

УДК 539.376

© 2003 г. А.М. ЛОКОЩЕНКО, В.В. НАЗАРОВ, Д.О. ПЛАТОНОВ,
С.А. ШЕСТЕРИКОВ

АНАЛИЗ КРИТЕРИЕВ ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ МЕТАЛЛОВ ПРИ СЛОЖНОМ НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ

Абсолютное большинство накопленных за последние пятьдесят лет экспериментальных данных по длительной прочности металлов при сложном напряженном состоянии относится к испытаниям при постоянных нагрузках. За эти годы различными исследователями для этих условий накоплен обширный фактический материал, который позволяет предложить количественную методику его обработки и из достаточно большого набора критериев выделить наиболее эффективные. В связи с большим разбросом результатов испытаний обобщенные характеристики длительной прочности реально могут быть сформулированы только в виде простейших скалярных критериев. В работе дан анализ всех известных авторам опубликованных экспериментальных данных. Получены статистические оценки применимости известных критериев с использованием наиболее апробированных функциональных зависимостей.

1. Введение. Большинство экспериментальных данных по длительной прочности металлов получено, как правило, на основе результатов испытаний в условиях чистого растяжения. Однако при оценке работоспособности элементов конструкций, находящихся при сложном напряженном состоянии, необходимы подходы, позволяющие учитывать неодноосность нагружения. Проведение высокотемпературных испытаний при сложном напряженном состоянии связано со значительными технологическими трудностями, поэтому в настоящее время известно относительно небольшое количество надежных опытных данных. Подробный анализ ряда известных экспериментальных исследований можно найти в монографиях [1, 2], а также в обзорах [3–6].

В первом приближении при определении времени разрушения t^* элемента конструкции, находящегося в условиях ползучести при сложном напряженном состоянии, можно принять гипотезу о существовании скалярного критерия длительной прочности. Введение понятия критерия позволяет определенным образом унифицировать системы сложного напряженного состояния по признаку приведения элементов конструкций к разрушению за одно и то же время t^* . Значение t^* в этом случае может быть определено с помощью самого простого испытания: при чистом растяжении.

Исследование длительной прочности металлов в условиях сложного напряженного состояния обычно проводится на тонкостенных трубчатых образцах, нагруженных осевой силой P^* , крутящим моментом M и внутренним давлением q в различных комбинациях. Опытные данные, как правило, обрабатываются следующим образом. В качестве эквивалентного напряжения σ_e выбираются различные комбинации главных напряжений σ_1 , σ_2 и σ_3 , рассматриваются степенная или экспоненциальная зависимости t^* от σ_e :

$$t^* = C \sigma_e^{-n} \quad (1.1)$$

$$t^* = C_1 \exp(-\gamma \sigma_e) \quad (1.2)$$

в зависимости от этого строятся диаграммы длительной прочности в логарифмических ($\lg \sigma_e - \lg t^*$) или полулогарифмических ($\sigma_e - \lg t^*$) координатах и приближенно графически аппроксимируются эти диаграммы прямыми линиями. В качестве критерия длительной прочности принимается то эквивалентное напряжение σ_e , которому на диаграмме соответствует визуально меньший разброс опытных данных относительно полученной прямой. При этом выбор критерия длительной прочности основывается на сравнении графических диаграмм и не предполагает привлечения статистических методов обработки экспериментальных данных. Такой подход приводит к погрешностям, связанным с определением параметров осредненных прямых и с оценкой общего разброса всех экспериментальных точек относительно этих прямых. Возникающие погрешности с увеличением количества опытных данных возрастают и могут привести к неправильному выбору критерия длительной прочности рассматриваемого материала.

В цикле работ [7–10] проведено систематическое исследование, в котором предложены количественные методы выбора критерия длительной прочности при различных исходных гипотезах. В [7] теоретические кривые длительной прочности рассматриваются в виде (1.1) или (1.2), при этом параметры искомого теоретических прямых соответственно в логарифмических или полулогарифмических координатах для каждого вида эквивалентного напряжения σ_e вычисляются методом наименьших квадратов. За характеристики разброса экспериментальных данных относительно этих прямых принимаются значения дисперсии η расстояний опытных точек от этих прямых. В качестве критерия длительной прочности выбирается то эквивалентное напряжение σ_e , которому соответствует наименьшее значение дисперсии η . С помощью методов математической статистики [11] показано, что распределение расстояний опытных точек от аналитических кривых длительной прочности во всех рассматриваемых испытаниях соответствует нормальному закону. В [8] полученные результаты обобщены на случай учета исходной прочностной анизотропии испытываемых трубчатых образцов. В [9] предложен критерий длительной прочности в виде кусочно-линейной комбинации максимального и минимального главных напряжений с дополнительной константой материала и описан статистический метод ее определения. Следует отметить, что сравнение значений η в [7–9] позволяет выявить предпочтительный вид σ_e при одном и том же виде зависимости $t^*(\sigma_e)$ и не позволяет выявить преимущество того или иного вида $t^*(\sigma_e)$. В [10] предложен метод выбора критерия длительной прочности при сложном напряженном состоянии, свободный от этого недостатка.

