

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОЛЗУЧЕСТИ И ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ ЖАРОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ

© 2006 В.В. Кривенюк

Институт проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАНУ, г. Киев

Представлены метод комбинированного прогнозирования ползучести и длительной прочности жаропрочных сталей и сплавов, а также результаты обработки более 1000 диаграмм длительной прочности японского Национального института материаловедения параметрическими методами и методом базовых диаграмм.

Жаропрочные стали и сплавы в авиационной технике используются при стационарных и нестационарных условиях нагружения. В данном случае акцентируется внимание на статических условиях нагружения. Целесообразность этого объясняется обработкой больших объемов экспериментальных данных с помощью метода базовых диаграмм (МБД) [1, 2]. Результаты этих исследований свидетельствуют о значительных возможностях уточнения особенностей поврежденности при статических условиях нагружения, учет которых может представлять интерес при переходе к учету поврежденности при нестационарных условиях нагружения.

Прогнозирование длительной прочности сталей и сплавов в мире производится преимущественно параметрическими методами Ларсона-Миллера (ЛМ), Мэнсона-Хэферда (МХ), Ойра-Шерби-Дорна (ОШД), которые позволяют в основном учитывать лишь роль ограниченного числа основных факторов. Вместе с тем решающей во многих случаях оказывается роль значительно большего числа кажущихся второстепенными факторов, для анализа которых целесообразнее использовать МБД.

Основу МБД составляет 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, t – время до разрушения, ч.

Это уравнение предназначено для оценки и учета возможных отклонений отдельных участков экспериментальных диаграмм от соответствующих участков базовых диаграмм в виде

$$\beta_y = \frac{\sigma_{\alpha t} - \sigma_{t_y}}{\sigma_{\alpha t} - \sigma'_t} = \frac{\Delta \sigma_{t_y}}{\Delta \sigma'_t}, \quad (2)$$

где $\sigma_{\alpha t}$ – координата общей исходной точки сравниваемых участков; σ_{t_y} , σ'_t – координаты правых границ сравниваемых участков экспериментальной и базовой диаграмм; $\Delta \sigma_{t_y}$ и $\Delta \sigma'_t$ – понижения длительной прочности по экспериментальной и базовой диаграммам за одно и то же время от αt до $t = t_y$.

Если в формулу (2) вместо σ_{t_y} подставить искомое напряжение, то получим формулу для его прогнозирования в виде

$$\sigma_t = \sigma_{\alpha t} - \beta (\sigma_{\alpha t} - \sigma'_t) = \sigma_{\alpha t} - \beta \Delta \sigma'_t. \quad (3)$$

Формулы (1) и (2) дают возможность информацию об отдельных участках экспериментальных диаграмм представлять точками с координатами (β_y , $\sigma_{\alpha t}$) в системе координат β_y — $\sigma_{\alpha t}$. Это облегчает сравнительный анализ больших массивов экспериментальных данных и создает благоприятные условия для перехода к качественно новому их системному анализу. Важными элементами такого анализа являются оценки и учет для различных групп материалов характеристик β , β_y , Δ_1 , Δ_2 , S_1 , S_2 , где

$$\Delta_1 = \lg t - \lg t_y, \quad (4)$$

$$\Delta_2 = \frac{\sigma_t - \sigma_{t_y}}{\sigma_{t_y}}, \quad (5)$$

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

и соответственно S_1 рассчитывается при $m = 1$ и подстановке значений Δ_1 , а S_2 – при $m = 2$ и подстановке значений Δ_2 .

МБД, прежде всего, отличается тем, что с помощью характеристик β_y позволяет конкретизировать особенность отдельных участков экспериментальных диаграмм дли-

тельной прочности. Размеры рассматриваемых участков измеряются величиной $\lg(t\tau / \alpha t) = q$ и в различных исследованиях могут быть различными. Например, при использовании МБД-1 выполняется прогнозирование на один порядок по логарифмической шкале времени и преимущественно рассматриваются участки величиной $q = 1$. Кроме того, могут рассматриваться участки при $q = 1-3$ и более (МБД-2). Следовательно, системный анализ известных экспериментальных данных в том числе включает прогнозирование при $q = 1$ (МБД-1) и $q = 1-3$ (МБД-2).

