уточняется по данным для точек диаграммы 3. Для конечного участка параметрической кривой при максимальной температуре и минимальных напряжениях, определяемого диаграммой 4, такого уточнения уже нет. В связи с этим может резко повышаться роль случайных отклонений.

Например, прогнозирование с помощью метода ЛМ при значении константы  $C = 18$  привело к довольно большой величине  $S_1 = 1,32$ . При  $C = 22$  и  $26$  значения  $S_1 = 1,36$  и  $1,46$  соответственно. Дополнительно рассчитывали параметрические кривые при изменении положения лишь одной точки на диаграмме (рис. 2), т.е. точки при произвольно выбранных  $\sigma_{te} = 226,3$  МПа и температуре  $550^\circ\text{C}$ . Сначала вместо  $1000$  ч было принято  $2000$  ч. При  $C = 18; 22; 26$  такое изменение времени до разрушения привело к более низким значениям  $S_1 = 1,28; 1,15; 1,10$ . Затем вместо  $1000$  ч было принято  $500$  ч, что при  $C = 18; 22; 26$  привело к увеличению значений  $S_1$  до  $1,79; 1,93; 2,11$ . Это свидетельствует о возможной значительной роли кажущихся второстепенными многих факторов, которые вообще не принимаются во внимание. При этом особенно следует подчеркнуть, что рассмотренные диаграммы не относятся к сложным.

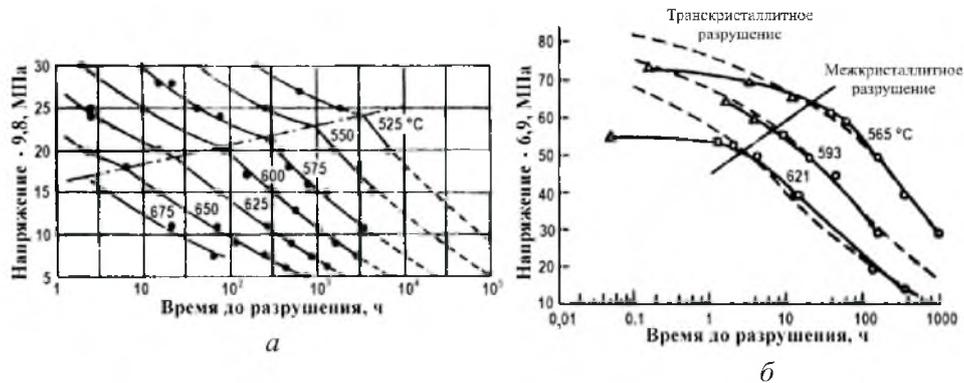


Рис. 4. Длительная прочность сталей 2,25Cr-1Mo (а) и 17-22As (б) [6].

О сложных случаях прогнозирования [6] можно судить по данным рис. 4 и решениям, рекомендуемым в [6]. Экспериментальные данные по левую и правую стороны от линии раздела (рис. 4) могут описываться функцией  $f(\lg \sigma)$  формулы (1) в виде

$$G = A + B \lg \sigma + C/\sigma \quad (2)$$

и

$$G = A' + B' \lg \sigma + C'\sigma \quad (3)$$

соответственно или общей функцией

$$G = B + C \lg \sigma + D\sigma + E\sigma^2. \quad (4)$$

На рис. 4,а диаграммы длительной прочности представлены в полулогарифмической, на рис. 4,б – в двойной логарифмической системах координат. Какое-либо физически обоснованное уточнение границ рассмотренных областей с помощью эмпирических соотношений вида (2)–(4) не только не выполняется, но и, как показывает применение МБД, вероятнее всего, не

может выполняться вследствие неоправданного использования довольно большого числа эмпирических постоянных. Это определяет значительные трудности эффективного развития прогнозирования ползучести и длительной прочности. В связи с этим для сравнения проанализируем также результаты обработки данных рис. 4 с помощью МБД-2 (табл. 1,а и 1,б; рис. 5).

