

УДК 539.4

В.В. КРИВЕНЮК, Е.И. УСКОВ, Д.С. АВРАМЕНКО, Г.А. ОКОЛОТ*Институт проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины, Украина***О ПОВЫШЕНИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК СТАТИЧЕСКОГО РАСТЯЖЕНИЯ ДЛЯ УТОЧНЕНИЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОЛЗУЧЕСТИ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ НИКЕЛЯ**

Обосновываются целесообразность согласованного развития эмпирического анализа взаимосвязи характеристик кратковременной и длительной прочности, а также феноменологических исследований с целью возможность повышения эффективности использования данных о кривых статического растяжения для уточнения прогнозирования ползучести жаропрочных сплавов на основе никеля.

статическое растяжение, ползучесть, длительная прочность, жаропрочность, пластичность, уравнения состояния, прогнозирование

Введение

Развитие авиации в значительной мере характеризуется уровнем рабочих параметров ГТД. Повышение жаропрочности никелевых сплавов, широко применяемых в качестве конструкционных материалов, оптимальная оценка их потенциальных возможностей, прогнозирование работоспособности становятся все более сложной задачей.

Для улучшения положения в решении указанных проблем обосновывается необходимость и целесообразность анализа взаимосвязи характеристик кривых статического растяжения (КСР) и ползучести на эмпирической и феноменологической основе.

1. Формулирование проблемы

Сплавы на основе никеля, согласно [1], предназначены преимущественно для лопаток газовых турбин, газотурбинных дисков и крепежных деталей.

Никелевая основа сплава составляет 60-80%. Легирование никелевых сплавов производится преимущественно вольфрамом и молибденом, входящими в твердый раствор, а также титаном и алюминием, образующими интерметаллидные соединения. За рубежом широко применяются никелевые сплавы

с кобальтом, который способствует повышению стабильности твердого раствора и частично входит в интерметаллидную фазу с титаном и алюминием. В большинстве сплавов содержится бор.

В числе никелевых сплавов имеются легированные только титаном (ХН78Т) или только алюминием (ХН69Ю). Наибольшее количество сплавов содержит в своем составе одновременно титан и алюминий (например, ЭИ437Б); эти элементы являются основными упрочняющими добавками, образующими интерметаллидное соединение типа $Ni_3(Ti Al)$, которое при соответствующих температурах выделяется из твердого раствора.

В ряде сплавов кроме титана и алюминия, суммарное содержание которых составляет примерно 3,0%, имеется ниобий, образующий первичные карбиды (ЭИ607А, ЭИ869). В некоторых сплавах кроме значительного количества титана и алюминия (до 4,5%) содержится также большой процент вольфрама и молибдена (до 10%), например, в сплавах ЭИ445Р, ЭИ765, ЭИ893, ЭИ826 и др. В ряде сплавов отсутствует титан, но при этом имеется значительное количество алюминия (4,5%), например, ЭИ827.

Имеются два сплава, содержащих кобальт: в количестве 4 – 6% (ЭИ867) или 12-16% (ЭИ929), при этом содержание титана и алюминия доходит до

5,5-6,5% при наличии вольфрама и молибдена в количестве свыше 10%.

Различие в легировании никелевых сплавов обусловлено необходимостью обеспечить соответствующий уровень жаропрочности при температурах выше 700 °С при возможно большем ресурсе.

Уровень механических свойств сплавов определяется степенью их легирования. Наименее легированные сплавы имеют сравнительно низкий предел текучести – 350 МПа (ЭИ435, ЭИ559А), некоторые сплавы обладают более высоким значением $\sigma_{0,2}$ – до 550 МПа (ЭИ445Р), большинство сплавов имеют предел текучести 650 МПа или несколько выше (ЭИ437Б, ЭИ869, ЭИ765, ЭИ893 и др.), а наиболее высоколегированные сплавы имеют предел текучести на уровне 750 МПа (ЭИ929, ЭИ698 и др.).

