

О применении метода базовых диаграмм для прогнозирования длительной прочности на основе испытаний образцов с надрезами

В. В. Кривенюк, В. П. Коляда, М. И. Егорова

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

Исследуется влияние концентраторов напряжений на закономерности длительной прочности жаропрочных сталей и сплавов с учетом известных данных как о подкрепляющей, так и ослабляющей роли концентраторов. Обосновывается целесообразность использования метода базовых диаграмм для существенного уточнения их роли. Приведены результаты обработки экспериментальных данных, согласно которым с увеличением длительности нагружения упрочнение при наличии надреза в основном сменяется разупрочнением.

Ключевые слова: длительная прочность, базовые диаграммы, гладкие образцы, образцы с надрезами, вязкое и хрупкое состояние, твердорастворное и дисперсное упрочнение, повреждение.

Результаты многих исследований длительной прочности образцов с надрезами свидетельствуют как о подкрепляющей, так и ослабляющей роли концентраторов напряжений [1–3]. Вместе с тем оснований для выводов о подкрепляющей роли концентраторов, по крайней мере в исследованиях сравнительно небольшой длительности, существует больше. Это не согласуется с реальными условиями работы элементов конструкций, в которых преимущественно проявляется повреждающая роль концентраторов. Очевидное противоречие определяется лишь одним из ряда факторов, которые приводят к значительным неопределенностям и трудностям при обеспечении надежного прогнозирования работоспособности соответствующих элементов конструкций. В [4] обосновывается целесообразность применения метода базовых диаграмм (МБД) [5, 6] для уточнения особенностей длительного разупрочнения металлических материалов при испытаниях образцов с надрезами. Настоящая работа посвящена более подробному рассмотрению результатов таких исследований.

Метод базовых диаграмм позволяет систематизировать известные экспериментальные данные с последующим улучшением прогнозирования характеристик длительной прочности. Следовательно, одна из задач исследования заключалась в обосновании полезности систематизации результатов испытаний гладких образцов для анализа закономерностей длительного разрушения при испытаниях образцов с надрезами. Ниже кратко описан МБД и приведены результаты некоторых обобщений на его основе.

Метод базовых диаграмм основан на использовании уравнения базовых диаграмм

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

где σ'_t – текущее напряжение по базовой диаграмме, МПа; σ_1 – напряжение, которое приводит к разрушению в течение одного часа; t – время до разрушения, ч.

В процессе обработки экспериментальных данных при прогнозировании с помощью МБД отдельные участки диаграмм длительной прочности рассматриваются независимо, каждый продолжительностью в пределах около одного порядка по логарифмической шкале времени.

Отклонения отдельных участков экспериментальных диаграмм от соответствующих участков базовых диаграмм определяются по формуле

$$\beta_3 = \frac{\sigma_{at} - \sigma_{t_3}}{\sigma_{at} - \sigma'_t} = \frac{\Delta\sigma_{t_3}}{\Delta\sigma'_t}, \quad (2)$$

где σ_{at} – длительная прочность, соответствующая левой (общей) границе участков; σ_{t_3} , σ'_t – длительная прочность, соответствующая правой границе участков экспериментальной и базовой диаграммы при $t_3 = t$; $\Delta\sigma_{t_3}$, $\Delta\sigma'_t$ – понижения длительной прочности на равных по продолжительности участках экспериментальной и базовой диаграмм (at , t); $t:at \approx 10$.

Прогнозирование длительной прочности σ_t по исходному значению σ_{at} проводится с помощью формулы

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

где β – обобщенный показатель отклонений отдельных участков экспериментальных диаграмм от соответствующих участков базовых диаграмм.

В первом приближении по экспериментальным данным определяют $(\beta_3)_i$ для каждого из участков ($i = 1, 2, \dots, n$), а в (3) принимают

$$\beta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\beta_3)_i. \quad (4)$$

На основе прогнозируемого по формуле (3) значения σ_t и экспериментального $(\sigma_{t_3})_i$ для $t = (t_3)_i$ рассчитывают погрешность прогнозирования

$$\Delta_i = \frac{\sigma_t - (\sigma_{t_3})_i}{(\sigma_{t_3})_i} \cdot 100\%. \quad (5)$$

Среднеквадратическую погрешность прогнозирования определяют по формуле

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \Delta_i^2}. \quad (6)$$

Сравнения известных данных о применении различных методов приводят к выводу, что лучшие из них обеспечивают прогнозирование с погрешностью

$$S \leq 10 \dots 12\%. \quad (7)$$

Метод базовых диаграмм широко применялся для анализа результатов испытаний гладких образцов. С его помощью оказалось возможным по значениям постоянных β контролировать довольно общие закономерности длительного разупрочнения. Кроме того, обеспечивается учет особенностей длительного разупрочнения с использованием характеристик β_3 по значениям $\beta - \beta_3$.