Т а б л и ц а 1,а

Результаты обработки данных по длительной прочности (рис. 4,а) [6] МБД-2

№ п/п	$\sigma_{\alpha t}$ , МПа	$\sigma_{te}$ , МПа	$\alpha t$ , ч	$te$ , ч	$\lg\left(\frac{te}{\alpha t}\right)$	$\Delta_1$	$\Delta_2$	$\beta_e$	$\beta_i$
1	300	240	180	3300	1,263	0,64	-0,23	0,68	1,3
2	300	230	42	1000	1,377	0,62	-0,23	0,75	
3	300	217	9	250	1,444	0,51	-0,19	0,87	
4	300	206	1	77	1,631	0,51	-0,19	0,92	
5	300	200	180	6700	1,571	0,49	-0,20	0,93	
6	300	150	42	4700	2,049	0,31	-0,15	1,13	
7	300	100	9	4400	2,689	0,18	-0,11	1,23	
8	300	75	1,8	2900	3,207	0,20	-0,14	1,24	
9	300	100	180	80000	2,648	0,23	-0,14	1,22	
10	300	50	42	100000	3,377	0,06	-0,06	1,29	
11	300	50	9	21000	3,368	0,02	0,01	1,30	
12	300	50	1,8	6200	3,537	0,07	-0,06	1,28	
13	250	193	1,8	23	1,106	0,35	-0,13	0,91	
14	250	50	1,8	1800	3,000	0,11	0,10	1,34	
15	200	180	2,3	7	0,483	0,24	-0,11	0,82	1,6
16	240	200	3300	6700	0,308	0,07	0,04	1,95	
17	230	150	1000	4700	0,672	0,15	0,09	1,91	
18	217	100	250	4400	1,246	0,07	0,05	1,68	
19	206	75	77	2900	1,576	0,02	0,01	1,61	
20	196	50	23	1800	1,894	0,04	0,04	1,62	
21	180	50	7	800	2,058	0,21	-0,24	1,47	
22	157	75	3	80	1,426	0,18	-0,13	1,43	
23	240	100	3300	80000	1,385	0,08	0,06	1,68	
24	230	50	1000	100000	2,000	0,08	0,10	1,65	
25	217	50	250	21000	1,924	0,09	0,11	1,66	
26	206	50	77	6200	1,906	0,06	0,07	1,64	
$S_1 = 0,291; S_2 = 0,135$									

Т а б л и ц а 1,б

Результаты обработки данных по длительной прочности (рис. 4,б) [6] МБД-2

№ п/п	$\sigma_{at}$ , МПа	$\sigma_{te}$ , МПа	$\alpha t$ , ч	$te$ , ч	$\lg\left(\frac{te}{\alpha t}\right)$	$\Delta_1$	$\Delta_2$	$\beta_e$	$\beta_i$
1	492	446	1	10	1	0,62	-0,17	0,54	1,40
2	449	380	1	10	1	0,4	-0,12	0,85	
3	466	380	10	100	1	0,32	-0,10	0,96	
4	492	380	1	100	2	1,07	-0,32	0,67	
5	449	242	1	100	2	0,15	-0,06	1,30	
6	466	207	10	1000	2	0,18	0,09	1,51	
7	492	207	1	1000	3	0,55	-0,26	1,18	
8	449	117	1	1000	3	0,15	0,11	1,46	
9	376	286	1	10	1	0,31	-0,13	1,23	1,75
10	380	242	10	100	1	0,01	0,00	1,75	
11	286	169	10	100	1	0,02	0,01	1,78	
12	380	207	100	1000	1	0,22	0,14	2,10	
13	242	117	100	1000	1	0,19	0,15	2,04	
14	169	70	100	1000	1	0,23	0,23	2,09	
15	376	169	1	100	2	0,36	-0,24	1,46	
16	380	117	10	1000	2	0,01	0,00	1,75	
17	286	70	10	1000	2	0,01	0,01	1,76	
$S_1 = 0,398; S_2 = 0,162$									

В первом приближении необходимые для прогнозирования величины  $\beta_1 = 1,3$  при  $\sigma_{at} = 250$  МПа и более и  $\beta_2 \approx 1,6$  при  $\sigma_{at} < 240$  МПа визуально определяются по данным рис. 5,а. Аналогично величины  $\beta_1 = 1$  при  $\sigma_{at} > 400$  МПа и  $\beta_2 = 1,6$  при  $\sigma_{at} < 400$  МПа устанавливаются по данным рис. 5,б. Более точная оценка дает в результате значения  $\beta_i$  и  $\beta_e$ , приведенные в табл. 1. Значения  $\beta_1$  составляют 1,3 при  $\sigma_{at} < 240$  МПа и  $\beta_2 = 1,6$  при  $\sigma_{at} > 240$  МПа (табл. 1,а), соответственно прогнозирование на интерполяционной основе с помощью МБД-2 привело к значениям  $S_1 = 0,291$  и  $S_2 = 0,135$ . Если учесть, что из 26 расчетных оценок 10 выполнены на два порядка и более, включая пять оценок на три порядка и более, то рассматриваемый случай может быть вполне оправданно отнесен к практически приемлемым.

