

Методологические аспекты прогнозирования ползучести жаропрочных сталей и сплавов. Сообщение 2. Прогнозирование в широких интервалах температур и длительностей нагружения

В. В. Кривенюк, Г. А. Околот, Е. И. Усков

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

Предложена оценка ползучести и длительной прочности металлических материалов в широком интервале температур и напряжений на основании расчетных уравнений с использованием ограниченного объема исходных данных. Эффективность такой оценки может быть существенно повышена путем перехода к системному анализу известных экспериментальных данных.

Ключевые слова: прогнозирование, ползучесть, пределы ползучести, длительная прочность.

В результате анализа больших объемов экспериментальных данных предложен один из возможных способов решения рассматриваемой проблемы с помощью комплексных расчетов, что будет показано на примере обработки прочностных характеристик широко используемой в теплоэнергетике стали 15ХМ. Применение такого способа для специально подобранных сталей и сплавов может рассматриваться как системный анализ. В соответствии с этим способом были обработаны данные [1] и выполнены их дополнительные уточнения по результатам [2, 3] с использованием метода базовых диаграмм (МБД) [4–7] и уравнения ползучести [8, 9]. При этом следует подчеркнуть, что рассматриваемая задача сводится не столько к достаточно точной расчетной оценке характеристик ползучести и длительной прочности в широких интервалах температур и напряжений, сколько к расширению возможностей уточнения прогнозируемых характеристик при использовании предлагаемого способа решения.

Выбор стали 15ХМ обусловлен ее широким применением в условиях длительного высокотемпературного нагружения и отсутствием достаточно полных сопоставимых данных о ползучести и длительной прочности. Эти характеристики жаропрочных сталей и сплавов в [1] широко используются для прогнозирования сроков службы элементов конструкций теплоэнергетического оборудования. Они получены по данным экспериментов весьма ограниченной продолжительности и требуют существенных уточнений.

В табл. 1 приведены характеристики длительной прочности, рассчитанные по справочным данным [1] и в результате прогнозирования МБД-1 [4, 7]. МБД разработан на основании уравнения 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, МПа; σ_1 – напряжение, которое вызывает разрушение в течение 1 ч, МПа; t – время до разрушения, ч (численные

значения постоянных справедливы при указанных размерностях напряжений и долговечности).

Отдельные участки экспериментальных диаграмм длительной прочности описывают с помощью характеристик

$$\beta_e = \frac{\sigma_{at} - \sigma_{te}}{\sigma_{at} - \sigma'_t}, \quad (2)$$

где σ_{at} – координата общей исходной точки сравниваемых участков диаграмм; σ_{te} , σ'_t – координаты правых границ сравниваемых участков экспериментальной и базовой диаграмм.

Т а б л и ц а 1

Длительная прочность стали 15ХМ по данным [1] ($t \leq 10^4$ ч) и по МБД-1 ($t > 10^4$ ч)

$T, ^\circ\text{C}$	$\sigma_{10^2},$ МПа	β_0	$\sigma_{10^3},$ МПа	β_1	$\sigma_{10^4},$ МПа	β_2	$\sigma_{10^5},$ МПа	β_3	$\sigma_{2 \cdot 10^5},$ МПа	β_4	$\sigma_{3 \cdot 10^5},$ МПа
450	435,0	0,50	390,0	0,58	340,0	0,78	277,9	0,98	256,0	1,18	241,3
460	411,0	0,53	365,0	0,62	314,0	0,82	252,3	1,02	231,0	1,22	216,7
470	387,0	0,56	340,0	0,69	286,0	0,89	223,3	1,09	202,3	1,29	188,6
480	365,0	0,62	315,0	0,74	260,0	0,94	198,0	1,14	177,8	1,34	164,8
490	346,0	0,72	290,0	0,79	234,0	0,99	172,9	1,19	153,6	1,39	141,4
500	328,0	0,84	265,0	0,83	210,0	1,03	151,4	1,23	133,3	1,43	122,0
510	310,0	0,97	240,0	0,88	185,0	1,08	128,5	1,28	111,7	1,48	101,2
520	289,0	1,07	215,0	0,94	161,0	1,14	107,4	1,34	92,0	1,54	82,7
530	267,0	1,18	190,0	0,99	138,0	1,19	88,2	1,39	74,4	1,59	66,2
540	245,0	1,13	165,0	1,31	115,0	1,51	69,3	1,71	44,6	1,91	50,3

