

О проблеме подготовки данных по длительной прочности при формировании нормативной документации для металлоемкого энергетического оборудования

В. В. Кривенюк, Д. С. Авраменко, Е. И. Усков, Ю. Ю. Садовский, Р. П. Приходько

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

Рассматриваются проблема формирования и уточнения данных по высокотемпературной длительной прочности сталей и сплавов, применяемых теплоэнергетике, и различные аспекты ее решения. Акцентируется внимание на необходимости обработки известных экспериментальных данных по длительной прочности методом базовых диаграмм, обобщенного и подробного представления их для максимально широких температурно-временных интервалов и последующего системного анализа.

Ключевые слова: длительная прочность, прогнозирование, метод базовых диаграмм, нормативные документы.

По мере увеличения срока службы металлоемкого энергетического оборудования до 200...300 тыс. ч существенно возрастает и даже качественно изменяется роль задач как прогнозирования длительной прочности, так и оценки остаточной долговечности, что объясняется рядом причин. К наиболее существенным в первую очередь относится комплексность условий нагружения: статическое; мало- и многоцикловое нагружение; наличие концентраторов напряжений; маневренные режимы работы теплоэнергетического оборудования и т.п. Вполне естественно, что необходимая достаточно точная оценка последствий такого нагружения является весьма затруднительной. Кроме того, роль отдельных составляющих нагружения исследуется в основном независимо, в результате чего оснований для взаимообусловленного учета действия различных факторов практически нет, т.е. проблема суммирования повреждений остается сложной. Наконец, по мере роста срока службы оборудования до 200...300 тыс. ч все более острыми становятся проблемы отсутствия данных об испытаниях такой продолжительности и длительных комплексных исследований при статических и переменных условиях нагружения. Все это приводит к различным неопределенностям при решении задач прогнозирования длительной прочности металлов и продления сроков службы соответствующего оборудования.

Цель настоящей работы заключается в некоторых возможностях разрешения таких неопределенностей. Исследование в значительной мере выполнено на основе метода базовых диаграмм (МБД) [1–4]. Метод отличается от известных и наиболее широко используемых параметрических методов [5–7] высокой чувствительностью к особенностям обрабатываемых данных. Поэтому он применяется для решения двух задач: непосредственно прогнозирования и системного анализа известных экспериментальных данных, что необходимо для существенного повышения точности и надежности прогнозирования.

Метод базовых диаграмм основан на использовании уравнения базовых диаграмм

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

где σ'_t – текущее напряжение по базовой диаграмме, МПа; σ_1 – напряжение, которое приводит к разрушению в течение 1 ч, МПа; t – время до разрушения, ч (постоянная 3,6 применима при указанных размерностях).

Особенности отдельных участков экспериментальных диаграмм длительной прочности учитываются с помощью 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 экспериментальной и базовой диаграмм; σ_{te} , σ'_t – координаты правых границ этих 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 (2) вместо σ_{te} подставить искомое напряжение σ_t , получим формулу для его прогнозирования в виде

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

где β – постоянная, которая в первом приближении устанавливается на основе экспериментальных значений β_e .

Важным аспектом развития прогнозирования является обработка известных экспериментальных данных при соответствующем обосновании возможностей постепенного уменьшения погрешностей прогнозирования длительной прочности по логарифму времени Δ_1 и напряжениям Δ_2 в виде

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

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

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

S_m – среднеквадратическая погрешность; $m=1$ для Δ_1 , $m=2$ для Δ_2 .

Прогнозирование, например, на интерполяционной основе значения $\sigma_{13886,5}$ по исходной величине $\sigma_{1030,3} = 294$ МПа с помощью (3) выполняется следующим образом. Принимается $\sigma_{at} = \sigma_{1030,3}$; $\sigma_{te} = \sigma_{13886,5}$; $at = 1030,3$ ч; $te = 13886,5$ ч. В (1) вместо σ'_t и t подставляются значения σ_{at} и at , что приводит к уравнению с одним неизвестным σ_1 . Подставляя в (1) $t = 13886,5$ при полученном значении σ_1 , рассчитывается σ'_t . Затем при известном

значении β с помощью (3) по $\sigma_{1030,3}$ вычисляется, т.е. прогнозируется, $\sigma_{13886,5}$.

Оценка значений β проводится на основе экспериментальных данных для исследуемого металла или сплава и результатов выполненного обобщенного анализа известных экспериментальных данных по (1)–(6).

Обобщенный анализ более 2000 диаграмм длительной прочности (ДДП) показывает, что наиболее используемыми для сплавов с твердорастворным упрочнением в практически важном интервале температур являются значения $\beta = 0,9...1,3$, а для дисперсно-упрочненных – $\beta = 1,4...1,7$ [14]. Это обусловлено в основном увеличением экспериментальных значений β_e по мере повышения температуры и длительности нагружения. В целом значения β_e изменяются в пределах $0...2,3$. Минимальными значения $\beta_e \approx 0$ будут в случаях, когда временные процессы разупрочнения практически не проявляются и диаграммы длительной прочности близки к горизонтальным.

