

В. В. Кривенюк

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

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ
ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ**

Приведены результаты экстраполяционного анализа длительной прочности никелевых сплавов методом базовых диаграмм. Проанализированы причины значительного увеличения погрешностей прогнозирования и возможности их устранения.

Ключевые слова: высокие температуры, прогнозирование, длительная прочность, ползучесть, деформационная и временная поврежденность

Прогнозирование ползучести и длительной прочности металлов при больших длительностях нагружения и повышенных температурах остается проблемным на протяжении ряда десятилетий. Многие аспекты такой проблемы довольно тщательно проанализированы в работе [1]. В первом приближении такой анализ приводит к следующим вполне логичным выводам. Описание всего многообразия первичных кривых ползучести возможно лишь с помощью уравнения механического состояния, которое в формулировке Ю. Н. Работнова [2] представляется следующим образом:

$$\varepsilon_n = F(\dot{\varepsilon}, T, \sigma, q_1, q_2, \dots, q_n), \quad (1)$$

где $\dot{\varepsilon}$, ε – скорость и деформация ползучести в момент времени τ ; q_1, q_2, \dots, q_n – параметры, с помощью которых задается структурное состояние материала.

Вид функции $F(\varepsilon, T, \sigma, q_1, q_2, \dots, q_n)$ зависит от рассматриваемой модели процесса деформирования в условиях ползучести. К настоящему времени предложено достаточно большое число моделей, основанных на представлениях механики твердого тела. К ним относится ряд моделей, представленных в работе [3]. Уравнение состояния (1), согласно [1], должно в интегральной форме отражать не только механические, но и физические закономерности процесса деформирования и разрушения. Формулировка моделей такого типа изложена в работах [4, 5]. Построение функции в уравнении (1) осуществляется с использованием результатов исследований ползучести в области физики твердого тела. В этих работах ползучесть рассматривается как термически активируемый процесс, для которого функция представляется в виде произведения экспоненты и предэкспоненциального множителя [6-10], которые, в свою очередь, являются функциями напряжения, температуры и структурных параметров. С учетом этих обстоятельств И. И. Трунин в работе [4] формулирует уравнение для скорости ползучести и представляется следующим образом:

$$\dot{\varepsilon}_{II} = f(\sigma, T, q_i) \exp \left[-\frac{Q(T, \sigma, q_i)}{RT} \right] \quad (2)$$

где f – функция структурных параметров q_i ($i = 1, 2, k$), пропорциональная степенной функции напряжения и температуры σ^m, T^{-p} ; Q – эффективная (кажущаяся) энергия активации процесса ползучести, в общем случае представляющаяся функцией температуры, напряжений и структурных параметров q_i ($i = k + 1, k + 2, \dots, l$); R – газовая постоянная.

Некоторые дополнительные уточнения приводят к выводу, согласно которому уравнение обобщенного вида (2) окончательно представляется в виде [1]

$$\varepsilon_n = AT^{-p} \sigma^m (\varepsilon_0 + \dot{\varepsilon}_n)^{-n} \exp \left(-\frac{Q_0 - g\sigma - r\varepsilon_n}{RT} \right) \quad (3)$$

где $\dot{\varepsilon}_n$ – скорость в текущей точке на первичной кривой ползучести; σ – напряжение при испытании с постоянной нагрузкой ($\sigma = (l + \varepsilon_0 + \varepsilon_n)$), МПа; σ_0 – напряжение в начальный момент; ε_0 – мгновенная деформация; ε_n – деформация ползучести; T – температура; K, A, p, m, n, Q_0, g, r – коэффициенты, определяемые при обработке результатов испытаний.

В работах [3, 4] отмечается, что m и n – коэффициенты, слабо зависящие, в большинстве случаев от свойств материала; для теплопрочных сталей $m \approx 1; 2$ или 3 ; $n \approx 1$ или 2 .

В заключение следует лишь подчеркнуть, что рассмотренную оценку достижений, определяемых разработкой и применением кинетического подхода к исследованиям ползучести и длительной прочности (1), оправдывают соответствующие доклады на многих весьма представительных международных конференциях. Однако и теперь, по истечении длительного периода со времени разработки широко используемого кинетического подхода Ю. Н. Работнова, следует признать, что проблема прогнозирования высокотемпературных свойств металлов остается по-прежнему актуальной и сложной. Это дает основание для предположения о возможных значительных недоработках в ее решении. Соответственно эта статья посвящается иллюстрации целого ряда частных упущений.

