

УДК 539.4

© 1997 г. А.Л. АРШАКУНИ

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ МЕТАЛЛОВ

С использованием дробной зависимости от напряжения предложено новое соотношение длительной прочности. Показано, что по сравнению с существующими методами оно позволяет с меньшим числом определяемых параметров и достаточной точностью экстраполировать характеристики длительной прочности широкого круга металлических материалов в области структурно стабильного деформирования. Представлено обоснование эффективности метода и его существенных преимуществ по сравнению с используемыми промышленностью методами.

1. Длительная прочность широкого круга металлических материалов может быть описана соотношением [1]:

$$\lg t_* = D + 17 \lg R - n \lg(\sigma / (R - \sigma)) \quad (1.1)$$

где t_* – время до разрушения, σ – напряжение; R [МПа] – теоретическое значение предела кратковременной прочности, D , n – постоянные материала (n – показатель длительной прочности, D – коэффициент пропорциональности).

При высоких температурах функция $R(T)$ может быть описана следующей зависимостью [1]:

$$\lg R = B + 0,525 T_* / T \quad (1.2)$$

где T – температура, K , T_* , B – постоянные материала.

Расчетные значения величины T_* для наиболее важных классов материалов представлены в [1].

В [1] показано, что для жаропрочных материалов с α -структурой: никелевых сплавов, аустенитных и высокохромистых ($Cr > 10\%$) сталей $n = 4$. Для остальных материалов значения коэффициентов уравнения (1.1) D , n могут быть определены в соответствии с табл. 1, где N_1 – марка материала (Ч – чугун; УС – углеродистые стали; ХНС – хромоникелевые сплавы), N_2 – основа, N_3 – характеристика сплава (П – перлит), T_w – рабочая температура

$$n(\sigma) = \min(3; 2 + 2,7\sigma / (R - \sigma)) \quad (1.3)$$

В публикуемой работе проанализированы в основном экспериментальные данные большой продолжительности, полученные на базе 10^4 – 10^5 ч.

Из соотношений (1.1) – (1.3) следуют формулы приведения [1]. Используемые в промышленности жаропрочные легированные перлитные стали описываются однопараметрической зависимостью (1.1) с $n = 5$, $D = -41$ при температурах до 520–570°C. При более высоких температурах величина показателя длительной прочности определяется по соотношению (1.3) и принимает значения от 2 до 3 единиц.

Таблица 1

N_1	N_2	N_3	$\sigma_b(20^\circ\text{C}), \text{МПа}$	$T_w, ^\circ\text{C}$	n	D
15X15M Ч	Fe 3% < Cr < 10%	-	-	600-700		
ASTM X2M1, X2M, X1MФ, X2H18B, XHV 23 УС, Ст 10	-	-	-	520-570	5	-41
Ст. 20	Fe	II	-	380		
X2M1, X1MФ, X1ГМФ, XMV 23	-	-	-	525		-37
ХНС	Cr-Ni	-	-	800-1000	$n(\sigma)$	-44
ВХ-ЧА, ВХ1	Cr	-	-	1150		-31,5
УС, А2	Fe	II	-	400-550		-39
ВМ2	Mo	-	-	1000-1400		
ВТ3-1, ВТ5-1, ВТ5	Ti	-	>650	20-500		-43
АК4, Д16Т, В95Т, ВДГ7	Al	-	>400	100-320	3	-41
ОТ4, ВТ1	Ti	-	-			
Д20, В300	Al	-	<400	150-350		-33
МЛ7-1	Mg	-	-			
Zr + 2,5% Nb, ЭИ635	Zr	-	-	300-1000		-36

Переход от одной зависимости к другой определяется только температурой и не зависит от времени. Это является существенным преимуществом зависимости (1.1) по сравнению со степенной.

С другой стороны, при $n = n(\sigma)$ кривая длительной прочности имеет излом, но все коэффициенты соотношения (1.3) – заранее известные числа. Единую зависимость в широком диапазоне температур дает только метод температурного прогнозирования [1].

