

УДК 539.376

© 2004 г. В.В. КАШЕЛКИН, И.А. КУЗНЕЦОВА, С.А. ШЕСТЕРИКОВ

**МЕТОД ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ  
ХРОМОНИКЕЛЕВЫХ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ**

Предлагается метод прогнозирования длительной прочности хромоникелевых аустенитных сталей по данным кратковременных испытаний. Обрабатываемые экспериментальные данные помимо значений времени до разрушения включают в себя также диаграммы ползучести для различных уровней приложенного напряжения. Использование предложенного метода иллюстрируется результатами, полученными на основе испытаний на ползучесть и длительную прочность хромоникелевой аустенитной стали марки 10X15H27T3MP (ЭП700) при температуре 600°C.

Длительная прочность и ползучесть материалов являются определяющими параметрами работоспособности и долговечности конструкций. Наиболее точное их значение можно получить прямыми испытаниями, что требует больших временных и финансовых затрат, а для материалов энергетических установок зачастую невозможно, так как не удается воспроизвести при испытаниях все рабочие параметры. Поэтому одним из важных направлений исследований становится поиск и разработка методов прогнозирования длительных характеристик материалов методами экстраполяции данных, полученных опытным путем за время испытаний на один-два порядка ниже требуемых [1–3].

Предлагаемый метод прогнозирования длительной прочности хромоникелевых аустенитных сталей основан на работах [3, 4], в которых изложена общая методика обработки экспериментальных данных по длительной прочности. Зависимость времени до разрушения  $t_p$  [ч] от прикладываемого напряжения при испытании  $\sigma$  [МПа] была представлена в [3, 4] в виде:

$$\lg t_p = D + 17 \lg \sigma_\sigma - n \lg [\sigma / (\sigma_\sigma - \sigma)] \quad (1.1)$$

где  $\sigma_\sigma$  – условный предел кратковременной прочности [МПа],  $D$  и  $n$  – константы.

Условный предел кратковременной прочности можно определить, используя экспериментальные данные по установившейся скорости ползучести. В качестве основного соотношения, описывающего процесс развития деформации ползучести, используется зависимость [3]:

$$\dot{\epsilon} = A \left( \frac{\sigma}{\sigma_\sigma - \sigma} \right)^n \quad (1.2)$$

где  $A$  и  $n$  – константы,  $\dot{\epsilon}$  – установившаяся скорость ползучести.

Записывая соотношение (1.2) для уровней напряжений  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  и  $\sigma_3$  и исключая постоянные  $A$  и  $n$ , приходим к равенству

$$\frac{\lg(\dot{\epsilon}_1/\dot{\epsilon}_2) \lg(\sigma_2(\sigma_\sigma - \sigma_3)/\sigma_3(\sigma_\sigma - \sigma_2))}{\lg(\dot{\epsilon}_2/\dot{\epsilon}_3) \lg(\sigma_1(\sigma_\sigma - \sigma_2)/\sigma_2(\sigma_\sigma - \sigma_1))} = 1 \quad (1.3)$$

где  $\dot{\epsilon}_1$ ,  $\dot{\epsilon}_2$ ,  $\dot{\epsilon}_3$  – значения установившейся скорости ползучести при соответствующих напряжениях [ $\text{ч}^{-1}$ ].

Из соотношения (1.3) определяются значения  $\sigma_\sigma$  для всех возможных подстановок напряжений. Условный предел кратковременной прочности стали при определенной температуре находится как среднее арифметическое значение из всех полученных. При этом не учитываются значения  $\sigma_\sigma$  ниже максимального напряжения при испытании и выше некоторого критического значения, в качестве которого в данной работе принимается 1000 МПа (т.е. рассматриваются реальные значения предела кратковременной прочности).

Подобным образом из соотношения (1.2) определяются значения константы  $n$  (при этом принимаются в расчет только значения параметра  $n$  большие или равные 1). Используя экспериментальные значения времен до разрушения образца при прилагаемом напряжении и полученные значения  $\sigma_\sigma$  и  $n$ , из соотношения (1.1) можно определить значение константы  $D$ .