2. Постановка задачи. В последние годы широкое распространение получила дробная модель ползучести и длительной прочности, предложенная в [12, 13]. Она более физически обоснована, чем, например, степенная модель (1.1), и имеет перед ней неоспоримые преимущества. Дробная модель [12, 13] учитывает максимальное предельное напряжение σ_e , характеризующее мгновенное разрушение металла при температуре испытаний, она также может описывать линейную ползучесть при малых напряжениях и различие характеристик длительной прочности при растяжении и сжатии. Кроме этого, модель [12, 13] может учитывать наличие ненулевого предела ползучести σ_0 , ограничивающего снизу диапазон напряжений, при котором развивается процесс ползучести. Рассмотрим четыре варианта кривой длительной прочности $t^*(\sigma_e)$, вытекающие из модели [12, 13]:

$$t^* = K(\sigma_b - \sigma_e)/\sigma_e \quad (2.1)$$

$$t^* = A[(\sigma_b - \sigma_e)/(\sigma_e - \sigma_0)] \quad (2.2)$$

$$t^* = D[(\sigma_b - \sigma_e)/\sigma_e]^n \quad (2.3)$$

$$t^* = B[(\sigma_b - \sigma_e)/(\sigma_e - \sigma_0)]^n \quad (2.4)$$

Эти зависимости описывают длительную прочность металлов с использованием соответственно двух (2.1), трех (2.2), (2.3) и четырех (2.4) материальных констант, при этом вводится ограничение на знак напряжения σ_0 ($\sigma_0 \geq 0$). В данной работе ставится цель выявить эффективность различных вариантов (2.1)–(2.4) дробной модели длительной прочности по сравнению со степенной моделью (1.1) и установить предпочтительный вид эквивалентного напряжения σ_e при анализе известных серий испытаний металлов на длительную прочность при сложном напряженном состоянии.

В качестве эквивалентных напряжений σ_e здесь рассматриваются четыре комбинации главных напряжений σ_1, σ_2 и σ_3 : максимальное главное напряжение $\sigma_{e1} = \sigma_{\max}$, интенсивность касательных напряжений $\sigma_{e2} = \sigma_{\nu}$, их полусумма σ_{e3} (критерий В.П. Сдобырева [15]) и разность максимального и минимального главных напряжений σ_{e4} . При обработке результатов испытаний тонкостенных образцов принимается, что $\sigma_1 \geq \sigma_2, \sigma_3 = 0$, в этом случае эквивалентные напряжения принимают следующий вид:

$$\sigma_{e1} = \sigma_1, \quad \sigma_{e2} = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2}$$

$$\sigma_{e3} = 0.5(\sigma_{e1} + \sigma_{e2}), \quad \sigma_{e4} = \max(\sigma_1, \sigma_1 - \sigma_2)$$

В ряде случаев испытания на длительную прочность проводились на образцах достаточно большой толщины, отношение β внешнего диаметра к внутреннему диаметру d иногда достигало 1.3. Основную часть времени до разрушения под действием внутреннего давления q или крутящего момента M такие образцы находятся в состоянии установившейся ползучести. В случае обработки результатов испытаний достаточно толстостенных труб под внутренним давлением q характеристики неоднородного напряженного состояния, определяемые при решении задач об установившейся ползучести трубы [1], заменяются интегрально средними по поперечному сечению значениями $\bar{\sigma}_\theta, \bar{\sigma}_z, \bar{\sigma}_r$ [7]. В случае степенного закона ползучести с показателем степени n эти средние значения принимают следующий вид:

$$\bar{\sigma}_z = \frac{q}{(\beta^2 - 1)}, \quad \bar{\sigma}_\theta = \frac{q}{(n-1)} \left[\frac{n-2}{\beta^2 - 1} + \frac{1}{\beta^{2/n} - 1} \right], \quad \bar{\sigma}_r = 2\bar{\sigma}_r - \bar{\sigma}_\theta \quad (2.5)$$