У углеродистых сталей аналогичное изменение коэффициентов n, D происходит при температуре 380°C . С другой стороны, в соответствии с "Правилами и Нормами в атомной энергетике" максимальная температура использования составляет для легированных перлитных сталей 500°C ; для углеродистых сталей 350°C , поэтому для расчета конструкций из перлитных сталей основным случаем является $n = 5; D = -41$. Эксплуатация остальных материалов при температурах, где происходит снижение показателя длительной прочности n (а следовательно, и механических характеристик), равного 3–5 единицам, также не допускается.

При анализе моделей проверялись следующие гипотезы:
значимость уточнения трехпараметрическим случаем (δ_3) однопараметрической (δ_1) модели

$$K_1 = \frac{\delta_1^2 / \delta_3^2}{F_{5\%}(f_1, f_3)} > 1$$

значимость уточнения зависимостью (1.1) соотношения Ларсона – Миллера (δ_L):

$$L(\sigma) = T(C + \lg t_*), \quad K_L = \frac{\delta_L^2 / \delta_3^2}{F_{5\%}(f_L, f_3)} \quad (1.4)$$

где $F_{5\%}$ – критерий Фишера с уровнем значимости 5%; f_1, f_3, f_L – число степеней свободы, соответственно для дисперсий $\delta_1^2, \delta_3^2, \delta_L^2$.

Погрешность моделей определялась по формулам

$$\delta^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \delta_i^2, \quad \delta_i = (\sigma_{ci} - \sigma_{ei}) / \sigma_{ei}$$

Таблица 2

N_1	N_2	$\delta_1, \%$	$\delta_2, \%$	$\delta_3, \%$	$\delta_L, \%$	K_1	K
15X15M	НЕФТЕ- МАШ	2,4	2,4	2,4	4,3	0,4	1,3
Ч	[2]	1,8	1,4	1,4	12,3	0,59	27
10X2M	[3]	2,5	2,4	2,4	—	0,48	—
X2M1	[2]	1,8	1,8	1,8	—	0,27	—
12X1MФ	[3]	2,8	2,7	2,6	—	0,13	—
15X1MФ	[3]	2,6	2,5	2,6	—	0,18	—
15XMФЛ	[3]	2,5	2,4	2,3	—	0,18	—
12XMV23	[2]	1,8	1,8	1,8	—	0,11	—
10X2M1ФБ	[3]	1,6	1,5	1,6	—	0,37	—
X2M1	[2]	5,1	—	5,6	13,7	0,43	4,5
12X1MФпл.211.	ЦНИИ	3,4	3,1	3,1	—	0,25	—
12X1MФпл.34385	ЧЕРМЕТ	2,4	—	3,6	—	0,1	—
14X1ГМФпл.37732	ВТИ	2,5	2,4	2,3	—	0,28	—
12X1MФпл.188	СОЮЗТЕХ энерго	1,6	—	3,4	—	0,16	—
12X1MФпл.83		4,2	3,7	3,8	—	0,3	—
12XMV23	[2]	3,1	3,0	2,5	4,6	0,58	2,3
XН*-сплав	ПРОМЕ- ТЕЙ	3,1	2,7	3,6	4,2	0,55	1,0
XН-сплав	[2]	6,9	6,5	4,9	8,4	0,96	1,4
ВХ-4А	[2]	8,8	8,8	8,7	—	0,22	—
ВХ-1	[2]	7,5	7,5	9,9	56	0,31	17
УС	[2]	5,7	5,2	4,9	6,2	0,56	0,66
А2	[2]	1,5	1,4	1,4	—	0,4	—
ВМ2	[2]	1,7	1,7	1,7	—	0,29	—
ВТ3-1	[2]	3,1	2,7	2,7	31	0,31	31
ВТ5-1	[2]	2,4	1,8	1,8	33	0,29	55
ВТ5	[2]	4,3	4,3	3,6	—	0,52	—
ОТ4	[2]	5,8	4,8	4,5	—	0,75	—
АК4	[2]	4,6	4,5	4,5	—	0,59	—
ВД17	[2]	6,1	5,9	5,6	—	0,67	—
Д16Т	[2]	4,8	3,8	3,7	36	0,27	15
В95Т	[2]	5,4	5,1	5,1	—	0,24	—
ВТ1пл."О"	НИИ	0,4	0,37	0,2	—	0,4	—
ВТ1пл."У"	ХИИМАШ	2,8	2,7	2,6	—	0,12	—
ВТ1пл."Х"		2,2	1,8	1,5	—	0,22	—
Д20	[2]	4,0	3,9	3,9	—	0,56	—
В300	[2]	4,6	3,6	3,2	—	0,35	—
МЛ7-1	[2]	5,3	4,7	3,7	—	0,7	—
Zr+2,5% Nb	НИКИЭТ	3,4	3,2	3,0	—	0,3	—
ЭИ635пл.3099		2,4	2,4	2,4	—	0,3	—