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

$$\sigma_t = \sigma_{at} - \beta(\sigma_{at} - \sigma'_t). \quad (3)$$

Согласно МБД-1 для каждого из временных интервалов $10^3 \dots 10^4$; $10^4 \dots 10^5$; $10^5 \dots 2 \cdot 10^5$; $2 \cdot 10^5 \dots 3 \cdot 10^5$ ч определяются значения β , равные β_1 , β_2 , β_3 , β_4 соответственно. Установлено, что зависимость между значениями β_i в первом приближении может быть представлена в виде

$$\beta_{n+1} = \beta_n + \Delta\beta_{n+1}, \quad (4)$$

при $\Delta\beta_{n+1} = 0,2$ получим

$$\beta_2 = \beta_1 + 0,2; \quad (5)$$

$$\beta_3 = \beta_2 + 0,2; \quad (6)$$

$$\beta_4 = \beta_3 + 0,2. \quad (7)$$

Характеристики длительной прочности (табл. 1) прогнозировали МБД-1 следующим образом. По значениям σ_{10^3} и σ_{10^4} [1] определяли значение β_1 , затем по формулам (5)–(7) – значения $\beta_2, \beta_3, \beta_4$. С помощью формулы (3) по σ_{10^4} при β_2 прогнозировали значение σ_{10^5} , по σ_{10^5} при β_3 – $\sigma_{2 \cdot 10^5}$, по $\sigma_{2 \cdot 10^5}$ при β_4 – $\sigma_{3 \cdot 10^5}$. Рассчитанные таким образом значения $\sigma_{10^5}, \sigma_{2 \cdot 10^5}, \sigma_{3 \cdot 10^5}$ и β_i приведены в табл. 1 и на рис. 1. При длительности испытаний $t \leq 10^4$ ч в качестве исходных приняты данные [1].

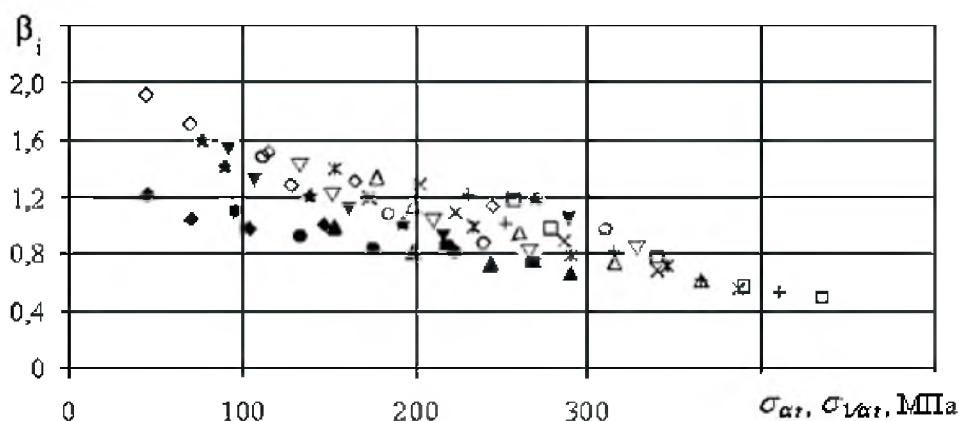


Рис. 1. Значения β_i ($\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$) при соответствующих σ_{at} и температурах, °С: 450 – □, 460 – +, 470 – ×, 480 – △, 490 – *, 500 – ▽, 510 – ○, 520 – ▾, 530 – ★, 540 – ◇ (табл. 1), а также при $\sigma_{1/2at}$ и температурах, °С: 450 – ■, 480 – ▲, 510 – ●, 540 – ◆ (табл. 3).

Объем экспериментальных данных по длительной прочности для прогнозирования значений $\sigma_{10^4}, \sigma_{10^5}$ весьма ограничен [1]. Главным образом это результаты испытаний длительностью 3000...7000 ч, с использованием которых рассчитывались значения $\sigma_{10^3}, \sigma_{10^4}, \sigma_{10^5}$. Число таких расчетных значений пределов ползучести и длительной прочности было сравнительно небольшим (табл. 2, 3). Тем не менее результаты прогнозирования, приведенные в [1] и рассчитанные по МБД-1 (табл. 2), в основном хорошо согласовались с экспериментальными данными [2, 3]. Из данных [2, 3] следует, что характеристики кратковременной и длительной прочности для плавок одной и той же стали в основном различаются. Более того, различие может быть настолько существенным, что обычное представление данных для одного или двух случайных состояний материала во многих справочных изданиях можно считать недостаточным, в связи с чем необходимы уточнения рассматриваемых характеристик, среди которых отметим уточнения путем совместного прогнозирования ползучести и длительной прочности. Развитие такого прогнозирования связано со многими затруднениями, о которых можно судить по представляемым ниже результатам, полученным с помощью уравнения [6, 10, 11]

$$\dot{\varepsilon}^{1-\gamma} \lg \dot{\varepsilon} = \left[\frac{\frac{\sigma_0}{\sigma'}}{\left(1 - \frac{r\varepsilon}{1+r\varepsilon} - \alpha t^{1/3}\right) \left(1 + \frac{h}{\sigma_0^2} \varepsilon\right)^{n/2}} \right]^{N/(3,6-\lg \sigma')} \quad (8)$$

