

ОБ ОДНОМ ПОДХОДЕ К ПОСТРОЕНИЮ ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ УРАВНЕНИЙ В ТЕОРИИ ПОЛЗУЧЕСТИ

Задача построения адекватных определяющих уравнений ползучести относится к числу наиболее сложных в механике сплошной среды. Особенно актуальной представляется проблема описания процессов деформирования вплоть до разрушения. В настоящее время она решается или на основе безразмерного параметра поврежденности (см., например, [1—4]), или с использованием функции поврежденности, отождествляемой с удельной работой разрушения [5]. Основная трудность при этом заключается в получении достоверных оценок для кинетики поврежденности. В данной работе предлагается один из возможных подходов к построению определяющих уравнений ползучести, позволяющий описать все стадии процесса без привлечения функции поврежденности и учесть исходные деформационные свойства материала.

1. Введение. При решении задач построения определяющих уравнений наибольшее распространение в теории ползучести получила концепция «механического уравнения состояния»

$$(1.1) \quad \Phi(\sigma_i, \varepsilon_i^c, \dot{\varepsilon}_i^c, t, T) = 0,$$

где Φ — экспериментально определяемая функция; $\sigma_i, \varepsilon_i^c, \dot{\varepsilon}_i^c$ — интенсивности напряжений, деформаций и скоростей ползучести соответственно; t — время; T — температура.

Функция Φ конкретизируется в опытах на одноосное растяжение. Для конкретизации чаще всего используются принцип подобия, позволяющий представить функцию Φ в виде произведения функций, понятия старения и упрочнения, предложенные Содербергом и Дэвенпортом, и понятие поврежденности, предложенное Работновым [1, 3—6]. Однако адекватность такого подхода реальному процессу требует в большинстве случаев уточнений. Это связано с необходимостью экспериментального обоснования гипотезы «единой кривой ползучести», установления истинного закона влияния поврежденности на скорость ползучести и закона накопления повреждений ползучести.

Наиболее принципиальное значение имеет выполнение условия подобия [1, 4, 5, 7]. Все существующие конкретизации уравнения (1.1) сделаны в предположении, что подобие процессов ползучести наблюдается в той системе координат, когда одной из переменных является время t , а напряжения и температура — параметры. Для неустановившейся стадии этот подход приводит к весьма удовлетворительным результатам. Однако для установившейся и особенно ускоренной стадии такое подобие в подавляющем большинстве случаев отсутствует [1, 3, 7].

Более перспективным представляется подход, когда подобие процессов ползучести ищется в координатах напряжение — деформация, а время t есть параметр. Такая трактовка была предложена Работновым [1]. Если изохронные диаграммы ползучести подобны, то зависимость между напряжением, деформацией и временем может быть представлена в виде произведения двух функций [1]:

$$(1.2) \quad \sigma = \varphi(\varepsilon)\psi(t),$$

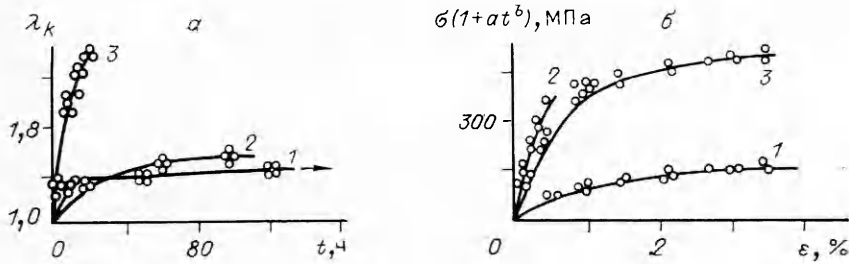
а коэффициент подобия λ задается соотношением [7] $\lambda_k = \varphi(\varepsilon)/\sigma_k$ (ε — деформация, включающая упругую составляющую, σ_k — ордината изохроны при $t = t_k$ ($k = 0, 1, \dots, n$)).