где σ_{ei} , σ_{ci} — соответственно экспериментальное [1–4] и расчетное значения σ ; N — число значений σ_{ei} .

Из табл. 2 (где N_2 — источник) видно, что коэффициент K_1 во всех случаях меньше единицы, т.е. в качестве расчетного может быть принят однопараметрический вариант зависимости (1.1) (с параметром R), который позволяет надежно экстраполировать длительную прочность по напряжению по результатам испытаний продолжительностью до 10^3 ч.

Погрешность метода Ларсона — Миллера δ_L во всех без исключения случаях оказывается больше, чем δ_3 по зависимости (1.1) (табл. 2). Таким образом, метод Ларсона — Миллера (1.4) и менее точен, и более сложен, принципиально не позволяя экстраполировать длительную прочность по напряжению, поэтому использование метода Ларсона — Миллера нецелесообразно.

Таблица 3

<i>n</i>	H65A10	ЭИ929	ЭИ847	Timken 25–20	XH55MBЦ	45X25H20C2	
Const	–	–	–	–	–	–	
5	–	–	–	–	–	–	
4	5,6	6,2	2,6	8,0	7,9	1,0	
3	–	–	–	–	–	–	
<i>n</i> (σ)	14,7	9,5	10,6	27	13	3,9	
5 ∩ <i>n</i> (σ)	–	–	–	–	–	–	
<i>K</i> ₂	1,5	1,6	4,2	5,8	2,0	2,6	
<i>n</i> *				4			

<i>n</i>	X18H8	15X15M	Ч	21XMV511	X2M1	14MV63	
Const	–	–	–	6,1	11,4	–	
5	–	2,4	1,4	–	–	–	
4	4,2	4,0	6,0	–	–	9,6	
3	–	–	–	–	–	–	
<i>n</i> (σ)	6,6	–	–	4,1	5,1	5,8	
5 ∩ <i>n</i> (σ)	–	–	–	3,6	5,6	–	
<i>K</i> ₂	1,4	1,1	6,6	1,0	1,4	1,5	
<i>n</i> *	4	5					(1.3) (<i>R</i> = σ _b)

<i>n</i>	8XHNb1613	MnMo	XH*-сплав	УС	BM2	OT4	AK4
Const	–	–	–	–	–	–	–
5	–	–	–	–	–	–	–
4	8,5	11,0	8,4	–	3,2	8,1	–
3	–	–	–	5,2	1,7	4,8	4,5
<i>n</i> (σ)	6,0	4,0	2,7	8,6	3,8	7,0	7,8
5 ∩ <i>n</i> (σ)	–	–	–	–	–	–	–
<i>K</i> ₂	1,3	3,1	4,0	1,1	1,0	1,1	1,7
<i>n</i> *	(1.3) (<i>R</i> = σ _b)				3		

Из табл. 3 видно: значимость каждого из фиксированных значений величины *n**, равных 3, 4 [1] или 5 единицам; необходимость введения функции *n*(σ) (соотношение (1.3)); а также отсутствие необходимости использования смешанных моделей

$$5 \cap n(\sigma): t_* = \min(t_{1*}, t_{2*}) \quad (1.5)$$

где *t*_{1*}, *t*_{2*} – величины, определенные по соотношению (1.1) соответственно с *n* равным 5 и *n*(σ), *R* = *R*₁ и *R* = *R*₂; *R*₁/*R*₂ = const – в этом случае из модели (1.5) следуют формулы приведения [1].