Обработка данных (табл. 1,б) при  $\beta_1 = 1,40$  и  $\beta_2 = 1,75$  привела к  $S_1 = 0,398$  и  $S_2 = 0,162$ . Если, например, исключить из табл. 1,б результат прогнозирования с 1 на 100 ч (строка 4) и соответственно величину одной максимальной погрешности  $\Delta_1 = 1,07$ , то значение  $S_1$  уменьшится до 0,36, т.е. приблизится к принимаемым в качестве практически приемлемых, после чего рассматриваемый случай также может быть переведен из категории сложных в категорию сравнительно простых. Кроме того, особенно важной

является конкретизация двух-трех максимальных отклонений  $\beta_i - \beta_e$ , которые в основном и определяют максимальные погрешности и снижение точности прогнозирования в целом. После определения максимальных отклонений значительно упрощается выявление их причин, что в рамках системного анализа создает качественно новые возможности для существенного развития прогнозирования. При этом полностью исключается использование эмпирических постоянных, что фактически сделало невозможным эффективное развитие прогнозирования с помощью параметрических методов.

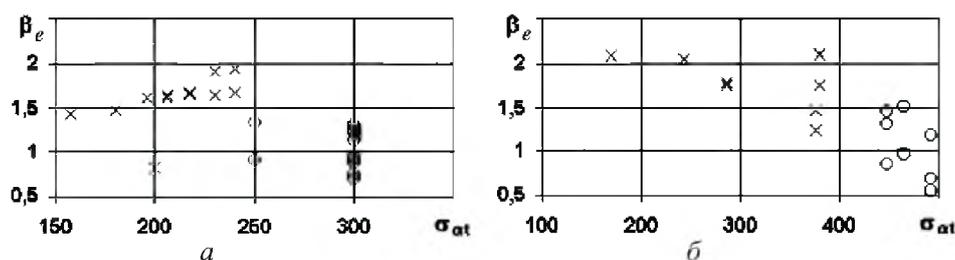


Рис. 5. Результаты обработки данных по длительной прочности МБД-2 для сталей 2,25Cr-1Mo (а) и 17-22As (б) [6].

**Результаты исследования.** Прогнозирование с помощью параметрических методов ЛМ [2], ОШД [3], МБД-1 и МБД-2 [15–17] для состояний 3 [7], 5 [8], 9 [9], 13 [10], 20 [11], 31 [12], 35 [13], 36 [14] выполнено на основании экстраполяционной обработки более 250 диаграмм длительной прочности (табл. 2). Обращают на себя внимание более высокие значения стандартных отклонений по логарифму времени  $S_1$  и напряжениям  $S_2$  в сравнении с рассчитанными по результатам интерполяционного анализа [1]. Так, например, интерполяционная обработка данных для указанных состояний привела к значениям  $S_1$ , равным 0,244 (МХ); 0,283 (МХ); 0,145 (МХ); 0,513 (ОШД); 0,473 (МХ); 0,411(МХ); 0,343 (ЛМ), 0,403 (ЛМ) [1]. При прогнозировании с помощью метода ЛМ значения  $S_1$  (табл. 2) в основном повышались до 0,57; 0,60; 0,93; 0,43; 0,87; 1,32; 1,82; 0,36. В результате прогнозирования с помощью метода ОШД получили значения  $S_1$ , равные 0,68; 0,54; 0,96; 0,30; 1,07; 1,20; 1,94; 0,46, которые близки к рассчитанным по методу ЛМ. При этом следует обратить внимание, что при интерполяционном анализе [1] определяли погрешности для состояния в целом, а в данном исследовании – для отдельных плавок. Это позволяет утверждать, что в результате экстраполяционного прогнозирования погрешности могут повышаться в два–четыре и более раз. А поскольку в каждом случае рост погрешности установить заведомо нельзя и она может значительно превышать практически приемлемую, необходимо провести подробный анализ причин ее увеличения.