Для функции $\psi(t)$ хорошие результаты дает аппроксимация вида [1, 8—11]

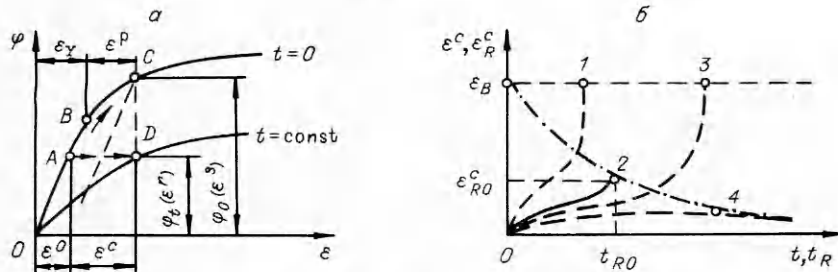
$$(1.3) \quad \psi(t) = 1/(1 + at^b),$$

где a и b — экспериментально определяемые коэффициенты ($a > 0, b \leq 1$). При $t = 0$ функция $\psi(0) = 1$, а $\varphi(\varepsilon)$ совпадает с функцией, задающей диаграмму мгновенного деформирования.

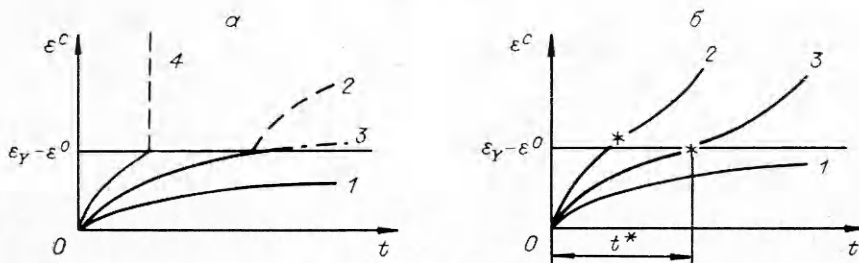
Условие подобия (1.2) для неустановившейся стадии ползучести подтверждается экспериментально практически на неограниченной базе для широкого класса материалов [1, 7, 9]. Дополнительно оценим возможность обобщения уравнения (1.2) на все характерные стадии ползучести, включая и третью. Аппроксимирующую функцию для $\psi(t)$ также выберем в форме (1.3), а значения коэффициентов a и b определим по методике, изложенной в [10, 11]. Справедливость критерия (1.2) оценим по условию получения единой зависимости λ от t при варьировании напряжений и по условию приведения семейства изохронных кривых, включающих и диаграмму мгновенного деформирования, к единой кривой в координатах $\sigma(1 + at^b) - \varepsilon$. Некоторые из результатов представлены на рис. 1, а, б (линия 1 — стеклотекстолит при $T = 20^\circ\text{C}$ [8], 2 — сталь ЭИ481 при $T = 700^\circ\text{C}$, 3 — сплав ВЖЛ12У при $T = 1000^\circ\text{C}$). Как видно, экспериментальные точки достаточно плотно (погрешность не превышает 12—15%) группируются в единые кривые при изменении напряжений от 0,2 до $0,8\sigma_y$ в диапа-



Р и с. 1



Р и с. 2



Р и с. 3

зоне от 1 до 1000 ч. Характерно, что при обработке эксперимента использовались также кривые ползучести с ускоренной стадией, продолжительность которой достигала в отдельных случаях 70 % от долговечности.

2. Одномерные определяющие уравнения. Условие подобия изохронных диаграмм ползучести (1.2) установлено свыше 40 лет тому назад и апробировано на широком классе материалов, однако для построения определяющих уравнений не использовалось. Рассмотрим один из возможных путей решения этой задачи, ограничившись на первом этапе одномерной постановкой.

Условие подобия (1.2), включающее диаграмму мгновенного деформирования $\varphi_0(\varepsilon^s)$ как изохрону при $t = 0$, с учетом (1.3) зададим соотношением

$$(2.1) \quad \varphi_0(\varepsilon^s) = \varphi_t(\varepsilon^r) [1 + G(t)],$$

которое при $\varepsilon^s = \varepsilon^r$ и $\varphi_t(\varepsilon^r) = \sigma_0$ преобразуется к виду

$$(2.2) \quad \varphi_0(\varepsilon^r) = \sigma_0 [1 + G(t)]$$

и постулирует идентичность характера мгновенной нелинейности и нелинейности ползучести. Здесь ε^s — склерономная деформация; $\varepsilon^r = \varepsilon^0 + \varepsilon^c$ — реономная деформация, включающая начальную деформацию ε^0 и деформацию ползучести ε^c ; φ_t — функция этой деформации. В (2.1) также принято $G(t) = at^b$.