Для определения, например, значения β_3 в строке 1 таблицы 1 по формуле (2) сначала в формулу (1) вместо σ'_t и t подставляются значения $\sigma_{\alpha t}$ и αt , в результате чего получаем уравнение с одним неизвестным и определяем $\lg \sigma_1$. После этого с помощью (1) при установленном $\lg \sigma_1$ определяем σ'_t для значения $t = t\tau$, которое подставляется в (2) при соответствующих значениях $\sigma_{\alpha t}$ и $\sigma_{t\tau}$ в строчке 1 таблицы 1, таким же образом определяются σ'_t по $\sigma_{\alpha t}$ при прогнозировании σ_t с помощью формулы (3). В таблице 1 представлены результаты обработки данных [3] на интерполяционной основе, то есть при использовании всех экспериментальных данных и установлении таких значений $\beta_1, \beta_2, \beta_3$, которые обеспечивали бы минимальные значения S_1 и S_2 . Необходимый выбор таких значений облегчается тем, что для прогнозирования с помощью формулы (3) необходимо знать лишь одно значение β , вместо которого подставляется одно из искомым значений $\beta_1, \beta_2, \beta_3$, а оценка значений $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ производится на основе данных табл. 1 об отдельных парах значений $\sigma_{\alpha t}$ и β_3 . Так, например, в таблице 1 значения $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ равны соответственно 0,14; 0,74 и 1,34. При $\sigma_{\alpha t} < \sigma_{\alpha} = 300$ МПа используются значение β_3 , при $\sigma_{\alpha} \leq \sigma_{\alpha t} \leq \sigma_{\beta} - \beta_2$ и при $\sigma_{\alpha t} > \sigma_{\beta} = 380$ МПа – β_1 . В соответствии с этими условиями значение β_3 используется в строках 10-32, значение β_2 – в строках 4-9, а значение β_1 – лишь в строках 1-3. Эти значения β_1, β_2 и β_3 и являются аналогами основных постоянных в параметрических методах. В остальном подробнейшая детализация

особенностей длительного разупрочнения производится с помощью представленных в таблице 1 характеристик β_3 , которые довольно четко конкретизируют особенности разупрочнения отдельных участков диаграмм длительной прочности (ДДП). Благодаря этому становится возможной эффективная систематизация известных экспериментальных данных и значительное улучшение прогнозирования длительной прочности.

Анализ более 2000 ДДП привел к концепции типовых структурных состояний, согласно которой существует ограниченное число состояний, порядка 50, к одному из которых с практически приемлемой точностью может быть приравнено любое из возможных состояний. Следовательно, для ограниченного числа структурных состояний могут быть получены достаточно представительные комплексы характеристик физико-химических, механических и структурных свойств. В первом приближении данные национального института материаловедения в Токио и могут рассматриваться в качестве отмеченного комплекса данных. Обработка более 1000 диаграмм этого института параметрическими методами и МБД показала, что для дальнейшего повышения эффективности прогнозирования целесообразно соответствующее развитие МБД.

Подобные исследования показали также целесообразность взаимосвязанного развития прогнозирования длительной прочности и ползучести с помощью уравнения [1, 2]

$$\varepsilon^{1-\gamma} \lg \dot{\varepsilon} = \left[\frac{\frac{\sigma_0}{\sigma'}}{\left(1 - \frac{r\varepsilon}{1+r\varepsilon} - \alpha\sigma\right)^{1/3} \left(1 + \frac{h}{\sigma_0^2} \varepsilon\right)^{n/2}} \right]^m, \quad (7)$$

где $\varepsilon, \dot{\varepsilon}$ – деформация при ползучести и ее скорость; h, r – характеристики деформационного упрочнения и разупрочнения; σ' – напряжение, при котором скорость пластической деформации $\dot{\varepsilon} = 1$ ч⁻¹, $\gamma = 0,1$; m – постоянная при $T = \text{const}$. Уравнение отличается тем, что позволяет также описывать изменение состояния материала, которое может быть проконтролировано по твердости.

