

О проблеме прогнозирования длительной прочности металла энергетического оборудования на большие сроки эксплуатации

Рассмотрены различные методы прогнозирования длительной прочности металла энергетического оборудования, в том числе наиболее распространенные параметрические. Предложен новый экспериментально обоснованный подход к решению проблемы прогнозирования прочности на большие сроки эксплуатации – метод базовых диаграмм. Разработанный метод использован для формирования базовых данных о прочностных характеристиках сталей и сплавов. В качестве примера приведены подробные данные о ползучести и длительной прочности легированной конструкционной стали 25X1M1Ф при различных температурах и длительности до 300 тыс. часов.

Ключевые слова: металл, длительная прочность, ползучесть, прогнозирование, метод базовых диаграмм

Нынешняя ситуация в тепловой энергетике Украины характеризуется тем, что при большой нагрузке и значительном физическом износе оборудования тепловых электростанций (ТЭС) отсутствует перспектива его замены или коренной реконструкции в обозримом будущем. Практически отсутствуют научно обоснованный долгосрочный прогноз ресурса основных трудно заменяемых элементов оборудования и надежный метод прогнозирования длительной прочности металла энергетического оборудования на большие сроки эксплуатации до 300 тыс. ч и более.

При этом следует отметить, что действующие тепловые электростанции и ТЭЦ, которые базируются на устаревшем оборудовании, еще долгое время будут оставаться основой энергетики Украины. Их доля в ближайшие 15-20 лет будет колебаться в пределах 40-50 % от общего производства электроэнергии. Кроме того, тепловые электростанции выполняют в объединенной энергосистеме Украины важную функцию – регулирование суточных и сезонных колебаний энергопотребления.

Интерес представляет сопоставление некоторых данных по Украине, России и ряду других стран. Ниже показана доля оборудования (в %) по состоянию на 2010 год, срок эксплуатации которого превысил 40 лет.

Доля оборудования (в %) по состоянию на 2010 г

Китай	Япония	США	ЕЭС	Россия	Украина
3	12	28	22	39	> 60 *

* показана доля энергоблоков ТЭС Украины, введенных в эксплуатацию более 40 лет назад

Из приведенных данных видно, что в Украине, как ни в какой другой стране, очень медленно идет процесс обновления основного оборудования, а поэтому очень остро стоит вопрос прогнозирования ресурса действующего оборудования ТЭС.

Проблема продления ресурса не является новой, возникшей только в последнее время. Она приобрела актуальность еще 30-35 лет назад, когда достаточно

большое количество действующего оборудования тепловых электростанций уже отработало или приближалось к отработке установленного расчетного срока.

При разработке, создании и освоении соответствующего оборудования ТЭС в 60-х годах прошлого столетия долговечность котлов, турбин и паропроводов, работающих в условиях ползучести, оценивалась в 100 тыс. ч. Этот ресурс был принят как расчетный срок эксплуатации, в течение которого, как предполагалось, обеспечивается проектная надежность оборудования. При сроках, превышающих 100 тыс. ч, заводы-изготовители не гарантировали сохранение на должном уровне прочностных и пластических свойств металла, а значит и надежности оборудования.

Базовыми характеристиками при проведении расчетов служили пределы длительной прочности и ползучести, причем прогнозирование этих характеристик на 100 тыс. ч осуществлялось по данным экспериментальных исследований длительностью 5-15 тыс. ч.

Полученные в различных организациях данные экспериментальных исследований были собраны и обобщены при формировании соответствующих справочников, среди которых следует отметить трехтомный справочник Либермана Л. Я. и Пейсихиса М. И. [1], который сыграл огромную положительную роль при проектировании энергоблоков в 60-70-е годы прошлого столетия.

Среди появившихся различных методов обработки данных при прогнозировании длительной прочности наибольшее распространение в мире получили так называемые параметрические методы, лучшие из которых, в частности методы Ларсона-Миллера, Мэнсона-Хэферда, Орра-Шерби-Дорна, используются до сих пор.

Заметим, что экстраполяция данных испытаний длительностью 5-10 тыс. ч на срок службы 100 тыс. ч, даже с использованием лучших в мире методов, все-таки была в определенной степени условной, так как не могла быть проверена экспериментально ввиду отсутствия на то время экспериментов такой большой длительности.

