

УДК 539.374+376

## СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ОЦЕНКИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ И РАЗРУШЕНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

О. В. Соснин, И. В. Любашевская, И. В. Новоселя

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск  
E-mail: lbi@ngs.ru

На примере нескольких конструкционных сплавов различного типа показана возможность сопоставления интенсивности процессов ползучести и длительности до разрушения этих материалов. Уравнение ползучести записывается в безразмерном виде, что позволяет в нормированных величинах сравнивать процессы ползучести вплоть до разрушения, оценивать их различие и в случае совпадения нормированных величин для ряда материалов в соответствующих этим величинам температурно-силовых режимах нагружения моделировать указанные процессы на основе экспериментальных данных для одного из этих материалов.

**Ключевые слова:** ползучесть, длительность до разрушения, характеристики ползучести.

**Введение.** Интенсивность процесса ползучести конструкционных материалов принято оценивать в виде зависимости скорости деформаций ползучести  $\eta$  от напряжения  $\sigma$ , температуры  $T$  и каких-либо структурных параметров  $q_i$ , учитывающих характер упрочнения-разупрочнения материала. В теориях ползучести типа течения  $\eta = f_1(\sigma, T, q_i)$ . В энергетическом варианте теории ползучести используется зависимость мощности рассеяния энергии  $W = \sigma\eta$  от аналогичных величин:  $W = f_2(\sigma, T, q_i)$ . Возможны также другие варианты связи кинематики процесса ползучести с термосиловыми и структурными параметрами, при этом для пространственного напряженно-деформированного состояния используются эквивалентные величины. Например, для изотропных материалов  $\eta_e = ((2/3)\eta_{ij}\eta_{ij})^{1/2}$  и  $\sigma_e = ((3/2)\sigma_{ij}\sigma_{ij})^{1/2}$ . Ниже при анализе результатов используется энергетический вариант теории ползучести.

При высоких температурах, обычно превышающих номинальные температуры, характерными особенностями деформационно-прочностного поведения материала являются отсутствие начальной стадии ползучести (стадии упрочнения) и сравнительно небольшая продолжительность третьей стадии (стадии разупрочнения). Ограничиваясь рассмотрением одного структурного параметра  $q$  и принимая в качестве этого параметра величину рассеянной энергии деформаций ползучести, исходное уравнение можно записать в виде

$$W = \frac{B_1(T)\sigma_e^n}{(A_* - A)^m} = \frac{B_1(T)\sigma_e^n}{A_*^m(1 - \omega)^m} = \frac{B(T)\sigma_e^n}{(1 - \omega)^m}, \quad (1)$$

где  $A_* = \int_0^{t^*} \sigma_{ij} \eta_{ij} dt$  — рассеянная энергия деформаций ползучести в момент разрушения  $t^*$ , которая для многих материалов является характеристикой и сохраняет свое значение в широком диапазоне температур [1, 2].

Запись уравнений в форме (1) ( $W = \varphi(\sigma_e, T)\psi(A)$ ) предполагает подобие диаграмм ползучести  $A = A(t)$  при фиксированных значениях  $\sigma_e$  и  $T$ . Как показано в [3], длительность процесса ползучести материала до разрушения обратно пропорциональна мощности рассеяния на установившейся стадии:

$$W_k t_k^* = W_l t_l^* = \text{const}. \quad (2)$$

Это утверждение подтверждается экспериментально для многих материалов в широком температурно-силовом диапазоне, что позволяет в рассматриваемой области нагрузок при каждом фиксированном значении  $T$  принять в качестве базовой одну из диаграмм ползучести при напряжении  $\sigma_0$  с соответствующей длительностью до разрушения  $t_0^*$  и, используя (2), определить  $t_k^*$  при любой нагрузке  $\sigma_k$ . Таким образом, при сравнительных оценках длительной прочности материалов в условиях ползучести можно ограничиться рассмотрением только установившейся стадии и, полагая в уравнении (1)  $\omega = 0$ , записать его в виде