Настоящее исследование основано на предположении, что при прогнозировании характеристик длительной прочности в качестве практически приемлемых можно рассматривать значения $S_1 \leq 0,3$; $S_2 \leq 0,12$. Анализ результатов большого объема прогнозирования на $0,7...1,5$ порядка по времени, т.е. при $q = 0,7...1,5$, где $q = \lg(te/\alpha t)$, показывает, что при выполнении неравенства

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

прогнозирование МБД приводит к

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

Одна из основных задач анализа известных экспериментальных данных с помощью МБД заключается в определении отдельных численных значений β , которые обеспечивали бы выполнение условия (8) при обработке как можно больших массивов экспериментальных данных. При этом следует подчеркнуть, что условия (7), (8) справедливы для прогнозирования на один порядок, т.е. при $q \approx 1$. Основную часть исследований выполняли с помощью усовершенствованного метода базовых диаграмм (МБД-2), который используется для прогнозирования на два, три и более порядков, а именно: при $q \geq 1...3$ [4, 8].

По мере увеличения числа порядков прогнозирования (q) при одной и той же разности $\beta - \beta_e$ величина погрешности прогнозирования может возрастать. Кроме того, она может повышаться за счет зависимости значений β от напряжений.

Для обеспечения выполнения условия (8) в подобных случаях вместо одного численного значения β при выполнении расчетов МБД после перехода к прогнозированию на большее число порядков необходимо использовать три значения β_i , т.е. $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ соответственно при условно низких, средних и высоких температурах.

Специальный анализ данных, полученных в Национальном институте материаловедения (Токио, Япония), позволил конкретизировать постоянные $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ в соответствии с результатами, представленными на рис. 1 [9].

Как видно, третий высокотемпературный интервал длительной прочности по общей температурной зависимости пределов прочности дополнительно условно делится на три интервала: низкие, средние и высокие температуры. Для них вводятся значения β_1 , β_2 , β_3 , возможности более точной оценки которых будут рассмотрены ниже на конкретных примерах.

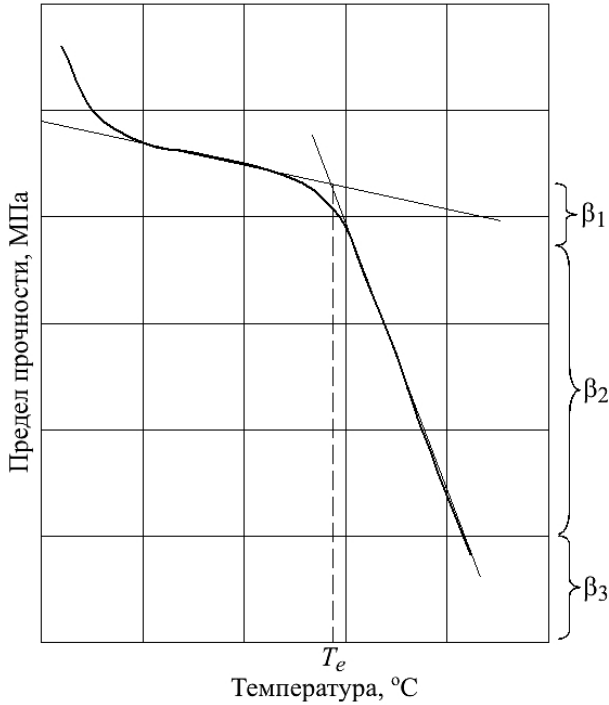


Рис. 1. Схематическая температурная зависимость предела прочности материала.

В [10] внимание акцентируется на важности оценки качества продукции металлопроизводства на основе учета характеристик кратковременной и длительной прочности, в частности σ_B , δ , ψ и σ_{100} . В настоящей работе обосновывается необходимость более широкого учета не только значений σ_{10^2} , но и σ_{10^5} . Поскольку данных о значениях σ_{10^5} при сравнительно низких температурах недостаточно, особое внимание предлагается уделять возможностям их упрощенной оценки путем анализа температурных зависимостей постоянных $k \approx \sigma_B / \sigma_{10^5}$ [9].

После такого представления МБД и некоторых примеров его использования проанализируем возможности уточнения прогнозирования характеристик длительной прочности на сроки службы металлов до 300 тыс. ч.

Длительное время проблема такого прогнозирования оставалась особенно сложной из-за отсутствия экспериментальных данных, полученных при испытаниях большой продолжительности. В настоящее время, хотя и ограниченно, они появляются, однако не получают должного внимания. Ниже рассмотрены некоторые аспекты сформировавшегося положения с целью обоснования того, что соответствующее внимание крайне необходимо.