Из (2.5) следует, что $\bar{\sigma}_z$ не зависит от n , а зависимость $\bar{\sigma}_\theta$ от n очень слабая, так как изменение n от 1 до $+\infty$ приводит к очень малому изменению $\bar{\sigma}_\theta$: при $\beta = 1.1$ это изменение составляет $\Delta = 0.16\%$, при $\beta = 1.2 - \Delta = 0.6\%$, при $\beta = 1.3 - \Delta = 1.3\%$. Ниже при вычислении средних напряжений (2.5) принималось значение $n = 3$, при этом средние эквивалентные напряжения имеют следующий вид:

$$\sigma_{e1} = \bar{\sigma}_\theta, \quad \sigma_{e2} = \sqrt{3}(\bar{\sigma}_\theta - \bar{\sigma}_z)$$

$$\sigma_{e3} = \frac{1}{2}(\sigma_{e1} + \sigma_{e2}), \quad \sigma_{e4} = 2(\bar{\sigma}_\theta - \bar{\sigma}_z)$$

В случае толстостенных труб, нагруженных при одновременном действии внутреннего давления q и дополнительной растягивающей силы P , интегрально средние значения главных напряжений и эквивалентные напряжения принимают следующий вид:

$$\bar{\sigma}_z = \frac{q}{(\beta^2 - 1)} + \frac{4P}{\pi d^2(\beta^2 - 1)}, \quad \bar{\sigma}_\theta = \frac{q}{2} \left[\frac{1}{\beta^2 - 1} + \frac{1}{\beta^{2/3} - 1} \right]$$

$$\bar{\sigma}_r = \frac{q}{2} \left[\frac{3}{\beta^2 - 1} - \frac{1}{\beta^{2/3} - 1} \right], \quad \sigma_{e1} = \max(\bar{\sigma}_z, \bar{\sigma}_\theta)$$

$$\sigma_{e2} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\bar{\sigma}_z - \bar{\sigma}_\theta)^2 + (\bar{\sigma}_z - \bar{\sigma}_r)^2 + (\bar{\sigma}_\theta - \bar{\sigma}_r)^2}$$

$$\sigma_{e3} = \frac{1}{2}(\sigma_{e1} + \sigma_{e2}), \quad \sigma_{e4} = \sigma_{e1} - \bar{\sigma}_r$$

При анализе напряженного состояния толстостенных труб, подверженных действию крутящего момента M , за среднее касательное напряжение $\bar{\tau}$ принимается значение, удовлетворяющее моментному уравнению равновесия:

$$\bar{\tau} = 12M/[\pi d^3(\beta^3 - 1)]$$

Для оценки суммарного расхождения экспериментальных значений времен разрушения t^* и теоретических значений $t^*(\sigma_{em})$, соответствующих степенной зависимости (1.1) и эквивалентному напряжению σ_{em} ($m = 1, 2, 3, 4$), вводится величина

$$S_{0m} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left[\frac{t^* - t^*(\sigma_{em})}{t^* + t^*(\sigma_{em})} \right]_k^2$$

где N – количество испытаний в каждой серии. Аналогичные суммы, полученные при использовании дробной модели с различным количеством материальных констант (2.1)–(2.4), обозначим соответственно $S_{1m}, S_{2m}, S_{3m}, S_{4m}$. Введем в рассмотрение величины

$$S_i = \min_m S_{im} \quad (i = 0, 1, 2, 3, 4)$$

Значение m , соответствующее S_i , и величина S_i характеризуют тот вид эквивалентного напряжения, который в рамках рассматриваемой i -ой модели приводит к наилучшему соответствию экспериментальных и теоретических значений времен разрушения, и значение суммарного разброса этих значений. В качестве базовой модели при описании экспериментальных данных принимается степенная зависимость (1.1), для сравнения эффективности применения различных вариантов дробной модели введены коэффициенты $a_i = S_i/S_0$.

3. Анализ полученных результатов. С помощью предложенного метода обработки экспериментальных данных по длительной прочности металлов был проведен анализ всех известных в литературе результатов испытаний. В табл. 1 приведены основные характеристики этих испытаний с указанием источника информации l , марки металла или сплава S , температуры испытаний T и количества образцов, испытанных при разных видах напряженного состояния. При $j = 1$ –16 указаны результаты испытаний трубчатых образцов при комбинации растяжения и кручения ($P + M$), при $j = 17$ –24 и $j = 26$ –28 – результаты испытаний при комбинации растяжения и внутреннего давления ($P + q$), при $j = 25$ указаны экспериментальные данные по длительной прочности прямоугольных пластин при одноосном и двухосном растяжении. В табл. 2 приведены результаты анализа всех рассмотренных экспериментальных данных с помощью предложенного метода: указаны виды эквивалентных напряжений σ_{em} для пяти рассмотренных теоретических моделей длительной прочности, приводящие к S_i , а также значения S_0, a_1, a_2, a_3 и a_4 . Из табл. 2 следует, что средние значения a_1 и a_2 больше 1, а a_3 и a_4 – меньше 1 ($a_3 = 0.84, a_4 = 0.76$). Таким образом, варианты (2.1), (2.2) дробной модели длительной прочности хуже описывают опытные данные, чем степенная зависимость (1.1), а варианты (2.3), (2.4) лучше. Сравнение результатов описания опытных данных с помощью (2.3) и (2.4) показывает, что введение в (2.4) дополнительной материальной константы (предела ползучести σ_0) не вызывает существенного уменьшения