$$W = B(T)\sigma_e^n. \quad (3)$$

При этом вместо характеристики  $B(T)$  можно использовать  $\sigma_0(T)$  как характеристику материала, связанную с длительностью  $t_0^*$  на базовой диаграмме. Разделив (3) на  $W_0 = B(T)\sigma_0^n$  и вводя обозначения  $\tilde{W} = W/W_0$ ,  $\tilde{\sigma} = \sigma/\sigma_0$ , получим

$$\tilde{W} = \tilde{\sigma}^n. \quad (4)$$

Нормированное уравнение (4) имеет один и тот же вид во всем рассматриваемом температурном диапазоне. Базовую величину  $\sigma_0(T)$  целесообразно выбрать таким образом, чтобы соответствующие ей длительности до разрушения материала  $t_0^*$ , а следовательно, и  $W_0$  (см. (2)) во всем температурно-силовом диапазоне были одинаковыми. При таком выборе на плоскости  $(T, \sigma_0)$  графиком уравнения  $W_0(T, \sigma_0) = \text{const}$  является кривая равных длительностей  $t_0^*$ .

В некоторых случаях в качестве базовой величины  $\sigma_0(T)$  целесообразно принять минимальное значение напряжения, соответствующее условно допустимой безопасной длительности работы элементов конструкций в экстремальных условиях. В литературе аналогичное понятие “предел ползучести” использовалось и ранее, определяя уровень напряжения, ниже которого в расчетах элементов конструкций деформациями ползучести можно пренебречь. Для каждой фиксированной температуры  $T_k$  в пространстве напряжений условие  $\sigma_0 = \text{const}$  соответствует предельной поверхности, в пределах которой напряжения  $\sigma_{ij}$  не представляют опасности для работы конструкций в условиях ползучести в заданном интервале  $t_0^*$ . Для напряженных состояний  $\sigma_e > \sigma_0$  время до разрушения уменьшается, и при некотором значении  $\sigma_{\text{max}}$  время  $t^* \rightarrow 0$ , что соответствует предельной поверхности текучести идеально вязкой среды (аналог предельной поверхности текучести идеально пластической среды).

Очевидно, если рассматривать процесс ползучести и разрушения для конкретного материала в узком температурном диапазоне или при фиксированной постоянной температуре  $T$ , то какое-либо преимущество в записи уравнения ползучести в форме (4) по сравнению с записью в форме (1) или в редуцированном виде (3) отсутствует. Преимущество обнаруживается при сравнении процессов ползучести и длительности до разруше-

ния в широком температурном интервале или при сопоставлении интенсивностей процессов и длительностей до разрушения для материалов различного типа в соответствующих температурно-силовых режимах эксплуатации.

Уравнения в нормированной форме (4) не описывают третью стадию ползучести предразрушения, но позволяют в широком температурном диапазоне, используя (2), (3), сопоставлять длительности до разрушения с длительностью, соответствующей базовой диаграмме:

$$W_k t_k^* = W_l t_l^* = W_0 t_0^* \implies \tilde{W}_k t_k^* = \tilde{W}_l t_l^* = 1 \cdot t_0^* \quad (5)$$

Если взять одно и то же значение  $t_0^*$  для разных материалов при различных температурах и нагрузках, то можно сопоставить интенсивность ползучести и длительность до разрушения конструкционных сплавов различного типа, что позволяет моделировать процессы ползучести с использованием более простых материалов [4].

В (3) значения коэффициентов  $B$  и  $n$  для разных материалов в широком диапазоне температур могут существенно различаться, причем значения коэффициента  $B$  могут различаться на несколько порядков. Определенное преимущество записи в форме (4) состоит в том, что при изменении температуры  $T$  величина  $\sigma_0$  меняется в значительно меньшем диапазоне. Ниже для ряда конструкционных материалов рассмотрены некоторые случаи аппроксимации зависимостей в виде (3), (4).