Т а б л и ц а 1

Относительные значения длительной прочности для различных плавок стали 25X1M1Ф

T, °C	500					550					600					650	
	10 ²	10 ³	10 ⁴	3·10 ⁴	10 ⁵	10 ²	10 ³	10 ⁴	3·10 ⁴	10 ⁵	10 ²	10 ³	10 ⁴	3·10 ⁴	10 ²	10 ³	
Долговечность, ч	396	352	302,5	276,5	244,5	314,4	268	211,6	178	132,1	239	183	103,5	66,4	157	82,4	
σ, МПа																	
Плавка																	
VaA	0,97	0,97	0,98	0,98	0,99	0,98	0,98	0,98	0,98	0,95	0,98	0,98	0,94	0,96	0,97	0,95	
VaB	0,99	0,97	0,95	0,94	0,93	0,98	0,94	0,94	0,93	0,92	0,96	0,94	0,92	0,92	0,94	0,90	
VaC	–	1,03	1,02	1,01	1,00	1,04	0,99	0,99	0,96	0,88	1,03	0,98	0,92	0,92	0,97	0,92	
VaD	0,97	0,98	0,98	0,98	0,99	0,98	0,99	0,99	0,98	0,96	1,00	1,00	1,07	1,07	1,00	1,06	
VaE	0,95	0,97	0,99	0,99	1,00	0,98	0,99	0,99	0,98	0,98	0,99	0,98	1,01	1,01	0,98	1,03	
VaG	1,09	1,08	1,06	1,05	1,03	1,05	1,01	1,01	0,99	0,95	1,02	1,00	0,90	0,90	0,99	0,95	
VaH	1,03	1,03	1,03	1,04	1,04	1,04	1,06	1,06	1,07	1,11	1,05	1,07	1,10	1,10	1,08	1,09	
VaJ	1,00	1,00	0,99	0,99	0,99	1,00	1,00	1,00	1,02	1,07	0,99	1,01	1,04	1,04	1,02	1,03	
VaR	1,01	1,01	1,01	1,02	1,02	1,01	1,03	1,03	1,07	1,07	1,01	1,03	0,99	0,99	1,03	1,00	

При решении задач прогнозирования длительной прочности металлов возникает много неопределенностей, которые затрудняют эффективное улучшение прогнозирования. В этом случае необходимы более подробная конкретизация факторов, определяющих закономерности длительной прочности, а также данные об испытаниях большой продолжительности. Более того, особенно важно разработать специальный системный подход для улучшения данного положения. Ниже на отдельных примерах проанализируем возможности формирования такого подхода. Для их обоснования в первую очередь проанализируем данные по длительной прочности, полученные в [11, 12] (табл. 1–3) и в [13] (табл. 4, 5) для сталей 1Cr–1Mo–0,25V (25X1M1Ф) и 15X1M1Ф.

Подробная информация о различных свойствах отдельных сталей и сплавов, приведенная в справочнике [13], до настоящего времени используется в России и Украине для оценки и прогнозирования длительной прочности и ползучести. Однако сведений о длительной прочности представлено недостаточно, о чем можно судить по данным табл. 2 [11] и 4 [13].

Представленные в табл. 1 данные получены после некоторого преобразования значений длительной прочности стали 25X1M1Ф [11] методом Мэнсона–Хэферда (МХ). Суть преобразования заключается в следующем.

Для определенной температуры и длительности до разрушения (например, 500°С, 10² ч) устанавливается среднее для де-

Т а б л и ц а 2

Данные по длительной прочности стали 25X1M1Ф

T , °C	σ_{10^2} , МПа	β'_0	σ_{10^3} , МПа	β'_1	σ_{10^4} , МПа	β'_2	σ_{10^5} , МПа	β'_3	$\sigma_{2 \cdot 10^5}$, МПа	β'_4	$\sigma_{3 \cdot 10^5}$, МПа
450	575	0,71	500	0,70	430	0,90	347,0	1,10	318,8	1,30	300,2
460	545	0,74	470	0,72	401	0,92	320,1	1,12	292,9	1,32	275,0
470	515	0,76	440	0,74	372	0,94	293,3	1,14	267,2	1,34	250,0
480	485	0,79	410	0,73	345	0,93	270,2	1,13	245,4	1,33	229,2
490	455	0,82	380	0,76	316	0,96	243,5	1,16	219,9	1,36	204,6
500	425	0,85	350	0,75	290	0,95	222,2	1,15	200,1	1,35	185,9
510	399	0,85	327	0,77	268	0,97	202,3	1,17	181,3	1,37	167,7
520	373	0,77	310	0,81	250	1,01	184,8	1,21	164,2	1,41	151,2
525	360	0,75	300	0,83	240	1,03	175,5	1,23	155,4	1,43	142,7
530	348	0,74	290	0,85	230	1,05	166,2	1,25	146,6	1,45	134,2
540	320	0,68	270	0,89	210	1,09	147,8	1,29	129,1	1,49	117,5
550	300	0,64	255	1,00	190	1,20	126,1	1,40	108,0	1,60	97,0
560	283	0,63	240	1,12	170	1,32	105,0	1,52	87,8	1,72	77,6
570	272	0,68	227	1,20	155	1,40	90,7	1,60	74,5	1,80	65,1
575	265	0,69	220	1,28	145	1,48	80,5	1,68	64,9	1,88	56,1
580	259	0,73	212	1,35	135	1,55	71,0	1,75	56,3	1,95	48,1
590	246	0,82	195	1,45	117	1,65	55,8	1,85	42,9	2,00	36,1
600	235	0,97	177	1,59	98	1,79	42,0	1,99	30,9	2,00	25,7