где ε , $\dot{\varepsilon}$ – деформация ползучести и ее скорость; h , r – постоянные деформационного упрочнения и разупрочнения; α – постоянная временного разупрочнения; N – постоянная наклона графика зависимости начальной скорости ползучести от напряжений в системе координат $\lg \sigma_0 - \lg \dot{\varepsilon}$; σ_0 , σ' – исходное напряжение и напряжение при скорости пластической деформации $\dot{\varepsilon} = 1 \text{ ч}^{-1}$ (расчеты выполнялись при значениях σ' , равных пределу прочности σ_B , $\gamma = 0,1$ и $n = 1$).

Т а б л и ц а 2

Кратковременная и длительная прочность стали 15ХМ

T, °C	$\sigma_{0,2}$; σ_B ; σ_t ; МПа	Данные [1]	Данные [2]	Данные [3]*			МБД-1
				ЛМ	ОШД	МХ	
1	2	3	4	5	6	7	8
20	$\sigma_{0,2}$	350	239–343		320–350		350,0
	σ_B	540	431–502		460–500		540,0
450	$\sigma_{0,2}$	250	176–287		194–261		250,0
	σ_B	490	444–479		419–452		490,0
	σ_{10^2}	–	–	–	–	–	435,0
	σ_{10^3}	–	–	–	–	–	390,0
	σ_{10^4}	340	–	–	–	–	340,0
	σ_{10^5}	270	–	–	–	–	277,9
480	$\sigma_{0,2}$	262 ¹	–		–		262,0
	σ_B	470 ¹	–		–		470,0
	σ_{10^2}	365	–	–	–	–	365,0
	σ_{10^3}	315	–	–	–	–	315,0
	σ_{10^4}	255	–	–	–	–	260,0
	σ_{10^5}	200	–	–	–	–	198,0
510	$\sigma_{0,2}$	266 ¹	160–274 ²		193–258 ²		266,0
	σ_B	444 ¹	417–449 ²		387–422 ²		444,0
	σ_{10^2}	310	–	–	–	–	310,0

1	2	3	4	5	6	7	8
510	σ_{10^3}	230	339–362 ²	–	–	–	240,0
	σ_{10^4}	165	253–281 ²	–	–	–	185,0
	σ_{10^5}	120	127–154 ²	124–161 ²	126–166 ²	117–150 ²	128,5
540	$\sigma_{0,2}$	254 ¹	172–262 ³		186–254 ³		245,0
	$\sigma_{\text{в}}$	426 ¹	367–395 ³		342–384 ³		426,0
	σ_{10^2}	245	278–305 ³	–	–	–	245,0
	σ_{10^3}	165	161–199 ³	–	–	–	165,0
	σ_{10^4}	110	97–111 ³	–	–	–	115,0
	σ_{10^5}	73	58–65 ³	54–79 ³	53–78 ³	54–78 ³	69,3

Примечание: 1 – интерполяционные данные; 2 – при 500°С; 3 – при 550°С; звездочкой обозначены интервалы значений для восьми плавок; параметрические методы Ларсона–Миллера (ЛМ), Орра–Шерби–Дорна (ОШД) и Мэнсона–Хэферда (МХ).

Т а б л и ц а 3

Пределы ползучести стали 15ХМ

T, °С	Данные [1]		Расчетные данные*	
	$\sigma_{1/10^4}$, МПа	$\sigma_{1/10^5}$, МПа	$\sigma_{1/10^4}$, МПа	$\sigma_{1/10^5}$, МПа
450	240	200	268	218
480	225	155	198	153
510	170	120	134	96
540	122	82	71	45

Примечание. Звездочкой обозначены значения, рассчитанные по МБД-1 и уравнению (8).

В [1], как и в других справочных изданиях, например [10], приведены расчетные значения пределов ползучести для различных сталей и сплавов, в частности для 15ХМ (табл. 3). В настоящей работе расчет ползучести для этой стали по уравнению (8) проводился таким образом, чтобы при одинаковом напряжении время до разрушения, рассчитанное по этому же уравнению, было равным времени до разрушения в табл. 1. Расчетные значения характеристик ползучести приведены в табл. 4, значения постоянных уравнения (8) – на рис. 2, кривые ползучести – на рис. 3, пределы ползучести – в табл. 3 и на рис. 4. При анализе этих данных необходимо учитывать следующее.