Основная идея представления (2.2) заключается в том, что процесс ползучести в плоскости $\varphi_0 - \varepsilon$ развивается, подобно процессу мгновенного деформирования, и полностью определяется видом функции φ_0 (рис. 2, а). В общем случае процесс деформирования может рассматриваться как чередование активного ($d\sigma > 0, dt = 0$) и пассивного ($d\sigma = 0, dt > 0$) режимов изменения функции $\varphi_0(\varepsilon^s)$ (за счет приращения нагрузки или за счет приращения времени). Так, нагружение ($t = 0$) до заданного напряжения σ_0 (рис. 2, а, точка А) соответствует движению по прямой OA и вызывает деформацию $\varepsilon^0 = \sigma_0/E$. За некоторый промежуток времени ($t(\sigma_0 = \text{const})$) накапливается деформация ползучести ε^c и точка А перемещается в положение С.

Дифференцируя обе части (2.2) по t , получаем соотношение

$$(2.3) \quad \frac{d\varphi_0(\varepsilon^r)}{d\varepsilon^r} \frac{d\varepsilon^r}{dt} = \frac{d}{dt} \{ \sigma_0 [1 + G(t)] \},$$

разрешая которое относительно скорости накопления реономной деформации, находим уравнение ползучести в виде

$$(2.4) \quad \frac{d\varepsilon^r}{dt} = \frac{d}{dt} \{ \sigma_0 [1 + G(t)] \} \left[\frac{d\varphi_0(\varepsilon^r)}{d\varepsilon^r} \right]^{-1},$$

где $d\varphi_0(\varepsilon^r)/d\varepsilon^r = g_0(\varepsilon^s)$ характеризует интенсивность деформационного упрочнения среды. Очевидно, что в рамках определяющего уравнения (2.4) характер ползучести будет определяться структурой временного оператора $G(t)$ и видом диаграммы мгновенного деформирования $\varphi_0(\varepsilon^s)$.

Диаграмму мгновенного деформирования $\varphi_0(\varepsilon^s)$ зададим системой уравнений

$$(2.5) \quad \varphi_0(\varepsilon^s) = \begin{cases} E\varepsilon^e & \text{при } 0 \leq \varepsilon^s \leq \varepsilon_Y, \\ E\varepsilon_Y + \varphi_0(\varepsilon^p) & \text{при } \varepsilon_Y \leq \varepsilon^s \leq \varepsilon_B \end{cases}$$

и рассмотрим в качестве примера особенности ползучести материалов с линейным ($\varphi_0(\varepsilon^p) = E^*\varepsilon^p$) и степенным ($\varphi_0(\varepsilon^p) = B(\varepsilon^p)^m$) упрочнением. Здесь $\varepsilon^e, \varepsilon^p$ — упругая и пластическая компоненты склерономной деформации; $\varepsilon_Y, \varepsilon_B$ — деформации, соответствующие пределу текучести и прочности; E — модуль упругости; E^* — модуль линейного упрочнения; B, m — коэффициенты степенного упрочнения.

Прежде всего отметим, что в области деформаций $\varepsilon^r < \varepsilon_Y$ ползучесть не зависит от характера исходного упрочнения материала, поскольку для всех материалов $g_0(\varepsilon^s) = E$ и для скорости ползучести из (2.4) можно записать

$$(2.6) \quad \frac{d\varepsilon^c}{dt} = a \frac{\sigma_0}{E} \frac{1}{t^{1-l}},$$

где принято $\varepsilon^c = \varepsilon^r - \varepsilon^0$; $G(t) = at^b$; $g_0(\varepsilon^s) = E$.