К настоящему времени объем испытаний гладких образцов намного больше объема испытаний образцов с надрезами. Соответственно закономерности длительного разрушения, устанавливаемые при испытаниях образцов с надрезами, изучены менее подробно.

Анализ данных [7] по длительной прочности гладких образцов из стали X18H12T, которые включают обработку 36 диаграмм длительной прочности (ДДП), полученных при четырех уровнях температур и длительности испытаний до 100000 ч, показал, что при значении $\beta = 1,2$

$$\beta - 0,3 \dots 0,4 < \beta_3 < \beta + 0,3 \dots 0,4. \quad (8)$$

Соответственно прогнозирование с помощью формулы (3) при использовании единственного значения $\beta = 1,2$ привело к $S < 10\%$, что согласуется с условием (7). Многочисленные исследования свидетельствуют о взаимосоответствии (8) и (7).

Для некоторых материалов при испытаниях на длительную прочность в широких температурно-временных интервалах диапазон изменения значений β_3 может значительно увеличиваться и становиться больше по сравнению с определяемым условием (8), что приводит к невыполнению (7). В таких случаях для отдельных температур или интервалов значений σ_{at} вместо одного общего β используются два или максимум три значения $\beta_1, \beta_2, \beta_3$, что должно обеспечить выполнение условия (7).

Обобщенный анализ с помощью МБД данных испытаний гладких образцов позволил получить результаты, важные также для уточнения закономерностей длительного разрушения при испытаниях образцов с надрезами. Было установлено, что при исследовании сплавов с твердорастворным упрочнением можно ориентироваться на значения $\beta = 1 \dots 1,3$, а сплавов с дисперсным упрочнением – на $\beta = 1,4 \dots 1,7$. Значения β_3 в соответствии с (8) изменяются в более широких пределах, однако во всех выполненных исследованиях не выявлено значений $\beta_3 > 2,2 \dots 2,3$.

Анализ данных, полученных при испытаниях большой длительности, свидетельствует [8] о целесообразности выделения четырех временных интервалов – $10^3 \dots 10^4$, $10^4 \dots 10^5$, $10^5 \dots 2 \cdot 10^5$, $2 \cdot 10^5 \dots 3 \cdot 10^5$ ч с введением для каждого из них характеристик $\beta = \beta_1$, $\beta = \beta_2$, $\beta = \beta_3$, $\beta = \beta_4$. Была также установлена зависимость

$$\beta_n = \beta_{n-1} + \Delta\beta_n \quad (9)$$

и возможность ее предварительной конкретизации в виде

$$\Delta\beta_n = 0,2. \quad (10)$$

Согласно (9) и (10), значения β возрастают по мере увеличения длительности нагружения. К этому следует добавить, что возможные отдельные значения $\Delta\beta_n$ порядка 0,6...0,9 определяют так называемые переломы диаграмм длительной прочности, поэтому при анализе экспериментальных данных заслуживают особого внимания. Исходя из приведенных выше сведений о МБД рассмотрим закономерности длительной прочности при испытаниях образцов с надрезами. Основная задача такого исследования заключается в выяснении, насколько отмеченные обобщенные выводы применимы для анализа результатов испытаний надрезанных образцов.

В первую очередь представляют интерес данные [9], полученные при испытаниях гладких и надрезанных образцов длительностью до 300000 ч (табл. 1, 2, рисунок). Из них, в частности из рисунка, следует, что интервал изменения характеристик β_3 для гладких и надрезанных образцов довольно близкий. Это в какой-то мере указывает на идентичность закономерностей длительного разрушения. При более детальном анализе отдельных временных интервалов можно выявить некоторые заслуживающие внимания особенности длительного разупрочнения гладких и надрезанных образцов.

Приведенные в табл. 1 данные для σ_{10^3} свидетельствуют о проявлении подкрепляющего эффекта надреза практически для всех материалов, за исключением четвертого, поскольку эта величина для образцов с надрезами оказалась больше, чем для гладких образцов. Однако при значительном увеличении длительности нагружения отмеченный эффект может ослабевать настолько, что вывод о влиянии надреза может изменяться на противоположный. Так, например, для первого, пятого и шестого материалов подкрепляющий эффект сохраняется и при больших длительностях нагружения. Значения σ_{10^4} для образцов с надрезами второго и третьего материалов ниже, чем для гладких. По мере дальнейшего увеличения длительности нагружения эффект снижения длительной прочности в большей степени наблюдается для надрезанных образцов. Таким образом, согласно данным табл. 1 выводы о влиянии надреза могут быть различными, что зависит от условий испытаний. В целом отношение длительной прочности образцов с надрезами к длительной прочности гладких образцов изменяется в зависимости от продолжительности испытаний в сравнительно небольших пределах. Проанализируем особенности таких изменений на основе данных о β_3 .