Сформировавшееся к настоящему времени положение определяется, в значительной мере, использованием значительного числа достаточно

общих упрощений при разработке уравнений состояния. Начинается это с распространенного использования простейшей степенной зависимости

$$\varepsilon_{\min} = A \sigma^n, \quad (4)$$

где A и n – постоянные при $T = \text{const}$, которая стала «основой» прогнозирования характеристик ползучести.

Вместе с тем, при использовании феноменологических и физически обоснованных уравнений внимание акцентируется в основном лишь на значениях n без учета постоянной A , а, следовательно, это уже источник возможных существенных и практически неконтролируемых неопределенностей. В этой связи следует заметить, что в методе базовых диаграмм (МБД) [11] для прогнозирования характеристик длительной прочности роль этих двух постоянных заменена одной при полном исключении таких неопределенностей.

Суть наиболее существенных из них в рассматриваемом прогнозировании можно объяснить на следующем примере.

В работе [12] довольно подробно представлено обоснование уравнения

$$\dot{\varepsilon} = m \varepsilon^{1-n} \exp[\alpha \sigma_0 (1 + k \varepsilon)] \quad (5)$$

где α , m , n , k – постоянные при $T = \text{const}$, при этом n – характеристика упрочнения; k – характеристика разупрочнения, которая обеспечивает учет изменения поперечного сечения образца вследствие геометрического его сужения и накопления различного рода повреждений (трещин, пор и т. п.).

Использование условия определения положения точки перегиба на кривой ползучести привело к формуле

$$\varepsilon_k = \frac{n-1}{\alpha k \sigma}, \quad (6)$$

где ε_k – ордината точки перегиба.

Из формулы (6) следует, что при $\varepsilon_k \approx \text{const}$ между параметрами n и k должна существовать взаимосвязь. Однако в действительности возможность проявления такой взаимосвязи полностью игнорируется. Это, в частности, четко проявляется в том, что при определении параметров, ответственных за описание третьей стадии ползучести (в рассматриваемом случае это параметр k), пренебрегают информацией о первой стадии (и соответственно данными о величине n), как и при описании первой стадии пренебрегают информацией о третьей (в частности о величине k). И лишь данные (рис. 1) позволяют показать, насколько существенна рассматриваемая взаимосвязь между параметрами n и k .

На рис. 1 показаны две кривые ползучести, рассчитанные с помощью уравнения (5). Видно, что при близких второй и третьей стадиях ползучести величина k для этих двух кривых ползучести

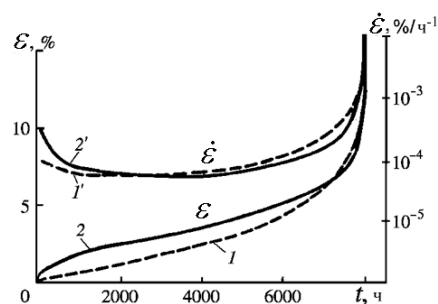


Рис. 1. Рассчитанные с помощью уравнения (5) кривые ползучести (1 и 2) и мгновенной скорости (1', 2') при напряжении 130 МПа и характеристиках жаропрочности α , n , $-lg m$, k , равных соответственно 0,7; 1,5; 10,4; 5 и 0,3; 4; 12,776; 25

различается в 5 раз. Более высокое значение $k = 25$ (как следует из рассмотренной формулы) объясняется, в значительной мере, большей величиной значения постоянной n , что не может быть оправдано с физической точки зрения. Следовательно, если при прогнозировании длительной прочности свойств металла или сплава на сроки службы до 100 тыс. часов и более изменение параметра поврежденности на 10-15 % может приводить к существенным погрешностям, то в рассматриваемом примере неконтролируемое изменение параметра может достигать 100 % и более. Эта неопределенность довольно общая, в какой-то мере она характерна и для уравнения (3). Следовательно, повторение процедуры анализа (5) для уравнения (3) вследствие большего числа постоянных в выражении (3) приведет и к более сложной взаимообусловленности констант по сравнению с (6). Это лишь в какой-то мере дает представление о том, насколько могут отличаться и отличаются расчетные оценки характеристик поврежденности от реальных.