Для ограниченных температурно-силовых условий нагружения накоплено много экспериментальных данных. Однако, что касается длительных испытаний, то чаще это лишь данные о ползучести или длительной прочности, что затрудняет сопоставимость и оценку точности получаемых харак-

теристик. В связи с этим для выполнения различных уточнений особую ценность представляет анализ достаточно полных экспериментальных данных для отдельных материалов, например данных [2, 3] по кратковременной и длительной прочности, ползучести, твердости, структуре и т.п. для нескольких плавок одного материала. Ниже будут рассмотрены некоторые возможности и трудности использования таких данных для отмеченных уточнений.

Т а б л и ц а 4

Характеристики ползучести стали 15ХМ по МБД-1 и уравнению (8)

T, °C	σ , МПа	ϵ_0 , %	$\dot{\epsilon}_0$, %/ч	Время, ч, достижения деформации				$\dot{\epsilon}_{min}$, %/ч	t_p , ч	ϵ_p , %
				0,5%	1,0%	2,0%	5,0%			
450	241,3	0,310	$2,46 \cdot 10^{-4}$	3700	33400	138100		$9,84 \cdot 10^{-6}$	300000	4,82
	277,9	0,461	$4,72 \cdot 10^{-4}$	200	5850	32250	91950	$3,48 \cdot 10^{-5}$	97500	5,79
	340,0	1,350	$4,52 \cdot 10^{-4}$			1730	8915	$3,40 \cdot 10^{-4}$	10250	6,38
	390,0	2,698	$1,69 \cdot 10^{-3}$				846	$1,69 \cdot 10^{-3}$	1075	6,40
	435,0	4,234	$1,40 \cdot 10^{-2}$				39	$1,40 \cdot 10^{-2}$	90	7,09
480	164,8	0,141	$1,36 \cdot 10^{-3}$	10000	53600	167100		$9,04 \cdot 10^{-6}$	300000	4,43
	198,0	0,203	$5,42 \cdot 10^{-3}$	1450	9750	39450	96650	$3,30 \cdot 10^{-5}$	100000	5,47
	260,0	0,373	$9,87 \cdot 10^{-3}$	40	450	2415	8350	$4,11 \cdot 10^{-4}$	9750	6,72
	315,0	1,084	$8,66 \cdot 10^{-3}$			180	832	$3,92 \cdot 10^{-3}$	1025	7,09
	365,0	2,247	$2,71 \cdot 10^{-2}$				81	$2,71 \cdot 10^{-2}$	105	6,91
510	101,2	0,091	$1,18 \cdot 10^{-3}$	17700	71200	184300		$8,50 \cdot 10^{-6}$	290000	3,94
	128,5	0,140	$4,46 \cdot 10^{-3}$	2650	13500	45350	102150	$3,13 \cdot 10^{-5}$	105000	5,38
	185,0	0,191	$4,54 \cdot 10^{-2}$	100	600	2620	8520	$4,21 \cdot 10^{-4}$	10500	7,36
	240,0	0,353	$7,26 \cdot 10^{-2}$	5	44	213	796	$4,54 \cdot 10^{-3}$	1050	7,84
	310,0	1,352	$1,09 \cdot 10^{-1}$			8	44	$7,22 \cdot 10^{-2}$	60	7,88
540	50,3	0,091	$2,74 \cdot 10^{-3}$	16200	57900	152600	300500	$1,03 \cdot 10^{-5}$	300000	4,98
	69,3	0,146	$8,71 \cdot 10^{-3}$	2600	11100	35000	89500	$4,05 \cdot 10^{-5}$	105000	7,00
	115,0	0,173	$7,12 \cdot 10^{-2}$	105	515	1955	6575	$5,87 \cdot 10^{-4}$	10000	9,89
	165,0	0,175	$3,59 \cdot 10^{-1}$	9	43	173	641	$5,99 \cdot 10^{-3}$	1050	10,34
	245,0	0,358	1,12		2	9	33	$1,16 \cdot 10^{-1}$	53	9,85

Для стали 15ХМ в [1] приведены экспериментальные данные лишь при четырех температурах, включая $T = 510$ и 540°C , и малых длительностях нагружения. С помощью (8) выполнялись расчеты, результаты которых сравнивались с данными [2] лишь при $T = 500$ и 550°C . Для плавки М рассматриваемой стали [2] при $T = 500^\circ\text{C}$ и $\sigma = 118$ МПа деформация $\epsilon = 1\%$ была

накоплена за 103000 ч, а расчетное значение $\varepsilon = 1\%$ по (8) при 510°C и $\sigma = 101,2$ МПа было получено за 71200 ч. При 500 и 510°C , $\sigma = 196$ и 185 МПа экспериментальное время до разрушения составило 23600, а расчетное – 600 ч, при 550 и 540°C , $\sigma = 61$ и $50,3$ МПа соответственно 59000 ч [2] и 57900 ч, при 550 и 540°C , $\sigma = 108$ и 115 МПа – 3840 ч [2] и 515 ч. Как видно, различие в температуре испытаний даже на 10°C существенно затрудняет сравнение экспериментальных и расчетных характеристик разных материалов.