Таблица 1

j	S	$T^{\circ}\text{C}$	N	P	M	$P+M$	q	$P+q$	I
1	Медь	250	9	2	1	6	-	-	[14]
2	сплав ЭИ437Б	700	23	9	6	8	-	-	[15]
3	сталь ЭИ694	700	19	14	5	0	-	-	[16]
4	сплав ЭИ437Б	700	17	5	8	4	-	-	[17]
5	сплав RR59	200	6	0	2	4	-	-	[18]
6	сталь 15X1M1Ф	570	15	6	4	5	-	-	[19]
7	сталь 1X18H12T	610	21	5	6	10	-	-	[19]
8	сплав ЭИ787	700	17	6	2	9	-	-	[20]
9	сплав Д16Т	250	12	6	6	0	-	-	[21]
10	сталь X18H10T	850	53	29	0	24	-	-	[22]
11	сталь ЭП182	525	41	17	0	24	-	-	[23]
12	сплав ЭИ698ВД	650	36	13	0	23	-	-	[24]
13	сплав ЭИ698ВД	700	17	8	0	9	-	-	[24]
14	сплав ЭИ698ВД	750	30	11	0	19	-	-	[24]
15	сплав ЖС (Ni)	900	15	4	5	6	-	-	[25]
16	сплав ЖС (Ni)	1000	19	11	4	4	-	-	[25]
17	сталь SA 210	510	7	0	-	-	7	0	[26]
18	сталь 20	500	19	7	-	-	12	0	[27]
19	сталь 1X18H9T(A)	650	15	6	-	-	9	0	[28]
20	сталь 1X18H9T(B)	650	16	10	-	-	6	0	[28]
21	сталь ЭИ694	700	30	14	-	-	16	0	[16]
22	сталь 12XMФ	590	10	5	-	-	5	0	[29]
23	сталь 12MXФ	595	16	0	-	-	0	16	[30]
24	сталь 1X18H9T	520	21	5	-	-	3	13	[31]
25	сплав Al-Mg-Si	210	24	13	-	-	2	9	[32]
26	сталь X18H10T	850	45	29	-	-	4	12	[22]
27	сталь 12CMVW	575	10	5	-	-	3	2	[33]
28	сталь 1CM	575	12	6	-	-	4	2	[33]