В области деформаций $\varepsilon^r > \varepsilon_Y$ для материалов с линейным упрочнением из (2.4) получим

$$(2.7) \quad \frac{d\varepsilon^c}{dt} = ab \frac{\sigma_0}{E^*} \frac{1}{t^{1-b}},$$

а для материалов со степенным упрочнением

$$(2.8) \quad \frac{d\varepsilon^c}{dt} = ab \left(\frac{1}{B} \right)^{1/m} \frac{\sigma_0}{m} [\sigma_0 (1 + at^b) - E\varepsilon_Y]^{(1-m)/m} \frac{1}{t^{1-b}}.$$

Здесь $g_0(\varepsilon^s) = E^*$ и $g_0(\varepsilon^s) = Bm(\varepsilon^s)^{m-1}$ соответственно. Графическая интерпретация особенностей ползучести, определяемых уравнениями (2.6)–(2.8), показана на рис. 3.

Как видно, в области деформаций $\varepsilon^c < \varepsilon_Y - \varepsilon^0$ (кривые 1) и для материалов с линейным упрочнением (рис. 3, а, кривые 2, 3) ползучесть является неустановившейся ($\varepsilon^c \rightarrow 0$ при $t \rightarrow \infty$ и $g_0(\varepsilon^s) = \text{const}$) и кривая ползучести не имеет точки перегиба, поскольку вторая производная от ε^c по t

$$\frac{d^2\varepsilon^c}{dt^2} = ab(b-1) \frac{\sigma_0}{g_0(\varepsilon^s)} \frac{1}{t^{2-b}}$$

всегда меньше нуля ($b-1 < 0$).

В материалах с четко выраженным переходом от упругого участка к участку с линейным упрочнением возникает эффект скачкообразного увеличения скорости неустановившейся ползучести (рис. 2, б, кривая 2) при постоянном напряжении. Эффект связан со скачкообразным изменением модуля упрочнения $g_0(\varepsilon^s)$ на величину $\Delta g_0(\varepsilon^s) = E - E^*$ при достижении реономной деформацией ε^r значений ε_Y в момент времени, когда $\psi_0(\varepsilon^r) = \varphi_0(\varepsilon_Y)$. Экспериментально эффект подтвержден в п. 3 на примере жаропрочного материала.

Сплав	T, °C	a, (1/4) ^b	b	E · 10 ⁻² , МПа	E* · 10 ⁻² , МПа	m	B · 10 ⁻² , МПа	σ _Y , МПа
12X1МФ	540	0,005	0,95	712	—	0,30	6,5	285
ЭИ481	600	0,059	0,33	900	28,0	—	—	450
ЭИ929ВД	800	0,087	0,34	653	—	0,28	94,0	620
	650	0,048	0,30	1150	80,2	—	—	550
ЭИ437Б	800	0,105	0,60	720	—	0,33	110,0	360
	850	0,100	0,77	870	—	—	—	310
ЭИ867	900	0,078	0,55	745	—	0,41	82,0	430
	950	0,407	0,56	680	—	0,41	82,0	320
ВЖЛ12УУ	1000	0,269	0,44	440	—	0,32	81,0	375

Ползучесть материалов со степенным упрочнением включает все три стадии (рис. 3, б, кривые 2, 3). В этом случае вторая производная от ε^c по t

$$\frac{d^2 \varepsilon^c}{dt^2} = ab \left(\frac{1}{B} \right)^{1/m} \frac{\sigma_0}{m} \left[\sigma_0 (1 + at^b) - E \varepsilon_Y \right]^{(1-m)/m} \times \\ \times \left\{ \frac{1-m}{m} \frac{ab \sigma t^b}{\left[\sigma_0 (1 + at^b) - E \varepsilon_Y \right]} - (1-b) \right\} \frac{1}{t^{2-b}}$$

в момент времени

$$(2.9) \quad t^* = \left[\frac{1-b}{a \left(\frac{b}{m} - 1 \right)} \left(1 - \frac{\sigma_Y}{\sigma_0} \right) \right]^{1/b}$$

становится равной нулю и на кривой ползучести появляется точка перегиба (рис. 3, б, звездочки). Скорость ползучести после точки перегиба возрастает, так как, согласно (2.4), при $g_0(\varepsilon^r) \rightarrow 0$ $\varepsilon^r \rightarrow \infty$. Участок кривой ползучести в области точки перегиба близок к прямолинейному и соответствует установившейся стадии. В случае, когда $g_0(\varepsilon^r) = 0$, то ползучесть при $\varepsilon^c > \varepsilon_Y - \varepsilon^0$ практически не зависит от времени (рис. 3, а, кривая 4).