В монографии [1] представлены также данные о химсоставе, структуре и механических свойствах никелевых сплавов США и Англии, в справочнике [2] – о свойствах никелевых сплавов ФРГ и т.д. Т.е. в целом число таких материалов является весьма значительным, в связи с чем целесообразно сделать следующие довольно общие замечания.

Различные сплавы на основе никеля могут существенно отличаться по структуре, характеристикам механических свойств, в том числе по характеристикам ползучести и длительной прочности. Вместе с тем для многих из этих сплавов столь важные характеристики, как характеристики ползучести и длительной прочности, представлены на основе экспериментальных данных весьма ограниченной продолжительности порядка 3000...7000 ч, в связи с чем является актуальным прогнозирование ползучести и длительной прочности на большие сроки службы. Ограниченные объемы экспериментальных исследований для отдельных сплавов, характерная фрагментарность исследований при влиянии большого числа факторов на эксплуатационную надежность, ряд других факторов придают особое значение повышению эффективности использования информативности характеристик кратковременной

прочности для оценки и прогнозирования ползучести.

2. Решение проблемы

Многие исследователи показали наличие корреляционной связи между различными характеристиками кратковременной и длительной прочности [3 – 6]. Особый интерес с точки зрения разработки ускоренных методов прогнозирования характеристик длительной прочности представляет, например, связь между пределами прочности σ_e и длительной прочности σ_t [5].

Однако, поскольку часто изменение характеристик прочности взаимосвязано с изменением характеристик пластичности, отмеченную связь, согласно [6], полезно рассматривать в более общем виде:

$$f_1(u_1, u_2, \dots, u_n) f_2(q_1, q_2, \dots, q_n) = P \sim \sigma_t, \quad (1)$$

где u_1, u_2, \dots, u_n – характеристики кратковременной прочности; q_1, q_2, \dots, q_n – характеристики пластичности; P – прочностной параметр.

В [6] представлены результаты исследований с целью уточнения оптимального варианта (1) для практического использования в виде

$$f(\sigma_e) f(\delta, \psi, a) = P \sim \sigma_t, \quad (2)$$

где δ – относительное удлинение после разрушения; ψ – относительное сужение после разрушения; a – ударная вязкость.

Целесообразность комплексного учета кратковременных характеристик пластичности объясняется тем, что в их изменении при изменении условий испытания просматриваются как общие тенденции, так и особенности.

Заслуживает внимания специфика комплексных исследований на основе (1) и (2), результаты которых представлены в [6] и других работах. Вместо общепринятых характеристик δ, ψ, a использовались относительные безразмерные характеристики $\bar{\delta}_0 = \delta / \delta'$; $\bar{\psi}_0 = \psi / \psi'$; $\bar{a}_0 = a / a'$, где δ', ψ', a' – усредненные неизменные характеристики при некоторых предварительно оговоренных условиях.

Безразмерность характеристик позволяет использовать комплексный параметр пластичности, например

$$S_{\delta} = \frac{\bar{\delta}_{\delta} + \bar{\psi}_{\delta} + \bar{a}_{\delta}}{3}. \quad (3)$$

Обобщенный анализ данных для различных классов материалов без учета температуры на основе (2) и (3) в [6] и других работах позволил четко показать, что прогнозирование σ_t по значению σ_{ϵ} , скорректированному по величине S_{δ} в рамках (2), значительно лучше, чем только по σ_{ϵ} . Улучшение обеспечивается обобщенной взаимосвязью прочности и пластичности [7, 8], которая удобно конкретизируется на основе (1) – (3). Т.е., если кратковременная прочность выше некоторого общего среднего значения, то характеристики пластичности (δ, ψ, a) ниже соответствующих средних в рамках конкретизированного (2), что и улучшает прогнозирование длительной прочности с помощью (2). Однако целесообразность развития исследований на основе (2) и (3) в более общем виде определяется не только рассмотренным эмпирическим улучшением прогнозирования, но и созданием основы для реализации улучшения прогнозирования путем постепенных уточнений феноменологиче-

ского, физического характера.