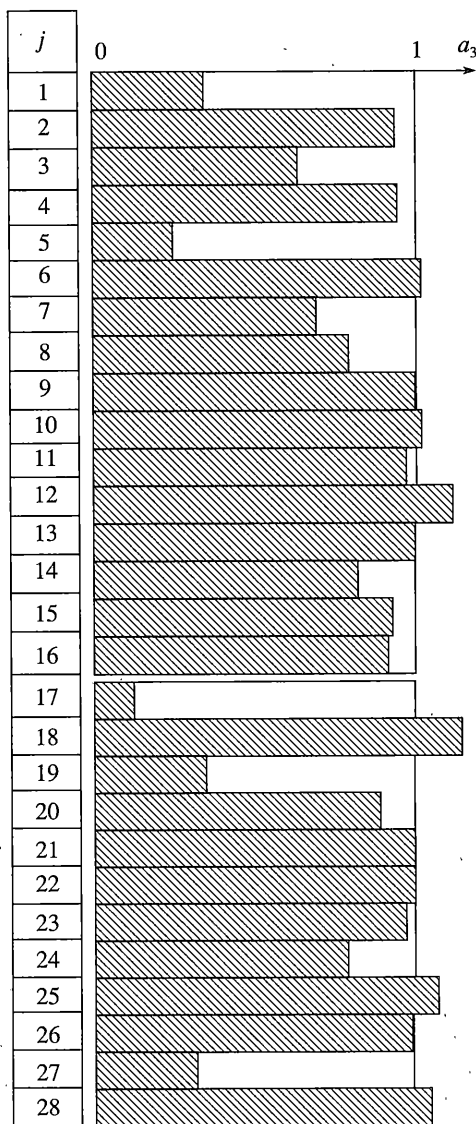
Таблица 2

j	(1.1)		(2.1)		(2.2)		(2.3)		(2.4)	
	σ_{em}	S_0	σ_{em}	a_1	σ_{em}	a_2	σ_{em}	a_3	σ_{em}	a_4
1	σ_{e3}	0.0098	σ_{e3}	0.57	σ_{e3}	0.35	σ_{e3}	0.36	σ_{e3}	0.35
2	σ_{e1}	0.218	σ_{e3}	0.98	σ_{e3}	0.88	σ_{e3}	0.95	σ_{e3}	0.86
3	σ_{e3}	0.018	σ_{e3}	2.33	σ_{e3}	0.89	σ_{e3}	0.65	σ_{e3}	0.65
4	σ_{e3}	0.104	σ_{e3}	0.97	σ_{e3}	0.93	σ_{e3}	0.95	σ_{e3}	0.88
5	σ_{e4}	0.020	σ_{e2}	0.24	σ_{e2}	0.22	σ_{e2}	0.24	σ_{e2}	0.20
6	σ_{e3}	0.027	σ_{e3}	2.19	σ_{e3}	0.96	σ_{e3}	1.03	σ_{e3}	0.93
7	σ_{e3}	0.033	σ_{e3}	3.24	σ_{e3}	0.94	σ_{e3}	0.69	σ_{e3}	0.61
8	σ_{e3}	0.051	σ_{e3}	0.84	σ_{e3}	0.82	σ_{e3}	0.81	σ_{e3}	0.80
9	σ_{e4}	0.017	σ_{e4}	4.06	σ_{e4}	0.94	σ_{e4}	1.00	σ_{e4}	0.94
10	σ_{e1}	0.031	σ_{e1}	1.32	σ_{e1}	1.03	σ_{e1}	1.08	σ_{e1}	1.00
11	σ_{e1}	0.068	σ_{e1}	2.79	σ_{e1}	2.43	σ_{e1}	0.98	σ_{e1}	0.97
12	σ_{e2}	0.087	σ_{e3}	1.64	σ_{e2}	1.00	σ_{e2}	0.97	σ_{e2}	0.97
13	σ_{e2}	0.036	σ_{e3}	3.63	σ_{e3}	1.20	σ_{e2}	1.10	σ_{e2}	0.92
14	σ_{e2}	0.068	σ_{e2}	1.66	σ_{e2}	0.79	σ_{e2}	0.82	σ_{e2}	0.76
15	σ_{e2}	0.112	σ_{e2}	1.12	σ_{e2}	0.83	σ_{e2}	0.94	σ_{e2}	0.79
16	σ_{e2}	0.054	σ_{e2}	1.52	σ_{e2}	0.91	σ_{e2}	0.93	σ_{e2}	0.91
17	σ_{e4}	0.0085	σ_{e4}	21.79	σ_{e4}	5.60	σ_{e3}	0.12	σ_{e4}	0.15
18	σ_{e4}	0.081	σ_{e1}	9.51	σ_{e4}	2.10	σ_{e4}	1.15	σ_{e4}	0.98
19	σ_{e4}	0.073	σ_{e4}	0.56	σ_{e4}	0.32	σ_{e3}	0.47	σ_{e4}	0.32
20	σ_{e4}	0.022	σ_{e4}	1.55	σ_{e4}	0.95	σ_{e4}	0.90	σ_{e4}	0.91
21	σ_{e4}	0.035	σ_{e4}	1.26	σ_{e4}	1.03	σ_{e4}	1.00	σ_{e4}	1.00
22	σ_{e4}	0.046	σ_{e4}	1.52	σ_{e4}	1.04	σ_{e4}	1.00	σ_{e4}	1.00
23	σ_{e2}	0.029	σ_{e2}	1.05	σ_{e2}	1	σ_{e2}	0.99	σ_{e2}	0.97
24	σ_{e3}	0.024	σ_{e3}	1.64	σ_{e3}	1.01	σ_{e3}	0.91	σ_{e3}	0.92
25	σ_{e4}	0.046	σ_{e2}	3.69	σ_{e4}	1.24	σ_{e4}	1.09	σ_{e4}	0.96
26	σ_{e4}	0.038	σ_{e4}	1.66	σ_{e4}	1.11	σ_{e4}	1.00	σ_{e4}	1.00
27	σ_{e4}	0.026	σ_{e4}	10.54	σ_{e4}	3.69	σ_{e4}	0.46	σ_{e3}	0.48
28	σ_{e2}	0.0023	σ_{e3}	10.87	σ_{e2}	0.37	σ_{e2}	1.05	σ_{e2}	0.36

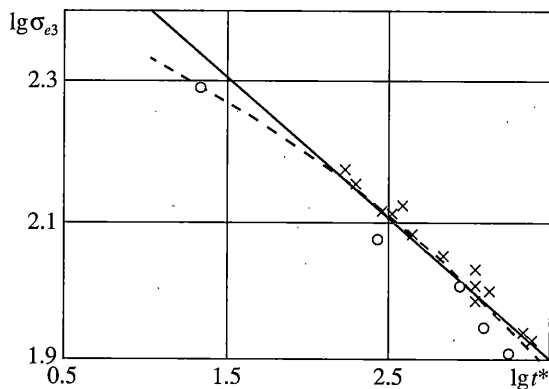
параметра разброса S_4 по сравнению с S_3 , это обстоятельство объясняется условием неотрицательности напряжения σ_0 , которое в ряде случаев приводит к значению $\sigma_0 = 0$.