3. Прогнозирование ползучести. В проблеме ползучести актуальны задачи прогнозирования и расчета остаточных деформаций при стационарном, ступенчатом и циклическом режимах нагружения. Для решения их в рамках построенных определяющих уравнений необходимо располагать функцией $\varphi_0(\varepsilon^s)$ и значениями реологических констант a и b .

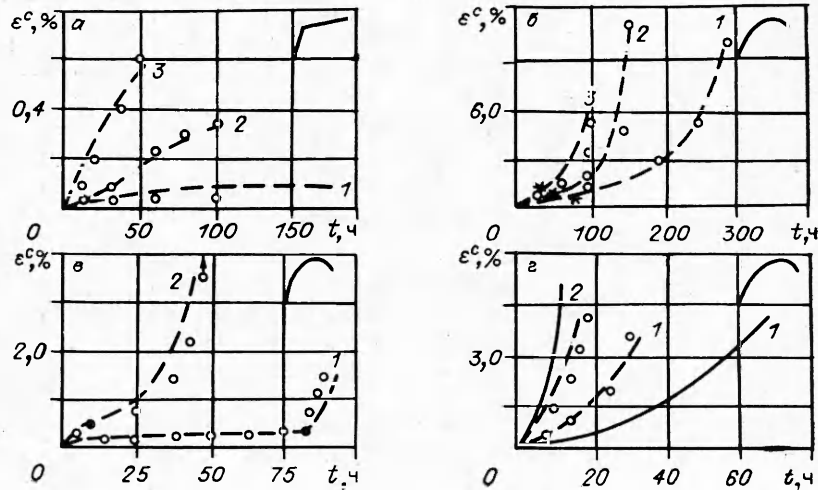
Функция $\varphi_0(\varepsilon^s)$, включая значения E , E^* , B , m , σ_Y , ε_Y , ε_B , задается по результатам аппроксимации экспериментальных данных одноосного растяжения гладких цилиндрических образцов. Коэффициенты a и b определяются с использованием той же диаграммы растяжения и одной кривой ползучести из соотношения [10]

$$(3.1) \quad \lg a + b \lg t_k = \lg (\sigma_k / \sigma - 1) \quad (k = 1, 2, \dots, i),$$

где t_k — произвольный момент времени на базовой кривой ползучести; σ_k — соответствующее величине деформации ползучести в момент времени t_k напряжение на диаграмме растяжения. Угол наклона прямой (3.1) отвечает значению b ; отрезок, отсекаемый на оси ординат ($t_k = 1$), равен $\lg a$. Значения коэффициентов, рассчитанные для некоторых конструкционных материалов, приведены в таблице. Базовая кривая ползучести ограничивалась установившейся стадией.

Рассмотрим прежде всего стационарный ($\sigma_0 = \text{const}$) режим нагружения. В этом случае для расчета деформаций ползучести достаточно воспользоваться уравнениями, разрешенными относительно ε^c . Тогда для материалов с линейным упрочнением, интегрируя (2.6) и (2.7) с начальным условием $\varepsilon^c = 0$ при $t = 0$, получаем

$$(3.2) \quad \varepsilon^c = \begin{cases} \frac{a}{E} \sigma_0 t^b, \\ \frac{\sigma_0}{E} (1 + at^b) + \frac{\sigma_Y}{E} \left(1 - \frac{E}{E^*} \right) - \frac{\sigma_0}{E}, \end{cases}$$



Р и с. 4

а для материалов со степенным упрочнением, интегрируя (2.6) и (2.8), имеем

$$(3.3) \quad \varepsilon^c = \begin{cases} \frac{a}{E} \sigma_0 t^b, \\ \left(\frac{1}{B}\right)^{1/m} [\sigma_0 (1 + at^b) - \sigma_Y]^{1/m} + \frac{\sigma_Y - \sigma_0}{E}. \end{cases}$$

Результаты расчетов (линии), выполненных по уравнениям (3.2) и (3.3), сопоставлены на рис. 4 с экспериментальными данными (точки) для сплава ЭИ437Б (а) при $T = 650^\circ\text{C}$ и $\sigma = 400, 470$ и 500 МПа (линии 1—3) и стали 12Х1МФ (б) при $T = 540^\circ\text{C}$ и $\sigma = 200, 250$ и 285 МПа (линии 1—3). В правом верхнем углу показан характер мгновенного деформирования. Положение точки перегиба, рассчитанное по уравнению (2.9), помечено звездочкой. Экспериментальные данные для сплава ЭИ437Б заимствованы из [8].