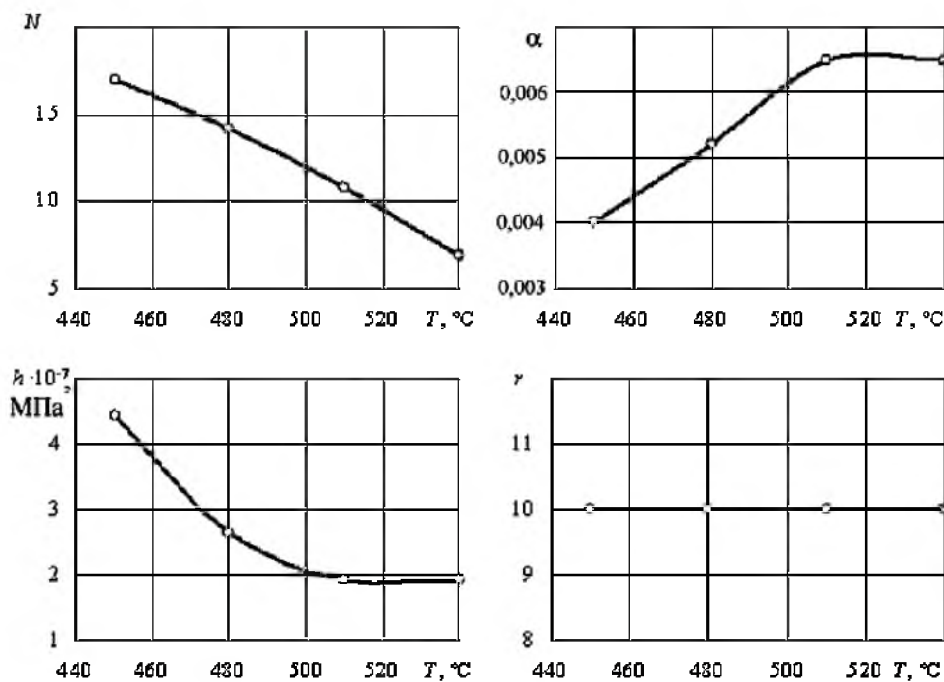


Рис. 2. Температурные зависимости параметров ползучести стали 15XM.

К настоящему времени известно лишь около 500 экспериментов длительностью 10^5 ч и более. Ввиду сложности проведения и высокой стоимости таких испытаний не приходится ожидать заметного увеличения их объема и достаточной полноты исследований. Кроме того, для подобных экспериментальных исследований характерны существенные отличия в условиях испытаний. Это затрудняет уточнение роли многих факторов, оказывающих влияние на характеристики ползучести и длительной прочности. В связи с этим особое значение приобретают выявление и учет информативности ограниченного объема экспериментальных данных, подобных приведенным в [2, 3].

Экспериментальные исследования [2, 3] позволили получить расчетные значения мгновенной деформации, продолжительности различных стадий ползучести и соответствующей постстадийной деформации, скоростей ползучести для узких температурных интервалов (табл. 4), которые, безусловно, представляют практический интерес. Так, например, из этих данных видно,

что мгновенная деформация при нагружении может составлять значительную долю той величины (1%), которая принимается в качестве допустимой при работе многих элементов конструкций. Кроме того, при возможных перегрузках мгновенная деформация может существенно возрасти, снижая соответствующий ресурс работы. За мгновенной деформацией следует ускоренное деформирование, поэтому для оценки предельного деформационного поведения исследуемых материалов важны данные о взаимозависимости начальной и минимальной скоростей ползучести. Однако до настоящего времени предсказание рассматриваемых составляющих общей деформации остается весьма сложным. Это, в частности, обусловлено тем, что уравнения состояния разрабатываются исходя из условия равномерного деформирования по длине рабочей части испытуемого образца, которое практически никогда не выполняется, и неравномерность деформирования в большинстве случаев оказывается весьма значительной. Стоимость получения экспериментальных данных, подобных данным [2, 3], которые могут быть использованы для проверки результатов расчетов, является настолько высокой, что становятся весьма важными максимальное выявление и учет информативности как достаточно полных комплексов экспериментальных данных, которых сравнительно мало, так и менее представительных, которых значительно больше. Это можно обеспечить путем выполнения достаточно полных и возможно более подробных расчетных исследований.