Таблица 1. Результаты обработки данных [3] для плавки 20G по МБД-2

№ п/п	T, °C	$\sigma_{\alpha t}$, МПа	$\sigma_{t\beta}$, МПа	αt , ч	$t\beta$, ч	$\lg\left(\frac{t\beta}{\alpha t}\right)$	β_1	β_2	Δ_1	Δ_2
1	450	412,0	392,0	0,5	68,2	2,135	0,1	0,13	0,20	-0,005
2	450	412,0	373,0	0,5	3835,4	3,885	0,1	0,15	0,38	0,007
3	450	392,0	373,0	68,2	3835,4	1,750	0,1	0,14	0,06	-0,002
4	450	373,0	294,0	3835,4	48420,7	1,101	0,7	0,86	0,20	0,038
5	450	373,0	265,0	3835,4	93425,4	1,387	0,7	0,96	0,48	0,092
6	500	333,0	294,0	116,9	1030,3	0,945	0,7	0,54	0,27	-0,049
7	500	333,0	265,0	116,9	2783,7	1,377	0,7	0,67	0,15	-0,028
8	500	333,0	265,0	116,9	7790,7	1,824	0,7	0,52	0,60	-0,108
9	500	333,0	235,0	116,9	5533,9	1,675	0,7	0,81	0,18	0,035
10	500	294,0	196,0	1030,3	13886,5	1,130	1,30	1,23	0,11	-0,046
11	500	294,0	157,0	1030,3	35646,2	1,539	1,30	1,30	0,05	-0,025
12	500	294,0	137,0	1030,3	52982,6	1,711	1,30	1,36	0,04	0,020
13	500	265,0	157,0	2783,7	35646,2	1,107	1,30	1,47	0,13	0,061
14	500	265,0	137,0	2783,7	52982,6	1,280	1,30	1,53	0,22	0,117
15	550	294,0	196,0	77,8	496,2	0,805	1,30	1,73	0,25	0,112
16	550	294,0	157,0	77,8	1448,6	1,270	1,30	1,58	0,26	0,132
17	550	294,0	118,0	77,8	4006,2	1,712	1,30	1,56	0,34	0,209
18	550	294,0	88,0	77,8	11854,2	2,183	1,30	1,49	0,31	0,231
19	550	294,0	69,0	77,8	35165,5	2,655	1,30	1,39	0,14	0,122
20	550	294,0	69,0	77,8	45351,5	2,766	1,30	1,35	0,03	0,024
21	550	294,0	53,0	77,8	145440,1	3,272	1,30	1,28	0,21	-0,207
22	550	157,0	69,0	1448,6	35165,5	1,385	1,30	1,45	0,14	0,093
23	550	157,0	69,0	1448,6	45351,5	1,496	1,30	1,36	0,03	0,015
24	550	157,0	53,0	1448,6	145440,1	2,002	1,30	1,27	0,13	-0,101
25	550	118,0	69,0	4006,2	35165,5	0,943	1,30	1,38	0,04	0,023
26	550	118,0	69,0	4006,2	45351,5	1,054	1,30	1,26	0,08	-0,046
27	550	118,0	53,0	4006,2	145440,1	1,560	1,30	1,21	0,20	-0,135
28	550	88,0	53,0	11854,2	145440,1	1,089	1,30	1,10	0,23	-0,146
29	600	157,0	88,0	27,30	473,5	1,239	1,30	1,30	0,05	-0,027
30	600	157,0	69,0	27,30	1378,6	1,703	1,30	1,26	0,13	-0,081
31	600	157,0	53,0	27,30	3675,4	2,129	1,30	1,25	0,19	-0,145
32	600	88,0	53,0	473,5	3675,4	0,890	1,30	1,32	0,02	-0,009

$$S_1 = 0,229; S_2 = 0,102; \beta_1 = 0,1; \beta_2 = 0,7; \beta_3 = 1,3; \sigma_{\alpha} = 300 \text{ МПа}; \sigma_{\beta} = 380 \text{ МПа}$$