После такого частного замечания о рассматриваемом прогнозировании следует подчеркнуть, что есть достаточно много трудностей необходимого уточнения рассматриваемого прогнозирования, однако при обычных исследованиях лишь какие-то из них случайным образом подвергались фрагментальному анализу. Это и определяет, в основном, сложность как выявления различного рода неопределенностей, так и разрешения. Вполне естественно, что такая практика не может привести к необходимому улучшению прогнозирования. Поэтому остается лишь выяснить, насколько она остается распространенной.

В плане подобных рассуждений можно прийти к выявлению существенного недостатка в развитии сформировавшегося прогнозирования, который заключается в следующем.

При формировании рассматриваемого прогнозирования объем известных экспериментальных данных был довольно ограниченным. В связи с этим доминировали теоретические разработки по сравнению с адекватным экспериментальным подтверждением. Для принципиального улучшения положения соответственно надо перейти не

Кратковременная прочность сплава ЭИ929

$T, ^\circ\text{C}$	$\sigma_{0,2}, \text{МПа}$	$\sigma_b, \text{МПа}$	$\delta, \%$	$\psi, \%$
20	780	1000	6	8
700	760	925	–	–
750	740	910	4	10
800	700	885	12	14,6
850	640	800	14	22
900	505	610	19	33,6
950	390	460	21	36,2
1000	230	270	25	48,5

просто к анализу известных экспериментальных данных, а к некоторому системному анализу, при котором могут более эффективно и полно выявляться объективные трудности развития решения рассматриваемой проблемы. С учетом сделанных замечаний было разработано уравнение состояния [11]. Основная задача разработки заключалась в обеспечении возможно более полного учета информативности характеристик кратковременной прочности при описании закономерностей пластического деформирования.

Ниже будут рассмотрены некоторые результаты применения разработанного в [11] уравнения в виде

$$\dot{\varepsilon}^{1-\gamma} \lg \varepsilon = \left[\frac{\frac{\sigma_0}{\sigma'}}{\left(1 - \frac{r\varepsilon}{1+r\varepsilon} - \alpha \sigma t^{1/3}\right) \left(1 + \frac{h}{\sigma_0^2} \varepsilon\right)^{n/2}} \right]^m, \quad (7)$$

где $\varepsilon, \dot{\varepsilon}$ – деформация при ползучести и ее скорость; h, r – характеристики деформационного упрочнения и разупрочнения; σ' – напряжение, при котором $\dot{\varepsilon} = 1 \text{ ч}^{-1}$; $\gamma = 0, 1$; $n = 1$; m – постоянная при $T = \text{const}$. Из этого уравнения после некоторых упрощений получена формула для описания кривых статического растяжения в виде

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

где σ_T – предел текучести.

Формула (8) используется также для описания мгновенного деформирования в виде

$$\sigma = \frac{(\sigma_y^2 + h_0 \varepsilon_{\text{оп}})^{1/2}}{1 + r\varepsilon}, \quad (9)$$

где σ_y – предел упругости; $\varepsilon_{\text{оп}}$ – пластическая составляющая деформации при нагружении.

Уравнение (7) разрабатывалось с учетом начальной конкретизации обобщенных уравнений пластического деформирования в виде

$$\dot{\varepsilon} = f_1(\varepsilon) f_2(\sigma, \omega), \quad (10)$$

где $\varepsilon, \dot{\varepsilon}$ – деформация и скорость ползучести, σ – напряжение; ω – параметр поврежденности; f_1 и f_2 – функции упрочнения и разупрочнения.