Соотношение (1.1), разрешенное относительно  $\sigma$ , позволяет определить прогнозируемый предел длительной прочности для времен до 100000 часов

$$\sigma = \frac{\sigma_\sigma}{1 + (t_p / (10^D \sigma_\sigma^{17}))^{1/n}}$$

В [5] представлены экспериментальные данные, полученные при испытании на длительную прочность и ползучесть образцов стали марки 08X16H11M3 при температурах 600°C, 650°C, 700°C, результаты определения на основе предлагаемого метода параметров  $\sigma_\sigma$ ,  $n$  и  $D$ , а также значения прогнозируемых пределов прочности для времен до 100000 часов. Указанная сталь относится к растворноупрочняемым хромоникельмолибденовым аустенитным сталям. В данной работе предлагаемый метод используется для прогнозирования предела длительной прочности дисперсионноупрочняемой хромоникелевой аустенитной стали марки 10X15H27T3MP (ЭП700), используемой для длительной работы при температурах до 600°C.

В табл. 1–3 представлены результаты определения констант  $\sigma_\sigma$ ,  $n$  и  $D$  в соотношении (1.1), выполненные по полученным экспериментальным данным ЦНИИ КМ “Прометей” испытаний на ползучесть и длительную прочность образцов стали марки ЭП700 при температуре 600°C. В табл. 3  $\sigma$  – напряжение при испытании,  $t$  – время до разрушения. В табл. 4 приведены значения теоретических ( $t_2$ ) и экспериментальных ( $t_1$ ) ( $t_0$  – среднее арифметическое) времен до разрушения, позволяющие оценить точность полученного прогноза;  $\Delta$  – относительная погрешность (при этом средние арифметические значения соответствующих величин были:  $\sigma_\sigma = 777.7$  МПа,  $n = 2.98$ ,  $D = -44.9226$ ). Теоретические значения предела длительной прочности для времен 10000 ч и 100000 часов составляют соответственно 422.0 и 275.3 МПа.

Учитывая большой разброс экспериментальных данных, наблюдается достаточно хорошее соответствие (относительная разница прогнозируемых и экспериментальных времен не превышает 12%). Исключение составляют данные, полученные при высоком прилагаемом напряжении при испытании – 650 МПа.

Таблица 1

$\sigma_1$ , МПа	$\sigma_2$ , МПа	$\sigma_3$ , МПа	$\dot{\epsilon}_1 \cdot 10^3$ , ч <sup>-1</sup>	$\dot{\epsilon}_2 \cdot 10^3$ , ч <sup>-1</sup>	$\dot{\epsilon}_3 \cdot 10^3$ , ч <sup>-1</sup>	$\sigma_0$ , МПа
650	600	550	0.18	0.0465	0.0186	711.2
650	600	550	0.15	0.0465	0.0186	755.9
650	600	320	0.18	0.0654	0.000316	964.1
650	600	320	0.18	0.0465	0.000316	765.8
650	600	320	0.15	0.0465	0.000316	817.0
650	600	280	0.18	0.0654	0.00032	851.9
650	600	280	0.18	0.0465	0.00032	736.8
650	600	280	0.15	0.0465	0.00032	769.9
650	600	240	0.18	0.0654	0.0002	830.2
650	600	240	0.18	0.0465	0.0002	732.5
650	600	240	0.15	0.0654	0.0002	955.1
650	600	240	0.15	0.0465	0.0002	762.3
650	600	200	0.18	0.0654	0.00016	798.0
650	600	200	0.18	0.0465	0.00016	721.5
650	600	200	0.15	0.0654	0.00016	885.5
650	600	200	0.15	0.0465	0.00016	746.0
650	550	320	0.18	0.0186	0.000316	808.5
650	550	320	0.15	0.0186	0.000316	853.5
650	550	280	0.18	0.0186	0.00032	751.6
650	550	280	0.15	0.0186	0.00032	776.0
650	550	240	0.18	0.0186	0.0002	743.5
650	550	240	0.15	0.0186	0.0002	764.8
650	550	200	0.18	0.0186	0.00016	726.1
650	550	200	0.15	0.0186	0.00016	742.8
650	280	240	0.18	0.00032	0.0002	682.7
650	280	240	0.15	0.00032	0.0002	686.9
600	550	320	0.0654	0.0186	0.000316	723.0
600	550	320	0.0465	0.0186	0.000316	929.3
600	550	280	0.0654	0.0186	0.00032	685.3
600	550	280	0.0465	0.0186	0.00032	787.1
600	550	240	0.0654	0.0186	0.0002	681.3
600	550	240	0.0465	0.0186	0.0002	769.3
600	550	200	0.0654	0.0186	0.00016	669.5
600	550	200	0.0465	0.0186	0.00016	736.7
550	280	240	0.0048	0.00032	0.0002	897.0