Эта неопределенность по мере приближения к исчерпанию расчетного ресурса (100 тыс. ч) заставляла искать новые подходы к оценке состояния металла, отработавшего расчетный срок, и возможности продления ресурса.

Следует отметить, что накопленные на электростанциях данные о состоянии оборудования и результаты исследований, проведенных отраслевыми и академическими научно-исследовательскими организациями, показали, что в течение расчетного срока не происходит такого снижения свойств металла, которое можно было бы считать критическим. Было признано, что после наработки 100 тыс. ч по состоянию металла эксплуатация оборудования может продолжаться.

На базе полученных данных был введен новый расчетный срок эксплуатации – 200 тыс. ч, исходя из которого в последующем велись расчеты на прочность при создании нового оборудования.

Позже, на базе накопленного опыта были введены и другие временные рубежи для корректировки контроля и отслеживания темпов исчерпания металлом своего потенциального ресурса – парковый и индивидуальный. Таким образом, сложилось 3 этапа жизненного цикла энергетического оборудования по срокам: 100 (или 200) тыс. ч (расчетный ресурс); парковый ресурс; индивидуальный ресурс.

Под парковым ресурсом в теплоэнергетике подразумевается продолжительность эксплуатации однотипных по конструкции, материалам и условиям эксплуатации элементов теплоэнергетического оборудования, в течение которой обеспечивается их безаварийная работа при соблюдении стандартных требований, предъявляемых к контролю металла, эксплуатации и ремонту энергоустановок.

Индивидуальный ресурс – назначенный расчетный ресурс конкретного объекта, определенный с учетом фактических свойств металла, геометрических размеров и условий его эксплуатации.

Понятия парковый и индивидуальный ресурсы распространяются в основном на оборудование, работающее в условиях ползучести. Работоспособность других элементов, исчерпание ресурса которых происходит под влиянием других факторов (коррозия, эрозия, другие виды исчерпания ресурса), определяется по результатам периодических обследований их фактического состояния. Прогноз, который при этом дается, как правило, не превышает одного межремонтного периода.

После достижения паркового ресурса проводится углубленное диагностирование конкретных узлов энергоустановок и устанавливается индивидуальный ресурс элементов энергооборудования.

При расчете индивидуального (остаточного) ресурса учитываются фактические условия эксплуатации, результаты контроля геометрических параметров элементов и остаточной деформации, уровень фактических служебных характеристик, включая жаропрочность металла (при наличии этих данных).

Индивидуальный ресурс для конкретного элемента не является постоянной, однажды рассчитанной величиной. Он может уточняться по мере наработки

при введении в расчет новых исходных данных, в том числе и по фактическим механическим свойствам.

Таким образом, можно констатировать, что если проблема продления ресурса оборудования ТЭС с расчетного срока эксплуатации в 100 тыс. ч на срок 200 тыс. ч была решена практически безболезненно, то при прогнозировании работоспособности оборудования на сроки до 300 тыс. ч и более ситуация заметно осложняется, возникает целый ряд существенных проблем.

Многие ранее успешно применявшиеся методы и модели прогнозирования, в том числе и лучшие в мире параметрические методы, утрачивают свои позиции. Ни один из этих методов не прошел экспериментального обоснования и проверки, поскольку отсутствовали соответствующие экспериментальные данные столь длительных испытаний.

Нормативные документы, разработанные более 30 лет назад, в которых регламентирующие расчеты и прогнозирование длительной прочности основывались на данных экспериментов длительностью до 15 тыс. ч, не могли эффективно применяться при прогнозировании на 300 тыс. ч и более. Использование при этом справочных данных могло бы привести к существенным ошибкам.

Решение проблемы прогнозирования на большие сроки требовало новых подходов и принципов, соответствующего научного обоснования. Разрабатываемые новые методы прогнозирования должны использовать комплексные данные о кратковременной и длительной прочности, пластичности, структуре и пр. При этом они должны быть хорошо экспериментально обоснованы и базироваться на анализе и учете известных в мире данных экспериментальных исследований длительностью 100 тыс. ч и более (до 150-200 тыс. ч)

Всем этим требованиям удовлетворяет разработанный в Институте проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины В. В. Кривенюком метод прогнозирования длительной прочности и ползучести материалов – метод базовых диаграмм (МБД) [2].

