

Подготовка данных по высокотемпературной ползучести при формировании нормативной документации для металлоемкого энергетического оборудования

В. В. Кривенюк, **Е. И. Усков**, **Д. С. Авраменко**, **Ю. Ю. Садовский**,
Р. П. Приходько

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

Обосновывается, что при формировании нормативной документации характеристики высокотемпературной ползучести металлов и сплавов определяются на основе системного анализа наиболее представительных известных экспериментальных данных о закономерностях пластического деформирования при статическом растяжении и ползучести и данных по длительной прочности. Окончательное их уточнение проводится на основании учета соответствующих результатов эксплуатационного контроля.

Ключевые слова: высокотемпературная ползучесть, прогнозирование, метод базовых диаграмм, нормативные документы.

Ранее [1] отмечалось, что прогнозирование высокотемпературной длительной прочности металлов и сплавов на 300 тыс. ч и более затруднено из-за влияния различных факторов. В связи с этим обосновывается необходимость формирования системного подхода к прогнозированию закономерностей пластического деформирования и длительного разрушения на основе обработки и анализа соответствующего комплекса экспериментальных данных. Заметим, что роль второстепенных факторов, которым практически не уделяется должного внимания, является во многих случаях весьма существенной. Поэтому для более четкой конкретизации роли как основных, так и второстепенных факторов необходимо разработать специальный системный подход и сформировать достаточно представительный комплекс экспериментальных данных. В подтверждение этого отметим, что современная теория описания закономерностей ползучести формировалась в середине прошлого века [2–4], когда столь большие длительности нагружения не были так актуальны, как в настоящее время. О возможных последствиях такого положения можно судить в какой-то мере на основании анализа приведенного ранее [5] примера использования уравнения [6]

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

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

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

$$\varepsilon_k = \frac{n-1}{\alpha k \sigma}, \quad (2)$$

где ε_k – ордината точки перегиба.

Из (2) следует, что при $\varepsilon_k \approx \text{const}$ между параметрами n и k существует некоторая взаимосвязь. Однако на практике такая взаимосвязь полностью игнорируется. Например, при определении параметров, ответственных за описание третьей стадии ползучести (в рассматриваемом случае это параметр k), пренебрегают информацией о первой стадии (и соответственно данными о n), как и при описании первой стадии пренебрегают информацией о третьей стадии (в частности, величиной k). Приведенные данные (рис. 1) позволяют показать, насколько существенна взаимосвязь между параметрами n и k .

На рис. 1 представлены кривые ползучести, рассчитанные с помощью уравнения (1). Видно, что для этих кривых при близких второй и третьей стадиях ползучести величина k различается в пять раз. Значение $k = 25$, как следует из (2), объясняется в основном большей величиной постоянной n , что не может быть оправдано с физической точки зрения [5].

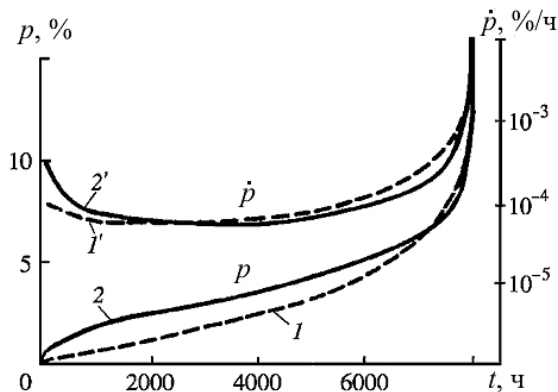


Рис. 1. Кривые ползучести (1 и 2) и ее мгновенной скорости (1', 2'), рассчитанные с помощью уравнения (1), при напряжении 130 МПа и характеристиках жаропрочности α , n , $-\lg m$, k , равных соответственно 0,7; 1,5; 10,4; 5 (1 и 1') и 0,3; 4; 12,776; 25 (2 и 2').

Следовательно, если в рассматриваемом примере есть истинное значение k , которое отвечает предполагаемому в [6] смыслу, то в реальных расчетах оно может отличаться от истинного в несколько раз, причем степень такого искажения практически никогда не контролируется. Кроме того, в этом случае внимание акцентируется на достаточно точном значении постоянной $m = 12,776$ с целью подчеркнуть, что численные значения отдельных констант могут быть существенны при отсутствии какого-либо физического смысла.