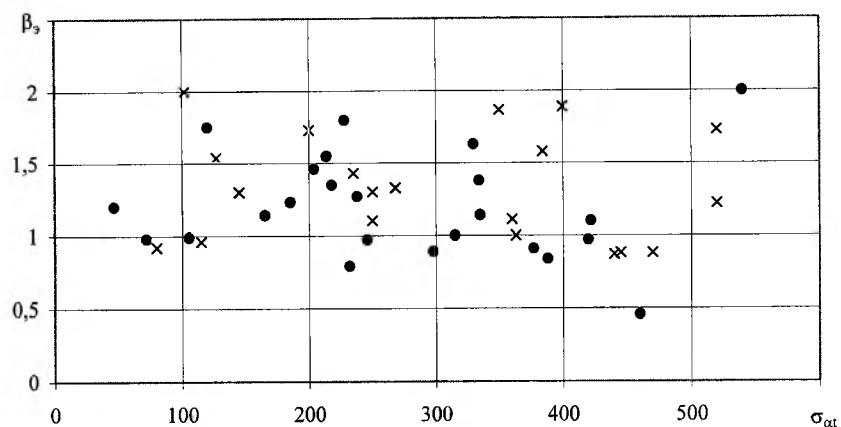
В соответствии с (9) величина $\Delta\beta_n$ характеризует изменение угла наклона участка диаграммы при переходе от одного временного интервала к следующему. Заметим, что согласно (10), наиболее вероятное значение $\Delta\beta_n = 0,2$. Вместе с тем выполненные исследования показывают, что увеличение значений $\Delta\beta_n$ до 0,6...0,8 свидетельствует о наличии переломов на диаграммах длительной прочности, с предсказаниями которых связаны основные трудности при прогнозировании длительной прочности.

Т а б л и ц а 1

Длительная прочность жаропрочных сталей по данным [9]

№ п/п	Материал	Образец	σ_{10^2} ,	β_0	σ_{10^3} ,	β_1	σ_{10^4} ,	β_2	σ_{10^5} ,	β_3	$\sigma_{2 \cdot 10^5}$,	β_4	$\sigma_{3 \cdot 10^5}$,
			МПа		МПа		МПа		МПа		МПа		МПа
1	Нелегированная сталь	Г	—	—	105,5	0,99	72,0	0,98	46,5	1,20	40,0	—	—
			—	—	105,5	0,99	72,0	1,19	42,0	1,39	34,2	1,59	29,7
		Н	—	—	115,0	0,96	80,0	0,92	56,0	—	—	—	—
			—	—	115,0	0,96	80,0	1,16	47,9	1,36	39,5	1,56	34,5
2	1,6Cr+ 1,28Mo+ 0,1V	Г	422,0	1,10	335,0	1,14	246,0	0,97	185,0	1,23	165,0	1,14	156,0
			—	—	335,0	1,14	246,0	1,34	160,3	1,54	136,6	1,74	122,4
		Н	520,0	1,22	400,0	1,89	235,0	1,43	145,0	1,30	127,0	1,54	117,0
			—	—	400,0	1,89	235,0	2,00	111,0	2,00	—	—	—
3	2,6Cr+ 0,26Mo+ 0,48V	Г	540,0	2,00	330,0	1,63	204,0	1,46	120,0	1,75	100,0	—	—
			—	—	330,0	1,63	204,0	1,83	101,4	2,03	79,0	—	—
		Н	520,0	1,73	350,0	1,87	200,0	1,73	102,0	2,00	82,0	—	—
			—	—	350,0	1,87	200,0	2,00	88,0	2,00	—	—	—
4	2,7Cr+ 0,51Mo+ 0,74V+ 0,48W	Г	460,0	0,46	420,0	0,97	334,0	1,38	228,0	1,80	197,0	—	—
			—	—	420,0	0,97	334,0	1,17	243,2	1,37	215,5	—	—
		Н	470,0	0,88	384,0	1,58	250,0	1,30	163,0	—	—	—	—
			—	—	384,0	1,58	250,0	1,78	135,5	—	—	—	—
5	20Cr+ 0,96Mo	Г	—	—	377,0	0,91	298,0	0,89	232,0	0,79	218,0	1,35	195,0
			—	—	377,0	0,94	298,0	1,14	215,0	1,34	189,8	1,54	174,1
		Н	—	—	440,0	0,87	360,0	1,11	268,0	1,33	240,0	—	—
			—	—	440,0	0,87	360,0	1,07	272,3	1,27	244,5	—	—
6	18Cr+ 8Ni+ 0,67Ti	Г	—	—	388,0	0,84	315,0	1,00	238,0	1,27	214,0	1,55	192,0
			—	—	388,0	0,84	315,0	1,04	235,5	1,24	210,4	1,44	194,5
		Н	—	—	445,0	0,88	363,0	1,00	250,0	1,10	228,0	—	—
			—	—	445,0	0,88	363,0	1,08	273,5	1,28	245,3	—	—