В качестве основы МБД используется предложенное В. В. Кривенюком уравнение базовых диаграмм

$$\lg \sigma'_t = \lg \sigma_1 - \frac{3,6 - \lg \sigma_1}{12} [\lg t + 0,1 (\lg t)^2], \quad (1)$$

где σ'_t – текущее напряжение по базовой диаграмме, МПа; σ_1 – напряжение, которое приводит к разрушению в течение одного часа, МПа; t – время до разрушения, ч.

На рис. 1 показано схематическое представление базовых диаграмм при произвольно заданных значениях σ_1 , рассчитанных с помощью (1). Без второго слагаемого в скобках они были бы прямолинейными.

Особенности отдельных участков экспериментальных диаграмм длительной прочности определяются с помощью характеристик

$$\beta_{\sigma} = \frac{\sigma_{at} - \sigma_{t\sigma}}{\sigma_{at} - \sigma'_t} = \frac{\Delta \sigma_{t\sigma}}{\Delta \sigma'_t}, \quad (2)$$

где σ_{at} — координата общей исходной точки сравниваемых участков экспериментальной и базовой диаграмм;

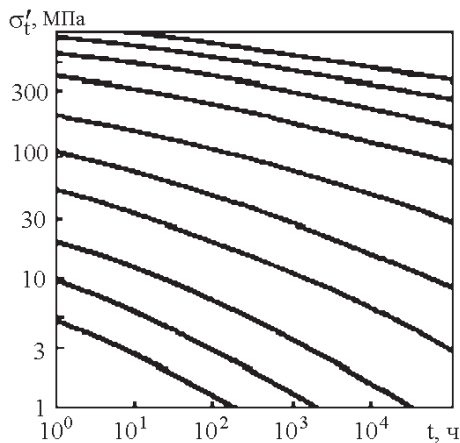


Рис. 1. Схематическое представление базовых диаграмм длительной прочности, рассчитанных по уравнению (1) при различных заданных значениях σ_1

$\Delta\sigma_{t_3}$, σ'_t – координаты правых границ; $\Delta\sigma_{t_3}$ и $\Delta\sigma'_t$ – понижение длительной прочности по экспериментальной и базовой диаграммам за одно и то же время от αt до t_3 .

Если в формулу (2) вместо σ_{t_3} подставить искомое напряжение σ'_t , то получим формулу для его прогнозирования в виде

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

где β – усредненное значение β_3 .

Формулы (1) и (2) дают возможность представлять информацию об отдельном участке экспериментальной диаграммы в виде точки с координатами $(\beta_3, \sigma_{\alpha t})$. Это облегчает сравнительный анализ особенностей больших массивов экспериментальных данных и создает благоприятные условия для перехода к качественно новому их системному анализу. Важными элементами такого анализа являются оценка и учет для различных групп материалов характеристик β , β_3 , Δ_1 , Δ_2 , S_1 , S_2 , где

$$\Delta_1 = \lg t - \lg t_3, \quad (4)$$

$$\Delta_2 = \frac{\sigma_t - \sigma_{t_3}}{\sigma_{t_3}}, \quad (5)$$

$$S_m = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta_m)_i^2}, \quad (6)$$

и соответственно S_1 рассчитывается при $m = 1$ и подстановке значений погрешностей прогнозирования по логарифму времени Δ_1 , а S_2 – при $m = 2$ и подстановке значений погрешностей по напряжению Δ_2 . В целом значения β_3 изменяются в пределах от 0 до 2,3. Минимальными являются значения $\beta_3 \approx 0$ в тех случаях, когда временные процессы разупрочнения практически не проявляются и экспериментальные диаграммы являются близкими к горизонтальным. На практике значения β_3 изменяются от 0,6-0,8 до 2,3. Причем для сплавов с твердорастворным упрочнением наиболее вероятными являются значения $\beta = 0,9-1,3$; а для дисперсно-упрочненных – $\beta = 1,4-1,7$. Указанные интервалы значений β опре-

деляются в основном возрастанием экспериментальных значений β_3 по мере возрастания температуры и длительности нагружения. Соответственно уточнение таких значений β способствует улучшению прогнозирования длительной прочности.