Из сказанного следует, что в качестве зависимости времени разрушения металлов t^* от эквивалентного напряжения σ_e следует принимать степенную модель длительной прочности (1.1) или дробную модель (2.3). На фиг. 1 приведены значения a_3 для всех 28 проанализированных серий испытаний. В тех испытаниях, в которых значения a_3 имеют порядок 1, можно с одинаковым основанием применять модели (1.1) и (2.3). В испытаниях, которым соответствуют значения a_3 , существенно меньшие 1, предпочтительно применение дробной модели (2.3). На фиг. 2 в качестве примера представлены экспериментальные данные ($j = 3$), полученные при комбинации ($P + M$), и результаты анализа этих данных, проведенного с помощью моделей (1.1) (сплошная линия) и (2.3) (штриховая линия). Светлые точки соответствуют M , а кресты – P . На фиг. 3 представлены аналогичные данные ($j = 19$), полученные при комбинации ($P + q$), размерность σ_{e3} и σ_{e4} – МПа, t^* – час. Светлые точки соответствуют q , а кресты – P .

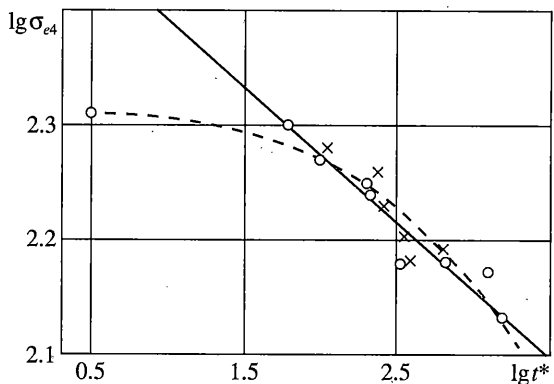
Для каждой серии испытаний следует выяснить, существенно ли различаются при разных m значения сумм S_{3m} , соответствующие различным видам эквивалентного напряжения σ_{em} при использовании модели (2.3), или это различие следует объяснить лишь недостаточным количеством испытаний и естественным разбросом опытных данных. Для решения вопроса о том, насколько значительно различаются эти суммы, используется известное статистическое распределение Фишера [11, 9]. С этой целью введены в рассмотрение отношения $F_m = S_{3m}/S_3$ ($m = 1, 2, 3, 4$). Значения F_m следует сравнить с критическим значением распределения Фишера $F_*(N, \alpha)$, зависящим от количества испытаний и выбранного уровня значимости α . Если какое-либо значение F_m меньше F_* , то согласно критерию Фишера оно несущественно отличается от минимального значения F_m , равного единице. В этом случае несколько типов эквивалентного напряжения σ_{em} могут быть приняты за критерий длительной прочности конкретного материала при выбранном виде (2.3) зависимости $t^*(\sigma_e)$. Если же среди отношений F_m имеются три величины, большие F_* , то за критерий длительной прочности можно принять только то эквивалентное напряжение σ_{em} , которому соответствует значение $F_m = 1$.



Фиг. 1



Фиг. 2



Фиг. 3

При анализе опытных данных в качестве уровня значимости было использовано общепринятое значение $\alpha = 0.05$. В табл. 3 для каждого j указаны значения F_* , соответствующие выбранному α и количеству испытаний N (при этом количества степеней свободы k_1 и k_2 удовлетворяют равенству $k_1 = k_2 = N - 1$). Все типы эквивалентных напряжений σ_{em} , которым соответствуют несущественно различающиеся значения F_m , можно принять за критерий длительной прочности.

Анализ табл. 3 показывает, что из четырех рассмотренных типов эквивалентных напряжений σ_{em} для описания испытаний при $(P + M)$ в качестве критерия длительной прочности предпочтительно использовать критерий Сдобырева σ_{e3} , а для описания испытаний при $(P + q)$ – разность максимального и минимального главных напряжений σ_{e4} . С учетом критерия Фишера эти выводы выполняются в подавляющем большинстве экспериментальных данных (более 80% всех серий испытаний). Аналогичные результаты получены при описании экспериментальных данных с помощью всех рассмотренных видов зависимости $t^*(\sigma_e)$. Таким образом, при расчете длительного разрушения элементов конструкций, находящихся в условиях неоднородного плоского напряженного состояния ($\sigma_1 \geq \sigma_2$, $\sigma_1 > 0$, $\sigma_3 = 0$), в качестве скалярного критерия длительной прочности рекомендуется принимать $\sigma_e = \sigma_{e3}$ при $\sigma_2 < 0$ и $\sigma_e = \sigma_{e4}$ при $\sigma_2 > 0$.