Таким образом, для расчета элементов конструкций основными значениями показателя длительной прочности *n** являются 3, 4 [1], 5. Значения *n* < 3 в соотношении (1.1) реализуются только в области высоких температур, где соответствующие материалы обычно не используются.

В табл. 4 представлены примеры прогнозирования длительной прочности перлитных сталей (по данным ЦКТИ [3], $\lg t_* = -41 + 17 \lg R - 51 \lg[\sigma / (R - \sigma)]$) и циркониевого сплава (по данным НИКИЭТ [3], $\lg t_* = -36 + 17 \lg R - 31 \lg[\sigma / (R - \sigma)]$). В первых строках табл. 4 от 10³ до 10⁴ ч (включительно) указаны экспериментальные значения пределов длительной прочности, а для 3·10⁴ и более часов – результаты прогноза, выполненного по методу ЦКТИ [3]. Во вторых строках указаны значения

Таблица 4

N_1	$T, ^\circ\text{C}$	$t = 10^3$	$3 \cdot 10^3$	10^4	$3 \cdot 10^4$	10^5	$2 \cdot 10^5$	$\delta, \%$	$R, \text{МПа}$	
10X2M	450	300	280	260	230	200	190	2,8	463	
		300	276	248	223	195	180	180		
	500	220	190	160	140	120	110	110	5,8	405
		220*	195	171	149	128	116	116		
12X1MФ	510	205	175	148	129	110	101	6,4	395	
		205*	182	159	138	118	106	106		
	450	295	275	250	235	200	190	190	4,8	460
		295*	271	244	219	192	177	177		
15X1M1Ф	500	294	275	245	230	201	188	4,5	459	
		294*	270	243	218	191	175	175		
	400	290	270	240	220	190	170	170	1,5	457
		290*	267	240	215	188	173	173		
10X2M1ФБ	450	275	255	230	205	180	170	3,0	446	
		275*	252	225	201	175	160	160		
	300	270	260	250	230	210	200	200	3,5	296
		270*	259	244	226	203	187	187		
Zn+2,5%Nb	325	250	233	216	200	185	175	4,5	282	
		250*	237	220	201	176	160	160		
	350	220	202	185	167	150	140	140	6,2	263
		220*	206	186	164	139	124	124		

Таблица 5

N_1	$T_e, ^\circ\text{C}$	$\delta_{1c}, \%$	$\delta_1, \%$	K_{1c}	B	T, K
15X5M	500–700	3,8	2,4	0,95	1,57	
ASTMX2M1	371–570	5,5	5,0	0,5	1,61	
12X1MФпл.211	540–610	4,2	3,4	0,32	1,44	
12X1MФпл.34385	540–610	2,9	2,4	0,31	1,47	1473
14X1ГМФпл. 37732	540–610	3,3	2,5	0,41	1,5	
12X1MФпл.188	540–675	1,9	1,6	0,23	1,42	
12X1MФпл.830	540–650	5,2	4,2	0,37	1,47	
12XM23	525–600	3,5	3,1	0,48	1,47	
ХНС-сплав	650–815	7,5	6,9	0,57	1,88	1673
ВХ-4А	900–1100	9,0	8,8	0,22	1,03	2173
ОТ4	400–550	7,3	5,8	0,72	1,61	1473
В300	300–350	7,5	4,6	0,45	1,18	973
Zr +2,5% Nb	350–1000	4,0	3,4	0,4	1,35	1273

Таблица 6

$T, ^\circ\text{C}$	350	600	650	700	750	800	900	1000
$\sigma_{\max}, \text{МПа}$	237	119	106	97	88,4	81,1	76,1	73,5
$t_*(\sigma_{\max}), \text{с}$	$1,1 \cdot 10^6$	6,1	0,8	0,2	$4 \cdot 10^{-2}$	$9 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$

пределов длительной прочности, спрогнозированные по зависимости (1.1). Прогнозируемые значения параметра R были определены по отмеченным звездочкам и экспериментальным значениям предела длительной прочности за 10^3 ч. Из табл. 4 видно, что среднеквадратическое отклонение разработанного метода от метода ЦКТИ не превосходит 10%.