вяти плавков напряжение, которое приводит к разрушению за 10^2 ч. Затем для каждой из девяти плавков при температуре 500°C определяются величины отношений действительного напряжения к установленному среднему. При переходе от одной температуры к другой эти отношения для различных плавков могут существенно изменяться, что необходимо учитывать.

Рассмотрим значения таких отношений для различных плавков стали 25X1M1Ф при температуре 500°C с увеличением долговечности в интервале $10^2 \dots 10^5$ ч (табл. 1). Наблюдается небольшой рост указанных отношений для плавков VaA, VaD, VaE, VaH и VaR. Для плавков VaB и VaG характерно уменьшение значений этих отношений по мере повышения долговечности от 0,99 до 0,93 и от 1,09 до 1,03 соответственно. Интересно, что для плавки VaG при 550°C оно оказалось существеннее (1,05...0,95). Тенденция уменьшения значений указанных отношений при увеличении длительности нагружения усилилась при $T = 600$ и 650°C . В целом такой анализ позволяет оценивать усредненные значения длительной прочности для различных плавков.

Заметим, что за 50 лет в Украине и России выполнены многочисленные экспериментальные исследования длительной прочности и ползучести сталей и сплавов, используемых в теплоэнергетике, при ограниченной во времени продолжительности испытаний. Однако эффективность этой информации практически ничтожно мала из-за ограниченных температурно-временных интервалов испытаний и невозможности сопоставления полученных разными исследователями данных. Поэтому предлагаемый анализ усредненных значений длительной прочности и отношений действительных напряжений к усредненным для различных плавков является целесообразным.

Т а б л и ц а 3

Данные по длительной прочности стали 15X1M1Ф

T , °C	σ_{10^2} , МПа	β'_0	σ_{10^3} , МПа	β'_1	σ_{10^4} , МПа	β'_2	σ_{10^5} , МПа	β'_3	$\sigma_{2 \cdot 10^5}$, МПа	β'_4	$\sigma_{3 \cdot 10^5}$, МПа
450	470	0,90	422	0,59	369	0,79	303,1	0,99	279,9	1,19	264,2
460	450	0,53	402	0,59	350	0,79	285,8	0,99	263,2	1,19	248,1
470	430	0,56	380	0,59	330	0,79	268,4	0,99	246,8	1,19	232,3
475	421	0,56	372	0,62	320	0,82	257,1	1,02	235,5	1,22	221,0
480	410	0,56	362	0,64	310	0,84	247,6	1,04	226,3	1,24	212,1
490	393	0,57	345	0,66	293	0,86	231,5	1,06	210,7	1,26	196,9
500	374	0,59	326	0,67	275	0,87	215,3	1,07	195,2	1,27	182,0
510	357	0,59	310	0,68	260	0,88	201,9	1,08	182,6	1,28	169,9
520	340	0,62	292	0,72	241	0,92	183,3	1,12	164,5	1,32	152,3
525	332	0,63	284	0,73	233	0,93	175,8	1,13	157,3	1,33	145,4
530	325	0,64	277	0,76	225	0,96	167,6	1,16	149,2	1,36	137,5
540	308	0,67	260	0,79	208	0,99	151,8	1,19	134,2	1,39	123,0
550	292	0,68	245	0,87	190	1,07	133,0	1,27	116,0	1,47	105,3
560	277	0,70	230	0,98	171	1,18	113,1	1,38	96,6	1,58	86,7
570	261	0,74	213	1,05	153	1,25	96,4	1,45	81,0	1,65	71,9
575	255	0,77	206	1,11	144	1,31	87,2	1,51	72,4	1,71	63,7
580	245	0,81	195	1,17	132	1,37	76,3	1,57	62,3	1,77	54,3
585	235	0,83	185	1,26	120	1,46	65,0	1,66	52,0	1,86	44,7
590	230	0,90	177	1,34	110	1,54	55,7	1,74	43,6	1,94	36,9
600	220	0,94	166	1,57	91	1,77	37,1	1,97	27,1	2,00	22,4

Т а б л и ц а 4

Данные по длительной прочности стали 25X1M1Ф [13]

T , °C	$\sigma_{1/10^5}$, МПа	σ_{10^4} , МПа	σ_{10^5} , МПа
450	290	440	390
480	220	–	–
500	140...150	260...310	220...260
525	125	230...280	180...220
550	95	205	150
575	–	140...165	100...120

В табл. 2 и 3 приведены усредненные значения длительной прочности при различных температурах для сталей 25X1M1Ф и 15X1M1Ф соответственно, в табл. 4 и 5 – данные для этих сталей, взятые из [13].