Если ни одно из рассмотренных четырех простейших выражений эквивалентного напряжения σ_{em} ($m = 1-4$) при их использовании в качестве критерия длительной проч-

Таблица 3

j	N	F_*	F_1	F_2	F_3	F_4
1	9	3.44	1.00	31.97	13.76	39.32
2	23	2.75	1.06	1.13	1.00	1.18
3	19	2.19	6.97	1.84	1.00	4.71
4	17	2.33	1.94	1.70	1.00	1.77
5	6	5.05	35.13	1.00	22.86	2.17
6	15	2.48	3.29	2.96	1.00	4.78
7	21	2.12	4.91	3.50	1.00	5.74
8	17	2.33	1.07	4.37	1.00	4.77
9	12	2.82	41.14	13.85	28.87	1.00
10	53	1.60	1.00	1.12	1.01	1.28
11	41	1.69	1.00	2.34	1.19	4.24
12	36	1.76	2.19	1.88	1.00	2.96
13	17	2.33	4.31	4.28	1.00	5.16
14	30	1.86	2.76	1.00	1.44	2.39
15	15	1.95	1.96	1.00	1.23	1.18
16	19	2.19	2.05	1.00	1.16	1.52
17	7	4.28	1.00	1.14	1.00	1.14
18	19	2.22	2.78	4.99	3.56	1.00
19	15	2.48	3.52	4.77	4.16	1.00
20	16	2.41	1.84	2.84	2.34	1.00
21	30	1.86	1.60	1.65	1.62	1.00
22	10	3.18	1.34	1.58	1.46	1.00
23	16	2.41	2.25	1.00	1.31	1.33
24	21	2.12	2.90	2.50	1.00	2.90
25	24	2.01	1.00	1.31	1.10	1.00
26	45	1.65	1.00	1.31	1.12	1.00
27	10	3.18	2.07	1.76	1.00	2.04
28	12	2.82	2.58	1.00	1.58	4.01