Предположения о том, что $\varepsilon = 1$, временной поврежденностью можно пренебречь, позволяет на основе (4) получить формулу для описания диаграмм статического растяжения в виде

$$\sigma = \frac{(\sigma_0^2 + h\varepsilon)^{1/2}}{1 + r\varepsilon}, \quad (8)$$

где σ_T — предел текучести, ε — пластическая составляющая деформации при нагружении, и соответственно формулу для описания мгновенного деформирования в виде

$$\sigma = \frac{(\sigma_y^2 + h_0\varepsilon_{0T})^{1/2}}{1 + r\varepsilon_{0T}} \quad (9)$$

где σ_y — предел упругости, ε_{0T} — пластическая составляющая деформации при мгновенном деформировании.

В знаменателе правой части уравнения (7) слагаемые со знаками минус предназначены соответственно для описания деформационной и временной поврежденности. Четкое разделение этих поврежденностей остается сложной задачей. Положение значительно улучшается при использовании уравнения (7), поскольку характеристики деформационного разупрочнения при ползучести r оказываются часто близкими к характеристикам r , устанавливаемым с помощью формулы (8) при описании диаграмм статического растяжения.

К настоящему времени нет единой точки зрения по поводу необходимости учета мгновенной деформации при описании процесса ползучести, релаксации напряжений.

Таблица 2. Длительная прочность сплава ЭИ827

$T, ^\circ\text{C}$	$10^2, \text{ МПа}$	β'_0	$10^3, \text{ МПа}$	β'_1	$10^4, \text{ МПа}$	β'_2	$10^5, \text{ МПа}$	β'_3	$2 \cdot 10^5, \text{ МПа}$	β'_4	$3 \cdot 10^5, \text{ МПа}$
700	650	1,34	500	1,31	370	1,51	243,9	1,71	209,0	1,91	188,2
710	619	1,32	475	1,31	348	1,51	226,0	1,71	192,7	1,91	172,9
720	588	1,30	450	1,33	326	1,53	208,3	1,73	176,5	1,93	157,8
730	556	1,27	425	1,35	303	1,55	189,0	1,75	158,9	1,95	141,3
740	527	1,27	400	1,37	281	1,57	171,5	1,77	143,1	1,97	126,6
750	500	1,29	375	1,37	260	1,57	155,6	1,77	128,9	1,97	113,5
760	477	1,34	350	1,39	239	1,59	139,8	1,79	114,9	1,99	100,7
770	456	1,44	323	1,38	218	1,58	125,3	1,78	102,4	1,98	89,3
780	438	1,57	297	1,39	197	1,59	110,2	1,79	89,3	1,99	77,4
790	419	1,68	272	1,39	178	1,59	97,6	1,79	78,4	1,99	67,7
800	400	1,76	250	1,41	160	1,61	84,7	1,81	67,3	2,00	57,7
810	380	1,81	231	1,44	144	1,64	73,1	1,84	57,3	2,00	48,8
820	360	1,82	215	1,47	130	1,67	62,8	1,87	48,4	2,00	40,9
830	340	1,82	200	1,53	116	1,73	52,2	1,93	39,3	2,00	33,0
840	320	1,81	186	1,58	104	1,78	43,8	1,98	32,4	2,00	27,0
850	300	1,84	170	1,64	90	1,84	34,3	2,00	24,8	2,00	20,4