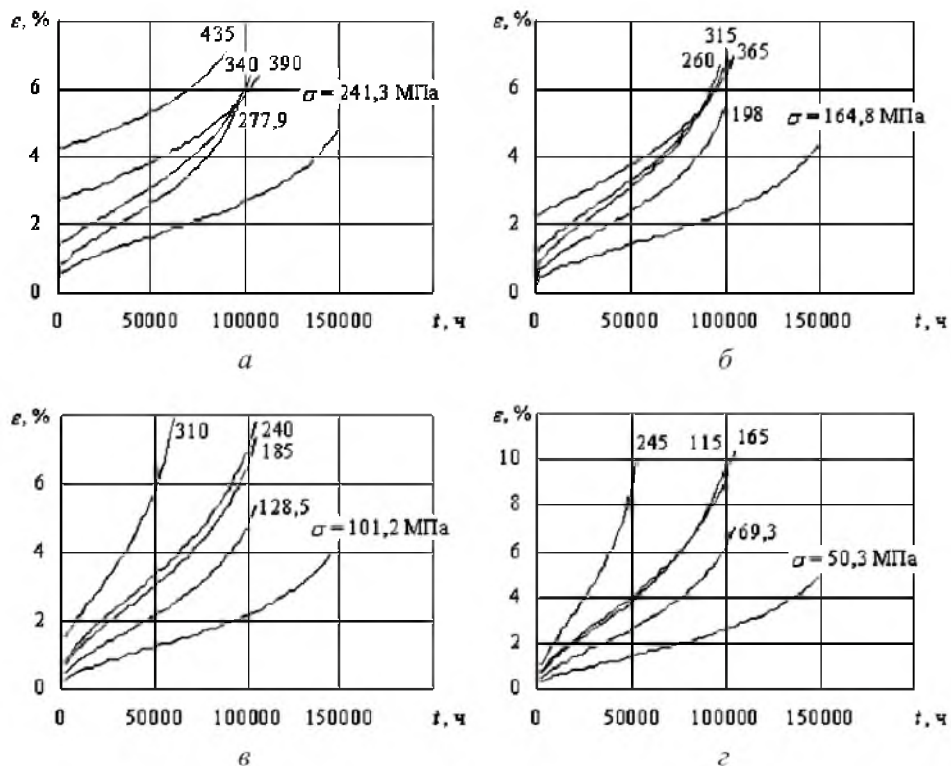


Рис. 3. Кривые ползучести стали 15ХМ при 450°С – а, 480°С – б, 510°С – в и 540°С – з (действительное время для максимального и последующего напряжения равно произведению постоянной 0,001; 0,01; 0,1; 1,0 и 2,0 на t).

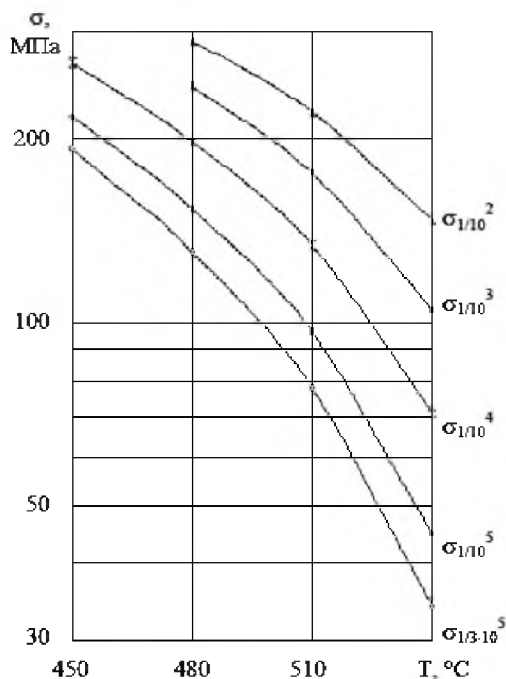


Рис. 4. Пределы ползучести стали 15XM.