Средний процент различия (вычисленный по табл. 4) пределов длительной прочности за $2 \cdot 10^5$ ч спрогнозированных по соотношению (1.1) и по методу ЦКТИ $\langle \delta_{2 \cdot 10^5} \rangle$

составляет: для перлитных сталей (для которых у ЦКТИ есть прямой эксперимент большой продолжительности) всего минус 2%, а для циркониевого сплава – целых минус 9%. При отсутствии прямого эксперимента используется метод, предсказывающий минимальное значение предела длительной прочности, поэтому использование метода ЦКТИ [3] нецелесообразно.

2. В табл. 5 представлены результаты статистического анализа упроченной модели (1.1), (1.2) с погрешностью δ_{1c} . Прогнозирование длительной прочности по соотношению (1.1) требует проведения испытаний длительностью до 10^3 ч только в области рабочих (умеренных) температур эксплуатации конструкций (в области высоких напряжений и значительных мгновенных пластических деформаций). В области высоких температур соотношение (1.1) соответствует опыту и при весьма малых временах до разрушения. Например, для циркониевого сплава Zr +2,5% Nb при температуре 350°C максимальное значение напряжения σ_{\max} , при котором соотношение (1.1) соответствует эксперименту, составляет 237 МПа, а $t_* = 300$ ч. В табл. 6 представлены значения σ_{\max} , рассчитанные для более высоких температур по модели (1.1), (1.2):

$$\sigma_* = \sigma(R_*R), \lg t_* + 17 \lg(R_* / R)$$

$$\lg(R_* / R) = 0,525(1273T_* - 1273 / 623)$$

В области высоких температур ($T > 700^\circ\text{C}$) расчетные значения R оказываются значительно больше значений σ_b , полученных при кратковременном разрыве образцов. Испытания на кратковременный разрыв теряют "физический" смысл, измеряя предел длительной, а не кратковременной ("мгновенной") прочности.

N_1	N_2	$t = 10$	30	10^2	$3 \cdot 10^2$	10^3
12X1MФ	400	441°	441°	441°	441°	432
		441°	441	441	441	432*
		441°	441°	441°	441°	441°
15XM	400	441	441	441	441	441
		420°	420°	420°	420°	420°
		420	420	420	420	420
12MX	400	340°	340°	340°	340°	340°
		340	340	340	340	340
		410	410	410	410	410
Ст. 10	350	340	340	340	340	340
		410	410	410	410	410
		410	410	410	410	410
Ст. 20	350	410	410	410	410	410
		410	410	410	410	410
		410	410	410	410	410

В области умеренных температур у сталей и никелевых сплавов наблюдается переход от разрушения вследствие ползучести к (независящему от времени) мгновенному разрушению [1] (табл. 7, N_2 – температура °C).

Параметр R соотношения (1.1) был определен по отмеченному звездочкой экспериментальному значению предела длительной прочности. Градусом отмечены экспериментальные значения предела кратковременной прочности σ_b . Расчетным значением предела прочности является минимальное из значений σ_b и величины σ , определенной по соотношению (1.1):

$$\sigma = \min(\sigma_b, \sigma) \quad (2.1)$$

Для перлитных сталей в области умеренных температур прогноз по методу ЦКТИ [3] также несколько завышает предел длительной прочности за $2 \cdot 10^5$ ч; для сталей 12X1MФ, 15XM, 12MX $\langle \delta_{2 \cdot 10^5} \rangle = -3,1\%$; для Ст. 10, Ст. 20 $\langle \delta_{2 \cdot 10^5} \rangle = -0,8\%$.

Соотношения (1.1), (2.1) позволяют (как и для аустенитных сталей [1]) прогнозировать температуру T_{*}° , при которой длительная прочность (зависимость от времени предела прочности материала) реализуется только при времени не менее t_* :

$$T_{*}^{\circ} = \frac{T_*}{\lg(R_{*}^{\circ} / R) / 0,525 + T_* / T} \quad (2.2)$$

где R – значение, вычисленное по зависимости (1.1), по которому осуществляется прогноз; R_{*}° – значение R , вычисленное по зависимости (1.1) при указанном значении t_* и $\sigma = \sigma_b(T_{*}^{\circ})$; для сталей $T_* = 1473$ К. Значения T_{*}° даны в табл. 8.