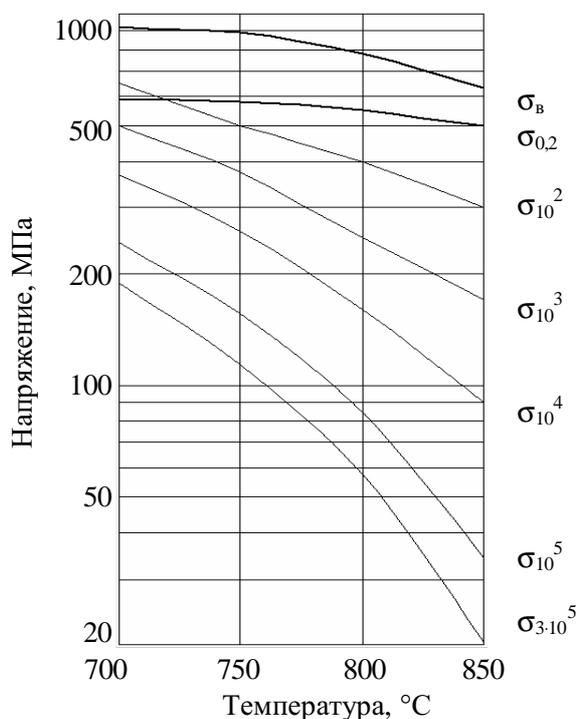


Рис. 1. Кратковременная и длительная прочность сплава ЭИ827

В одних случаях считается необходимым такой учет, в других случаях нет. Развитие этих исследований показало, что особенно важным залогом необходимого уточнения поврежденности является взаимосвязанный и взаимно дополняемый учет поврежденности при различных условиях нагружения. Необходимость учета, в частности, объясняется тем, что в реальных конструкциях допускаются ограниченные деформации

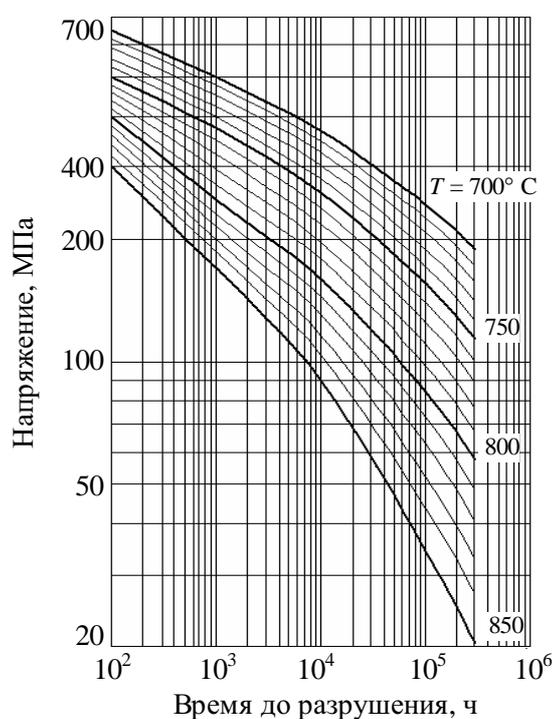
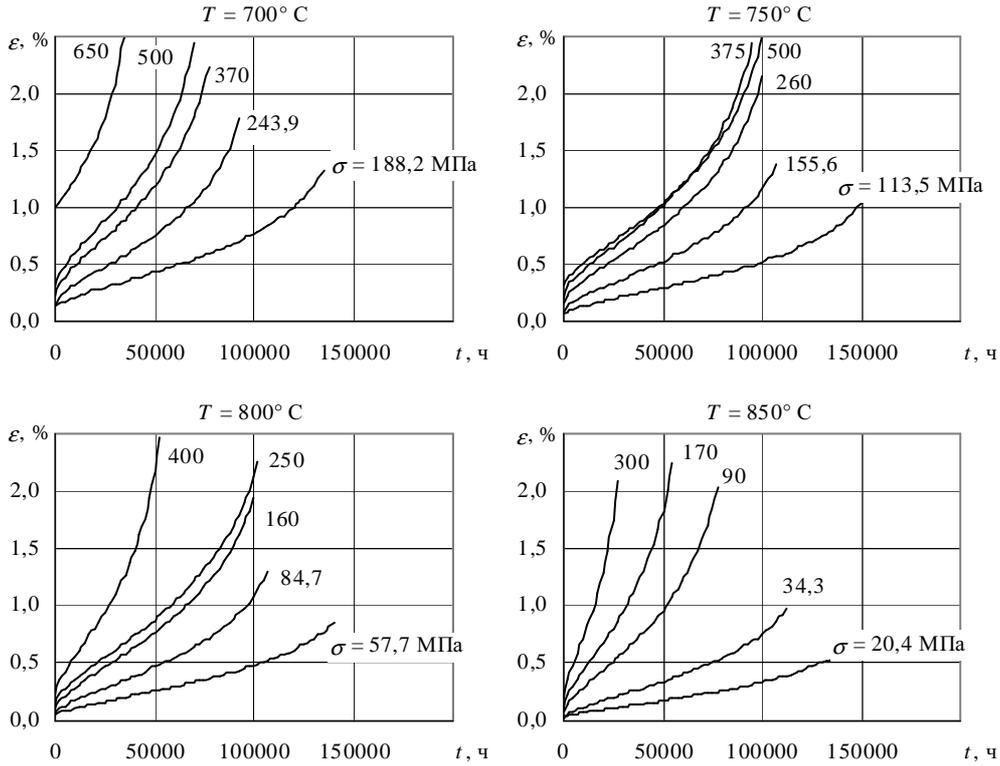