Таким образом, использование различных уравнений для описания закономерностей пластического деформирования при произвольном выборе числа постоянных означает разную их чувствительность к особенностям процессов упрочнения и разупрочнения, которая в целом достаточно далека от необходимой, особенно для уточнения прогнозирования свойств металлов при больших длительностях высокотемпературного нагружения. Поэтому

формирование специального комплексного системного подхода к решению рассматриваемой проблемы, один из возможных вариантов которого разработан и представлен ранее [5], имеет существенное значение. Суть подхода заключается в следующем.

Свойства отдельного материала в достаточной мере определяются ограниченным комплексом разных характеристик. При этом одной из важных задач является обеспечение максимально возможной информативности характеристик кратковременной прочности и пластичности, закономерностей пластического деформирования и длительного разрушения как независимо, так и взаимообусловленно. Результаты исследований [5, 7, 8] свидетельствуют о целесообразности оценки длительной прочности на основе прочностного параметра в виде

$$f(\sigma_B)g(\delta, \psi, KCU) = P \sim \sigma_t, \quad (3)$$

где σ_B – предел прочности; δ, ψ – относительные удлинение и сужение после разрушения; KCU – ударная вязкость.

Рациональность комплексного учета характеристик пластичности и ударной вязкости обусловлена тем, что условия испытания влияют на закономерности изменения указанных характеристик, которые имеют как общие, так и специфические тенденции.

Заслуживает внимания рассмотрение специфики комплексных исследований на основе (3), результаты которых представлены в работах [5, 7, 8 и др.]. Вместо общепринятых величин δ, ψ, KCU использовались относительные безразмерные $\bar{\delta} = \delta/\delta', \bar{\psi} = \psi/\psi', \bar{KCU} = KCU/KCU'$, где δ', ψ', KCU' – статистически усредненные значения характеристик пластичности сталей и сплавов, приведенные в основном в [9], при некоторых оговоренных условиях [4]. Безразмерность величин позволяет использовать комплексный параметр пластичности, например, в виде

$$S = \frac{1}{3}(\bar{\delta} + \bar{\psi} + \bar{KCU}). \quad (4)$$

Обобщенный анализ данных для различных классов материалов без учета температуры на основе (3) и (4), проведенный в [5] и других работах, показывает, что прогнозирование с помощью (3) длительной прочности σ_t по значению σ_B , скорректированному по величине S , значительно точнее, чем по σ_B . Точность прогнозирования повышается благодаря взаимосвязи между прочностью и пластичностью [10, 11], которая описывается (3), (4). Если кратковременная прочность материала выше некоторого общего среднего значения, то характеристики пластичности (δ, ψ, KCU) в соответствии с (3) ниже соответствующих средних значений. Учет такой взаимообусловленности и приводит к повышению точности прогнозирования длительной прочности с помощью (3). Можно заключить, что прогнозирование длительной прочности только на основании данных по длительной прочности не оптимально, поэтому прогнозирование должно уточняться по характеристикам пластичности. Однако целесообразность дальнейшего развития исследо-

ваний на основе (3) и (4) в более общем виде может быть обоснована лишь в случае постепенных соответствующих уточнений феноменологического и физического характера.

Одним из наиболее значимых может быть уточнение в рамках (4) роли каждой из характеристик пластичности. Следует подчеркнуть, что значительно повысить эффективность использования характеристик кратковременной прочности и пластичности при прогнозировании длительной прочности можно при их разноплановом и взаимосвязанном применении [12].

Ранее [5] разработан обобщенный подход к описанию как кривых статического растяжения и закономерностей мгновенного пластического деформирования, так и кривых ползучести и длительной прочности. В настоящей работе подход используется для обоснования возможностей повышения точности и надежности описания закономерностей ползучести и длительной прочности при больших сроках высокотемпературного нагружения металлов и сплавов.

Для описания процесса ползучести используется уравнение [5]

$$\dot{\varepsilon}^{1-\gamma} \lg \dot{\varepsilon} = \left[\frac{\sigma_0 / \sigma'}{\left(1 - \frac{r\varepsilon}{1+r\varepsilon} - \alpha \sigma_0 t^{1/3}\right) \left(1 + \frac{h}{\sigma_0^2} \varepsilon\right)^{n/2}} \right]^m, \quad (5)$$

где ε , $\dot{\varepsilon}$ – пластическая деформация и скорость деформации при ползучести; 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 $t = \text{const}$.