Данные табл. 4 получены с помощью уравнения (8) и приведенных на рис. 2 значений постоянных. Температурная зависимость постоянных в основном является довольно монотонной, поэтому решение задачи описания ползучести можно считать сравнительно простым. Эта монотонность согласуется с представлениями, доминирующими в прогнозировании ползучести и длительной прочности. Вместе с тем в [12] приведены результаты обработки данных NIMS*, которые свидетельствуют о существенном нарушении такой монотонности. Так, например, для стали 12X2M1 при температурах 500, 550, 600 и 650°C в интервале длительностей нагружения $10^4 \dots 10^5$ ч значения $\Delta\beta_2$, характеризующие изменения наклонов соответствующих участков диаграмм длительной прочности, составили 0,2; 0,2; 0,7; -0,2, а для стали 25X1M1Ф при температурах 500, 550 и 600°C – соответственно 0,2; 0,7; 0,5, что свидетельствует об отмеченном нарушении монотонности. Для выявления случаев такого нарушения обработка данных о длительной прочности для возможно более широких температурно-временных условий нагружения также весьма эффективна.

В табл. 1 и 5 приведены характеристики длительной прочности для двух сталей. В первом случае значения σ_{10^4} и σ_{10^5} в основном расчетные, во втором – экспериментальные. Например, при 450°C указанные пределы длительной прочности равны 340 и 277,9 МПа (табл. 1), 342 и 275 МПа (табл. 5) при практически идентичных значениях β_2 , равных 0,78 и 0,842.

* National Institute for Materials Sciences, Токио, Япония.

При 540°C рассматриваемые характеристики равны 115 и 69,3 МПа (табл. 1) и близки к значениям 119 и 64 МПа при 570°C, $\beta_2 = 1,51$ и 1,466 соответственно (табл. 5). В результате равенство значений σ_{10^4} для обоих материалов при указанных температурах и близких значениях β_2 определяет равенство значений σ_{10^5} .

Т а б л и ц а 5

Длительная прочность и значения β_i для стали GS-17CrMoV511

$T, ^\circ\text{C}$	$\sigma_{1/10^4},$ МПа	β_2	$\sigma_{1/10^5},$ МПа	β_3	$\sigma_{2/10^5},$ МПа	$\sigma_{10^4},$ МПа	β_2	$\sigma_{10^5},$ МПа	β_3	$\sigma_{2 \cdot 10^5},$ МПа
400	438	0,733	370	0,528	(356)	479	0,613	419	0,842	(395)
410	410	0,662	351	0,973	(326)	451	0,646	390	0,951	(364)
420	383	0,713	322	0,985	(298)	423	0,693	360	0,959	(335)
430	356	0,747	295	1,040	(271)	395	0,723	332	1,007	(307)
440	330	0,810	267	1,108	(243)	368	0,779	303	1,023	(279)
450	305	0,880	240	1,089	(218)	342	0,842	275	0,997	(253)
460	279	0,934	214	1,176	(192)	316	0,886	249	1,111	(226)
470	255	0,993	190	1,217	(169)	291	0,936	224	1,140	(202)
480	231	1,015	169	1,382	(147)	266	0,965	201	1,171	(180)
490	209	1,089	147	1,317	(128)	243	0,995	180	1,203	(160)
500	188	1,289	120	0,802	(110)	222	1,043	160	1,240	(141)
510	170	1,183	112	1,519	(94)	203	1,058	144	1,337	(125)
520	154	1,228	98	1,491	(82)	187	1,103	129	1,447	(110)
530	139	1,279	85	1,762	(68)	171	1,157	114	1,500	(96)
540	125	1,360	72	1,529	(59)	157	1,211	101	1,640	(83)
550	112	1,424	61	1,604	(49)	144	1,292	88	1,717	(71)
560	100	1,463	52	1,968	(39)	131	1,362	76	1,918	(59)
570	88	1,516	43	2,286	(30)	119	1,466	64	2,189	(47)
580	78	1,594	35	2,695	(22)	107	1,562	53	2,535	(36)
590	68	1,696	27	3,325	(14)	96	1,731	41	2,923	(25)
600	61	1,897	19	3,730	(10)	86	1,921	30	3,757	(14)

Таким образом, характеристики β_i позволяют довольно четко определять особенности длительного разупрочнения исследуемых материалов в виде, удобном для системного анализа известных экспериментальных данных. В этом отношении целесообразно представлять одни и те же данные как в виде рисунков (рис. 1), так и таблиц (табл. 1, 3). Использование МБД и значений β_i определялось тем, что при наиболее характерных условиях нагружения значения β_i для различных материалов являются в основном установленными. Например, для сплавов с твердорастворным упрочнением в соответствующем интервале температур значения β_i составляют 0,9...1,3, для дисперсно-упрочненных – 1,3...1,7 [11]. Первому интервалу соответствуют данные табл. 1, второму – данные табл. 5.