Примечания: 1. Г – гладкий; Н – надрезанный; $\Delta\beta_n = 0,2$; $S = 13,4$. 2. Над чертой приведены экспериментальные данные, под чертой – расчетные.



Результаты обработки данных [9] для гладких образцов (●) и образцов с надрезом (×).

Т а б л и ц а 2

Результаты обработки данных [9] по МБД

№ п/п	σ_{ct} , МПа	σ_{t3} , МПа	ct , ч	$t3$, ч	$\lg(t3/ct)$	Δ , %	β_3
Гладкие образцы							
1	105,5	72,0	1000	10000	1,000	-14,70	0,98
2	72,0	46,5	10000	100000	1,000	-15,90	1,01
3	46,5	40,0	100000	200000	0,301	-3,40	1,07
4	335,0	246,0	1000	10000	1,000	-4,90	1,14
5	246,0	185,0	10000	100000	1,000	-11,80	0,95
6	185,0	165,0	100000	200000	0,301	-1,20	1,18
7	165,0	156,0	200000	300000	0,176	-1,90	0,97
8	330,0	204,0	1000	10000	1,000	12,60	1,63
9	204,0	120,0	10000	100000	1,000	9,30	1,50
10	120,0	100,0	100000	200000	0,301	3,80	1,60
11	420,0	334,0	1000	10000	1,000	-9,20	0,96
12	334,0	228,0	10000	100000	1,000	1,80	1,35
13	228,0	197,0	100000	200000	0,301	2,80	1,58
14	377,0	298,0	1000	10000	1,000	-10,10	0,94
15	298,0	232,0	10000	100000	1,000	-12,30	0,91
16	232,0	218,0	100000	200000	0,301	-5,40	0,71
17	218,0	195,0	200000	300000	0,176	4,30	2,05
18	388,0	315,0	1000	10000	1,000	-12,10	0,85
19	315,0	238,0	10000	100000	1,000	-8,80	1,02
20	238,0	214,0	100000	200000	0,301	-0,90	1,19
21	214,0	192,0	200000	300000	0,176	3,90	1,98
Образцы с надрезом							
22	115,0	80,0	1000	10000	1,000	-15,20	0,96
23	80,0	56,0	10000	100000	1,000	-21,00	0,87
24	400,0	235,0	1000	10000	1,000	22,00	1,89
25	235,0	145,0	10000	100000	1,000	6,60	1,45
26	145,0	127,0	100000	200000	0,301	-0,40	1,26
27	127,0	117,0	200000	300000	0,176	-0,01	1,29
28	350,0	200,0	1000	10000	1,000	22,90	1,87
29	200,0	102,0	10000	100000	1,000	25,70	1,77
30	102,0	82,0	100000	200000	0,301	6,80	1,81
31	384,0	250,0	1000	10000	1,000	9,40	1,57
32	250,0	163,0	10000	100000	1,000	1,80	1,35
33	440,0	360,0	1000	10000	1,000	-11,10	0,86
34	360,0	268,0	10000	100000	1,000	-5,50	1,12
35	268,0	240,0	100000	200000	0,301	-0,10	1,29
36	445,0	363,0	1000	10000	1,000	-10,70	0,88
37	363,0	250,0	10000	100000	1,000	2,20	1,36
38	250,0	228,0	100000	200000	0,301	-2,20	1,06

Примечание. При $\beta_1 = 1,50$ получено $S = 12,8$, при $\beta_1 = 1,40$ – $S = 11,4$, при $\beta_1 = 1,30$ – $S = 10,7$, при $\beta_1 = 1,20$ – $S = 10,8$, при $\beta_1 = 1,10$ – $S = 11,8$.