Из уравнения (5) можно получить формулу для описания кривых статического растяжения (КСР). Для этого следует выполнить математические преобразования (5) с учетом некоторых предположений, в частности принимаем: $\dot{\varepsilon} = 1 \text{ ч}^{-1}$ при $\sigma' = \sigma_B$, $\alpha = 0$, поскольку при малых длительностях нагружения можно пренебречь временной поврежденностью:

$$\sigma = \frac{(\sigma_{0,2}^2 + h\varepsilon')^{1/2}}{1 + r\varepsilon'}, \quad (6)$$

где $\sigma_{0,2}$ – условный предел текучести; ε' – деформация за вычетом упругой деформации и деформации текучести, для которой условно принято общее значение 0,2%.

В [5] было также обосновано, что формула (6), в свою очередь, может быть использована для описания мгновенного деформирования в виде зависимости

$$\sigma = \frac{(\sigma_y^2 + h_0 \varepsilon_{0п})^{1/2}}{1 + r\varepsilon}, \quad (7)$$

где σ_y – предел упругости; $\varepsilon_{0п}$ – пластическая составляющая деформации при нагружении; h_0 – характеристика упрочнения при мгновенном деформировании.

На рис. 2 приведены экспериментальные [9] и расчетные КСР стали 25Х1М1Ф при различных температурах. Для каждой кривой с помощью формулы (6) определяли коэффициенты h и r , а затем координаты представленных на рис. 2 расчетных точек.

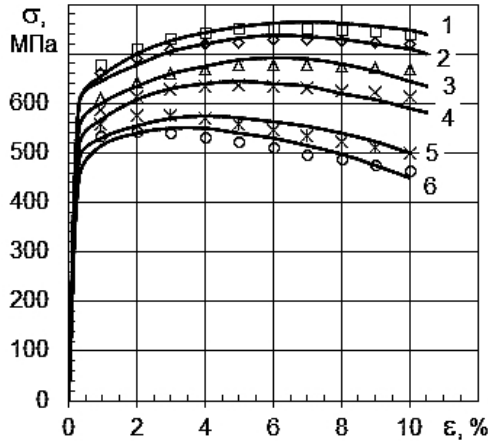


Рис. 2. Экспериментальные [9] (сплошные линии) и расчетные (точки) кривые статического растяжения стали 25Х1М1Ф при различных T , h и r . 1 – $T = 20^\circ\text{C}$, $h = 1,6 \cdot 10^7$, $r = 9$; 2 – $T = 100^\circ\text{C}$, $h = 1,5 \cdot 10^7$, $r = 9$; 3 – $T = 200^\circ\text{C}$, $h = 1,3 \cdot 10^7$, $r = 9$; 4 – $T = 400^\circ\text{C}$, $h = 1,3 \cdot 10^7$, $r = 10,5$; 5 – $T = 500^\circ\text{C}$, $h = 2 \cdot 10^7$, $r = 20$; 6 – $T = 540^\circ\text{C}$, $h = 1,7 \cdot 10^7$, $r = 20$.

Как видно, расчетные точки удовлетворительно соответствуют экспериментальным кривым. При этом, конечно, следует учитывать, что истинные диаграммы обычно значительно отличаются от приведенных на рис. 2 условных, поскольку истинные напряжения на втором участке КСР могут быть выше величины σ_b . При описании ползучести имеет место аналогичная картина, т.е. на ускоренной стадии ползучести также наблюдаются уменьшение поперечного сечения образца и локализация пластической деформации. Поскольку отмеченные неопределенности весьма существенны, достаточно строгое описание КСР практически невозможно. Поэтому упрощения, часто используемые при развитии исследований по уточнению особенностей пластического деформирования, могут быть оправданы как при кратковременном растяжении, так и при ползучести. Заметим, что численные значения постоянных h и r устанавливаются методом эмпирического подбора, который должен обеспечивать как можно более точное описание КСР.