Рис. 2. Длительная прочность сплава ЭИ827

и значительной частью таких деформаций может быть именно мгновенная, которую надо предсказывать достаточно точно, особенно при больших длительностях нагружения.

Для значительного числа состояний различных материалов обрабатывались данные о характеристиках кратковременной и длительной прочности, ползучести с помощью приведенных выше формул.



Действительное время (по оси абсцисс) при максимальном напряжении составляет 0,001t; при последующих напряжениях соответственно 0,01t; 0,1t; t; 2t

Рис. 3. Кривые ползучести сплава ЭИ827

Таблица 3. Пределы ползучести сплава ЭИ827

$T, ^\circ\text{C}$	$\sigma_{1/10^2}, \text{ МПа}$	β'_0	$\sigma_{1/10^3}, \text{ МПа}$	β'_1
700	563	1,19	440	1,20
750	460	1,29	341	1,27
800	332	1,37	228	1,33
850	215	1,44	134	1,42
$\sigma_{1/10^4}, \text{ МПа}$	β'_2	$\sigma_{1/10^5}, \text{ МПа}$	β'_3	$\sigma_{1/3 \cdot 10^5}, \text{ МПа}$
329	1,30	228	1,61	179
241	1,40	153	1,74	113
148	1,45	84	1,90	56
76	1,51	36	2,12	20