На основании выполненного большого объема прогнозирования показано, что при неравенстве

$$\beta - (0,3 \dots 0,4) < \beta_3 < \beta + (0,3 \dots 0,4) \quad (7)$$

прогнозирование с помощью МБД выполняется при погрешности

$$S_2 \leq 0,1 \dots 0,12. \quad (8)$$

На основе разработанного метода базовых диаграмм был выполнен системный анализ и обработка более 1100 уникальных и достаточно представительных диаграмм длительной прочности при продолжительности экспериментов до 100-150 тыс. ч, которые были получены в японском Национальном институте материаловедения (NIMS – до 2001 г. RNIM). Это позволило существенно повысить эффективность, точность и надежность прогнозирования длительной прочности на срок службы до 300 тыс. ч по сравнению с лучшими в мире параметрическими методами.

Разработанный метод прогнозирования использовали для формирования базовых данных о ползучести и длительной прочности сталей и сплавов тепловых электростанций при длительности высокотемпературного нагружения до 300 тыс. ч [3].

Для наиболее распространенных сталей и сплавов в отечественной теплоэнергетике были выбраны зарубежные аналоги с достаточно полным комплексом данных о свойствах при длительности нагружения до 100-150 тыс. ч. Затем для отечественных сталей и сплавов выполнено прогнозирование ползучести и длительной прочности на срок эксплуатации до 300 тыс. ч. Причем выбор аналогов и прогнозирование осуществлялись не только по данным о длительной прочности, а по комплексу различных физико-химических, механических и структурных характеристик [4, 5].

Для указанных сталей выполнен комплексный анализ данных о механических свойствах, в том числе о длительной прочности и ползучести, которые имелись в различных источниках, в первую очередь в справочнике [1], а также в журналах NIMS, в которых выбирались аналоги отечественным материалам.

В справочнике [1] приведены характеристики различных свойств сталей и сплавов, в том числе характеристики ползучести и длительной прочности. Следует отметить, что отдельные прогнозируемые данные по длительной прочности и ползучести на сроки 10 тыс. ч и 100 тыс. ч требуют существенных уточнений, поскольку, как было отмечено выше, в то время имелись данные об испытаниях длительностью лишь 5-10 тыс. ч.

В журнале NIMS приводится весьма подробная информация о различных свойствах сталей и сплавов, в том числе химсостав, характеристики кратковременной

прочности и пластичности, ползучести, длительной прочности. Причем информация имеется не для одного, а для нескольких (до десяти) состояний (плавов) каждой марки стали или сплава. Приводятся уникальные экспериментальные данные испытаний длительностью до 150-200 тыс. ч, а также прогнозные характеристики на срок до 300 тыс. ч, полученные с помощью лучших параметрических методов.

На основании обработки и анализа имеющейся информации с помощью метода базовых диаграмм для распространенных сталей и сплавов теплоэнергетики были получены подробные данные в виде таблиц и графиков о ползучести и длительной прочности этих материалов, в том числе и расчетные прогнозируемые данные на срок до 300 тыс. ч.

Как пример, для одного произвольно выбранного материала – легированной конструкционной стали 25X1M1Ф, ниже приведены некоторые данные (рис. 2-5, табл. 1-2) из обширной информации, полученной для этой стали.

Следует отметить, что приведенные данные для стали 25X1M1Ф в основном являются расчетными. В [6] для 9 плавов зарубежной стали-аналога представлены подробные экспериментальные данные по кратковременной и длительной прочности, в том числе и результаты испытаний на длительную прочность продолжительностью до 150 тыс. ч и более.

Эта уникальная информация использована при получении приведенных выше таблиц и графиков.

Эти комплексные базовые данные для наиболее распространенных отечественных сталей теплоэнергетики могут служить основой для системной переработки отраслевой нормативно-технической документации в части оценки остаточного ресурса действующего оборудования тепловых электростанций.