Следует подчеркнуть, что уже такая исходная довольно общая структура уравнения приводит к большим трудностям получения более конкретных уравнений, постоянные которых имели бы четкий смысл. Объясняется это, в основном, тем, что согласно уравнению (10) скорость ползучести определяется соотношением интенсивностей процессов упрочнения и разупрочнения, а в таком случае трудно рассчитывать на достаточно точный контроль роли отдельных постоянных. Это определяется тем, что при деформации точки перегиба кривой ползучести, описываемой с помощью уравнения (5), взаимосвязь этих ко-

эффициентов будет определяться формулой (6), при других значениях деформации взаимосвязь будет другая, причем уточнение такой взаимосвязи представляет значительные трудности. В связи с этим обратим внимание на следующее утверждение [1]: в работе [3] показано, что вклад деформации в упрочнение выражается членом ε^{-n} ; при этом отмечается, что роль мгновенной деформации и деформации ползучести может быть равной. Следовательно, параметр упрочнения можно представить в виде

$$q_2 = (\varepsilon_0 + \varepsilon_n)^{-n}. \quad (11)$$

В исследованиях [11] с помощью выражений (7), (9) и (табл. 1), в работе [13] установлено, что роль мгновенной деформации и деформации ползучести редко является равной, а уточнение этого различия имеет существенное практическое и научное значение по следующей причине.

При обычном использовании функции упрочнения в виде $q_2 = \varepsilon_n^{-n}$ устанавливается показатель степени, который определяет описываемый участок кривой упрочнения. В действительности же несравненно более важным является учет изменения состояния материала при переходе от одной точки кривой упрочнения к последующей. При отсутствии такого учета практически невозможно выявить многие неопределенности и соответственно устранить их. В связи с этим при разработке уравнения (7) [11] функция упрочнения была представлена в виде

$$f_1(\varepsilon) = \left[\frac{\sigma_0}{(\sigma_0^2 + h\varepsilon)^{1/2}} \right]^n, \quad (12)$$

где h – постоянная упрочнения. Описание этой функции таково, что числитель и знаменатель после раскрытия скобок при $n = 1$ можно отождествлять с сопротивлением деформированию в начальный момент и, соответственно, по мере нарастания пластической деформации, это обеспечивает возможность расчетной оценки деформационного упрочнения при различных значениях деформации, результаты которой могут контролироваться, например, методом оценки твердости.

Функция разупрочнения в соответствии с кинетическим подходом Ю. Н. Работнова используется в виде

$$f_2(\sigma, \omega) = \left(\frac{\sigma}{\sigma'} \right)^m \quad (13)$$

Параметры деформационной

$$\omega_1 = \omega(\varepsilon) = \frac{r\varepsilon}{1+r\varepsilon}, \quad (14)$$

где r – постоянная разупрочнения, и временной

$$\omega_2 = \omega(t) = \alpha \sigma t^{1/3} \quad (15)$$

поврежденности аналогичны принятым в известных работах [3], в том числе в работах, посвященных исследованию влияния диффузионных процессов на длительное разупрочнение металлических материалов.