При больших длительностях высокотемпературного нагружения и существенных ограничениях допустимой деформации важным является достаточно точное описание закономерностей мгновенного упругопластического деформирования. Заметим, что устанавливаемая для КСР характеристика деформационного разупрочнения r может использоваться в уравнении (5) для описания ползучести. В свою очередь, с помощью (7) можно исследовать закономерности мгновенного деформирования и уточнить значения мгновен-

ной деформации. Это было обосновано результатами следующих исследований.

С помощью формул (6) и (7) обрабатывались экспериментальные данные [13–15]. Задача сводилась к расчетной оценке численных значений постоянных h_0 , h и r при описании мгновенного деформирования и кратковременного растяжения с последующим установлением взаимосвязи между численными значениями этих постоянных для соответствующих условий нагружения. Следует подчеркнуть, что решение задачи затруднено из-за недостатка экспериментальной информации и соответствующих теоретических разработок. В настоящее время существенно увеличилось количество необходимых экспериментальных данных, о чем можно судить, например, по работам [13–15]. Тем не менее практически в каждом случае имеющаяся информация не является достаточно полной, что приводит к необходимости использования дополнительных упрощений.

На рис. 3–5 показаны экспериментальные [13–15] и рассчитанные с помощью формулы (7) диаграммы мгновенного деформирования зарубежных аналогов отечественных сталей X18H10T, 15X1M1Ф и 25X1M1Ф. В противоположность обычному представлению сведений о мгновенном деформировании в виде одного значения напряжения и соответственно одного значения деформации там же приведены зависимости между напряжением и деформацией, которые в общем случае имеют два выраженных участка: первый участок ниже предела текучести, второй – выше.

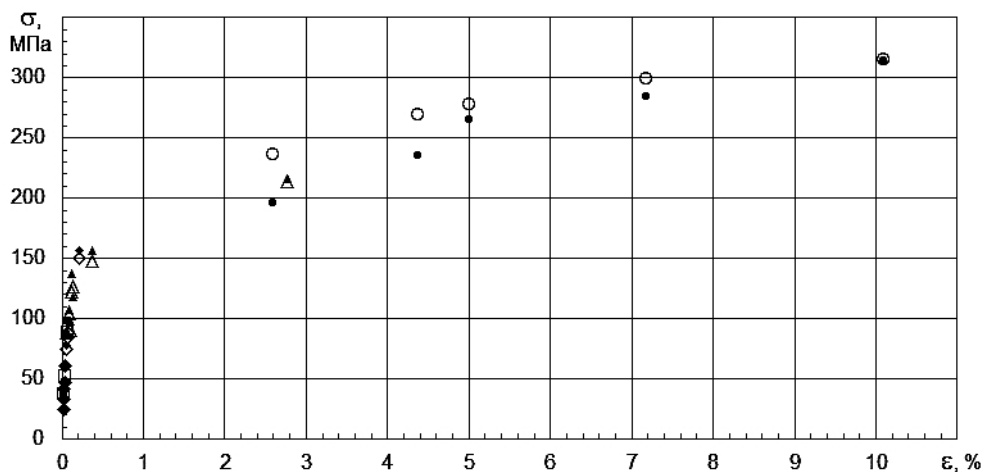


Рис. 3. Экспериментальные (темные точки) и расчетные (светлые точки) диаграммы мгновенного деформирования стали X18H10T (пл. М): ○, ● – $T = 550^{\circ}\text{C}$; △, ▲ – $T = 650^{\circ}\text{C}$; ◇, ◆ – $T = 700^{\circ}\text{C}$; □, ■ – $T = 750^{\circ}\text{C}$.

Процесс деформирования на этих участках существенно различается. На первом участке при напряжениях выше предела упругости и ниже предела текучести происходит в большей степени разупрочнение вследствие появления начальных пластических сдвигов. Вместе с тем после возникновения первых пластических сдвигов в соответствующих участках происходит также процесс упрочнения, однако он не может поддержать то нарастание напря-

жения, которое имеет место при полностью упругом деформировании. Следует отметить, что формулы (6) и (7) в основном используются при описании процесса упрочнения при соответствующих значениях h . В то же время формула (7) с учетом значений h_0 позволяет констатировать, насколько отмеченное деформирование при появлении первых пластических сдвигов и развитии этого процесса отличается от чисто упругого деформирования. Таким образом контролируются особенности деформирования исследуемого материала.