Для стали 25X1M1Ф при $T = 450^\circ\text{C}$ значения σ_{10^4} и σ_{10^5} (табл. 2 и 4) составляют 430, 347 и 440, 390 МПа, при 500°C – 290, 222,2 и 260...310, 220...260 МПа, при 525°C – 240, 175,5 и 230...280, 180...220 МПа, при 550°C – 190, 126,1 и 205, 150 МПа, при 575°C – 145, 80,5 и 140...165, 100...120 МПа.

Т а б л и ц а 5

Данные по длительной прочности стали 15X1M1Ф [13]

$T, ^\circ\text{C}$	$\sigma_{1/10^5}, \text{МПа}$	$\sigma_{10^4}, \text{МПа}$	$\sigma_{10^5}, \text{МПа}$
500	–	–	210
525	–	–	170
540	120	–	160
550	80	–	130
565...570	50	120	100
585	–	105	80
600	40	85	65

Аналогично для стали 15X1M1Ф можно сравнивать приведенные в табл. 3 и 5 значения σ_{10^5} . При $T = 500^\circ\text{C}$ имеем $\sigma_{10^5} = 215,3$ и 210 МПа, при 525°C – 175,8 и 170 МПа, при 540°C – 151,8 и 160 МПа, при 550°C – 133 и 130 МПа. Эта сопоставимость сравниваемых значений может показаться весьма неожиданной, если учесть, насколько разная история их получения. С этой точки зрения являются неожиданными следующие сравнения.

В табл. 3 и 5 при $T = 570$ и $565...570^\circ\text{C}$ значения σ_{10^4} и σ_{10^5} составляют 153, 96,4 и 120, 100 МПа, при 585°C – 120, 65 и 105, 80 МПа, при 600°C – 91, 37,1 и 85, 65 МПа. Согласно экспериментальным данным [12], при $T = 600^\circ\text{C}$ и $\sigma = 70$ МПа время до разрушения сталей различных плавок изменялось в интервале 20...35 тыс. ч. Это свидетельствует о том, что данные [12] более точные, хотя в целом они близки к представленным в [13], что говорит о достоинстве последних, особенно если учесть, что для них дополнительно приведена качественно различная и весьма полезная информация. Однако следует подчеркнуть, что эффективность их использования очень низкая, в частности, из-за ограниченных объемов данных о длительной прочности. Именно поэтому необходим переход к системному анализу качественно различной информации о свойствах сталей и сплавов. Важный элемент такого анализа – подготовка подробных табличных экспериментальных данных, подобных приведенным в табл. 2 и 3.

Подготовка указанных таблиц проводится на основе МБД-1 [14] с использованием экспериментальных данных σ_{10^2} , σ_{10^3} , σ_{10^4} . По σ_{10^3} и σ_{10^4} устанавливается значение β_e , которое принимается в качестве β_1 . Затем рассчитываются σ_{10^5} по σ_{10^4} при $\beta_2 = \beta_1 + 0,2$, $\sigma_{2 \cdot 10^5}$ по σ_{10^5} при $\beta_3 = \beta_2 + 0,2$ и, наконец, $\sigma_{3 \cdot 10^5}$ по $\sigma_{2 \cdot 10^5}$ при $\beta_4 = \beta_3 + 0,2$. Анализ данных табл. 2 и 3 показывает, что такая подготовка является оправданной.

Подробные структуризация и развитие сопоставимости экспериментальных данных способствуют системному улучшению прогнозирования, о чем можно судить на основании следующих примеров.

Сравним данные по длительной прочности стали GS-17CrMoV511 (табл. 6), представленной в нормативном документе Германии, с таковыми

