

Интерполяционный анализ особенностей длительного разрушения хромоникелевых и хромомолибденовых сталей

В. В. Кривенюк, Д. С. Авраменко, Р. П. Приходько

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

Обосновывается, что метод базовых диаграмм благодаря достаточно точной оценке отклонений отдельных участков экспериментальных диаграмм от соответствующих участков неизменных базовых диаграмм обеспечивает значительное повышение эффективности использования данных по длительной прочности различных плавок сталей или сплавов для уточнения особенностей их длительного разрушения.

Ключевые слова: метод базовых диаграмм, длительная прочность, структурный фактор.

Достаточно точно оценить и соответственно обеспечить учет рассеяния свойств металлов довольно сложно, поскольку при этом большую роль играют факторы, многие из которых практически вообще не учитываются. Для развития такой оценки необходимы соответствующие анализ и обработка весьма представительного комплекса экспериментальных данных, полученных при испытаниях сталей и сплавов при больших длительностях высокотемпературного нагружения. В настоящее время известны комплексные данные NIMS (National Institute for Materials Science, Tokyo, Japan) о свойствах сталей и сплавов, например [1–5], что позволяет существенно улучшить оценку и прогнозирование межплавочного рассеяния свойств металлов и соответственно уточнить роль структурного фактора.

Ниже будут представлены результаты обработки данных по кратковременной и длительной прочности хромоникелевых и хромомолибденовых сталей, которые различаются соответственно сравнительно низким и повышенным межплавочным рассеянием механических свойств. При использовании методов прогнозирования прочностных характеристик металлов выполнена обработка данных ряда плавок, установлено различие между расчетными и экспериментальными результатами и обоснованы возможности уточнения соответствующего прогнозирования. Для этого были использованы метод базовых диаграмм (МБД) [6–9] и параметрические методы (Ларсена–Миллера (ЛМ), Орра–Шерби–Дорна (ОШД), Мэнсона–Хэферда (МХ)) [10–12] прогнозирования длительной прочности металлов и сплавов. Поскольку вышеуказанные методы достаточно полно представлены в [6–12], приведем только их основные зависимости.

В основу МБД положено уравнение 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 по базовой диаграмме, МПа; σ_1 – напряжение, которое приводит к разрушению в течение одного часа, МПа; t – время до разрушения, ч.

Особенности отдельных участков экспериментальных диаграмм длительной прочности (ДДП) исследуются 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 участков; $\Delta\sigma_{te}$, $\Delta\sigma'_t$ – снижение длительной прочности по экспериментальной и базовой диаграммам за одно и то же время от at до $t = te$.

Прогнозируемое значение напряжений вычислялось по уравнению

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

Важными элементами представленного анализа являются оценка и учет для различных групп материалов характеристик β , β_e , Δ_1 , Δ_2 , S_1 , S_2 , где

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

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

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

S_1 рассчитывается при $m=1$ и подстановке значений погрешностей прогнозирования по логарифму времени Δ_1 ; S_2 – при $m=2$ и подстановке значений погрешностей по напряжению Δ_2 ; n – количество участков.

В [1–5] наряду с данными по длительной прочности представлены результаты их обработки с помощью одного из параметрических методов:

$$P_{\text{ЛМ}} = f(\sigma) = T(C + \lg t); \quad (7)$$

$$P_{\text{МХ}} = f(\sigma) = \frac{\lg t - \lg t_a}{T - T_a}; \quad (8)$$

$$P_{\text{ОШД}} = f(\sigma) = \lg t - B/T; \quad (9)$$

$$f(\sigma) = b_0 + b_1 \lg \sigma + b_2 \lg^2 \sigma + \dots + b_n \lg^n \sigma. \quad (10)$$

При анализе этих методов обычно внимание акцентируется на значениях только основных постоянных C , $\lg t_a$, T_a , B , в то время как точность прогнозирования значительно зависит как от описания полиномиальной функции (10), так и от значений постоянных b_i .

Принципиальные особенности прогнозирования по МБД установлены по результатам обработки данных [1–5] (табл. 1–3). Каждый участок диаграммы длительной прочности характеризует величина β_e . Прогнозирование выполняется во всех случаях с помощью одного значения постоянной β (МБД) или трех значений $\beta = \beta_i$ ($i = 1, 2, 3$) (МБД-2). В итоге численные значения характеристик β_1 , β_2 , β_3 определяют величины S_m , которые используются для сравнения возможностей параметрических методов и МБД.

Т а б л и ц а 1

Результаты обработки данных [4] методом Мэнсона–Хэферда для плавки G

n	S_1	T_a	$\lg t_a$	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4
234	0,473	340	18,08	-0,477	0,918	-0,69	0,229	-2,85
27	0,378	0	30,15	-1,09	2,110	-1,55	5,060	-6,16

Т а б л и ц а 2

Результаты обработки данных [4] МБД-2 для плавки G

n	S_1	S_2	β_1	β_2	β_3
283	0,459	0,156	0,30	1,10	1,40
32	0,229	0,102	0,14	0,74	1,34

Для метода базовых диаграмм характерно то, что расширение объемов обработки экспериментальных данных обычно сопровождается выявлением некоторых особенностей длительного разупрочнения, учет которых может способствовать повышению точности прогнозирования.