Анализ данных на рис. 3–5 показывает, что с помощью формулы (7) можно довольно подробно и точно описать закономерности мгновенного деформирования. Обратим внимание на следующую особенность использования формулы (7).

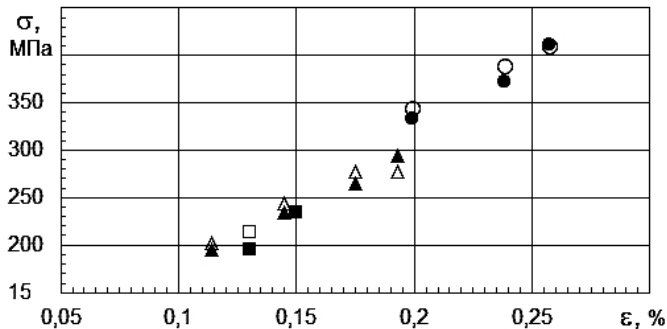


Рис. 4. Экспериментальные (темные точки) и расчетные (светлые точки) диаграммы мгновенного деформирования стали 15X1M1Ф (пл. А): ○, ● – $T = 450^\circ\text{C}$; △, ▲ – $T = 500^\circ\text{C}$; □, ■ – $T = 550^\circ\text{C}$.

При значениях напряжений, меньших или равных пределу текучести, закономерности мгновенного деформирования непосредственно описываются с помощью формулы (7), т.е. так описывается первый участок рассматриваемой зависимости. При этом в (7) используется величина $\varepsilon_{0п} = \varepsilon - \varepsilon_y$. При описании второго участка, т.е. участка при напряжениях выше предела текучести, в качестве величины деформации используется $\varepsilon_{0п} = \varepsilon - \varepsilon_y - 0,002$.

Из рис. 3 следует, что расчетные данные, за исключением двух результатов на втором участке, близки к экспериментальным. Если учесть это, то представляет интерес сравнительный анализ характеристик деформационного упрочнения, приведенных в таблице, где h – величина, установленная по КСР; h_{01} и h_{02} – значения, рассчитанные на основе данных о первом и втором участках кривой мгновенного деформирования. Видно, что значения h_{02} довольно близки к h , в то время как h_{01} значительно их выше.

На рис. 4 и 5 приведены экспериментальные и расчетные кривые мгновенного деформирования зарубежных аналогов сталей 15X1M1Ф [14] и 25X1M1Ф [15], свидетельствующие о хорошем соответствии расчетных характеристик деформационного упрочнения экспериментальным. Для этих сталей в интервале температур 450...550°C значения h_{01} оказались близкими. Для аналога стали 25X1M1Ф при более высоких температурах полученные данные указывают на существенную температурную зависимость h_{01} . Данных по h_{02} в этих случаях нет, поскольку в [14, 15] не приводятся КСР.

Постоянные упрочнения в формулах (6) и (7)

Материал	$T, ^\circ\text{C}$	$h_{01} \cdot 10^{-7},$ (МПа) ²	$h_{02} \cdot 10^{-7},$ (МПа) ²	$h \cdot 10^{-7},$ (МПа) ²
X18H10T, пл. М	550		0,200	0,36
	600	1,2	0,152	0,33
	650	1,2	0,150	0,27
	700	1,5		0,18
	750	1,7		0,11
25X1M1Ф, пл. А	450	7,4		0,62
	500	7,1		0,50
	550	4,8		0,35
	600	2,2		0,31
	650	1,1		0,24
15X1M1Ф, пл. А	450	8,8		0,53
	500	6,8		0,45
	550	5,1		0,36