Ползучесть при переменных во времени напряжениях рассчитывается с использованием определяющих уравнений скоростного типа (2.6)—(2.8), которые отражают, по существу, временное упрочнение. Рассмотрим случай однократного ступенчатого изменения напряжений в режиме догрузки и частичной разгрузки. Результаты расчетов сопоставлены на рис. 4, в с экспериментальными данными (точки) для сплава ЭИ437Б при $T = 750^\circ\text{C}$, $\sigma_1 = 300 \rightarrow \sigma_2 = 400$ МПа и $T = 800^\circ\text{C}$, $\sigma_1 = 300 \rightarrow \sigma_2 = 200$ МПа (линии 1 и 2). Моменты догрузки и частичной разгрузки помечены темными точками на кривых 1 и 2.

Режим циклического нагружения зададим условием

$$(3.4) \quad \sigma_0 = \sigma_m + \sigma_a \gamma(f, t),$$

где σ_m , σ_a — статическая и циклическая компоненты напряжения; γ — периодическая функция времени t и частоты f . В реальных материалах, как известно [1, 2], циклическая нагрузка (3.4) ускоряет или замедляет ползучесть по отношению к стационарному ($\sigma_a = 0$) нагружению.

Влияние циклических нагрузок на процесс ползучести может быть учтено в форме чередования догрузок и разгрузок с использованием (2.6) и (2.8). В случае быстрого циклического нагружения ($f > 10$ Гц) достаточно учесть влияние σ_a на предел текучести σ_Y , что эквивалентно эквидистантному смещению функции $\varphi_0(\varepsilon^p)$ в (2.5) на σ_a [12]. Очевидно, что в этом случае циклическая нагрузка будет оказывать влияние на ползучесть в области деформаций $\varepsilon^c > \varepsilon_Y - \varepsilon^0$.

Рассмотрим случай, когда $\varphi_0(\varepsilon^p)$ уменьшается на величину σ_a . Тогда определяющее уравнение циклической ползучести при линейном упрочнении, используя (3.2), получим в виде

$$\varepsilon_a^c = \frac{[\sigma_m (1 + at^b) + \sigma_a]}{E^*} + \frac{\sigma_Y}{E} \left(1 - \frac{E}{E^*}\right) - \frac{\sigma_m}{E},$$

а при степенном упрочнении, используя (3.3), — в виде

$$(3.5) \quad \varepsilon_a^c = \left(\frac{1}{B}\right)^{1/m} [\sigma_m (1 + at^b) - (\sigma_Y - \sigma_a)]^{1/m} + \frac{(\sigma_Y - \sigma_m)}{E},$$

откуда следует, что циклическая нагрузка ускоряет процесс ползучести. Здесь ϵ_a — деформация циклической ползучести, а $\sigma_m = \sigma_0$.

Эффект упрочнения (возрастание $\varphi_0(\epsilon^p)$) при циклическом нагружении наблюдается в материалах со степенным упрочнением [12]. В данном случае по аналогии с (3.5)

$$(3.6) \quad \epsilon_a^c = \left(\frac{1}{B}\right)^{1/m} [\sigma_m (1 + at^b) - (\sigma_Y + \sigma_a)]^{1/m} + \frac{(\sigma_Y - \sigma_m)}{E}$$

и имеет место эффект замедления ползучести.

Результаты расчетов, выполненных по уравнениям (3.5) и (3.6), сопоставлены на рис. 4, с экспериментальными результатами (точки) для сплава ЭИ867 при $\sigma_m = 200$, $\sigma_a = 50$ МПа соответственно для $T = 900$ и 950 °С (линии 1 и 2), сплошными линиями нанесены кривые статической ($\sigma_a = 0$) ползучести.