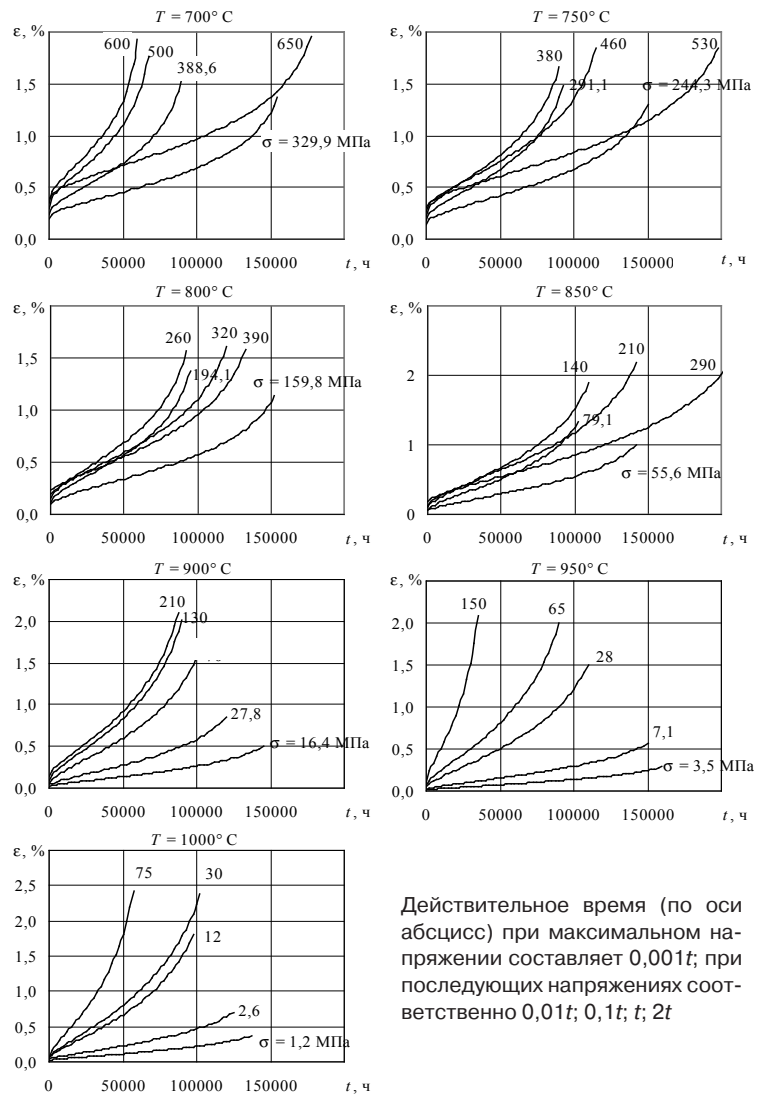
Уточнение и развитие представлений о взаимосвязи мгновенного деформирования и доускоренной ползучести необходимо для решения вопроса о влиянии мгновенной деформации на ползучесть, способа испытаний и нагружения на процесс релаксации напряжений и т. п. В настоящее время высказываются противоречивые точки зрения по этому поводу. В одних случаях считают, что влияние мгновенной деформации на ползучесть существует, в других, – что этим влиянием можно пренебречь. Выполненные исследования с помощью формул (7)-(9) привели к выводу о необходимости достаточно точного как описания, так и учета мгновенной деформации. Эта необходимость объясняется тем, что при большом числе отмеченных неопределенностей одна из наиболее существенных возможностей их выявления и разрешения может заключаться во взаимосвязанном рассмотрении сопротивления деформированию и разрушению металлов при различных условиях нагружения. Именно такие описание и учет в рамках системного подхода к экспериментально обоснованию уравнений состояния значительно расширяют возможности как экспериментальной проверки уравнений, так и повышения точности решения различных частных задач прогнозирования свойств металлов. В подтверждение этого в первом приближении достаточно перечислить лишь различные примеры такого подтверждения.

Первичная проверка (7) была выполнена [11] при описании кривых релаксации напряжений, приведенных в справочнике [13], затем – [14].

Исследования на основе (7)-(9) показали, что существует некоторый крити-

ческий минимум различных экспериментальных данных, взаимосвязанная обработка которых может обеспечить постепенное устойчивое улучшение прогнозирования высокотемпературных свойств металлов. Из-за дефицита части из них считают целесообразным выполнение описания и прогнозирования ползучести при условии, что разрушение при ползучести происходит за время, прогнозируемое МБД. Предполагается, что исследования при таком условии должны позволить четко определить тот достаточно полный комплекс экспериментальных данных, оперирование которым и должно обеспечить эффективное и довольно устойчивое улучшение рассматриваемого прогнозирования.

В плане этих представлений теперь следует обратить внимание на одно из наиболее существенных упущений в прогнозировании длительных высокотемпературных механических свойств металлов. Предварительно обратим внимание на некоторые экспериментальные и, в основном, расчетные данные рис. 2 и табл. 1-3. Можно предположить, что это с практической точки зрения достаточно полный комплекс необходимых расчетных данных о длительной прочности и ползучести