Обобщенный и вместе с тем достаточно четкий анализ показал, что в рамках (2) при $\sigma_{\epsilon} > \sigma'_{\epsilon}$, где σ'_{ϵ} – общее среднее, $\psi < \psi'$, или наоборот, т.е. $\sigma_{\epsilon} < \sigma'_{\epsilon}$ при $\psi > \psi'$. Подобная зависимость выполнялась в 250 случаях из 337. Для характеристик δ это выполнялось в 232 случаях из 349, для характеристик a – в 226 случаях из 336 [9]. При этом следует подчеркнуть, что по мере увеличения числа случаев выполнения рассматриваемого условия прогнозирование длительной прочности по характеристикам кратковременной прочности улучшается.

Более существенное улучшение прогнозирования за счет дополнительного учета характеристики ψ вполне логично по сравнению с учетом только δ в связи с несравненно большим искажением δ вследствие неравномерности деформирования по длине рабочей части испытываемого образца. По крайней мере по этой причине должна уточняться величина δ и в какой-то мере такие уточнения вполне возможны. Однако только этим неопределенности, на которые вообще не обращается внимание, далеко не исчерпываются.

Таблица 1

Свойство стали 12Х1МФ паропроводов в исходном состоянии и после наработки

№ паропровода	Время нагружения, тыс. ч	$\bar{\delta}_{\delta} = \frac{\delta}{\delta'}$	$\bar{\psi}_{\delta} = \frac{\psi}{\psi'}$	$\bar{a}_{\delta} = \frac{a}{a'}$	$\frac{1}{3}(\bar{\delta}_{\delta} + \bar{\psi}_{\delta} + \bar{a}_{\delta})$
1	0,000	0,77	0,62	0,76	0,72
	28,800	0,95	0,8	0,76	0,84
	66,700	1,02	0,74	1,19	0,98
2	0,000	0,67	0,83	0,83	0,78
	22,300	1,01	1,0	0,75	0,92
	65,900	0,93	0,7	0,97	0,87
3	0,000	0,86	0,9	0,73	0,83
	59,300	1,4	0,99	1,12	1,17
4	19,200	0,87	1,0	0,92	0,93
	47,800	1,08	0,8	0,72	0,87
	103,400	0,89	0,65	1,23	0,92
5	19,200	0,76	1,17	1,17	1,03
	46,000	1,24	0,94	0,76	0,98
	103,400	1,0	0,73	1,4	1,04
6	0,000	1,05	1,29	1,16	1,17
	93,700	1,01	0,85	1,4	1,09
7	0,000	1,1	0,76	0,75	0,87
	93,700	0,9	0,8	0,99	0,9
8	0,000	1,05	0,8	0,8	0,88
	93,700	0,91	0,74	0,95	0,87

В табл. 1 приведены результаты производственного контроля высокотемпературного состояния трубопроводов в течение длительного времени. Вполне логично предположить, что изменение характеристик пластичности в течение длительной службы должно быть монотонным. Но как следует из данных табл. 1, этому условию соответствует в большей мере изменение общего параметра пластичности S_D по сравнению с изменением каждой из характеристик пластичности в отдельности. Это дает основание утверждать, что индивидуальные особенности сопротивления деформированию и разрушению отдельных материалов могут контролироваться достаточно точно лишь комплексом каких-то характеристик.

В данном случае можно лишь представляется, что прогнозирование длительной прочности на основе соотношения (2) может существенно уточняться. К числу первых и наиболее существенных может относиться уточнение в рамках (3) роли каждой из характеристик пластичности δ , ψ , a . Возможны и другие уточнения. К ним, в частности, следует отнести исследование взаимосвязи характеристик прочности и пластичности при кратковременном растяжении материалов [10].

Обычно широко используются данные о σ_s , δ , ψ , a . В работе [10] акцентируется внимание на важности учета параметров описания упрочнения h и разупрочнения r , устанавливаемых следующим образом.