Проведение испытаний при $T \geq T_{10^2}^{\circ}$ обеспечивает возможность эксплуатации длительной прочности по результатам испытаний длительностью до 10^3 ч. В соответствии с нормами ASME [4] отсутствие снижения величины σ_b при временах ($2 \cdot 10^6$ ч) в 10 раз превышающих расчетную долговечность ($2 \cdot 10^5$ ч) гарантирует возможность пренебречь процессом ползучести.

3. Выше рассмотрено прогнозирование средних значений пределов длительной прочности $\langle \sigma \rangle$, соответствующих 50% вероятности разрушения. Важное практическое значение имеет определение гарантированных значений пределов длительной прочности $\bar{\sigma}$, которое обычно принимается соответствующим 1% вероятности

$t = 3 \cdot 10^3$	10^4	$3 \cdot 10^4$	10^5	$2 \cdot 10^5$	$\delta, \%$	$R, \text{МПа}$
418	398	378	354	340	6,8	558
411	383	356	324	305		
429	403	374	340	320	0,5	572
429*	402	375	343	324		
408	384	356	324	304	0,4	557
408*	381	354	322	303		
340°	319	295	266	249	0,9	514
340	319*	293	262	244		
407	384	356	321	300	0,6	556
407*	380	352	320	301		

разрушения [3]. Как показали расчеты, для оценки гарантированной долговечности соотношение (1.1) следует записать в следующем виде:

$$\lg \bar{t}_* = D + 17 \lg \langle R \rangle - n \lg \frac{\bar{\sigma}}{\bar{R} - \bar{\sigma}} \quad (3.1)$$

При $\bar{R} = \langle R \rangle$ соотношения (1.1) и (3.1) совпадают ($\bar{t}_* = t_*$, $\bar{\sigma} = \sigma$). Для зависимости (3.1) применимы все рассмотренные выше способы фиксирования коэффициентов D , n ; аппроксимации функции $\langle R(T) \rangle$ и прогнозирования. При этом (как показали расчеты) соотношение (3.1) обеспечивает такую же прочность прогноза, как соотношение (1.1).

Для перлитных сталей в табл. 9 представлены примеры прогнозирования гарантированных значений пределов длительной прочности (вторые строки) по данным ЦКТИ [3] (первые строки). Указанные гарантированные значения пределов длительной прочности спрогнозированы по зависимости (3.1) или (3.1), (1.2) ($R = \langle R \rangle$, $T_* = 1473 \text{ K}$), с $n = 5$, $D = -41$ (табл. 1).

Прогнозируемые значения параметров $\langle R \rangle$ и \bar{R} были определены по отмеченным звездочкам экспериментальным значениям гарантированных $\bar{\sigma}$ (табл. 9, первые строки) и средних $\langle \sigma \rangle$ пределов длительной прочности за 10^3 ч. Из табл. 9 видно, что, как и для аустенитных и высоколегированных сталей [1], среднеквадратическое отклонение δ разработанного метода от метода ЦКТИ [3] не превосходит 10% и метод [3] (как и при прогнозе средних значений) завышает предел гарантированной прочности за $2 \cdot 10^5$ ч в среднем на 2,7%, поэтому использование метода [3] по испытаниям длительностью 10^4 ч нецелесообразно.

В область умеренных температур такая экстраполяция осуществляется с использованием соотношения, аналогичного (2.1):

$$\bar{\sigma} = \min(\bar{\sigma}_b, \bar{\sigma}) \quad (3.2)$$

где $\bar{\sigma}_b$ – экспериментальные значения гарантированных пределов кратковременной прочности, $\bar{\sigma}$ – гарантированное значение предела длительной прочности, вычисленное по соотношению (3.1).