ности не приводит к удовлетворительному соответствию экспериментальных и теоретических значений времен разрушения, то следует использовать усложненные выражения σ_e с дополнительными материальными константами. В качестве таких выражений можно использовать линейную комбинацию σ_{\max} и σ_u [34], линейную комбинацию σ_{\max} и σ_{\min} [9] и другие функции главных напряжений [35–36].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 02-01-00289) и ФЦП "Интеграция" (грант А0083).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Работнов Ю.Н.* Ползучесть элементов конструкций. М.: Наука, 1966. 752 с.
2. *Писаренко Г.С., Лебедев А.А.* Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии. Киев: Наук. думка, 1976. 415 с.
3. *Johnson A.E.* Complex-stress creep of metals // *Metallurgical Reviews*. 1960. V. 5. No 20. P. 447–506.
4. *Локощенко А.М., Шестериков С.А.* Ползучесть // *Итоги науки. Сер. Механика*. М.: ВИНТИ, 1965. С. 177–227.
5. *Шестериков С.А., Локощенко А.М.* Ползучесть и длительная прочность металлов // *Итоги науки и техники. Сер.: Механ. деформ. тверд. тела*. М.: ВИНТИ, 1980. Т. 13. С. 3–104.
6. *Браун Р.Дж., Лонсдейл Д., Флюитт П.* Испытания на длительную прочность при многоосном напряженном состоянии и анализ данных для жаропрочных сталей // *Тр. Амер. о-ва инженеров-механиков*. 1982. Т. 104. № 4. С. 56–65.
7. *Локощенко А.М.* Длительная прочность металлов при сложном напряженном состоянии // *Проблемы прочности*. 1983. № 8. С. 55–59.
8. *Локощенко А.М.* Определение анизотропии при исследовании длительной прочности в условиях плоского напряженного состояния // *Проблемы прочности*. 1983. № 9. С. 71–73.
9. *Локощенко А.М., Шестериков С.А.* Исследование длительной прочности металлов при сложном напряженном состоянии // *Проблемы прочности*. 1986. № 12. С. 3–8.
10. *Локощенко А.М.* К выбору критерия длительной прочности при сложном напряженном состоянии // *Проблемы прочности*. 1989. № 9. С. 3–6.
11. *Смирнов Н.В., Дунин-Барковский И.В.* Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений. М.: Наука, 1965. 512 с.
12. *Шестериков С.А., Юмашева М.А.* Конкретизация уравнения состояния в теории ползучести // *Изв. АН СССР. МТТ*. 1984. № 1. С. 86–91.
13. *Shesterikov S.A., Yumashева M.A.* On the non-linear creep flow potential // *Creep in structures*. 4th IUTAM Symp. Cracow, Poland, 1990. Berlin: Springer, 1991. P. 615–620.
14. *Johnson A.E., Henderson J., Mathur V.D.* Combined stress creep fracture of a commercial copper at 250°C. P. 1 // *The Engineer*. 1956. V. 202. No. 5248. P. 261–265.
15. *Сдобырев В.П.* Длительная прочность сплава ЭИ437Б при сложном напряженном состоянии // *Изв. АН СССР. ОТН*. 1958. № 4. С. 92–97.
16. *Зверьков Б.В.* Длительная прочность труб при сложных нагрузках // *Теплоэнергетика*. 1958. № 3. С. 51–54.
17. *Сдобырев В.П.* Критерий длительной прочности для некоторых жаропрочных сплавов при сложном напряженном состоянии // *Изв. АН СССР. ОТН. Механика и машиностроение*. 1959. № 6. С. 93–99.
18. *Johnson A.E., Henderson J., Mathur V.D.* Complex stress creep fracture of an aluminium alloy // *Aircraft Eng.* 1960. V. 32. No. 376. P. 161–170.
19. *Трунин И.И.* Оценка сопротивления длительному разрушению и некоторые особенности деформирования при сложном напряженном состоянии // *ПМТФ*. 1963. № 1. С. 110–114.
20. *Сдобырев В.П.* Ползучесть и длительная прочность при растяжении с кручением // *Инж. ж. АН СССР*. 1963. Т. 3. № 2. С. 413–416.
21. *Соснин О.В., Горев Б.В., Никитенко А.Ф.* К обоснованию энергетического варианта теории ползучести. Сообщение 1. Основные гипотезы и их экспериментальная проверка // *Проблемы прочности*. 1976. № 11. С. 3–8.
22. *Локощенко А.М., Мякотин Е.А., Шестериков С.А.* Ползучесть и длительная прочность стали X18H10T в условиях сложного напряженного состояния // *Изв. АН СССР. МТТ*. 1979. № 4. С. 87–94.
23. *Павлов П.А., Курилович Н.Н.* Длительное разрушение жаропрочных сталей при нестационарном нагружении // *Проблемы прочности*. 1982. № 2. С. 44–47.
24. *Голубовский Е.Р.* Длительная прочность и критерий разрушения при сложном напряженном состоянии сплава ЭИ698ВД // *Проблемы прочности*. 1984. № 8. С. 11–17.
25. *Голубовский Е.Р., Подъячев А.П.* Оценка длительной прочности при сложном напряженном состоянии никелевых сплавов с поликристаллической и монокристаллической структурой // *Проблемы прочности*. 1991. № 6. С. 17–22.
26. *Kooistra L.F., Blaser R.U., Tucker J.T.* High temperature stress rupture testing of tubular specimens // *Trans. ASME*. 1952. V. 74. No. 5. P. 783–792.

27. Кац Ш.Н. Исследование длительной прочности углеродистых труб // Теплоэнергетика. 1955. № 11. С. 37–40.
28. Кац Ш.Н. Разрушение аустенитных труб под действием внутреннего давления в условиях ползучести // Энергомашиностроение. 1957. № 2. С. 1–5.
29. Лагунцов И.Н., Святославов В.К. Испытание пароперегревательных труб из стали 12ХМФ на длительную прочность // Теплоэнергетика. 1959. № 7. С. 55–59.
30. Кац Ш.Н. Влияние добавочных осевых усилий на длительную прочность котельных труб // Теплоэнергетика. 1960. № 5. С. 12–16.
31. Лебедев А.А. Экспериментальное исследование длительной прочности хромоникелевой стали в условиях двухосного растяжения // Термопрочность материалов и конструктивных элементов. Киев: Наук. думка, 1965. С. 77–83.
32. Hayhurst D.R. Creep rupture under multi-axial states of stress // J. Mech. and Phys. of Solids. 1972. V. 20. No. 6. P. 381–390.
33. Brown R.J., Lonsdale D., Flewitt P.E.J. The role of stress state on the creep rupture of 1%Cr1/2%Mo and 12%Cr1%MoVW tube steels // Creep and Fract. Eng. Mater. and Struct. Proc. Intern. Conf. Swansea, 1981. P. 545–558.
34. Лебедев А.А. Обобщенный критерий длительной прочности // Термопрочность материалов и конструктивных элементов. Киев: Наук. думка, 1965. С. 69–76.
35. Трунин И.И. Обобщенный критерий сопротивления разрушению материалов при сложном напряженном состоянии // Изв. вузов. Машиностроение. 1968. № 8. С. 50–55.
36. Милейко С.Т. Длительная прочность конструкционных материалов при сложном напряженном состоянии // Докл. АН СССР. 1976. Т. 228. № 3. С. 562–565.

Москва

Поступила в редакцию
3.05.2001