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

Рис. 2. Кривые ползучести сплава ЭИ929

Длительная прочность сплава ЭИ929

T, °C	σ_{10^2} , МПа	β'_0	σ_{10^3} , МПа	β'_1	σ_{10^4} , МПа	β'_2	σ_{10^5} , МПа	β'_3	$\sigma_{2 \cdot 10^5}$, МПа	β'_4	$\sigma_{3 \cdot 10^5}$, МПа
700	650	0,45	600	0,91	500,0	1,11	388,6	1,31	352,8	1,51	329,9
710	626	0,50	571	0,89	476,0	1,09	369,9	1,29	335,8	1,49	313,8
720	603	0,55	544	0,88	452,0	1,08	349,6	1,28	316,7	1,48	295,6
730	579	0,61	515	0,86	428,0	1,06	330,9	1,26	299,6	1,46	279,5
740	555	0,65	488	0,86	404,0	1,06	310,6	1,26	280,6	1,46	261,4
750	530	0,70	460	0,84	380,0	1,04	291,1	1,24	262,6	1,44	244,3
760	502	0,73	431	0,82	356,0	1,02	272,5	1,22	245,6	1,42	228,4
770	473	0,74	403	0,81	332,0	1,01	253,0	1,21	227,7	1,41	211,4
780	443	0,77	373	0,78	308,0	0,98	235,2	1,18	211,7	1,38	196,5
790	416	0,80	346	0,78	284,0	0,98	215,0	1,18	192,8	1,38	178,6
800	390	0,84	320	0,79	260,0	0,99	194,1	1,19	173,2	1,39	159,8
810	367	0,88	296	0,85	235,0	1,05	170,1	1,25	150,1	1,45	137,5
820	346	0,94	273	0,93	210,0	1,13	145,6	1,33	126,6	1,53	114,9
830	327	1,03	250	1,03	184,0	1,23	120,0	1,43	102,2	1,63	91,5
840	308	1,08	230	1,14	161,0	1,34	97,8	1,54	81,2	1,74	71,6
850	290	1,16	210	1,24	140,0	1,44	79,1	1,64	64,1	1,84	55,6
860	271	1,19	192	1,32	122,0	1,52	64,0	1,72	50,6	1,92	43,2
870	256	1,27	175	1,37	107,0	1,57	52,8	1,77	40,9	1,97	34,5
880	240	1,33	159	1,40	94,0	1,60	43,9	1,80	33,4	2,00	27,9
890	224	1,38	144	1,44	82,0	1,64	35,9	1,84	26,9	2,00	22,2
900	210	1,44	130	1,51	70,0	1,71	27,8	1,91	20,1	2,00	16,4
910	197	1,53	116	1,53	60,0	1,73	22,1	1,93	15,7	2,00	12,7
920	186	1,65	102	1,57	50,0	1,77	16,6	1,97	11,4	2,00	9,1
930	174	1,78	88	1,56	42,0	1,76	13,3	1,96	9,0	2,00	7,1
940	162	1,87	76	1,60	34,0	1,80	9,4	2,00	6,1	2,00	4,8
950	150	1,96	65	1,60	28,0	1,80	7,1	2,00	4,6	2,00	3,5
960	136	1,98	56	1,61	23,0	1,81	5,2	2,00	3,3	2,00	2,5
970	120	1,94	49	1,58	20,0	1,78	4,5	1,98	2,8	2,00	2,1
980	106	1,92	42	1,54	17,0	1,74	3,8	1,94	2,4	2,00	1,8
990	90	1,84	36	1,51	14,5	1,71	3,2	1,91	2,0	2,00	1,5
1000	75	1,77	30	1,47	12,0	1,67	2,6	1,87	1,6	2,00	1,2

Таблица 3

Пределы ползучести сплава ЭИ929

T, °C	$\sigma_{1/10^2}$, МПа	β'_0	$\sigma_{1/10^3}$, МПа	β'_1	$\sigma_{1/10^4}$, МПа	β'_2	$\sigma_{1/10^5}$, МПа	β'_3	$\sigma_{1/3 \cdot 10^5}$, МПа
700	652	0,81	561	0,87	469	0,97	375	1,17	326
750	541	0,89	451	0,92	365	1,00	282	1,17	241
800	391	0,86	319	0,89	252	0,96	190	1,16	159
850	299	1,32	206	1,31	133	1,37	77	1,59	55
900	188	1,39	117	1,39	66	-	-	-	-
950	105	1,45	57	1,44	27	-	-	-	-
1000	54	1,44	26	1,39	11	-	-	-	-

жаропрочного никелевого сплава ЭИ929. Теперь следует заметить, что наличие приведенного комплекса данных может резко изменять участие материаловедов в уточнении таких расчетных характеристик. У них есть значительные и эффективные