Т а б л и ц а 6

Данные по длительной прочности стали GS-17CrMoV511 и значения характеристик β_i

T , °C	$\sigma_{1/10^4}$, МПа	β_2	$\sigma_{1/10^5}$, МПа	β_3	$\sigma_{2/10^5}$, МПа	σ_{10^4} , МПа	β_2	σ_{10^5} , МПа	β_3	$\sigma_{2\cdot 10^5}$, МПа
400	438	0,733	370	0,528	(356)	479	0,613	419	0,842	(395)
410	410	0,662	351	0,973	(326)	451	0,646	390	0,951	(364)
420	383	0,713	322	0,985	(298)	423	0,693	360	0,959	(335)
430	356	0,747	295	1,040	(271)	395	0,723	332	1,007	(307)
440	330	0,810	267	1,108	(243)	368	0,779	303	1,023	(279)
450	305	0,880	240	1,089	(218)	342	0,842	275	0,997	(253)
460	279	0,934	214	1,176	(192)	316	0,886	249	1,111	(226)
470	255	0,993	190	1,217	(169)	291	0,936	224	1,140	(202)
480	231	1,015	169	1,382	(147)	266	0,965	201	1,171	(180)
490	209	1,089	147	1,317	(128)	243	0,995	180	1,203	(160)
500	188	1,289	120	0,802	(110)	222	1,043	160	1,240	(141)
510	170	1,183	112	1,519	(94)	203	1,058	144	1,337	(125)
520	154	1,228	98	1,491	(82)	187	1,103	129	1,447	(110)
530	139	1,279	85	1,762	(68)	171	1,157	114	1,500	(96)
540	125	1,360	72	1,529	(59)	157	1,211	101	1,640	(83)
550	112	1,424	61	1,604	(49)	144	1,292	88	1,717	(71)
560	100	1,463	52	1,968	(39)	131	1,362	76	1,918	(59)
570	88	1,516	43	2,286	(30)	119	1,466	64	2,189	(47)
580	78	1,594	35	2,695	(22)	107	1,562	53	2,535	(36)
590	68	1,696	27	3,325	(14)	96	1,731	41	2,923	(25)
600	61	1,894	19	3,073	(10)	86	1,921	30	3,757	(14)

стали 25X1M1Ф (табл. 2). Рассмотрим, например, значения σ_{10^4} , σ_{10^5} , $\sigma_{2\cdot 10^5}$ для сталей 25X1M1Ф при 480°C и GS-17CrMoV511 при 450°C, которые соответственно равны 345; 270,2; 245,4 и 342; 275; 253 МПа, т.е. являются довольно близкими, хотя получены для различных сталей и при разных температурах.

Подобная картина наблюдается также для других сопоставляемых значений. Так, при $T = 525$ (табл. 2) и 490°C (табл. 6) и различных длительностях значения длительной прочности σ_{10^4} , σ_{10^5} , $\sigma_{2\cdot 10^5}$ составляют соответственно 240; 175,5; 155,4 и 230; 180; 160 МПа, при 550 и 520°C – 190; 126,1; 108 и 187; 129; 110 МПа; при 590 и 570°C – 117; 55,8; 42,9 и 119; 64; 47 МПа. Как видно, во всех случаях данные достаточно близки.

Согласно данным, приведенным в табл. 6, характеристики β_2 и β_3 в интервале $10^4 \dots 10^5$ и $10^5 \dots 2 \cdot 10^5$ ч практически идентичны для пределов ползучести и длительной прочности. Это важно для уточнения прогнозирования пределов ползучести, однако в целом к такой идентичности следует относиться весьма осторожно.

Следует заметить, что ситуация, когда для различных сталей и сплавов температурная зависимость характеристик длительной прочности является разной, а временная – близкой, довольно распространенная. Выявление таких

Т а б л и ц а 7

Результаты обработки МБД данных [11] для плавки D

№ строки	T, °C	σ_{at} , МПа	σ_{te} , МПа	at, ч	te, ч	$\lg\left(\frac{te}{at}\right)$	β_i	β_e	Δ_1	Δ_2
1	500	373	333	181,7	1865,4	1,011	0,6	0,48	0,21	-0,029
2	500	373	294	181,7	8436,9	1,667	0,6	0,6	0,02	0,001
3	500	373	265	181,7	47021,8	2,413	0,6	0,6	0,02	0,002
4	500	373	235	181,7	112223	2,791	0,6	0,69	0,56	0,074
5	500	333	265	1865,4	47021,8	1,402	0,6	0,64	0,12	0,017
6	500	294	235	8436,9	112223	1,124	0,9	0,74	0,23	-0,056
7	550	294	157	178,5	47808,5	2,428	0,9	0,9	0,02	0,003
8	550	294	137	178,5	96134,3	2,731	0,9	0,95	0,20	0,056
9	550	294	235	267,1	3590,7	1,129	0,9	0,75	0,21	-0,051
10	550	294	196	267,1	16778,4	1,798	0,9	0,82	0,18	-0,047
11	550	294	177	267,1	28065,7	2,022	0,9	0,89	0,03	-0,007
12	550	294	177	267,1	28941,7	2,035	0,9	0,89	0,04	-0,010
13	550	294	157	267,1	47808,5	2,253	0,9	0,96	0,18	0,051
14	550	294	137	267,1	96134,3	2,556	0,9	0,99	0,37	0,107
15	550	265	196	984,2	16778,4	1,232	0,9	0,86	0,07	-0,017
16	550	265	177	984,2	28065,7	1,455	0,9	0,95	0,09	0,024
17	550	265	177	984,2	28941,7	1,468	0,9	0,94	0,08	0,020
18	550	265	157	984,2	47808,5	1,686	0,9	1,02	0,29	0,083
19	550	265	137	984,2	96134,3	1,99	0,9	1,06	0,46	0,139
20	550	235	157	3590,7	47808,5	1,124	0,9	1,14	0,35	0,104
21	600	177	98	1027,2	19478,5	1,009	1,6	1,56	0,03	-0,018
22	600	177	69	1027,2	27376,7	1,426	1,6	1,58	0,02	-0,016
23	600	177	61	1027,2	46952,1	1,66	1,6	1,5	0,13	-0,126
24	600	137	69	3544,3	27376,7	0,888	1,6	1,81	0,14	0,115
25	600	137	61	3544,3	46952,1	1,122	1,6	1,65	0,05	0,038
26	650	137	69	166,9	2669,3	1,204	1,6	1,42	0,16	-0,127
27	650	137	47	166,9	4440,6	1,425	1,6	1,63	0,03	0,030
28	650	98	47	702,3	4440,6	0,801	1,6	1,94	0,20	0,190