В качестве примера проанализируем возможности прогнозирования на длительный срок на основании обработки данных для плавки 3А [7], для которой приведены экспериментальные значения  $\sigma = 294; 265; 216; 177; 157; 137$  МПа и  $t_p = 794,5; 1567,3; 6057,0; 17829,6; 31692,8; 70341,1$  ч при  $T = 500^\circ\text{C}$  [7]. При выборе этих данных следовало ориентироваться на макси-

мальное время 70341,1 ч и на время в десять раз меньшее – 6057 ч. При этом промежуточные длительности нагружения, т.е. 17829,6 и 31692,8 ч, и соответствующие напряжения не учитывали. В качестве исходных принимали данные испытаний длительностью до 6057 ч. В результате для построения параметрических кривых и расчетов по МБД при  $T = 500^{\circ}\text{C}$  использовали лишь три результата испытаний, а при более высоких температурах – по два. Следовательно, объемы данных для испытаний малой длительности были значительно меньше необходимых, в частности для построения зависимостей  $\lg t = f(1/T)$  и определения значений активационных параметров.

Т а б л и ц а 2

Результаты экстраполяционной обработки данных по длительной прочности [7–14] для отдельных состояний материала

№ п/п	Состояние	ЛМ	ОШД	МБД-1			МБД-2		МБД-2	
		$S_1$	$S_1$	$S_1$		$S_2$	$S_1$	$S_2$	$S_1$	$S_2$
				$\beta$	$\beta + 0,2$	$\beta + 0,2$	$\beta$	$\beta$	$\beta + \Delta\beta$	$\beta + \Delta\beta$
1	3	0,57	0,68	0,71	0,47	0,26	0,76	0,32	0,35	0,20
2	5	0,60	0,54	0,27	0,21	0,13	0,33	0,28	–	–
3	9	0,93	0,96	0,62	0,31	0,17	0,70	0,22	–	–
4	13	0,43	0,30	0,49	0,37	0,16	0,90	0,20	0,44	0,15
5	20	0,87	1,07	0,90	0,46	0,21	0,84	0,29	–	–
6	31	1,32	1,20	1,38	0,49	0,17	2,06	0,26	0,52	0,20
7	35	1,82	1,94	1,02	0,46	0,18	1,78	0,36	0,45	0,26
8	36	0,36	0,46	0,46	0,31	0,26	0,82	0,44	–	–

При использовании МБД-1 и МБД-2 устанавливали значения  $\beta$  для каждой температуры, затем прогнозировали длительную прочность на максимальное время, в данном случае 70343,1 ч при  $T = 500^{\circ}\text{C}$ , и рассчитывали погрешности прогнозирования, а также стандартные отклонения.

В результате прогнозирования с использованием данных для плавки ЗВ [7] при 500, 550, 600, 650 $^{\circ}\text{C}$  получили значения  $\Delta_1$ , равные –0,09; –0,08; 0,13; 1,21 (ЛМ); –0,02; –0,13; –0,03; –1,46 (ОШД); 0,44; 0,54; 0,28; 0,51 (МБД-1); 0,28; 0,31; 2,03; 0,37 (МБД-2). Видно, что при максимальных температурах применение параметрических методов приводит к резкому увеличению значений  $\Delta_1$  (рис. 3). При других температурах результаты прогнозирования с помощью ЛМ и ОШД точнее, чем по МБД. При использовании МБД-2 наблюдалось резкое увеличение  $\Delta_1$  при 600 $^{\circ}\text{C}$ , обусловленное более низкими значениями  $\beta$ , по сравнению с  $\Delta_1$  при 550 и 650 $^{\circ}\text{C}$ . Это в какой-то мере нелогично, поскольку повышение температуры и длительности нагружения чаще приводит к увеличению значений  $\beta$ . Заметим также, что при других температурах расчет по МБД-2, в том числе на 2,37; 3,24; 1,66 порядка, по сравнению с МБД-1 оказался точнее при прогнозировании на 0,69...1,65 порядка. Даже такой предварительный анализ позволяет предположить, что для развития прогнозирования целесообразно использовать более детальный системный анализ экспериментальных данных.