В целом, как видно из рис. 4, получено вполне удовлетворительное качественное и количественное согласование расчета с экспериментом. В частности, для материалов с линейным упрочнением подтверждена возможность развития только неустановившейся ползучести (а), а для материалов со степенным упрочнением — всех трех стадий ползучести (б).

4. Прогнозирование длительной прочности. Долговечность в условиях ползучести для заданного уровня напряжения σ_k определим как точку на кривой ползучести, абсцисса которой отвечает моменту разрушения t_{Rk} , а ордината — величине накопленной к этому моменту деформации ползучести ϵ_{Rk}^c (см. рис. 2, б). В этом случае длительная прочность может быть рассчитана (при варьировании σ_k) из совместного решения системы уравнений

$$(4.1) \quad \epsilon^c = \int_0^t f[\sigma_k, \varphi_0, (\epsilon^s), G(t)] dt, \quad \epsilon_{Rk}^c = \Psi(t_{Rk}),$$

задающих закон ползучести и критерий разрушения соответственно.

Закон ползучести в зависимости от характера исходного упрочнения материала может быть выбран в виде (3.2) или (3.3). Выбор функции Ψ осуществим с использованием представления о разрушении в условиях ползучести как о процессе, сопровождающемся охрупчиванием материала [1—4]. В рамках предлагаемых соотношений (2.4) и (2.5) максимальная накапливаемая к моменту разрушения деформация ползучести ϵ_R^c не будет превышать ϵ_B (см. рис. 2, б, точки 1 и 2). Тогда охрупчивание определим как процесс снижения со временем величины ϵ_R^c по отношению к ϵ_B , а для функции $\Psi(t_R)$ выберем экспоненциальный закон (рис. 2, б, точки 2 и 4), так что

$$(4.2) \quad \epsilon_R^c = \epsilon_B \exp\left(-\frac{t_R}{L}\right) = \epsilon_R \left(\frac{\epsilon_{R0}^c}{\epsilon_B}\right)^{-t_R/t_{R0}}$$

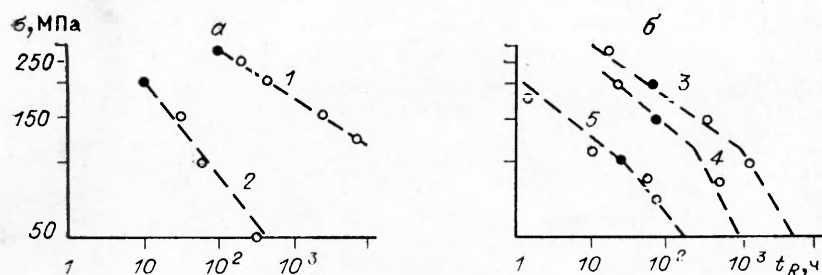
Здесь L — показатель экспоненты; ϵ_{R0}^c , t_{R0} — деформация, накопленная к моменту разрушения, и время до разрушения, определяемые по базовой кривой ползучести (см. рис. 2, б, кривая 2). В (4.2) принято, что при $t_R = 0$ $\epsilon_R^c = \epsilon_R$, при $t_R > 0$ $\epsilon_R^c < \epsilon_B$, при $t_{R4} > t_{R2}$ $\epsilon_{R4} < \epsilon_{R2}$. Экспоненциальную зависимость (4.2) следует интерпретировать не как физическую закономерность, а как удобную при определении коэффициентов аппроксимацию.

Особенность предлагаемого подхода — возможность аналитического определения точки перелома на кривой длительной прочности. Это связано с тем, что закон ползучести в (4.1) задается системой уравнений (3.2) или (3.3) и точка перелома будет соответственно определяться достижением деформацией ползучести величины ϵ_Y . В частности, для материалов со степенным упрочнением долговечность t_R^* , отвечающая точке перелома на кривой длительной прочности, находится из соотношения

$$(4.3) \quad t_R^* = \left(\frac{E\epsilon_Y - \sigma^*}{a\sigma^*}\right)^{1/b} = \left(\frac{\sigma_Y - \sigma^*}{a\sigma^*}\right)^{1/b},$$

где σ^* — напряжение, при котором за время t_R накапливается деформация ползучести $\epsilon^c = \epsilon_Y$.