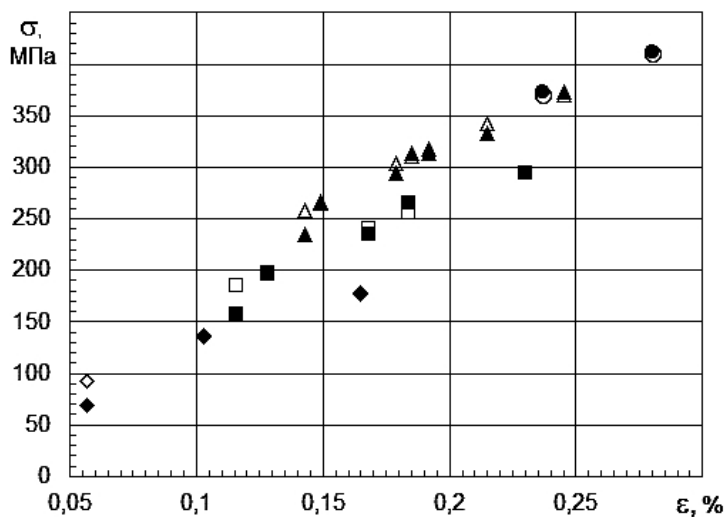


Рис. 5. Экспериментальные (темные точки) и расчетные (светлые точки) диаграммы мгновенного деформирования стали 25X1M1Ф (пл. А): ○, ● – $T = 450^\circ\text{C}$; △, ▲ – $T = 500^\circ\text{C}$; □, ■ – $T = 550^\circ\text{C}$; ◇, ◆ – $T = 600^\circ\text{C}$.

Таким образом, результаты выполненного исследования свидетельствуют о целесообразности более детального анализа кривых мгновенного деформирования, в том числе и в рассмотренном плане, несмотря на использование существенных упрощений при получении формул (6) и (7). Это определяется возможностью дополнительного применения стандартных характеристик прочности и пластичности, получаемых при кратковременном растяжении,

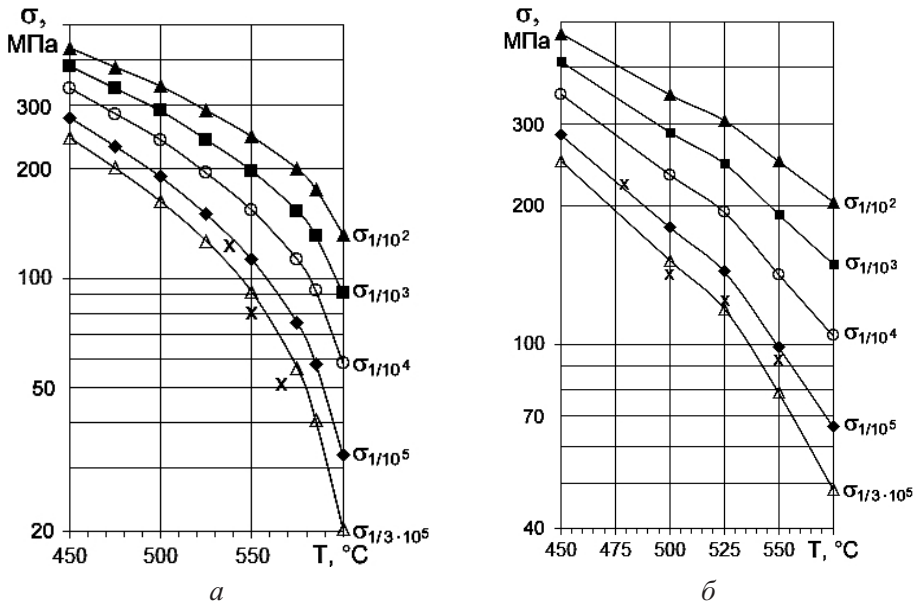


Рис. 6. Пределы ползучести сталей 15X1M1Ф (а) и 25X1M1Ф (б): × – данные [9].

для более тщательного контроля индивидуальных особенностей исследуемых материалов. Вместе с тем выполненный анализ показывает, что одной из существенных трудностей развития таких исследований является дефицит данных даже по значениям таких характеристик, которые согласно общепринятым представлениям относятся к весьма важным. Это явление довольно распространенное, что позволяет акцентировать внимание на установлении общих соотношений между различными характеристиками механических свойств, по отдельным из которых нет необходимой информации.

Заметим, что в зависимостях, описывающих ползучесть (при росте деформации во времени), индивидуальные особенности исследуемых материалов проявляются в большей степени, чем при описании длительной прочности. В связи с этим прогнозирование длительной прочности может уточняться по данным о закономерностях ползучести, в частности о минимальной скорости ползучести. Выполненный ранее [16] анализ экспериментальных данных показывает, что рассеяние данных по минимальной скорости ползучести больше, чем по длительной прочности, что и определяет необходимость дополнительных уточнений. Использование уравнения (5) совместно с (6) и (7) создает условия для расширения возможностей соответствующих уточнений. При этом следует подчеркнуть, что эффективность и возможности уточнений могут определяться также выбором экспериментальных данных, объемом, разнообразием и комплексностью соответствующей их обработки.