В табл. 1 и 2 для стали 0,5Cr–0,5Mo, т.е. для девяти плавок, приведены результаты обработки, полученные параметрическим методом Мэнсона–Хэферда [4] и МБД-2 соответственно. Корреляционный анализ с помощью параметрического метода выполняется при использовании большего числа постоянных при близких по сравнению с полученными МБД-2 результатах. Кроме того, существенным является то, что при использовании параметрических методов нет соответствия между значениями общих постоянных для различных и отдельных плавок, о чем можно судить, например, по значению постоянной $T_a = 340$, общей для девяти плавок, и $T_a = 0$ для отдельно указанной плавки. Однако данные, приведенные в табл. 2, свидетельствуют о соответствии указанных значений при использовании МБД-2, и именно большие возможности уточнения такой согласованности создают основу для последующего более точного прогнозирования длительной прочности по МБД и, в частности, МБД-2.

С помощью МБД контролируется роль каждого отдельного участка диаграммы длительной прочности, что положительно влияет на результаты прогнозирования. Рассмотрим суть обработки экспериментальных данных отдель-

Результаты обработки данных [1] МБД-2 для плавки В

№ строки	$T, ^\circ\text{C}$	$\sigma_{at}, \text{МПа}$	$\sigma_{te}, \text{МПа}$	$at, \text{ч}$	$te, \text{ч}$	$\lg\left(\frac{te}{at}\right)$	β_i	β_e	Δ_1	Δ_2
1	600	216,0	157,0	219,0	5151,0	1,371	0,85	0,78	0,13	-0,034
2	600	216,0	137,0	219,0	15467,9	1,849	0,85	0,81	0,10	-0,027
3	600	216,0	118,0	219,0	37441,0	2,233	0,85	0,87	0,07	0,018
4	600	216,0	108,0	219,0	74753,6	2,533	0,85	0,87	0,09	0,024
5	600	196,0	157,0	502,8	5151,0	1,010	0,86	0,72	0,18	-0,048
6	600	196,0	137,0	502,8	15467,9	1,488	0,86	0,78	0,17	-0,046
7	600	196,0	118,0	502,8	37441,0	1,872	0,86	0,85	0,03	-0,007
8	600	196,0	108,0	502,8	74753,6	2,172	0,86	0,85	0,02	-0,005
9	600	177,0	137,0	1568,7	15467,9	0,994	0,86	0,80	0,08	-0,022
10	600	177,0	118,0	1568,7	37441,0	1,378	0,86	0,89	0,06	0,016
11	600	177,0	108,0	1568,7	74753,6	1,678	0,86	0,88	0,06	0,017
12	600	157,0	108,0	5151,0	74753,6	1,162	0,86	0,93	0,12	0,034
13	600	177,0	137,0	59,7	523,7	0,943	0,86	0,87	0,01	0,002
14	650	177,0	98,0	59,7	5686,5	1,979	0,86	0,91	0,14	0,041
15	650	177,0	88,0	59,7	20155,1	2,528	0,86	0,85	0,05	-0,014
16	650	177,0	78,0	59,7	36873,9	2,791	0,86	0,88	0,11	0,030
17	650	177,0	69,0	59,7	63534,9	3,027	0,86	0,91	0,29	0,087
18	650	137,0	98,0	523,7	5686,5	1,036	0,86	0,92	0,08	0,025
19	650	137,0	78,0	523,7	36873,9	1,848	0,86	0,86	0,01	-0,001
20	650	137,0	69,0	523,7	63534,9	2,084	0,86	0,90	0,16	0,048
21	650	118,0	88,0	1748,3	20155,1	1,062	0,86	0,77	0,13	-0,041
22	650	118,0	78,0	1748,3	36873,9	1,324	0,86	0,85	0,02	-0,006
23	650	118,0	69,0	1748,3	63534,9	1,560	0,86	0,91	0,13	0,040
24	700	98,0	69,0	622,5	8922,4	1,156	0,95	0,80	0,21	-0,078
25	700	98,0	61,0	622,5	16983,9	1,436	0,95	0,86	0,18	-0,066
26	700	98,0	53,0	622,5	19562,8	1,497	0,95	1,01	0,12	0,048
27	700	98,0	47,0	622,5	33021,8	1,725	0,95	1,02	0,19	0,078
28	700	98,0	41,0	622,5	46947,1	1,877	0,95	1,07	0,36	0,161
29	700	78,0	53,0	1127,5	19562,8	1,239	0,95	0,78	0,27	-0,103
30	700	78,0	47,0	1127,5	33021,8	1,467	0,95	0,85	0,20	-0,081
31	700	78,0	41,0	1127,5	46947,1	1,619	0,95	0,94	0,04	-0,013
32	750	78,0	53,0	241,9	5082,8	1,322	0,95	0,75	0,33	-0,128
33	750	78,0	47,0	241,9	11507,5	1,677	0,95	0,77	0,40	-0,154

$S_1 = 0,173$; $S_2 = 0,063$; $\beta_1 = 0,85$; $\beta_2 = 0,86$; $\beta_3 = 0,95$; $\sigma_\alpha = 100 \text{ МПа}$; $\sigma_\beta = 200 \text{ МПа}$.