**1. Случай постоянного показателя ползучести  $n$ .** В (1), (3) показатель ползучести меняется в зависимости от температуры и напряжения, т. е. от длительности процесса до разрушения. Для многих конструкционных сплавов с увеличением температуры показатель  $n$  уменьшается, а затем вновь возрастает. Однако в узком диапазоне температур его можно считать постоянным. При изменении  $\sigma$  показатель  $n$  обычно меняется, но на небольших интервалах нагрузок его можно считать постоянным.

На рис. 1 приведены диаграммы ползучести, полученные в экспериментах при осевом растяжении стандартных образцов из конструкционной стали марки Ст. 45 при постоянных температуре и напряжении. В эксперименте после каждого приращения осевой деформации на величину  $\Delta\varepsilon = 0,5\%$  из условия пластической несжимаемости материала  $S_0 l_0 = S(t)l(t)$  пересчитывалась площадь сечения образца  $S(t)$  и корректировалась осевая нагрузка для поддержания постоянного напряжения  $\sigma$ . Из рис. 1 следует, что во всем интервале напряжений и температур значение  $A_* \approx 30$  МДж/м<sup>3</sup>, третья стадия ползучести непродолжительна и для оценки длительности процесса  $t^*$  до разрушения по урав-

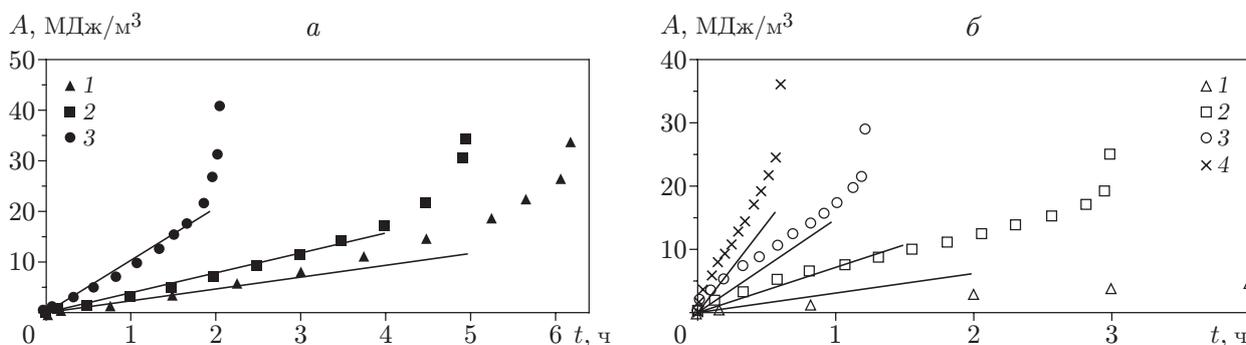


Рис. 1. Диаграммы ползучести при растяжении для стали марки Ст. 45 при постоянных температуре и напряжении:  
 а —  $T = 700\text{ }^\circ\text{C}$  (1 —  $\sigma = 55$  МПа; 2 —  $\sigma = 60$  МПа; 3 —  $\sigma = 70$  МПа); б —  $T = 850\text{ }^\circ\text{C}$  (1 —  $\sigma = 35$  МПа; 2 —  $\sigma = 40$  МПа; 3 —  $\sigma = 45$  МПа; 4 —  $\sigma = 50$  МПа)