$S_1 = 0,216; S_2 = 0,076$

случаев и их обобщенный анализ могут способствовать уточнению взаимобусловленности химсостава, структурного состояния и соответственно закономерностей длительного разрушения.

При подготовке данных табл. 2, 3 ориентировались на приведенные в [11, 12] результаты. При этом учитывали не непосредственно экспериментальные данные [11, 12], а результаты их обработки параметрическими методами. Такая обработка в основном “сглаживает” диаграммы длительной прочности.

О развитии такого подхода можно судить по следующим данным. В табл. 7 приведены результаты обработки данных по длительной прочности для плавки D МБД [11]. Пересчет в строках № 3, 4, 7, 8, 11, 12, 13, 14 выполнен на два порядка и более при использовании только расчетных значений $\beta_1 = 0,6$, $\beta_2 = 0,9$, $\beta_3 = 1,6$. При использовании метода Мэнсона–Хэферда величина S_1 оказалась ниже, чем 0,216 (0,070), что было получено с помощью семи

численных значений постоянных: $t_a = 500$; $\lg t_a = 13,367$; $b_0 = -1,202$; $b_1 = 2,418$; $b_2 = -1,851$; $b_3 = 0,627$; $b_4 = -0,079$. Данные, приведенные в табл. 7, дают следующую информацию. В строках № 1–4 значения β_e равны 0,48; 0,6; 0,6; 0,69 при пересчете с 181,7 на 1865,4; 8436,9; 47021,8; 11222,3 соответственно. Заметим, что в строке № 4 содержится информация о пересчете на 2,79 порядка по времени, аналогично в строке № 14 выполнен пересчет на 2,55 порядка. Таким образом, дополнительно по сравнению с [9] четко определяются особенности всех отдельных участков соответствующих диаграмм. Это обеспечивает в целом подробную сопоставимую оценку особенностей обрабатываемых участков различных экспериментальных диаграмм длительной прочности и является основой для перехода к системному анализу известных экспериментальных данных. О возможностях такого анализа можно судить по следующему примеру.

Т а б л и ц а 8

Результаты прогнозирования длительной прочности после интерполяционной обработки данных [15] для стали 0,5Cr–0,5Mo

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	0,3	1,1	1,4	340	480	0,459	0,156
А	27	0,348	34	0,23	1,1	1,37	420	480	0,225	0,121
В	25	0,447	34	0,11	1,0	1,4	300	400	0,208	0,110
Д	22	0,157	20	0,7	0,64	1,4	340	460	0,167	0,086
Е	26	0,113	32	0,7	1,2	1,55	340	460	0,154	0,125
F	27	0,426	34	0,14	1,04	1,42	340	480	0,260	0,143
G	27	0,378	32	0,14	0,74	1,34	300	380	0,229	0,102
Н	27	0,380	37	0,1	1,07	1,48	340	460	0,182	0,112
L	29	0,393	31	0,11	1,0	1,43	340	440	0,177	0,106
М	24	0,242	29	0,53	0,8	1,32	300	380	0,191	0,080

Примечание: 1. Звездочкой обозначены все плавки; 2. n – число результатов испытаний; 3. n' – число прогнозных оценок.

Сложность прогнозирования определяется, в частности, рассеянием свойств и соответственно увеличением значений S_1 и S_2 , о чем свидетельствуют данные, приведенные в табл. 8 и на рис. 2. В этих случаях значения β_1 довольно низкие, близки к 0,1...0,2, соответственно значения k – к 1,3...1,4. Из рис. 2 видно, что это уже более полные и сравнительно редкие данные по длительной прочности, т.е. при минимальных температурах испытаний наклон диаграмм длительной прочности при долговечности 10^5 ч приближается к минимально возможному.

Учет подобных данных важен с точки зрения формирования достаточно представительного комплекса экспериментальных результатов.