ной плавки на примере данных, приведенных в табл. 3. Прогнозирование, например, на интерполяционной основе величины $\sigma_{te} = 219 \text{ МПа}$ (в табл. 1 строка № 1) при $te = 5151 \text{ ч}$ по $\sigma_{at} = 216 \text{ МПа}$ и $at = 157 \text{ ч}$ с помощью формулы (3) выполняется следующим образом. Принимается $\sigma_{at} = \sigma_{157}$, $\sigma_{te} = \sigma_{5151}$, $at = 157 \text{ ч}$, $te = 5151$. Сначала в (1) вместо σ'_t и t подставляются значения σ_{at} и at , что приводит к уравнению с одним неизвестным σ_1 . Подставив в (1) $t = 5151 \text{ ч}$, при установленном значении σ_1 рассчитывается σ'_t и по формуле (2) – величина β_e . В итоге при известном значении β с

помощью (3) по σ_{157} рассчитывается, т.е. прогнозируется, σ_{5151} . Оценка значений $\beta = \beta_i$ ($i=1, 2, 3$) выполняется следующим образом.

В соответствии с (3) для прогнозирования σ_{5151} по σ_{157} (в табл. 3 строка № 1) необходимо знать только значение β , что характерно для прогнозирования данных и в остальных строках. Вначале задается произвольный ряд значений β , например 0,5; 0,6; ...; 1,7; 1,8. Затем при каждом значении β , например при $\beta = 0,5$, осуществляется прогнозирование в каждой строке с помощью формулы (5) и определяются все значения погрешностей Δ_2 , на основе которых рассчитывается величина S_2 . Расчеты повторяются при каждом значении β указанного ряда. При минимальной величине $\beta = 0,5$ значение S_2 , как правило, будет большим, по мере увеличения β значение S_2 сначала уменьшается, а затем возрастает, в результате чего устанавливаемое таким образом минимальное значение S_2 определяет искомое значение β .

Таким образом, подробный анализ зависимости $\beta_e = f(\sigma_{at})$ показывает, что ее характер для отдельных плавок различается. Представленная в [1–5] комплексная информация вполне достаточна для физического уточнения особенностей таких зависимостей для отдельных плавок и существенного развития прогнозирования длительной прочности.

Резюме

Обґрунтовується, що метод базових діаграм завдяки достатньо точній оцінці відхилень окремих ділянок експериментальних діаграм від відповідних ділянок незмінних базових діаграм забезпечує значне підвищення ефективності використання даних про тривалу міцність різних плавок сталей та сплавів для уточнення особливостей їх довготривалого знеміцнення.

1. *Data sheets on the elevated-temperature properties of 18Cr–8Ni steel // NIRM Creep Data Sheet. – 1986. – No. 4B. – 32 p.*
2. *Data sheets on the elevated-temperature properties of 18Cr–10Ni–Ti stainless steel // Ibid. – 1987. – No. 5B. – 32 p.*
3. *Data sheets on the elevated-temperature properties of 1Cr–0.5Mo steel // Ibid. – 1996. – No. 1B. – 36 p.*
4. *Data sheets on the elevated-temperature properties of 0.5Cr–0.5Mo steel // Ibid. – 1994. – No. 20B. – 28 p.*
5. *Data sheets on the elevated-temperature properties of 1Cr–0.5Mo steel // Ibid. – 1990. – No. 35A. – 22 p.*
6. *Кривенюк В. В. Прогнозирование длительной прочности тугоплавких металлов и сплавов. – Киев: Наук. думка, 1990. – 248 с.*
7. *Писаренко Г. С., Кривенюк В. В. Новый подход к прогнозированию длительной прочности металлов // Докл. АН СССР. Механика. – 1990. – 312, № 3. – С. 558 – 562.*
8. *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.*

9. *Кривенюк В. В.* Прогнозирование длительной прочности сталей и сплавов параметрическими методами и методом базовых диаграмм. Сообщ. 2. Экстраполяционный анализ экспериментальных данных // Там же. – № 6. – С. 30 – 42.
10. *Larson F. R. and Miller J.* A time–temperature relationship for rupture and creep stresses // Trans. ASME. – 1952. – **74**, No. 5. – P. 765 – 775.
11. *Manson S. S. and Haferd A. M.* A Linear Time–Temperature Relation for Extrapolation of Creep and Stress Rupture Data // NACA TN 2890. – 1953. – 51 p.
12. *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.

Поступила 07. 11. 2011