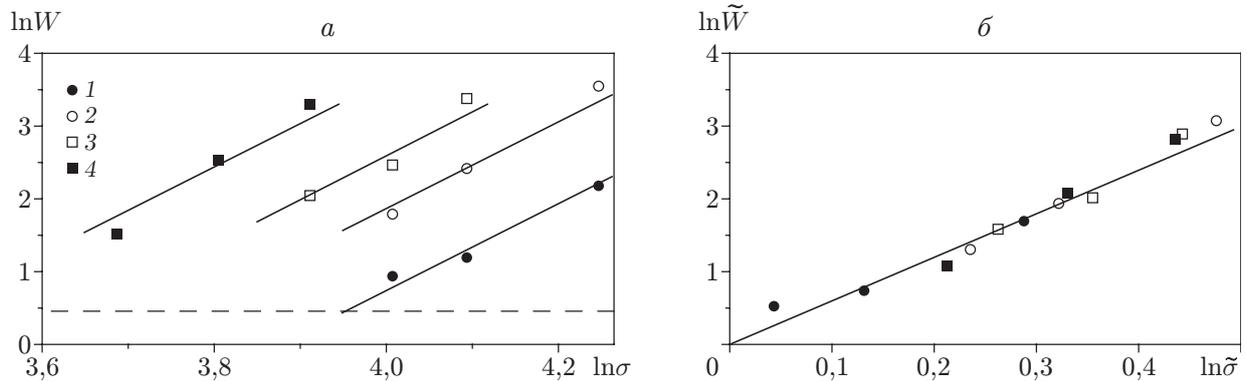


Рис. 2. Зависимости интенсивности процесса ползучести от напряжения  $\ln W \sim \ln \sigma$  (а) и  $\ln \tilde{W} \sim \ln \tilde{\sigma}$  (б) для стали марки Ст. 45:  
1 —  $T = 700$  °C; 2 —  $T = 750$  °C; 3 —  $T = 800$  °C; 4 —  $T = 850$  °C

Таблица 1  
Зависимости  $B(T)$  и  $\sigma_0(T)$

$T$ , °C	$B \cdot 10^{10}$ , (МПа) $^{1-n} \cdot \text{ч}^{-1}$	$\sigma_0$ , МПа
700	0,78	52,4
750	2,40	43,3
800	5,00	38,4
850	14,40	32,2

нениям (2), (3) достаточно использовать оценку мощности рассеяния на установившейся стадии и длительность  $t_k^*$  с соответствующей величиной  $W_k$  для одной из приведенных диаграмм. На рис. 2,а представлены результаты экспериментов в координатах  $(\ln W, \ln \sigma)$  в диапазоне температур  $700$  °C  $\leq T \leq 850$  °C. При всех фиксированных температурах экспериментальные точки ложатся на параллельные линии, угол наклона которых определяет величину  $n = 6$ . Для каждого значения температуры из соотношения  $W_k = B(T)\sigma_k^n$  определялась зависимость  $B(T)$  (табл. 1). Расчетные значения  $A(t) = Wt$  на установившейся стадии с полученными характеристиками  $B$  и  $n$  показаны на рис. 1 (прямые линии).

В качестве базового значения длительности  $t_0^*$  до разрушения принято значение  $t_0^* = 10$  ч (некоторое условно допустимое критическое время при аварийной ситуации). В соответствии с (2) из соотношения  $W_k t_k^* = W_0 t_0^*$  для выбранного базового времени  $t_0^* = 10$  ч определено значение  $W_0 = 1,6$  МДж/(м<sup>3</sup> · ч) (штриховая линия на рис. 2,а). Из соотношения  $W_0 = B(T)\sigma_0^n$  по известным  $B(T)$ ,  $n$  и  $W_0$  найдем  $\sigma_0(T)$  и запишем уравнение ползучести в безразмерной нормированной форме (4). Нормированные экспериментальные значения  $\tilde{W}$  и  $\tilde{\sigma}$  приведены на рис. 2,б в логарифмических координатах. Соответствующие значения  $\sigma_0(T)$  приведены в табл. 1, откуда следует, что значения  $B$  меняются более чем на порядок.

Если в координатах  $(\sigma, T)$  построить диаграммы, соответствующие температурно-силовым режимам  $(\sigma_0, T)$  для процессов с одной и той же мощностью рассеяния, то эти кривые разделят безопасные (ниже диаграмм) и опасные с точки зрения длительности процесса значения  $T$  и  $\sigma$ .