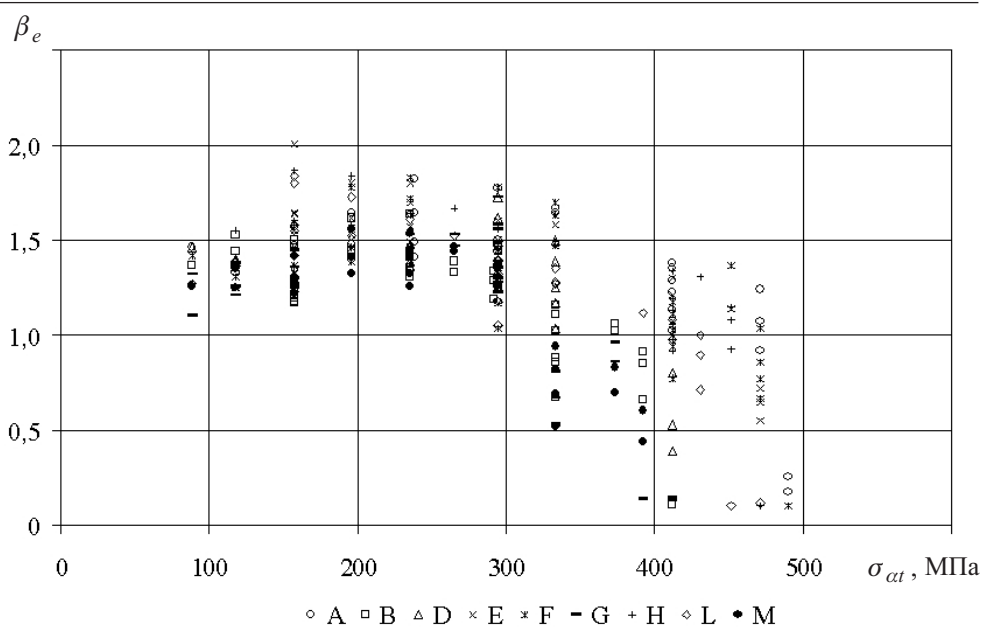


Рис. 2. Данные [15] по длительной прочности для девяти плавок (А–М) стали 0,5Cr–0,5Mo в координатах $\beta_e - \sigma_{ct}$.

Резюме

Розглядаються проблема формування й уточнення даних про високотемпературну тривалу міцність сталей і сплавів, що використовуються в теплоенергетиці, та різні аспекти її розв'язання. Акцентується увага на необхідності обробки відомих і експериментальних даних про характеристики тривалої міцності методом базових діаграм, узагальненого і детального представлення їх для більш широких температурно-часових інтервалів і подальшого системного аналізу.

1. *Кривенюк В. В.* Прогнозирование длительной прочности тугоплавких металлов и сплавов. – Киев: Наук. думка, 1990. – 248 с.
2. *Писаренко Г. С., Кривенюк В. В.* Новый подход к прогнозированию длительной прочности металлов // Докл. АН СССР. Механика. – 1990. – 312, № 3. – С. 558 – 562.
3. *Кривенюк В. В.* Метод прогнозирования характеристик длительной прочности жаропрочных и тугоплавких материалов // I Симпозиум: Проблемы ползучести материалов. – Белосток, 1983. – С. 325 – 332.
4. *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.
5. *Larson R. R. and Miller J.* Time–temperature relationship for rupture creep stress // Trans. ASME. – 1952. – 74, No. 5. – P. 765 – 775.

6. *Manson S. S. and Haferd A. M.* A liner time-temperature relation for extrapolation of creep and stress rupture data // NASA TN. – 1953. – TN-2890.
7. *Orr R. I., Sherby O. D., and Dorn J. E.* Correlation of rupture data for metals at elevated temperatures // Trans. ASM. – 1954. – 46. – P. 113 – 128.
8. *Кривенюк В. В.* Прогнозирование ползучести и длительной прочности металлических материалов на сроки службы до 300000 ч и более // Пробл. прочности. – 2003. – № 4. – С. 104 – 120.
9. *Кривенюк В. В.* Особливі співвідношення характеристик короткочасної та тривалої міцності // Металознавство та обробка металів. – 2006. – № 1. – С. 63 – 66.
10. *Приходько Э. В.* Эффективность комплексного легирования сталей и сплавов. – Киев: Наук. думка, 1995. – 292 с.
11. *Data sheets on the elevated-temperature properties of 1Cr–1Mo–0.25V steel //* NRIIM Creep Data Sheets. – 1990. – No. 9B. – 45 p.
12. *Data sheets on the elevated-temperature properties of 1Cr–1Mo–0.25V steel //* Ibid. – 1994. – No. 31B. – 41 p.
13. *Либерман Л. Я., Пейсихис М. И.* Свойства сталей и сплавов, применяемых в котлотурбостроении. – Л.: ЦКТИ, вып. 16, ч. 1. – 219 с.; ч. 2, 1966. – 244 с.; ч. 3, 1967. – 180 с.
14. *Кривенюк В. В., Заслоцкая Л. А., Авраменко Д. С.* Некоторые особенности и возможности обобщенного анализа характеристик длительной прочности металлических материалов // Пробл. прочности. – 2000. – № 3. – С. 24 – 36.
15. *Data sheets on the elevated-temperature properties of 0.5Cr–0.5Mo steel //* NRIIM Creep Data Sheets. – 1994. – No. 20B. – 28 p.

Поступила 22. 03. 2010