По данным табл. 1 максимальное значение $\Delta\beta_2$ для гладких образцов составляет 0,41, для надрезанных – 0,46, соответственно $\Delta\beta_3$ – 0,29 и 0,27; $\Delta\beta_4$ – 0,56 и 0,24. При этом отметим, что максимальные значения $\Delta\beta_n$ оказываются небольшими и временная их зависимость сравнительно слабая. В целом значения β_3 (табл. 1) изменяются в пределах 0,84...2,0: для гладких образцов от 0,84 до 1,75, для надрезанных от 0,88 до 2,0. Исходя из этого можно заключить, что при испытаниях образцов с надрезами даже при столь больших длительностях нагружения значения β_3 не выходят за установленные на основе анализа более 2000 ДДП обобщенные предельные значения 2,2; 2,3 для гладких образцов.

Для анализа одних и тех же экспериментальных данных можно использовать разные варианты метода базовых диаграмм, что позволяет расширить возможности анализа особенностей длительного разупрочнения. Например, в табл. 2 представлены результаты обработки тех же данных, что и в табл. 1. Здесь σ_{at} и σ_{t3} – экспериментальные значения, т.е. координаты левой и правой границ отдельных участков экспериментальных диаграмм. Для прогнозирования длительной прочности по формуле (3) необходимо знать лишь значение постоянной β . Для ее определения задан произвольный ряд значений β , например 1,5; 1,4; 1,3; 1,2; 1,1; 1,0. При каждом отдельном значении β для всех 38 участков (табл. 2) по данным на левой границе с помощью (3) прогнозировали данные для правой границы, затем по формуле (5) рассчитывали значения Δ , а по ним – S .

По приведенным в табл. 2 данным для произвольно заданных β получены значения S , равные 13,2; 11,7; 11,1; 12,2; 13,8%, по минимальному из которых (11,1%) определено искомое значение $\beta = 1,3$. Как видно, значения β_3 выходят за рамки условия (8), тем не менее условие (7) выполняется. В табл. 1 из шести материалов первый – сплав с твердорастворным упрочнением, остальные – с дисперсным упрочнением. Установленное значение $\beta = 1,3$ несколько ниже представленных выше общих значений $\beta = 1,4...1,7$ для дисперсно-упрочненных сплавов.

Особенности длительной прочности на каждом участке можно оценивать по β_3 и Δ , приведенным в табл. 1 и 2. Согласно формуле (2), при $\beta_3 = 1$ понижение длительной прочности по экспериментальной и базовой диаграмме за сопоставимое время одинаковое, при $\beta_3 > 1$ наклон участка экспериментальной диаграммы больше, при $\beta_3 < 1$ – меньше. Обобщенное значение $\beta = 1,3$. При $\beta_3 = 1,3$ имеем $\Delta = 0$. При $\beta_3 < 1,3$ знак Δ отрицательный, и наоборот.

Как следует из табл. 2, максимальное значение Δ для гладких образцов составляет 15,9%, для образцов с надрезами – 22,9%. Именно положительные значения Δ и соответственно отрицательная разность $\beta - \beta_3$ определяют больший наклон участков экспериментальных диаграмм длительной прочности. Эти данные свидетельствуют о дополнительной поврежденности за счет надреза. В нашем случае она определяется сравнительно высокими значениями β_3 , равными 1,89; 1,87; 1,7. Следует подчеркнуть, что для уточнения прогнозирования важно знать независимо установленные как значения $\Delta\beta_n$, так и β_3 .

В табл. 1 приведены результаты прогнозирования σ_{10^5} , $\sigma_{2 \cdot 10^5}$, $\sigma_{3 \cdot 10^5}$ по σ_{10^3} и σ_{10^4} с учетом соотношений (9) и (10). По данным σ_{10^3} и σ_{10^4} с помощью формулы (2) рассчитываются значения $\beta = \beta_1 = \beta_3$. Затем по формулам (7) и (8) вычисляются β_2 , β_3 , β_4 и, наконец, по $\sigma_{10^4} - \sigma_{10^5}$ при $\beta_2 = \beta_1 + 0,2$, по $\sigma_{10^5} - \sigma_{2 \cdot 10^5}$ при $\beta_2 = \beta_1 + 0,2$. Аналогично определяется значение $\sigma_{3 \cdot 10^5}$. Величина S в результате такого прогнозирования оказалась равной 13,3%, т.е. выше, чем при использовании общего значения $\beta = 1,3$ (табл. 2).

Рассматривая представленные выше результаты обработки МБД для образцов с надрезами в качестве исходных, перейдем к анализу данных, которые обычно отличаются фрагментарностью, ограниченными объемом и продолжительностью исследований и т.п.