Таблица 2

$\sigma_1$ , МПа	$\sigma_2$ , МПа	$\dot{\epsilon}_1 \cdot 10^3$ , ч <sup>-1</sup>	$\dot{\epsilon}_2 \cdot 10^3$ , ч <sup>-1</sup>	$n$
650	600	0.18	0.0654	2.47
650	600	0.18	0.0465	3.30
650	600	0.15	0.0654	2.02
650	600	0.15	0.0465	2.85
650	550	0.18	0.0186	3.05
650	550	0.15	0.0186	2.80
650	550	0.18	0.0048	4.86
650	550	0.15	0.0048	4.62
650	320	0.18	0.000316	3.20
650	320	0.15	0.000316	3.10
650	280	0.18	0.00032	2.88
650	280	0.15	0.00032	2.79
650	240	0.18	0.0002	2.79
650	240	0.15	0.0002	2.72
650	200	0.18	0.00016	2.61
650	200	0.15	0.00016	2.55
600	550	0.0654	0.0186	3.75
600	550	0.0465	0.0186	2.74
600	550	0.0654	0.0048	7.80
600	550	0.0465	0.0048	6.78
600	320	0.0654	0.000316	3.39
600	320	0.0465	0.000316	3.17
600	280	0.0654	0.00032	2.97
600	280	0.0465	0.00032	2.78
600	240	0.0654	0.0002	2.86
600	240	0.0465	0.0002	2.69
600	200	0.0654	0.00016	2.64
600	200	0.0465	0.00016	2.49
550	320	0.0186	0.000316	3.29
550	280	0.0186	0.00032	2.79
550	240	0.0186	0.0002	2.68
550	200	0.0186	0.00016	2.45
550	320	0.0048	0.000316	2.19
550	280	0.0048	0.00032	1.86
550	240	0.0048	0.0002	1.88
550	200	0.0048	0.00016	1.75
320	240	0.000316	0.0002	1.02
280	240	0.00032	0.0002	2.03
280	200	0.00032	0.00016	1.43

Таблица 3

$\sigma$ , МПа	$t$ , ч	$D$
650	101	-45.0335
650	144	-44.8794
650	177	-44.7898
650	211	-44.7135
650	246	-44.6468
600	189	-45.2925
600	308	-45.0804
600	434	-44.9315
600	670	-44.7429
550	737	-45.1350
550	862	-45.0670
550	1627	-44.7911
320	52126	-44.8899

Таблица 4

$\sigma$ , МПа	$t_1$ , ч	$t_0$ , ч	$t_2$ , ч	$\Delta$ , %
650	101			
	144			
	177	175.8	130.37	25.8
	211			
	246			
600	189			
	308			
	434	400.25	442.98	-10.7
	670			
550	737			
	862	1075.33	1201.90	-11.8
320	1627			
	52126	52126	48349.26	7.2

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Работнов Ю.Н.* Ползучесть элементов конструкций. М.: Наука, 1966. 752 с.
2. *Ле Мэй.* Развитие параметрических методов обработки результатов испытаний на ползучесть и длительную прочность // Теоретические основы инженерных расчетов. 1979. Т. 101. № 4. С. 19–24.
3. *Аришакуни А.П., Шестериков С.А.* Прогнозирование длительной прочности жаропрочных металлических материалов // Изв. РАН. МТТ. 1994. № 3. С. 126–141.
4. *Шестериков С.А., Юмашева М.А.* Конкретизация уравнения состояния в теории ползучести // Изв. АН СССР. МТТ. 1984. № 1. С. 86–91.
5. *Shesterikov S.A., Beliakova T.A., Voshedchenko B.M., Kashelkin V.V., Kuznetsova I.A., Yakovlev V.A.* Long-term strength prediction for chromium-nickel austenitic steels based on short-term experimental results // Materials Physics and Mechanics. 2003. V. 6. No. 2.

Москва

Поступила в редакцию  
17.11.2003