На рис. 5 некоторые результаты прогнозирования длительной прочности сопоставлены с экспериментальными данными (точки) для хромомолибденовой стали 12Х1МФ при $T = 540$ °С, жаропрочных никелевых сплавов ЭИ437Б при $T = 850$ и 800 °С, ВЖЛ12У при $T = 1000$ °С, ЭИ867 при $T = 1000$ °С (линии 1—5). Расчет выполнен с использованием уравнений (3.3) и (4.2). Кривые 1 и 2 рассчитывали, исходя из условия $\epsilon_R^c = \epsilon_B$. Точки перелома на кривых длительной прочности 2—4 рассчитаны по уравнению (4.3). Базовые кри-



Р и с. 5

вые ползучести помечены темными точками. Максимальное расхождение между расчетом и экспериментом не превышает 30 % и относится в основном к области высоких напряжений. В практически важной задаче прогнозирования длительной прочности на базы, соизмеримые с эксплуатационными, расхождение не превышает 20 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Работнов Ю. Н. Ползучесть элементов конструкций.— М.: Наука, 1966.
2. Москвитин В. В. Циклические нагружения элементов конструкций.— М.: Наука, 1981.
3. Закономерности ползучести и длительной прочности: Справочник/Под общ. ред. С. А. Шестерикова.— М.: Машиностроение, 1983.
4. Бойл Дж., Спенс Дж. Анализ напряжений в конструкциях при ползучести.— М.: Мир, 1986.
5. Соснин О. В., Горев Б. В., Никитенко А. Ф. Энергетический вариант теории ползучести.— Новосибирск: ИГ СО АН СССР, 1986.
6. Davenport C. C. Correlation of creep and relaxation properties of copper // J. Appl. Mech.— 1938.— V. 5, N 2.
7. Колтунов М. А. Ползучесть и релаксация.— М.: Высш. шк., 1976.
8. Атлас диаграмм растяжения при высоких температурах, кривых ползучести и длительной прочности сталей и сплавов для двигателей/И. П. Булыгин, П. Т. Власова, А. Т. Горбодей и др.— М.: Оборонгиз, 1957.
9. Goldhoff R. M. The application of Rabotnov's creep parameter // Proc. ASTM.— 1961.— V. 61.— P. 907.
10. Работнов Ю. Н., Милейко С. Т. Кратковременная ползучесть.— М.: Наука, 1970.
11. Голуб В. П., Олейник А. С. К методике расчета коэффициентов в параметре ползучести Работнова // Машинноеведение.— 1988.— № 2.
12. Голуб В. П., Олейник А. С., Павлов В. Н. Особенности кратковременного деформирования в условиях вибраций // Машинноеведение.— 1988.— № 5.

г. Киев

Поступила 13/VI 1989 г.,
в окончательном варианте — 20/III 1990 г.

УДК 539.376

В. П. РАДЧЕНКО

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ВАРИАНТ ОДНООСНОЙ ТЕОРИИ ПОЛЗУЧЕСТИ И ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ

Все рекомендованные в существующей нормативно-технической документации [1] модели, описывающие третью стадию ползучести, базируются либо на теории упрочнения, либо на теории течения и имеют ряд их недостатков. Один из них — невозможность описания обратной ползучести при разгрузке, пренебрежение которой приводит к ошибкам при нахождении времени до разрушения, особенно в условиях нестационарных и циклических нагрузок. Проблемным остается вопрос о формулировке определяющих реологических уравнений, позволяющих описывать ползучесть за пределом упругости, а также о выборе критерия разрушения материалов, при помощи которого можно было бы с единых позиций описать следующие экспериментально наблюдаемые факты: немонотонный характер предельной неупругой деформации при разрушении, нелинейный характер диаграмм длительной прочности, наличие стадии «лавиной» ползучести. Поэтому в данной работе поставлена задача разработки теории ползучести и критерия разрушения металлов, которые позволили бы решить сформулированные выше задачи.

1. В основу конструирования соответствующих реологических уравнений был положен метод разделения деформаций, предложенный для первой и второй стадий