Для описания процесса ползучести использовано обоснованное в [12, 13] уравнение

$$\dot{\varepsilon}^{1-\gamma} \dot{\varepsilon}^{\gamma} = \left[\frac{\sigma_0 / \sigma'}{\left(1 - \frac{r\varepsilon}{1+r\varepsilon} - \alpha \sigma_0 t^{1/3}\right) \left(1 + \frac{h}{\sigma_0^2} \varepsilon\right)^{n/2}} \right]^m, \quad (4)$$

где ε , $\dot{\varepsilon}$ – пластическая деформация при ползучести и ее скорость; h , r – характеристики деформационного упрочнения и разупрочнения; σ' – напряжение,

при котором $\dot{\varepsilon} = 1 \text{ ч}^{-1}$; σ_0 – исходное условное напряжение; t – текущее время; $\gamma = 0,1$; $n = 1$; α , m – постоянные при $T = \text{const}$.

Преобразования выражения (4) на основе предположений о том, что при напряжении, равном пределу прочности, $\dot{\varepsilon} = 1 \text{ ч}^{-1}$, при малых длительностях нагружения можно пренебречь временной поврежденностью и принять $\alpha = 0$, приводят к формуле для описания КСР в виде

$$\sigma = \frac{(\sigma_{0,2}^2 + h\varepsilon)^{1/2}}{1 + r\varepsilon}, \quad (5)$$

где ε – текущая деформация за вычетом упругой деформации и деформации текучести (0,2%).

На рис. 1 приведены экспериментальные [11] и расчетные КСР стали 25X1M1Ф при различных температурах. Для каждой КСР с помощью формулы (5) определяли коэффициенты h и r , а затем рассчитывали координаты представленных на рис. 1 точек.

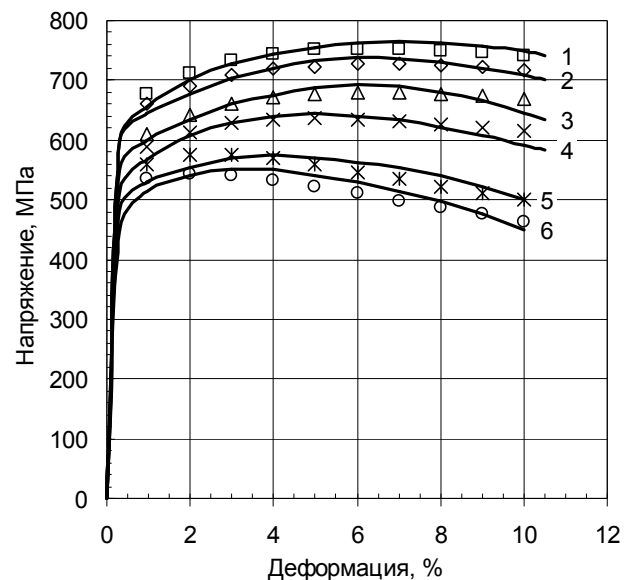


Рис. 1. Экспериментальные (сплошные линии) и расчетные (точки) диаграммы растяжения стали 25X1M1Ф при различных температурах и значениях:

- 1 – 20 °C, $1,6 \times 10^7$, 9; 2 – 100 °C, $1,5 \times 10^7$, 9;
- 3 – 200 °C, $1,3 \times 10^7$, 9; 4 – 400 °C, $1,3 \times 10^7$, 10,5;
- 5 – 500 °C, 2×10^7 , 20;
- 6 – 540 °C, $1,7 \times 10^7$, 20

Как видно, расчетные кривые находятся в удовлетворительном соответствии с экспериментальными. При этом, конечно, следует учитывать, что истинные диаграммы обычно резко отличаются от приведенных на рис. 1 условных диаграмм, поскольку истинные напряжения на втором участке КСР могут значительно превышать величину σ_{θ} . Заметим, что при описании ползучести имеет место аналогичная картина, т.е. на ускоренной стадии ползучести также имеют место уменьшение поперечного сечения образца и локализация пластической деформации. Поскольку отмеченные неопределенности весьма существенны, достаточно строгое описание КСР практически невозможно. В этой связи упрощения, часто используемые при развитии исследований по уточнению особенностей пластического деформирования при кратковременном растяжении и в условиях ползучести, могут быть весьма полезными. Следует заметить, что численные значения постоянных h и r устанавливались методом эмпирического подбора, который должен обеспечивать как можно более точное описание стадии упрочнения. В соответствии с этими предпосылками в работе [9] рассматривалась возможность использования данных о кратковременном деформировании для описания закономерностей ползучести.