В [10] приведены полученные на гладких и надрезанных образцах данные о длительной прочности стали типа 12Cr+1,5Mo для роторов турбин при температуре 593°C. Задача таких исследований заключалась в обосновании того, что новая роторная сталь обеспечивает необходимую жаропрочность при повышении рабочей температуры от 566 до 593°C. Эти данные представлены в табл. 3, 4 соответственно для образцов, вырезанных из центральных и периферийных зон поковки ротора. При очевидной важности задачи оценки длительной прочности на 10^5 ч при 593°C длительность экспериментальных исследований составила в основном 5000...7000 ч и лишь в одном случае – 10^4 ч.

Т а б л и ц а 3

Результаты обработки данных [10] по МБД для стали 12Cr+1,5Mo
(центральная зона поковки)

σ_{at} , МПа	σ_{t3} , МПа	at , ч	$t3$, ч	$\lg(t3/at)$	Δ , %	β_3
Гладкие образцы						
325,0	270,0	20,0	350,0	1,243	-15,8	0,62
270,0	178,0	350,0	6800,0	1,288	-0,3	1,09
247,0	200,0	35,0	220,0	0,799	-3,7	0,95
200,0	147,0	220,0	235,0	1,029	-5,4	0,95
250,0	158,0	4,7	213,0	1,656	-6,8	0,98
158,0	100,0	213,0	4400,0	1,315	-5,6	1,00
Образцы с надрезом						
420,0	370,0	250,0	1000,0	0,602	-2,7	0,91
370,0	263,0	1000,0	10000,0	1,000	5,9	1,29
305,0	273,0	500,0	1000,0	0,301	2,4	1,38
273,0	200,0	1000,0	4700,0	0,672	10,6	1,55
322,0	222,0	65,0	725,0	1,047	7,8	1,32
220,0	141,0	725,0	6700,0	0,966	11,8	1,39

Примечание. Произвольно заданному ряду значений β , равных 0,8; 0,9; 1,0; 1,1; 1,2; 1,3, соответствуют значения S , равные 12,9; 10,2; 8,3; 7,8; 9,1; 11,4%.

Т а б л и ц а 4

**Результаты обработки данных [10] по МБД для стали 12Cr+1,5Mo
(периферийная зона поковки)**

σ_{at} , МПа	σ_{t3} , МПа	at , ч	$t3$, ч	$\lg(t3/at)$	Δ , %	β_3
Гладкие образцы						
320,0	262,0	55,0	650,0	10,073	-16,6	0,74
262,0	200,0	650,0	4700,0	0,859	-6,2	1,08
242,0	200,0	100,0	560,0	0,749	-9,3	0,89
200,0	155,0	560,0	2700,0	0,683	-3,1	1,74
250,0	180,0	20,0	200,0	1,000	-5,1	1,14
180,0	118,0	200,0	2000,0	1,000	-2,5	1,23
Образцы с надрезом						
420,0	370,0	370,0	1300,0	0,546	-4,0	1,00
370,0	285,0	1300,0	7900,0	0,784	-0,3	1,28
310,0	295,0	630,0	1000,0	0,201	-1,8	0,95
295,0	243,0	1000,0	3100,0	0,491	1,8	1,42
322,0	245,0	110,0	470,0	0,631	5,9	1,60
245,0	132,0	470,0	6700,0	1,154	15,2	1,58

Примечание. Произвольно заданному ряду значений β , равных 1,0; 1,1; 1,2; 1,3; 1,4; 1,5, соответствуют значения S , равные 10,9; 9,1; 7,9; 7,8; 8,7; 10,3%.

По данным табл. 3 установлено $S = 7,85\%$ при $\beta = 1,1$, по данным табл. 4 – $S = 7,84\%$ при $\beta = 1,3$. При этом полезно учитывать, что ранее был выполнен обобщенный анализ длительной прочности гладких образцов из стали 12Cr+1Mo [8], отличающейся лишь меньшим содержанием молибдена [10]. Согласно этому обобщению, при $\sigma_{at} > 270$ МПа для временного интервала $10^4 \dots 10^5$ ч β составляет 0,8, при $\sigma_{at} \leq 270$ МПа – 1,3. Приведенные в табл. 3, 4 значения β , равные 1,1 и 1,3, близки к указанным обобщенным β . Утверждения основаны на том, что имеющиеся между ними различия можно считать не очень существенными, если учесть условия (8) и (7). Значения S по данным табл. 3 и 4 равны 7,85 и 7,84% при $\beta = 1,1$ и 1,3 соответственно.