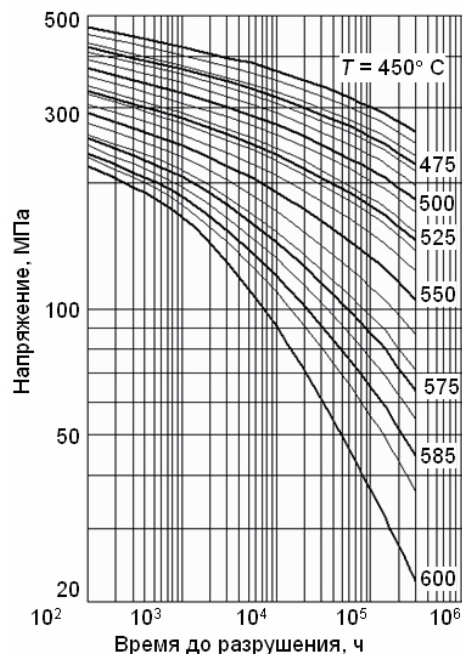


Рис. 3. Длительная прочность стали 25X1M1Ф

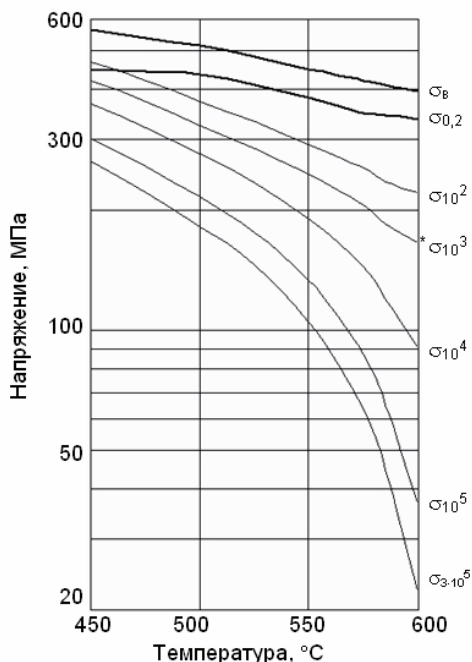


Рис. 2. Кратковременная и длительная прочность стали 25X1M1Ф (* σ_{10^3} – условный предел длительной прочности (величина напряжения, вызывающая разрушение при определенной температуре за время 1000 ч), МПа)

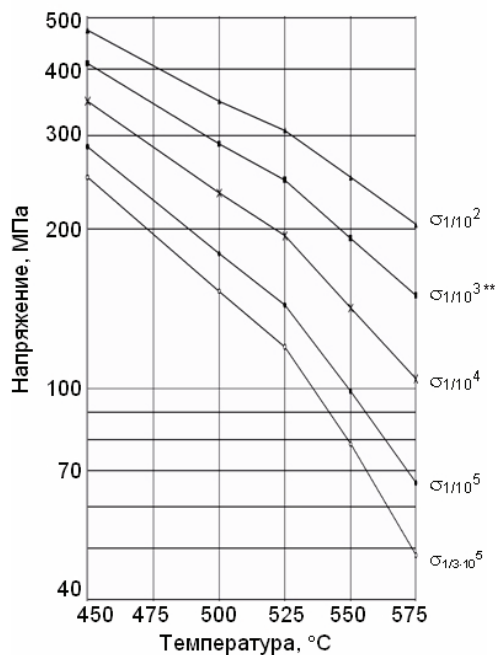


Рис. 4. Пределы ползучести стали 25X1M1Ф (** σ_{10^3} – условный предел ползучести (величина напряжения, при которой деформация ползучести при определенной температуре достигает 1 % за время 1000 ч), МПа)