Постоянные h и r для расчетных КСР (рис. 2) выбирались с учетом того, что их одинаковое пропорциональное уменьшение приводит к росту величины ε' при неизменных значениях $\sigma_{0,2}$ и σ_{θ} (ε' – деформация, при которой достигается предел прочности σ_{θ}).

Из рис. 2 следует, что при одних и тех же значениях $\sigma_{0,2}$ и σ_{θ} могут быть получены существенно различные расчетные КСР, для которых величины ε' явно отличаются друг от друга. Следовательно, обычно представляемые данные о σ_{θ} , $\sigma_{0,2}$, δ , ψ недостаточно информативны. О такой информативности можно судить на основании следующего.

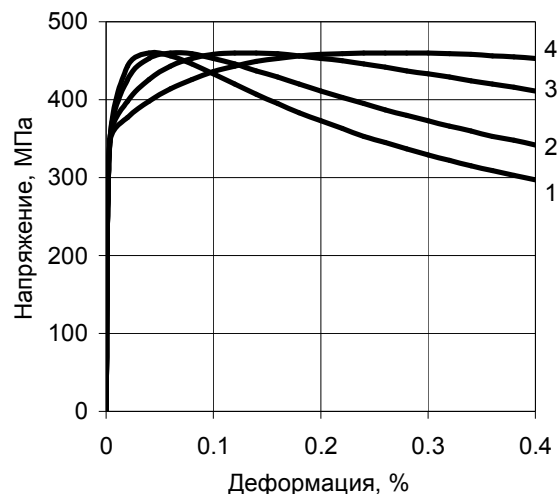


Рис. 2. Расчетные кривые статического растяжения при идентичных значениях σ_{θ} , $\sigma_{0,2}$, а также при значениях h и r , равных: 1 – $1,05 \times 10^7$, 15; 2 – $0,7 \times 10^7$, 10; 3 – $0,35 \times 10^7$, 5; 4 – $0,175 \times 10^7$, 2,5

На рис. 3 приведены экспериментальные и рассчитанные с помощью уравнения (4) кривые ползучести. Расчетные кривые построены при различных значениях h и r , причем при описании кривых ползучести использовались такие же значения h и r , как и при описании КСР (рис. 2). Кривые ползучести рассчитываются на основе представлений о равномерном деформировании по объему рабочей части образца, что не подтверждается экспериментально, особенно при рассматриваемых длительных испытаниях.

Поэтому ставилась задача выявления возможностей уточнения аналитического описания кривой ползучести. Кроме того, учитывая разброс экспериментальных данных, при оценке соответствия расчетных и экспериментальных кривых ползучести значительное внимание уделялось величине времени до разрушения. Данные рис. 3 позволяют утверждать, что экспериментальная кривая ползучести, представляемая точками, достаточно близка к одной из расчетных. Однако для оценки того, какая из приведенных на рис. 2 КСР близка к экспериментальной, необходимо, по крайней мере, располагать данными о ε' .

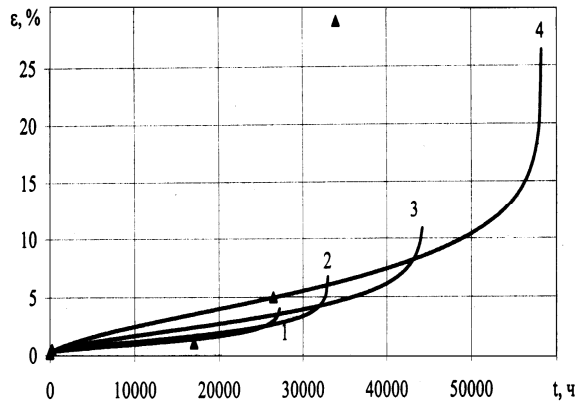


Рис. 3. Экспериментальные по данным [14] точки и расчетные (сплошные) кривые ползучести при общих значениях