В табл. 5 значения σ_{10^5} являются экспериментальными, а $\sigma_{2 \cdot 10^5}$ – расчетными (в скобках). Именно последние обуславливают высокие значения β_3 , достигающие трех и более, тогда как при обработке больших

массивов экспериментальных данных значения $\beta_e > 2,3$ практически не встречались [11].

Многими исследователями предпринимались попытки установить связь между наклонами диаграмм длительной прочности и пределов ползучести. Из анализа данных табл. 5 следует, что использование характеристик β_i значительно упрощает решение такой задачи. Так, например, можно исходить из того, что значения β_i увеличиваются одинаково для пределов ползучести и длительной прочности по мере повышения температуры и длительности нагружения. Во многих случаях эта идентичность подтверждается. Например, при 410°C значения β_2 и β_3 для пределов ползучести и длительной прочности равны 0,662, 0,973 и 0,646, 0,951, при 430°C – 0,747, 1,040 и 0,723, 1,007, при 460°C – 0,934, 1,176 и 0,886, 1,111, при 520°C – 1,228, 1,491 и 1,103, 1,447, при 580°C – 1,594, 2,695 и 1,562, 2,535. В результате можно утверждать, что рассмотренные значения β_i , определяющие наклоны диаграмм пределов ползучести и длительной прочности, являются практически идентичными. Вместе с тем известны случаи, противоречащие такому выводу. Это лишь подтверждает необходимость выполнения соответствующих уточнений и использования для них МБД.

При традиционном развитии прогнозирования в основном учитывают роль основных факторов, определяющих закономерности пластического деформирования и длительного разупрочнения жаропрочных сталей и сплавов. Представленный способ расчетов может быть использован также для учета факторов, кажущихся второстепенными. Их число несравненно больше, и учет в рамках системного подхода может оказаться важным для развития рассматриваемого прогнозирования.

Резюме

Запропоновано повзучість і тривалу міцність металевих матеріалів у широкому інтервалі температур і напружень оцінювати на основі розрахункових рівнянь із використанням обмеженого об'єму початкових даних. Ефективність оцінки може бути більш суттєвою при переході до системного аналізу відомих експериментальних даних.

1. *Либерман Л. Я., Пейсихис М. И.* Свойства сталей и сплавов, применяемых в котлотурбостроении. – Л.: ЦКТИ, вып. 16, ч. 1, 1966. – 219 с.; ч. 2, 1966. – 244 с.; ч. 3, 1967. – 180 с.
2. *Data sheets on the elevated-temperature properties of 1Cr–0.5Mo steel // NRIM Creep Data Sheet.* – 1996. – No. 1B. – 36 p.
3. *Data sheets on the elevated-temperature properties of 1Cr–0.5Mo steel // NRIM Creep Data Sheet.* – 1990. – No. 35A. – 22 p.
4. *Кривенюк В. В.* Прогнозирование длительной прочности тугоплавких металлов и сплавов. – Киев: Наук. думка, 1990. – 248 с.
5. *Писаренко Г. С., Кривенюк В. В.* Новый подход к прогнозированию длительной прочности металов // Докл. АН СССР. Механика. – 1990. – 312, № 3. – С. 558 – 562.

6. Троценко В. Т., Лебедев А. А., Стрижало В. А. и др. Механическое поведение материалов при различных видах нагружения. – Киев: Логос, 2000. – 571 с.
7. Кривенюк В. В., Заслоцкая Л. А., Авраменко Д. С. Некоторые особенности и возможности обобщенного анализа характеристик длительной прочности металлических материалов // Пробл. прочности. – 2000. – № 3. – С. 24 – 36.
8. Кривенюк В. В. О взаимообусловленности решения задач описания и анализа особенностей высокотемпературной ползучести металлических материалов // Там же. – 1990. – № 5. – С. 31 – 35.
9. Кривенюк В. В. Исследование закономерностей деформирования металлических материалов при различных условиях статического нагружения // Там же. – 1990. – № 8. – С. 51 – 58.
10. Колосков М. М., Долбенко Е. Т., Каширский Ю. В. и др. Марочник сталей и сплавов / Под общ. ред. А. С. Зубченко. – М.: Машиностроение, 2001. – 672 с.
11. Кривенюк В. В. Прогнозирование длительной прочности сталей и сплавов параметрическими методами и методом базовых диаграмм. Сообщ. 1. Интерполяционный анализ экспериментальных данных // Пробл. прочности. – 2006. – № 5. – С. 90 – 108.
12. Кривенюк В. В. Прогнозирование длительной прочности сталей и сплавов параметрическими методами и методом базовых диаграмм. Сообщ. 2. Экстраполяционный анализ экспериментальных данных // Там же. – № 6. – С. 30 – 42.

Поступила 01. 07. 2004