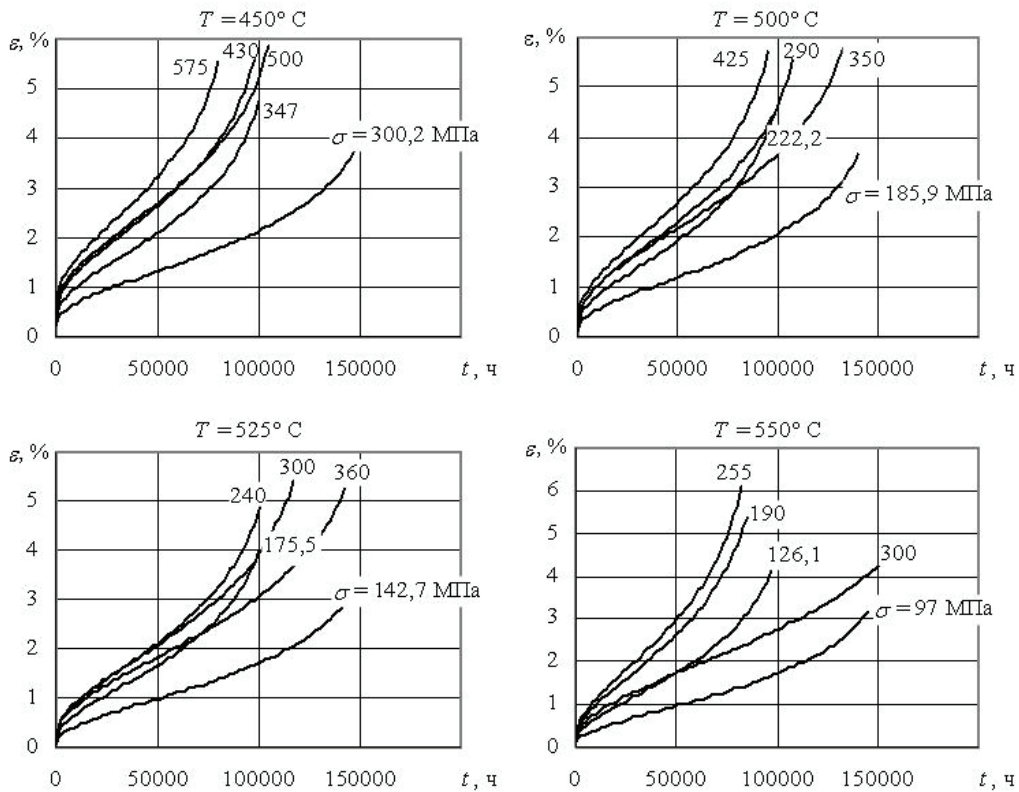


Рис. 5. Кривые ползучести стали 25X1M1Ф при различных температурах (действительное время (по оси абсцисс) при максимальном напряжении составляет $0,001t$; при последующих напряжениях соответственно $0,01t$; $0,1t$; t ; $2t$)

Таблица 1

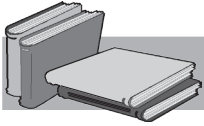
Длительная прочность стали 25X1M1Ф

$T, ^\circ\text{C}$	$\sigma_{10^2}, \text{МПа}$	β_0	$\sigma_{10^3}, \text{МПа}$	β_1	$\sigma_{10^4}, \text{МПа}$	β_2	$\sigma_{10^5}, \text{МПа}$	β_3	$\sigma_{2 \cdot 10^5}, \text{МПа}$	β_4	$\sigma_{3 \cdot 10^5}, \text{МПа}$
450	575	0,71	500	0,70	430	0,90	347,0	1,10	318,8	1,30	300,2
460	545	0,74	470	0,72	401	0,92	320,1	1,12	292,9	1,32	275,0
470	515	0,76	440	0,74	372	0,94	293,3	1,14	267,2	1,34	250,0
480	485	0,79	410	0,73	345	0,93	270,2	1,13	245,4	1,33	229,2
490	455	0,82	380	0,76	316	0,96	243,5	1,16	219,9	1,36	204,6
500	425	0,85	350	0,75	290	0,95	222,2	1,15	200,1	1,35	185,9
510	399	0,85	327	0,77	268	0,97	202,3	1,17	181,3	1,37	167,7
520	373	0,77	310	0,81	250	1,01	184,8	1,21	164,2	1,41	151,2
525	360	0,75	300	0,83	240	1,03	175,5	1,23	155,4	1,43	142,7
530	348	0,74	290	0,85	230	1,05	166,2	1,25	146,6	1,45	134,2
540	320	0,68	270	0,89	210	1,09	147,8	1,29	129,1	1,49	117,5
550	300	0,64	255	1,00	190	1,20	126,1	1,40	108,0	1,60	97,0
560	283	0,63	240	1,12	170	1,32	105,0	1,52	87,8	1,72	77,6
570	272	0,68	227	1,20	155	1,40	90,7	1,60	74,5	1,80	65,1
575	265	0,69	220	1,28	145	1,48	80,5	1,68	64,9	1,88	56,1
580	259	0,73	212	1,35	135	1,55	71,0	1,75	56,3	1,95	48,1
590	246	0,82	195	1,45	117	1,65	55,8	1,85	42,9	2,00	36,1
600	235	0,97	177	1,59	98	1,79	42,0	1,99	30,9	2,00	25,7