$$\sigma' = \sigma_0 = 461 \text{ МПа}, \sigma = 265 \text{ МПа};$$

$$\alpha = 5,5 \times 10^{-3}; N = 34$$

и значениях h и r , равных:

$$1 - 1,05 \times 10^7, 15; 2 - 0,7 \times 10^7, 10;$$

$$3 - 0,35 \times 10^7, 5; 4 - 0,175 \times 10^7, 2,5$$

В целом результаты исследования [10] приводят к целесообразности развития представлений о взаимосвязи как между характеристиками прочности и пластичности, устанавливаемыми по КСР, так и между характеристиками кратковременной и длительной прочности.

Особенность выполненного исследования заключается в практически приемлемой апробации подхода к описанию и прогнозированию ползучести жаропрочных сталей и сплавов при больших длительностях нагружения на основе обобщенного эмпирического анализа взаимосвязи характеристик кратковременной и длительной прочности с последующим взаимосвязанным переходом к описанию закономерностей пластического деформирования при статическом растяжении и ползучести.

Данные рис. 4 приводят к выводу о существовании корреляционной зависимости между значениями пределов прочности и текучести, а данные рис. 5 – о зависимости между пределами текучести и прочности и параметром упрочнения h . Вместе с тем оказалось довольно неожиданным практически полное отсутствие взаимосвязи между характеристиками кратковременной прочности и деформационного разупрочнения.

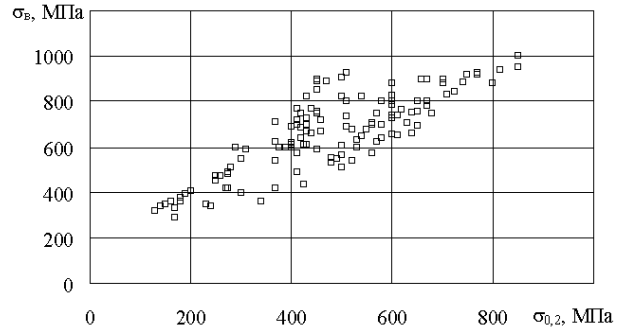


Рис. 4. Обобщенная зависимость между характеристиками σ_0 и $\sigma_{0,2}$ по данным [11]

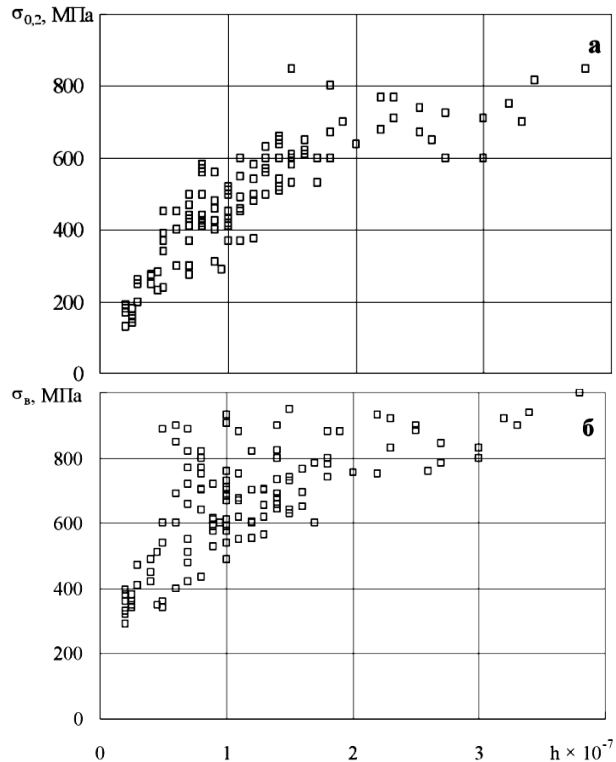


Рис. 5. Обобщенные зависимости между характеристиками $\sigma_{0,2}$ и h (а), σ_0 и h (б) по данным [11]