Из табл. 9 видно, что при отсутствии необходимой информации, как и для аустенитных и высоколегированных сталей [1], может быть принято

$$\langle R \rangle / \bar{R} = 1,35 \quad (3.3)$$

Таблица 8

N_1	12X1MΦ	15XM	12MX	Cr. 10	Cr. 20
G_0 , MПа	441	441	420	340	410
T_{10^2} , °C	411	417	419	375	369
$T_{2 \cdot 10^5}$, °C	362	367	366	323	323
$T_{2 \cdot 10^6}$, °C	345	351	350	308	308

Таблица 9

N_1	N_2	$t = 10^3$	10^4	10^5	$2 \cdot 10^5$	δ , %	$\langle R \rangle / \bar{R}$, MПа	$\langle R \rangle / \bar{R}$	
12X1MΦ	400	315	290	258	242		558		
		315	279	236	222		406		
	450	215	183	146	139		4.0	465	1.38
		220	183	144	133			338	
		219	181	143	129			457	
		400	219*	181	142	130	1.3	343	1.33
10X2M1ΦB	450	207	173	136	129		446		
		207*	169	131	120	4.3	335	1.33	
	N_2	$t = 10$	10^2	10^3	$3 \cdot 10^3$	10^4	$3 \cdot 10^4$	10^5	$3 \cdot 10^5$
371	414	414	414	414	414	414	379	344	
	414	414	413	399	381	363	339	316	
399	408	394	373	360	337	304	264	240	
	392	373	345	329	309	289	265	242	
427	394	380	302	264	243	215	190	169	
	366	323	286	268	247	227	204	183	
454	366	323	246	218	193	169	148	130	
	323	353	236	218	197	178	157	138	
482	323	353	197	176	152	134	115	99	
	281	211	192	156	137	103	89	77	
510	281	211	156*	140	122	107	91	78	
	221	169	126	107	92	77	66	56	
538	183	158	126	111	96	82	69	59	
	183	134	99	85	70	58	49	41	
566	131	102	89	75	64	53	45		
	131	102	89	75	64	53	45		

Таблица 10

В табл. 10 представлены экспериментальные данные ASME [4] для широко используемой за рубежом перлитной стали ASTMX2M1. До $3 \cdot 10^4$ ч (включительно) в первых строках табл. 10 указаны экспериментальные значения гарантированных пределов длительной прочности, а для 10^5 и $3 \cdot 10^5$ ч указаны значения, спрогнозированные по методу ASME [4] (обобщение метода Ларсона – Миллера). Кроме того, на 10^5 ч имелись контрольные экспериментальные точки, позволяющие оценить средние (но не гарантированные) пределы длительной прочности.

В табл. 10 экспериментальное значение, использованное для определения единственного неизвестного коэффициента B ($B = 1,61$) зависимости (1.2) отмечено звездочкой. Значения $\bar{\sigma}$ (вторые строки табл. 10) спрогнозированы по соотношениям (3.1), (1.2), (3.2), (3.3):

$$\lg \bar{t}_* = -41 + 17 \lg(R) - 51 \lg \frac{\bar{\sigma}}{R - \bar{\sigma}}$$

$$\langle R \rangle / \bar{R} = 1,35, \lg(R) = B + 0,525(1473 / T)$$

Из табл. 10 видно удовлетворительное соответствие разработанного метода эксперименту: $\delta = 5,5\%$; $T_{3 \cdot 10^5}^\circ = 341^\circ \text{C}$.

Таким образом, разработанный метод позволяет осуществлять надежную экстраполяцию длительной прочности широкого круга конструкционных сплавов по испытаниям длительностью до 10^3 ч.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аршакуни А.Л., Шестериков С.А. Прогнозирование длительной прочности жаропрочных металлических материалов // Изв. АН СССР. МТТ. 1994. № 3. С. 126–141.
2. Аршакуни А.Л., Чердеева Л.В. Учет зависимости энергии активации от температуры в определяющем соотношении длительной прочности металлов // Проблемы прочности. 1989. № 12. С. 11–18.
3. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. М.: Энергоатомиздат; 1989. 527 с.
4. Gases of ASME boiler and pressure vessel code. New York: ASME, 1988, N-47-28. 159 p.

Москва

Поступила в редакцию
9.X.1995