Как и следовало ожидать, при  $n = \text{const}$  во всем указанном температурном диапазоне одним и тем же нормированным значениям  $\tilde{\sigma} = \sigma/\sigma_0(T)$  соответствуют одни и те же значения нормированной мощности рассеяния  $\tilde{W} = \tilde{\sigma}^n$  и (в силу (5)) одни и те же

длительности до разрушения, что позволяет анализировать поведение материала во всем температурном диапазоне.

**2. Случай переменных характеристик  $B$  и  $n$ .** Как отмечено выше, при описании ползучести конструкционных материалов с использованием зависимостей (1) и (3) в широком температурно-силовом диапазоне при изменении температуры изменяются обе характеристики  $B$  и  $n$  и соответственно  $\sigma_0$ . На рис. 3 представлены диаграммы ползучести при осевом растяжении для титанового сплава ОТ-4 при постоянных температуре и напряжении [5]. Величина рассеянной энергии необратимых деформаций в момент разрушения во всем температурном интервале изменяется незначительно, и ее можно считать постоянной:  $A_* \approx 85$  МДж/м<sup>3</sup>. В соответствии с (1), полагая на установившейся стадии  $\omega = 0$ , при каждой температуре и различных значениях  $\sigma$  с использованием экспериментальных данных найдем значения  $W = B\sigma^n$ . Результаты экспериментов в координатах  $(\ln W, \ln \sigma)$  показаны на рис. 4,а в диапазоне температур  $400 \text{ }^\circ\text{C} \leq T \leq 550 \text{ }^\circ\text{C}$ . Эти зависимости могут быть аппроксимированы прямыми линиями. Угол наклона этих линий, а следовательно, и показатель  $n$  изменяются (с увеличением  $T$  показатель  $n$  уменьшается). Значения  $B$  и  $n$  для зависимости  $W = B\sigma^n$  приведены в табл. 2, а расчетные зависимости  $A(t) = Wt$  на установившейся стадии показаны на рис. 3 прямыми линиями.

В качестве базового значения мощности рассеяния на установившейся стадии принято значение  $W_0 = 0,0291$  МДж/(м<sup>3</sup> · ч<sup>-1</sup>) (штриховая линия на рис. 4,а), которому согласно (2) соответствует длительность до разрушения  $t_0^* = 1000$  ч. Зная  $B = B(T)$  и  $n = n(T)$ , из соотношения  $W_0 = B(T)\sigma_0^{n(T)}$  найдем значение  $\sigma_0 = \sigma(T)$  (соответствующие значения  $\sigma_0$  приведены в табл. 2) и запишем исходные уравнения (1) в безразмерной норми-

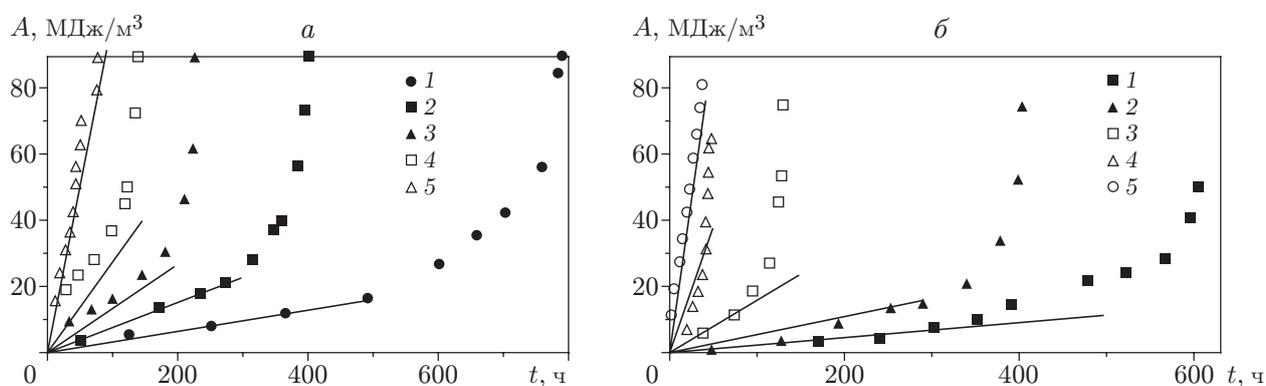


Рис. 3. Диаграммы ползучести при растяжении для сплава ОТ-4 при постоянных температуре и напряжении:

а —  $T = 400 \text{ }^\circ\text{C}$  (1 —  $\sigma = 392$  МПа; 2 —  $\sigma = 421,4$  МПа; 3 —  $\sigma = 441$  МПа; 4 —  $\sigma = 470,4$  МПа; 5 —  $\sigma = 490$  МПа); б —  $T = 550 \text{ }^\circ\text{C}$  (1 —  $\sigma = 39,2$  МПа; 2 —  $\sigma = 49$  МПа; 3 —  $\sigma = 63,7$  МПа; 4 —  $\sigma = 78,4$  МПа; 5 —  $\sigma = 98$  МПа)

Таблица 2

Зависимости  $B(T)$ ,  $n(T)$ ,  $\sigma_0(T)$

$T, \text{ }^\circ\text{C}$	$B, (\text{МПа})^{1-n} \cdot \text{ч}^{-1}$	$n$	$\sigma_0, \text{ МПа}$
400	$4,4 \cdot 10^{-40}$	14,6	394
450	$3,0 \cdot 10^{-16}$	6,0	214
500	$4,5 \cdot 10^{-11}$	4,5	91
550	$1,3 \cdot 10^{-8}$	4,0	39

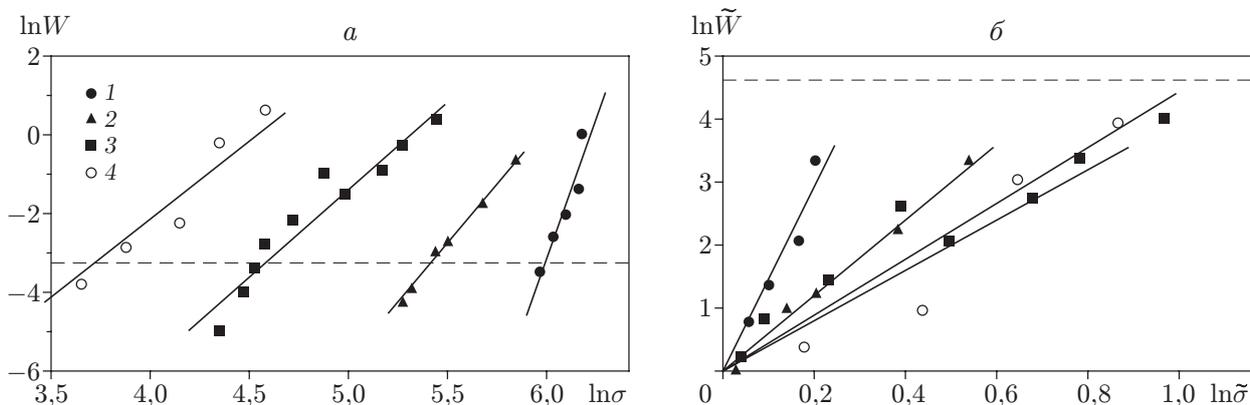


Рис. 4. Зависимости интенсивности процесса ползучести от напряжения  $\ln W \sim \ln \sigma$  (а) и  $\ln \tilde{W} \sim \ln \tilde{\sigma}$  (б) для сплава ОТ-4:

1 —  $T = 400$  °C; 2 —  $T = 450$  °C; 3 —  $T = 500$  °C; 4 —  $T = 550$  °C

рованной форме (4). Результаты экспериментов представлены на рис. 4, б в нормированных величинах. Как и следовало ожидать, получено семейство прямых линий, пересекающихся в начале координат и имеющих тот же угол наклона, что и на рис. 4, а. Согласно (2) одинаковым значениям  $\tilde{W}_k$  при любой температуре соответствует одна и та же длительность до разрушения. Например, значению  $\tilde{W}_k$  (штриховая линия на рис. 4, б), которое на два порядка больше  $\tilde{W}_0$ , соответствует длительность до разрушения  $t_k^*$  на два порядка меньше  $t_0^*$ , что подтверждается экспериментальными данными [5]. В отличие от случая, рассмотренного в п. 1, где  $n = \text{const}$  во всем температурном диапазоне, в данном случае нельзя утверждать, что одним и тем же значениям нормированных напряжений  $\tilde{\sigma}_k$  соответствуют одни и те же значения нормированных мощностей  $\tilde{W}_k$ , а следовательно, одни и те же длительности до разрушения  $t_k^*$  (сопоставление следует проводить по нормированным величинам  $\tilde{W}_k = \tilde{\sigma}_k^n$  с учетом изменения показателя  $n = n(T)$ ). В соответствии с (5) во всем температурном диапазоне произведение нормированной мощности  $\tilde{W}_k$  и соответствующей ей длительности до разрушения близко к значению  $t_0^* = 1000$  ч.

**3. Сравнение длительностей до разрушения материалов различного типа.** Пусть имеется несколько типов конструкционных сплавов, которые используются в различных высокотемпературных и силовых диапазонах. Для каждого материала имеется набор стандартных диаграмм ползучести, аналогичных представленным на рис. 1, 3, что позволяет определить характеристики  $B(T)$  и  $n(T)$  в (3), предельные значения  $A_*$  и соответствующие некоторым комбинациям  $\sigma_k, T_k$  длительности до разрушения  $t_k^*$ . Если процессы ползучести и длительности до разрушения этих материалов можно описать в рамках энергетического варианта теории ползучести, то в соответствии с (2) для них выполняется условие  $W_k t_k^* = W_m t_m^* = C$ . Однако для каждого материала значения  $W_k, t_k^*, C$  различны. Зададим какую-либо базовую величину  $t_0^*$  длительности до разрушения, одну и ту же для всех сравниваемых материалов во временном интервале их эксплуатации  $t_{\min}^* < t_0^* < t_{\max}^*$ . Тогда из соотношения  $W_k t_k^* = W_m t_m^* = W_0 t_0^*$  для каждого материала найдем базовую величину мощности рассеяния  $W_0$  на установившейся стадии. Зная для каждого материала характеристики  $B(T), n(T), W_0$ , из соотношения  $W_0 = B(T) \sigma_0^{n(T)}$  найдем  $\sigma_0(T)$  и получим безразмерное нормированное уравнение ползучести  $\tilde{W}_k = \tilde{\sigma}_k^n$  (4), где  $\tilde{\sigma} = \sigma / \sigma_0(T)$ ;  $n = n(T)$  (с различными значениями  $\sigma_0(T)$  и  $n = n(T)$  для каждого материала). В нормированных величинах для всех сравниваемых материалов соотношение (2) принимает вид  $\tilde{W}_k t_k^* = t_0^*$ , т. е. вместо констант  $C_1, C_2, \dots$  имеем одну константу  $t_0^*$  —

Таблица 3

Температурно-силовые режимы и параметры интенсивности процесса ползучести и его продолжительности

Материал	$T, \text{ }^\circ\text{C}$	$\sigma, \text{ МПа}$	$t^*, \text{ ч}$	$W, \text{ МДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{ч})$	$\tilde{W}t^*, \text{ ч}$
Д16Т	250	98,10	90	0,0138	512
		88,26	170	0,0073	513
		78,48	340	0,0036	507
		68,67	720	0,0016	482
ОТ-4	450	196,0	1080	0,0145	412
		205,8	700	0,0197	363
		230,3	400	0,0525	553
		245,0	340	0,0681	609
		294,0	100	0,1839	484
		343,0	40	0,5517	580
Ст. 45	700	70	2,08	8,392	542
		60	4,92	3,250	496
		55	6,17	2,613	500