Это очевидное противоречие приводит к следующему предположению. Постоянные деформационного упрочнения при кратковременном растяжении и ползучести в значительной мере определяются по начальным участкам соответствующих зависимостей, когда еще сравнительно слабо проявляется неравномерность деформирования по длине рабочей части образца. Характеристики деформационного разупрочнения определяются в основном на заключительных стадиях так называемого неустойчивого деформирования при отмеченной значительной неоднородности деформирования. и по длине и

объему образца, сопровождающейся часто выраженной локализацией.

Заключение

Для конструкционных жаропрочных сплавов ГТД характерны малодеформационные разрушения, при которых особенно сложным является прогнозирование закономерностей пластического деформирования и длительного разрушения. Следует отметить, что при наличии в мире большого числа жаропрочных никелевых сплавов длительность их испытаний была сравнительно небольшой.

Рассмотренный выше переход к обобщенному анализу взаимосвязи между характеристиками кратковременной и длительной прочности, к прогнозированию длительной прочности на основе принципа базовых соотношений и соответствующий анализ больших объемов экспериментальных данных приводят к выводу, что специфика длительных малодеформационных разрушений является достаточно общей для различных классов материалов.

Учитывая, что длительность испытаний материалов, применяемых в теплоэнергетике несравненно больше, целесообразно применение рассмотренных расчетных методик и для жаропрочных сплавов ГТД.

Литература

1. Химушин Ф.Ф. Жаропрочные стали и сплавы. – М.: Металлургия. – 646 с.
2. Ключ сталей / Ц.В. Вегст // Справочник «Stahlschüssel Wegst GmbH». – Дюссельдорф, 1989.
3. Бугай Н.В., Шкляр М.И. Неразрушающий контроль металла теплоэнергетических установок. – М.: Энергия, 1978. – 120 с.
4. Parker R.J. Estimation of stress-rupture properties from hot hardness tests // Metallurgia. – 1963. – 67, N 403. – P. 219 – 223.
5. Новик Ф. С., Клыпин Б. А. О корреляционных связях между свойствами некоторых жаропрочных сплавов // Пробл. прочности. – 1972. – № 9. – С. 84 – 89.
6. Кривенюк В.В. Прогнозирование длительной прочности тугоплавких металлов и сплавов. – К.: Наук. думка, 1990. – 248 с.
7. Мороз Л. С. К вопросу о времени и зависимости прочности металлических материалов // Пробл. прочности. – 1972. – № 12. – С. 81 – 84.
8. Мороз Л. С., Лихачев В. А., Голотин А. Е. О феноменологических теориях кинетического механизма разрушения металлических материалов // Пробл. прочности. – 1977. – № 8. – С. 11 – 17.
9. Кривенюк В.В. О связи кратковременных механических характеристик с длительной прочностью // Пробл. прочности. – 1974. – № 3. – С. 31 – 35.
10. Кривенюк В.В., Усков Е.И., Будинский В.Р. О взаимосвязи характеристик деформирования и прочности при кратковременном растяжении жаропрочных материалов // Пробл. прочности. – 2003. – № 5. – С. 71 – 80.
11. 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.
12. Кривенюк В.В. О взаимообусловленности решения задач описания и анализа особенностей высокотемпературной ползучести металлических материалов // Пробл. прочности. – 1990. – № 5. – С. 31 – 35.
13. Кривенюк В.В. Исследование закономерностей деформирования металлических материалов при различных условиях статического нагружения // Пробл. прочности. – 1990. – № 8. – С. 51 – 58.
14. Data sheets on the elevated-temperature properties of 12Cr stainless steel // NRIM creep data sheet. Tokyo. – 1994. – N 13B. – 44 p.

Поступила в редакцию 27.04.2005

Рецензент: д-р техн. наук Л.А. Хамаза, Институт проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины, Киев.