Расширить возможности использования известных экспериментальных данных для уточнения результатов прогнозирования характеристик ползучести и длительной прочности можно с помощью комплексного подхода на основе расчетных соотношений, приведенных ранее [1] и в этой работе.

Так, например, в справочнике [9] представлены комплексные данные о характеристиках сталей и сплавов теплоэнергетического оборудования, что

определяет его несомненную ценность. Однако данные по длительной прочности приведены в ограниченном объеме, о чем можно судить, например, по результатам на рис. 6, где кроме данных [9] приведены также полученные нами при разработке нового нормативного документа результаты.

В настоящей работе и в [1] предлагается комплекс расчетных соотношений, использование которых создает новые возможности как для уточнения разработанных уравнений, так и для расширения возможностей выявления информативности известных экспериментальных данных. Необходимость решения такой задачи объясняется актуальностью уточнения нормативных данных о свойствах материалов энергетического оборудования при высокотемпературной эксплуатации длительностью до 300 тыс. ч и более.

Резюме

Обґрунтовується, що при формуванні нормативної документації характеристики високотемпературної повзучості металів і сплавів визначаються на основі системного аналізу найбільш представницьких відомих експериментальних даних щодо закономірностей пластичної деформації при статичному розтязі і повзучості та даних про тривалу міцність. Остаточне їх уточнення проводиться на основі урахування відповідних результатів експлуатаційного контролю.

1. *Кривенюк В. В., Авраменко Д. С., Усков Е. И. и др.* О проблеме подготовки данных по длительной прочности при формировании нормативной документации для металлоемкого энергетического оборудования // Пробл. прочности. – 2012. – № 4. – С. 20 – 32.
2. *Работнов Ю. Н.* Ползучесть элементов конструкций. – М.: Наука, 1966. – 752 с.
3. *Кеннеди А. Д.* Ползучесть и усталость в металлах. – М.: Металлургия, 1965. – 312 с.
4. *Качанов Л. М.* О времени разрушения в условиях ползучести // Изв. АН СССР. Механика и машиностроение. – 1960. – № 5. – С. 88 – 92.
5. *Кривенюк В. В.* Прогнозирование длительной прочности тугоплавких металлов и сплавов. – Киев: Наук. думка, 1990. – 248 с.
6. *Лепин Г. Ф.* Ползучесть металлов и критерии жаропрочности металлических материалов. – М.: Металлургия, 1976. – 334 с.
7. *Кривенюк В. В.* О некоторых инженерных методах прогнозирования характеристик длительной прочности // Пробл. прочности. – 1976. – № 2. – С. 29 – 32.
8. *Кривенюк В. В.* О связи кратковременных механических характеристик с длительной прочностью // Там же. – 1974. – № 3. – С. 31 – 35.
9. *Либерман Л. Я., Пейсихис М. И.* Свойства сталей и сплавов, применяемых в котлотурбостроении. – Л.: ЦКТИ. – 1966. – Ч. 1. – 219 с.; Ч. 2. – 244 с.; 1967. – Ч. 3. – 180 с.

10. Мороз Л. С., Лихачев В. А., Голотин А. Е. О феноменологических теориях кинетического механизма разрушения металлических материалов // Пробл. прочности. – 1977. – № 8. – С. 11 – 17.
11. Мороз Л. С. К вопросу о временной зависимости прочности металлических материалов // Там же. – 1972. – № 12. – С. 81 – 84.
12. Кривенюк В. В., Усков Е. И., Будинский В. Р. О взаимосвязи характеристик деформирования и прочности при кратковременном растяжении жаропрочных материалов // Там же. – 2003. – № 5. – С. 71 – 79.
13. Data sheets on the elevated-temperature properties of 18Cr10NiTi stainless steel tubes // NRI Creep Data Sheet. – 1987. – No. 5B. – 32 p.
14. Data sheets on the elevated-temperature properties of 1Cr–1Mo–0.25V steel castings // Ibid. – 1994. – No. 31B. – 41 p.
15. Data sheets on the elevated-temperature properties of 1Cr–1Mo–0.25V steel forgings // Ibid. – 1990. – No. 9B. – 45 p.
16. 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.

Поступила 22. 03. 2010