Следует обратить внимание, что согласно данным табл. 1, 2 и 3, 4 значения β_3 для надрезанных образцов несколько выше, чем для гладких, однако в целом отмеченное превышение сравнительно небольшое.

По результатам исследований для гладких образцов можно принять $\beta_1 = 1,1$, для надрезанных – $\beta_1 = 1,3$. После этого значения σ_{10^5} рассчитываются по формуле (3) с использованием установленного значения $\sigma_{10^4} = \sigma_{at}$ и $\beta = \beta_2 = \beta_1 + 0,2$.

В работе [11] приведены результаты испытаний на длительную прочность гладких и надрезанных образцов с существенно разными радиусами надреза (1 и 5 мм), что способствовало более четкому проявлению подкрепляющего эффекта концентратора напряжений. Результаты обработки этих данных МБД представлены в табл. 5. Длительность испытания образ-

цов с надрезом радиусом 1 мм при напряжении 323 МПа составила 22000, гладких при значительно более низком напряжении 200 МПа – 15000 ч. При длительности испытания около 2000 ч прочность гладких образцов оказалась равной 245 МПа, т.е. ниже прочности образцов с надрезом радиусом 1 мм – 368 МПа. При близких напряжениях прочность образцов с надрезом радиусом 5 мм существенно ниже прочности образцов с надрезом радиусом 1 мм. Например, при напряжениях 350 и 368 МПа время до разрушения оказалось равным 43 и 241 ч. Для прогнозирования длительной прочности необходимы данные о β_3 . Из табл. 5 следует, что уменьшение радиуса надреза приводит к уменьшению значений β_3 . Для гладких образцов они оказались значительно выше. По такому ограниченному объему данных трудно делать выводы. Однако следует заметить, что в целом значения β_3 различаются в относительно малых пределах, что в какой-то мере согласуется с рассмотренными выше результатами более многочисленных и длительных исследований.

Т а б л и ц а 5

Результаты обработки данных [11] по МБД

$\sigma_{ат}$, МПа	$\sigma_{т3}$, МПа	$ат$, ч	$т3$, ч	$\lg(t3/at)$	Δ , %	β_3
Образцы с надрезом радиусом 5 мм						
400,0	350,0	43,0	254,0	0,771	1,1	0,76
350,0	300,0	254,0	1971,0	0,890	0,1	0,70
Образцы с надрезом радиусом 1 мм						
419,0	368,0	241,0	1990,0	0,917	-1,0	0,62
368,0	323,0	1990,0	22000,0	1,044	-4,7	0,52
Гладкие образцы						
300,0	245,0	350,0	2300,0	0,818	5,4	0,92
245,0	200,0	2300,0	15000,0	0,814	4,1	0,85

Примечание. Произвольно заданному ряду значений β , равных 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0, соответствуют значения S , равные 6,4; 4,6; 3,5; 3,8; 5,3; 7,3%.

Наконец, в табл. 6 представлены данные обработки [12] испытаний гладких и надрезанных образцов из материала в вязком и хрупком состоянии. Существенные особенности их заключаются в следующем. Для материала в вязком состоянии кривая длительной прочности надрезанного образца располагалась выше таковой гладкого, т.е. проявлялся подкрепляющий эффект концентратора, а для материала в хрупком состоянии сначала проявился подкрепляющий эффект, а затем наступило резкое разупрочнение. Более детально проанализируем полученную информацию путем сопоставления установленных характеристик длительного разупрочнения с приведенными выше некоторыми обобщенными характеристиками.

В соответствии с (10) будем рассматривать $\Delta\beta = 0,2$ как обобщенную характеристику. В данном случае для гладких образцов из стали в вязком и хрупком состоянии величина $\Delta\beta$ оказалась более высокой и составила 0,78 и 0,81, для надрезанных – соответственно 0,68 и 1,04. Для такой же по составу стали на основе данных [13] испытаний до 10^5 ч в [8] получены

более низкие значения β_3 . Так, например, из табл. 6 следует, что для гладких образцов при значении σ , равном 230 и 120 МПа, и температуре 560°C время до разупрочнения составило 235 и 3700 ч, а согласно данным [10], при $\sigma = 235$ и 137 МПа и температуре 550°C – 524 и 31000 ч, что и оправдывает такие значения β_3 . Более того, выше отмечалось, что для гладких образцов практически не встречались значения $\beta_3 > 2,2 \dots 2,3$. Следует полагать, что и для надрезанных образцов максимальные значения β_3 должны быть близки к указанным. В нашем случае установлено более высокое значение $\beta_3 = 2,56$.