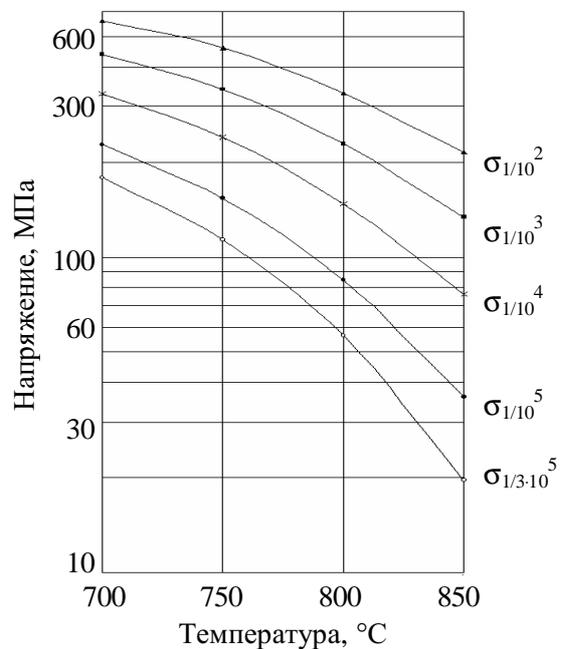


Рис. 4. Пределы ползучести сплава ЭИ827

В табл. 1 приведены данные о 32 прогнозных оценках на интерполяционной основе длительной прочности для одной плавки. Общее число плавок, для которых был выполнен такой анализ, составляло 277, а число выполненных с помощью МБД-2 прогнозных оценок составляло 8500, из них 1850 на два порядка и более, в том числе 720 на 2,5, 189 на 3, 107 на 3,2, 28 на 3,5, 18 на 3,7, 8 на 4, 2 на 5 порядков.

Условие $S_2 \leq 0,12$ при использовании трех расчетных значений постоянных β_i оказывается приемлемым для 15 из 34 рассмотренных состояний материалов. Прогнозирование с помощью метода базовых диаграмм было близким по точности прогнозированию с помощью лучших параметрических методов. В первом случае использовались только три постоянные, во втором 5-8. Приведенные в табл. 1 характеристики β_i при их широком использовании позволяют перейти к качественно новому прогнозированию длительной прочности. Было установлено, что важным элементом такого развития прогнозирования является расширение расчетных прогнозных исследований.

Ю.Н. Работнов, В.С. Наместников акцентировали внимание на преимущественном использовании уравнений состояний для ограниченных интервалов температур и длительностей нагружения, что остается в какой-то мере характерным до сих пор. В данном случае в качестве примера описание закономерностей ползучести и длительного разрушения производилось в интервале длительностей нагружения от 100 до 300000 ч и в довольно широком интервале температур. В таблицах 2, 3, на рис. 1-4 представлены результаты соответствующего прогнози-

рования на основе исходных данных [4] для жаропрочного сплава ЭИ827.

Расчет кривых ползучести производился при условии, что время до разрушения при ползучести должно быть равно времени до разрушения по экспериментальным (σ_{10}^2 , σ_{10}^3 , σ_{10}^4) и расчетным (σ_{10}^5 , $\sigma_{3 \cdot 10^5}$) данным о длительной прочности, а также с учетом данных о диаграммах статического растяжения и данных о начальной деформации. Эти условия описания ползучести объяснялись представлениями о том, что обычная практика учета ограниченного числа постоянных не может привести к достаточно точному описанию и прогнозированию исследуемых закономерностей пластического деформирования. Предполагалось также, что это положение может быть улучшено в результате системного подбора более полной информации об исследуемых материалах и последующего обеспечения её более полного учета.

Список литературы

1. Кривенюк В.В. Прогнозирование длительной прочности тугоплавких металлов и сплавов. — Киев: Наукова думка, 1990. — 248 с.
2. Кривенюк В.В. Прогнозирование ползучести и длительной прочности металлических материалов на сроки службы до 300000 ч и более // Пробл. прочности. -2003. -№ 4. -С. 104-120.
3. Data sheets on the elevated-temperature properties of 0.5Cr-0.5Mo steel // NRIM creep data sheet. Тоkyo. – 1994. – No. 20B. – 28 p.
4. Химушин Ф.Ф. Жаропрочные стали и сплавы. -М.: Металлургия, 1969, - 646 с.

PREDICTION OF CREEP AND LONG-TERM STRENGTH OF HEAT-RESISTANT STEELS AND ALLOYS

© 2006 V.V. Krivenyuk

G.S. Pisarenko Institute for Problems of Strength, of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

The method for the combined prediction of creep and long-term strength of heat-resistant steels and alloys is presented, and the results of processing more than 1000 diagrams of long-term strength of the National Institute for Materials Science in Tokyo using the parametrical methods and the method of base diagrams are given.