Результаты прогнозирования параметрическими методами для плавки 3С были более точными, что в сочетании с выполненным выше анализом позволяет говорить о значительной роли случайных факторов. Так, по мере повышения температуры значения  $\Delta_1$  оказались равны  $-0,08; -0,19; 0,38; 0,08$  (ЛМ);  $-0,01; -0,24; 0,23; -0,06$  (ОШД);  $0,05; 0,58; 0,35; 0,32$  (МБД-1);  $0,13; 0,51; 0,94; 0,55$  (МБД-2) при значениях  $S_1 = 0,224; 0,174; 0,375; 0,605$  соответственно.

Для плавки 3L получены более близкие значения  $S_1$ , равные  $0,45$  (ЛМ);  $0,55$  (ОШД);  $0,42$  (МБД-1);  $0,66$  (МБД-2); значения  $\Delta_1 = -0,34; -0,46; -0,08; -0,67$  (ЛМ);  $-0,40; -0,59; -0,27; -0,77$  (ОШД);  $0,25; 0,61; 0,50; 0,17$  (МБД-1);  $0,11; 0,28; 1,28; 0,18$  (МБД-2). При применении параметрических методов зависимость погрешностей от температуры проявляется в меньшей степени. Значения погрешностей следует считать сравнительно высокими. Вместе с тем результаты обработки по МБД-2, в частности значения  $\Delta_2 = -0,04; -0,09; 0,43; 0,15$  при прогнозировании на 2,5; 2,6; 2,9; 1,6 порядка, и систематическое увеличение  $\Delta_1$  при  $600^\circ\text{C}$ , в данном случае  $\Delta_1 = 0,43$ , обуславливают необходимость уточнения причин такого увеличения.

Для плавки 3М были установлены значения  $S_1 = 0,30$  (ЛМ);  $0,40$  (ОШД);  $0,39$  (МБД-1);  $0,53$  (МБД-2) и  $\Delta_1 = -0,20; -0,20; -0,12; -0,51$  (ЛМ);  $-0,22; -0,30; 0,06; -0,69$  (ОШД);  $0,28; 0,56; 0,52; 0,22$  (МБД-1);  $0,17; 0,39; 0,93; 0,31$  (МБД-2). В этом случае погрешности прогнозирования меньше, чем для других плавок, однако в целом они довольно высокие. Обработка данных при  $600^\circ\text{C}$  с помощью МБД-2 также привела к резкому увеличению погрешности прогнозирования по сравнению с обработкой другими методами.

Для различных плавок состояния 3 значения  $C$  и  $Q$  изменялись в довольно широких пределах:  $C = 11,6...32,8$  и  $Q = 228...621$  кДж/моль. При обработке рассматриваемых данных по МБД-2, например данных для различных плавок при  $500^\circ\text{C}$ , расчетные значения  $\beta$  составили  $1,24; 1,16; 1,15; 0,91; 0,87; 1,02; 1,0; 1,17; 1,03; 1,04; 1,24; 1,19$ , экспериментальные –  $1,23; 1,05; 1,21; 0,76; 0,74; 0,91; 0,85; 0,89; 0,84; 1,01; 1,16; 1,13$ . Из этого следует, что значения определяющих характеристик параметрических соотношений изменяются в более широких пределах по сравнению с МБД-2.

Практически для всех плавок при температуре  $600^\circ\text{C}$  значения  $\Delta_1$ , полученные по МБД-2, были более высокие. Последующее использование для рассмотренных 12 плавок вместо  $\beta$  значений  $\beta + 0,2$  привело к уменьшению  $\Delta_1$  с  $0,67; 2,03; 0,94; 0,76; 0,87; 4,07; 1,91; 1,94; 1,36; 1,28; 0,93; 1,06$  до  $0,24; 0,19; 0,12; 0,25; 0,18; 1,20; 0,07; 0,10; 0,10; 0,03; 0,09; 0,04$ . В результате для состояния 3 значение  $S_1$  уменьшилось с  $0,76$  до  $0,35$ , а  $S_2$  – с  $0,32$  до  $0,20$  (табл. 2). Следует отметить, что прогнозирование по МБД-2 не уступает в точности прогнозированию с помощью параметрических методов, несмотря на большое число прогнозных оценок на два-три порядка. Это позволяет сделать вывод, что значения  $\beta_i$ , получаемые при интерполяционном анализе, могут служить основой для существенного уточнения экстраполяционного прогнозирования.