возможности проверки и уточнения таких данных. В этом заключается практически единственная возможность эффективного и плодотворного сотрудничества механиков и материаловедов. Такие необходимость и возможность сотрудничества

объясняются тем, что рассматриваемая проблема не имеет строгого теоретического решения. Методы МТДТ эффективны при относительно стабильном структурном состоянии. При высокотемпературной структурной нестабильности, особенно сложнелегированных упрочненных сплавов, решающее значение имеет значительное разнообразие внутренних изменений. Такое разнообразие может быть проконтролировано на довольно представительном комплексе экспериментальных

данных при тесном сотрудничестве механиков и материаловедов.

В результате основная цель этой статьи и заключается в обосновании необходимости и возможности улучшения решения рассматриваемой проблемы путем перехода к рассмотренному перспективному прогнозированию свойств с последующей проверкой результатов прогнозирования материаловедами.



ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е. Н., Голубовский Е. Р. Жаропрочность никелевых сплавов. М.: Машиностроение, 1998. – 464 с.
2. Работнов Ю. Н. Ползучесть элементов конструкций. – М.: Наука, 1966. – 752 с.
3. Закономерности ползучести и длительной прочности / А. Л. Аршакуни, А. М. Локощенко, В. Н. Киселевский и др. Справочник // Под общей ред. С. А. Шестерикова. – М.: Машиностроение, 1983. – 102 с.
4. Трунин И. И. Механическое уравнение состояния металлических материалов и прогнозирование характеристик жаропрочности // Пробл. прочности. – 1976. – № 9. – С. 9-15.
5. Чижик А. А., Петреня Ю. К. О кинетических уравнениях повреждаемости при оценке ресурса и надежности материалов в условиях ползучести // Тр. ЦКТИ. – 1982. – Вып. 194. – С. 27-38.
6. Владимиров В. И. Физическая природа разрушения металлов. – М.: Металлургия, 1984. – 280 с.
7. Жаропрочные сплавы для газовых турбин. Метериалы международной конф. // Под ред. Р. Е. Шакина. – М.: Металлургия. – 1981. – 480 с.
8. Инденбом В. Л., Орлов А. Н. Долговечность материала под нагрузкой и накопление повреждений // Изв. АН СССР. – 1977. – Т. 43, Вып. 3. – С. 469-492.
9. Пинес. Б. Я. Очерки по металлофизике. – Харьков: ХГУ, 1961. – 246 с.
10. Регель В. Р., Слуцкер А. И., Томашевский Э. Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. – М.: Наука, 1974. – 560 с.
11. Кривенюк В. В. Прогнозирование длительной прочности тугоплавких металлов и сплавов. – Киев: Наук. думка, 1990. – 248 с.
12. Лепин Г. Ф. Ползучесть металлов и критерии жаропрочности металлических материалов. – М.: Металлургия, 1976. – 334 с.
13. Либерман Л. Я., Пейсихис М. И. Свойства сталей и сплавов, применяемых в котлотурбостроении. – Л.: ЦКТИ, 1966. – вып. 16, ч. 1. – 219 с.; ч. 2. – 244 с.; 1967. – ч. 3. – 180 с.
14. Кривенюк В. В. Методические аспекты прогнозирования ползучести жаропрочных сталей и сплавов // Пробл. прочности. – 2007. – № 1. – С. 55-68.

КРИВЕНЮК В. В. Прогнозування тривалої міцності жароміцних нікелевих сплавів

Наведено результати екстраполяційного аналізу тривалої міцності нікелевих сплавів методом базових діаграм. Проаналізовано причини значного збільшення похибок прогнозування та можливості їх усунення.

Ключові слова: високі температури, прогнозування, тривала міцність, повзучість, деформаційна і часова пошкодженість

KRIVENYUK V. Prediction of the long-term strength heat-resistant nickel alloy

Results of extrapolation analysis of creep-rupture diagrams by the base diagram method are presented. The reasons for a considerable increase in prediction errors and possibilities of their elimination are analyzed.

Keywords: high temperatures, prediction, long-term strength, creep, deformation and temporal damaged