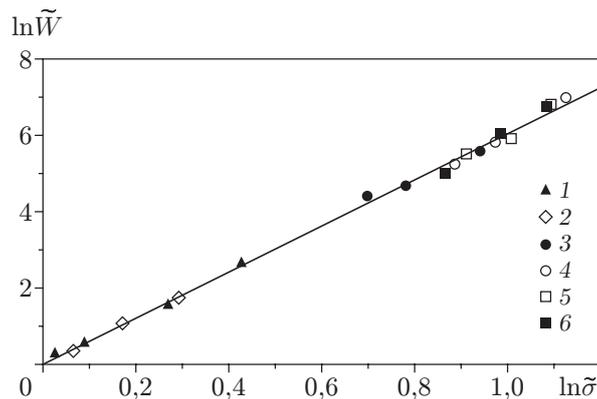


Рис. 5. Зависимость интенсивности процесса ползучести от напряжения:  
 1 — сплав ОТ-4 при  $T = 450 \text{ }^\circ\text{C}$ ; 2 — сплав Д16 при  $T = 250 \text{ }^\circ\text{C}$ ; 3–6 — сталь марки Ст. 45 (3 —  $T = 700 \text{ }^\circ\text{C}$ ; 4 —  $T = 750 \text{ }^\circ\text{C}$ ; 5 —  $T = 800 \text{ }^\circ\text{C}$ ; 6 —  $T = 850 \text{ }^\circ\text{C}$ )

выбранное базовое время сравнения. Если нормированные величины  $\tilde{W}$  и  $\tilde{\sigma}$  представить в логарифмических координатах, то для каждого рассматриваемого материала получим семейство прямых, пересекающихся в начале координат, как и на рис. 4,б, при этом одним и тем же значениям  $\tilde{W}$  для всех сравниваемых материалов будет соответствовать одна и та же длительность процесса до разрушения.

Таким образом, если для всех сравниваемых материалов имеются диаграммы, аналогичные представленным на рис. 4,б, то можно выбрать такие температурно-силовые интервалы, в которых показатели  $n$  этих материалов равны. Тогда диаграммы  $\tilde{W} \sim \tilde{\sigma}$  будут представлять собой одну и ту же прямую.

В табл. 3 приведены температурно-силовые режимы для трех материалов, соответствующие одинаковым показателям ползучести  $n(T) = 6$ , т. е. имеет место случай, описанный в п. 1. На рис. 5 для материалов, указанных в табл. 3, представлены экспериментальные данные в нормированных логарифмических координатах ( $\ln \tilde{W}, \ln \tilde{\sigma}$ ) для базового времени  $t_0^* = 500 \text{ ч}$ .

Рассмотренные материалы существенно различны, соответственно различны температурно-силовые диапазоны их эксплуатации. Тем не менее предложенный подход можно использовать для сопоставления интенсивности процессов ползучести разных материалов и оценки длительностей этих процессов до разрушения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Соснин О. В.** Энергетический вариант теории ползучести и длительной прочности // Пробл. прочности. 1973. № 5. С. 45–49.
2. **Соснин О. В., Горев Б. В., Никитенко А. Ф.** К обоснованию энергетического варианта теории ползучести // Пробл. прочности. 1976. № 11. С. 3–8.
3. **Соснин О. В.** О прогнозировании длительной прочности материала для интервала температур // Пробл. прочности. 1982. № 4. С. 45–47.
4. **Работнов Ю. Н.** Ползучесть элементов конструкций. М.: Наука, 1966.
5. **Соснин О. В., Торшенов Н. Г.** О ползучести и разрушении титанового сплава ОТ-4 в интервале температур 400–550 °С // Пробл. прочности. 1972. № 7. С. 55–59.

*Поступила в редакцию 21/III 2007 г.*

---