**Обсуждение результатов.** К настоящему времени в мире выполнено около 500 экспериментов длительностью  $10^5$  ч и более для довольно ограниченного числа материалов, что объясняется их высокой стоимостью и трудоемкостью. Следовательно, при резком увеличении числа новых конструкционных материалов необходимые для них экспериментальные данные не могут быть получены в достаточно полном объеме. Таким образом, задача возможно более полного выявления информативности известных данных по испытаниям длительностью  $10^5$  ч и более становится весьма актуальной.

Результаты экстраполяции данных по длительной прочности для отдельных состояний (табл. 2), а также аналогичные данные для отдельных плавок позволяют заключить, что переход от интерполяционных расчетов к экстраполяционным приводит не только к значительному увеличению погрешностей прогнозирования, но и к более резкому проявлению роли второстепенных, случайных факторов. О таком изменении погрешностей можно судить по значениям  $S_1$  и  $S_2$  для отдельных состояний и отдельных плавок, в связи с чем необходимы различные дополнительные системные уточнения. При анализе данных для различных плавок состояния 3 рассмотрим подробнее резкое увеличение погрешностей прогнозирования при  $600^\circ\text{C}$ . Эти погрешности являются результатом нарушения монотонного увеличения наклонов диаграмм длительной прочности в зависимости от температуры. Поведение сталей и сплавов довольно четко характеризуется температурными изменениями  $\Delta\beta_2$  (табл. 3), т.е. возрастанием значений  $\beta_i$  при переходе из интервала  $10^3 \dots 10^4$  в интервал  $10^4 \dots 10^5$  ч. Постоянство значений  $\beta_i$  определяется вышеупомянутым изменением наклонов диаграмм. Из данных табл. 3, в которой представлены результаты анализа более 200 диаграмм, полученных при длительности эксперимента до 100000 ч и более, следует, что значения  $\Delta\beta_2$  могут существенно отличаться от чаще принимаемого  $\Delta\beta_2 = 0,2$ . В этом случае особого внимания заслуживает резкое увеличение значения  $\Delta\beta_2 = 0,7$  для стали 2,25Cr-1Mo (состояние 3) при  $600^\circ\text{C}$  [7], для которой необходимо было вводить поправку  $\beta + \Delta\beta_2$  вследствие резкого нарушения наклонов отдельных участков диаграмм. Подобный эффект, но в меньшей степени проявляется и для других сталей (табл. 3). Эти нарушения при отдельных температурах позволяют констатировать следующее.

При параметрических методах используются постоянные  $C$ ,  $\lg t_a$ ,  $T_a$ , не зависящие от температуры, однако данные табл. 2, 3 показывают, что эта концепция неприемлема. В результате использование таких постоянных может приводить к резким отклонениям их расчетных значений от истинных. Это те весьма распространенные случаи, когда необходимо прибегать к дополнительным уточнениям физического характера, что при системном подходе не вызывает сколько-нибудь существенных затруднений. Такие уточнения в табл. 2 и определялись переходом от  $\beta$  к значениям  $\beta + \Delta\beta_2$ . Температурные изменения значений  $\Delta\beta_2$  (табл. 3) требуют физических обоснований. Системный подход к изучению отклонений значительно облегчает выявление их физических причин и соответственно способствует развитию прогнозирования.

## Погрешности прогнозирования МБД

Материал	$T, ^\circ\text{C}$	$\Delta\beta_2$	$S_2, \%$
X18H9T [8]	600	0,25	9,5
	650		
	700		
X13 [10]	450	0,40	11
	500	0,20	
	550	0,30	
	600	0,40	
12X2M1 (1) [7]	500	0,20	12,3
	550	0,20	
	600	0,70	
	650	-0,20	
12X2M1 (2) [14]	450	0,20	10,6
	500	0,20	
	550	0,20	
	600	0	
	650	-0,10	
12MX [11]	450	0,80	12,6
	500	0,40	
	550	-0,38	
15XM [13]	450	0,80	13,3 (15,0)
	500	0,40	
	550	-0,10	
	600	0,40	
25X1M1Ф [9]	500	0,20	9,8 (12,7)
	550	0,70	
	600	0,50	
15X1M1Ф [12]	450	0,80	9,1 (10,9)
	500	0,50	
	550	0,60	
	600	0,10	

**Примечание.** В скобках приведены значения без учета одной максимальной погрешности.

Выше отмечалось, что эффективным способом обнаружения информативности известных данных испытаний большой длительности является их системная обработка с помощью различных методов на интерполяционной основе. Определение максимальных значений погрешностей и соответствующих значений  $\beta_i, \beta_e$  в каждом случае создает благоприятные условия как для выяснения их причин, так и для разработки эффективных способов оценки и учета роли второстепенных факторов.