Т а б л и ц а 6

Результаты обработки данных [12] по МБД

№ п/п	$\sigma_{ат}$, МПа	$\sigma_{т3}$, МПа	$ат$, ч	$т3$, ч	$\lg(t3/at)$	Δ , %	β_3
1	360,0	265,0	70,0	680,0	0,987	-11,4	1,21
2	265,0	160,0	680,0	4500,0	0,821	10,2	1,82
3	290,0	230,0	16,5	235,0	1,154	-27,2	0,78
4	230,0	120,0	235,0	3700,0	1,197	-1,9	1,56
5	400,0	300,0	230,0	1300,0	0,752	-1,6	1,52
6	300,0	140,0	1300,0	9200,0	0,850	42,9	2,56
7	325,0	285,0	64,0	560,0	0,942	-25,3	0,57
8	285,0	170,0	560,0	9200,0	1,216	-10,7	1,38

Примечания: 1. Произвольно заданному ряду значений β , равных 1,3; 1,4; 1,5; 1,6; 1,7; 1,8, соответствуют значения S , равные 23,7; 22,2; 21,3; 21,2; 21,7; 22,8%. 2. №№ 1–4 – вязкий материал; №№ 5–8 – хрупкий материал. 3. №№ 1, 2, 5, 6 – образцы с надрезом; №№ 3, 4, 7, 8 – гладкие образцы.

Таким образом, можно заключить, что закономерности длительного разупрочнения надрезанных и гладких образцов в основном не очень существенно различаются, за исключением некоторых случаев, которые, тем не менее, требуют тщательного анализа. С учетом рассмотренного выше его целесообразно проводить с помощью МБД.

Резюме

Досліджується вплив концентраторів напружень на закономірності тривалої міцності жароміцних сталей і сплавів. Враховуються відомі дані про підкріпну і ослаблюючу роль концентраторів. Обґрунтовується доцільність використання методу базових діаграм для істотного уточнення їхньої ролі. Наведено результати обробки експериментальних даних, згідно з якими при збільшенні тривалості навантаження зміцнення за наявності надрізу в основному змінюється зменшенням.

1. Ohji K., Ogura K., Kubo S., and Ymakage H. Long-term strength of notched specimens from copper and carbon steel in torsion // J. Soc. Mater. Sci. – 1974. – 23, No. 246, – P. 196 – 201.

2. Наместникова И. В., Шестериков С. А. Векторное представление параметра поврежденности: Сб. тр. Ин-та механики МГУ. – М.: Изд-во Моск. гос. ун-та, 1985. – С. 43 – 52.
3. Шестериков С. А., Локощенко А. М. Влияние концентрации напряжений на длительную прочность // Пробл. прочности. – 1996. – № 5. – С. 39 – 43.
4. Троценко В. Т., Лебедев А. А., Стрижало В. А. и др. Механическое поведение материалов при различных видах нагружения. – Киев: Логос, 2000. – 571 с.
5. Кривенюк В. В. Прогнозирование длительной прочности тугоплавких металлов и сплавов. – Киев: Наук. думка, 1990. – 248 с.
6. Писаренко Г. С., Кривенюк В. В. Новый подход к прогнозированию длительной прочности металлов // Докл. АН СССР. Механика. – 1990. – **312**, № 3. – С. 558 – 562.
7. Data sheets on the elevated-temperature properties of 18Cr8NiTi stainless steel // NRI Creep Data Sheet. – Tokyo, 1987. – No. 5B. – 32 p.
8. 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.
9. Diehl H., Granacher Ju., und Granacher Jo. Ergebnisse aus Zeitstandversuchen bei 500°C mit einer Beanspruchungsdauer bis über 300000 S // Archiv für das Eisenhüttenwesen. – 1978. – No. 7. – P. 299 – 303.
10. Контести Е., Кайето Г., Левайян С. Металлографическое исследование и численное моделирование процесса накопления повреждений при ползучести в образцах с надрезом из нержавеющей стали марки 17-12 SPH // Теорет. основы инж. расчетов. Сер. Д. – 1988. – № 1. – С. 150 – 155.
11. Хизумэ А., Такэда Й., Укота Х. и др. Новая сталь типа 12%Cr для роторов турбин применительно к температуре пара 593°C // Там же. – № 3. – С. 55 – 67.
12. Devis D. C. An approach to predicting long-term toughness, strength, and ductility of a Cr–Mo–V steel alloy using short-term test // J. Test. Eval. – 1990. – **18**, No. 4. – P. 286 – 291.
13. Data sheets on the elevated-temperature properties of 2.25Cr–1Mo steel // NRI Creep Data Sheet. – Tokyo, 1991. – No. 36A. – 22 p.

Поступила 18. 02. 2002