Таблица 2

Пределы ползучести стали 25X1M1Ф

$T, ^\circ\text{C}$	$\sigma_{1/10^2}, \text{МПа}$	β_0	$\sigma_{1/10^3}, \text{МПа}$	β_1	$\sigma_{1/10^4}, \text{МПа}$	β_2	$\sigma_{1/10^5}, \text{МПа}$	β_3	$\sigma_{1/3 \cdot 10^5}, \text{МПа}$
450	473	0,66	411	0,70	349	0,79	285	0,99	250
500	348	0,76	289	0,78	234	0,88	180	1,08	152
525	306	0,82	247	0,84	194	0,93	144	1,09	120
550	250	0,93	192	0,94	142	1,00	99	1,20	79
575	204	1,00	150	1,02	105	1,14	66	1,39	49



ЛИТЕРАТУРА

1. Либерман Л. Я., Пейсихис М. И. Свойства сталей и сплавов, применяемых в котлотурбостроении. – Л.: ЦКТИ, вып. 16, ч. 1, – 219 с.: ч. 2, 1966. – 244 с.: ч. 3, 1967. – 180 с.
2. Кривенюк В. В. Прогнозирование длительной прочности тугоплавких металлов и сплавов. Киев: Наук. думка, 1990. – 248 с.
3. 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.
4. Усков Е. И. О корреляции характеристик кратковременной и длительной прочности конструкционных жаропрочных материалов // Надежность и долговечность механизмов, элементов конструкций и биологических систем: Материалы междунар. науч.-техн. конф. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2006. – С. 62-64.
5. Кривенюк В. В., Авраменко Д. С., Усков Е. И. Использование характеристик кратковременной прочности для уточнения прогнозирования ползучести и длительной прочности жаропрочных сталей и сплавов // Науч.-техн. конф. «Металл оборудования ТЭС. Проблемы и перспективы». Сб. докл. – М: ОАО «ВТИ», 2006. – С. 53-59.
6. Data sheets on the elevated-temperature properties of 1Cr-1Mo-0.25V steel // NRI creep data sheets. Tokyo. – 1990. – № 9B. – 45 p.

Анотація

Кривенюк В. В., Усков Є. І.

Щодо проблеми прогнозування тривалої міцності металу енергетичного обладнання на великі терміни експлуатації

Розглянуто різні методи прогнозування тривалої міцності металу енергетичного обладнання, у тому числі найбільш поширені параметричні. Запропоновано новий експериментально обґрунтований підхід до вирішення проблеми прогнозування міцності на великі терміни експлуатації – метод базових діаграм. Розроблений метод використовується для формування базових даних щодо характеристик міцності сталей і сплавів. Як приклад, наведено докладні дані щодо повзучості і тривалої міцності легованої конструкційної сталі 25X1M1Ф при різних температурах і тривалості до 300 тис. годин.

Ключові слова

метал, тривала міцність, повзучість, прогнозування, метод базових діаграм

Summary

Krivenyuk V. V., Uskov E. I.

On the problem of long-term service life prediction of creep rupture strength for the metal in power equipment

Various methods for predicting creep rupture strength of the metal in power equipment, including the most widely used parametric methods, are considered. A new experimentally justified approach to the solution of the problem on the long-term service life prediction of the strength such as the base diagram method is proposed. The developed method is used to generate basic data on the strength characteristics of steels and alloys. Detailed data on the creep and creep rupture strength of alloy steel 25Kh1M1F at different temperatures and duration of up to 300 thousand hours are taken as an example.

Keywords

metal, creep rupture strength, creep, prediction, base diagram method

Поступила 30.01.14