**Заключение.** В результате анализа более 250 диаграмм длительной прочности установлено, что переход от интерполяционного прогнозирования длительной прочности жаропрочных сталей и сплавов к экстраполяционному может приводить к увеличению значений стандартных отклонений в два–четыре и более раз. Данные интерполяционного прогнозирования без

применения эмпирических постоянных могут использоваться для существенного повышения эффективности и точности прогнозирования на экстраполяционной основе.

## Резюме

Наведено результати екстраполяційної обробки більш аніж 250 діаграм тривалої міцності методами Ларсона–Міллера, Менсона–Хеферда, Орра–Шербі–Дорна та методом базових діаграм. Установлено, що перехід від інтерполяційних розрахунків до екстраполяційних може призвести до збільшення похибки прогнозування в два-чотири рази. Проаналізовано причини значного збільшення похибки прогнозування та можливості їх усунення.

1. *Кривенюк В. В.* Прогнозирование длительной прочности сталей и сплавов параметрическими методами и методом базовых диаграмм. Сообщ. 1. Интерполяционный анализ экспериментальных данных // Пробл. прочности. – 2006. – № 5. – С. 90 – 108.
2. *Larson F. R. and Miller J.* Time-temperature relationship for rupture and creep stresses // Trans. ASME. – 1952. – 74, No. 5. – P. 765 – 775.
3. *Manson S. S. and Haferd A. M.* A linear time-temperature relation for extrapolation of creep and stress rupture data // NASA TN 2890. – 1953.
4. *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.
5. *Ле Мэй.* Развитие параметрических методов обработки результатов испытаний на ползучесть и длительную прочность // Теорет. основы инж. расчетов. Trans. ASME. Сер. Д. – 1979. – № 4. – С. 19 – 24.
6. *Manson S. S. and Ensign C. R.* A quarter-century of progress in the development of correlation and extrapolation methods for creep rupture data // J. Eng. Mater. Technol. – 1979. – 101, No. 4. – P. 317 – 325.
7. *Data sheets on the elevated-temperature properties of 2.25Cr–1Mo steel //* NIRM Creep Data Sheet. – 1986. – No. 3B. – 30 p.
8. *Data sheets on the elevated-temperature properties of 18Cr–10Ni–Ti stainless steel //* Ibid. – 1987. – No. 5B. – 32 p.
9. *Data sheets on the elevated-temperature properties of 1Cr–1Mo–0.25V steel //* Ibid. – 1990. – No. 9B. – 45 p.
10. *Data sheets on the elevated-temperature properties of 12Cr steel //* Ibid. – 1994. – No. 13B. – 44 p.
11. *Data sheets on the elevated-temperature properties of 0.5Cr–0.5Mo steel //* Ibid. – No. 20B. – 28 p.
12. *Data sheets on the elevated-temperature properties of 1Cr–1Mo–0.25V steel //* Ibid. – No. 31B. – 41 p.
13. *Data sheets on the elevated-temperature properties of 1Cr–0.5Mo steel //* Ibid. – 1990. – No. 35A. – 22 p.

14. *Data sheets on the elevated-temperature properties of 2.25Cr-1Mo steel // Ibid.* – 1991. – No. 36A. – 22 p.
15. *Кривенюк В. В.* Прогнозирование длительной прочности тугоплавких металлов и сплавов. – Киев: Наук. думка, 1990. – 248 с.
16. *Писаренко Г. С., Кривенюк В. В.* Новый подход к прогнозированию длительной прочности металлов // Докл. АН СССР. Механика. – 1990. – **312**, № 3. – С. 558 – 562.
17. *Троценко В. Т., Лебедев А. А., Стрижало В. А. и др.* Механическое поведение материалов при различных видах нагружения. – Киев: Логос, 2000. – 571 с.
18. *Creep Strength in Steel and High-Temperature Alloys: Proc. of the Iron and Steel Institute, University of Sheffield, 1972.* – 273 p.

Поступила 11. 05. 2004