

## Теоретико-вероятностное моделирование процесса ползучести образцов при одноосном растяжении

**Н. А. Веклич**

Научно-исследовательский институт МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия

vna4985@yandex.ru

*Получены конечное выражение для относительной поврежденности материала образца в зависимости от полной неупругой деформации и дифференциальное уравнение ползучести, в котором скорость ползучести выражена в виде суммы двух слагаемых. В конечное выражение для относительной поврежденности и в уравнение ползучести входят восемь коэффициентов, подбирая которые методом минимизации квадратичной невязки, удалось получить удовлетворительное совпадение расчетных кривых ползучести различных материалов с экспериментальными. Известный из литературных источников разброс экспериментальных кривых ползучести многих материалов, имеющий случайный (непредсказуемый) характер, можно описать количественно, применяя тот или иной набор коэффициентов, т.е. полагая, что каждый из восьми коэффициентов, по сути, является случайной величиной.*

**Ключевые слова:** относительная поврежденность, скорость ползучести, вероятностный подход, функция старения.

### Обозначения

$t$	– время
$\varepsilon$	– пластическая деформация образца
$\varepsilon_0$	– мгновенная пластическая деформация
$p$	– деформация ползучести
$\sigma_0$	– номинальное напряжение при испытании на ползучесть
$T$	– температура испытания
$\sigma_{0,2}$	– предел текучести
$\sigma_b$	– предел прочности
$\varepsilon^*$	– относительное удлинение при разрыве
$\psi^*$	– относительное сужение при разрыве
$\varphi(t, \sigma_0, T), h(\varepsilon, T)$	– функции старения
$N_0$	– начальное количество дислокационных петель, которые вносят вклад в деформацию ползучести
$r_0$	– приращение деформации ползучести за счет одной дислокационной петли
$dp/dt$	– скорость ползучести
$dp_1/dt, dp_2/dt$	– вклад в скорость ползучести механизма дислокационных петель и механизма накопления поврежденностей соответственно

$S_0$	– номинальная площадь поперечного сечения образца
$\omega_0$	– элементарная дефектная площадка на границе одного зерна
$Q_2(\varepsilon)$	– вероятность образования элементарной дефектной площадки
$\omega$	– математическое ожидание дефектной площади поперечного сечения образца
$\Omega$	– относительная поврежденность материала при ползучести
$D_1, D_2$	– дисперсии деформации ползучести и дефектной площадки
$p_0, \lambda, p^*, \gamma, k, a, C$	– коэффициенты аппроксимации в уравнении ползучести
$\Delta$	– суммарная квадратичная невязка ординат

**Введение.** Известно, что при испытаниях материалов на длительную ползучесть (месяцы и годы) на обычной кривой ползучести можно условно выделить три участка: затухающей, установившейся и ускоренной ползучести [1–3]. Это позволяет предположить, что возникновение участков обусловлено одновременным влиянием на ползучесть двух механизмов деформирования материала: “гибели” и “размножения”, каждый из которых вносит определенный вклад в деформацию ползучести. Соответственно предлагается закон ползучести, согласно которому скорость ползучести выражается в виде суммы двух слагаемых. Одно слагаемое связано со случайными движениями (с однократными скачками) дислокационных петель в зернах кристаллов [4]. Вклад этого слагаемого в затухающую ползучесть достаточно подробно рассматривался ранее [5, 6]. Другое слагаемое связано с зарождением случайных микроскопических дефектов (микропоры и микротрещины) на границах зерен. Дефекты уменьшают эффективную площадь поперечного сечения образца, увеличивают истинное напряжение и, как следствие, скорость ползучести.

Для сталей четырех марок – ЭИ756, НТ9, 1Х18Н12Т, 2337 – проведено сравнение теоретических кривых ползучести с экспериментальными, полученными при температуре испытания 600°C и различных номинальных напряжениях. Для всех рассмотренных экспериментальных кривых ползучести оказалось возможным определить значения постоянных, входящих в уравнение ползучести, при которых расчетные кривые удовлетворительно согласуются с экспериментальными. Предлагаемая теория ползучести может быть применена для обработки ряда экспериментальных данных по длительной ползучести материалов и теоретического описания случайного процесса ползучести.

**Результаты испытаний сталей на ползучесть.** Воспользуемся экспериментальными данными по ползучести четырех сталей [7]. В табл. 1 приведен химический состав двух высокохромистых сталей ЭИ756, НТ9 и двух сталей аустенитного класса 1Х18Н12Т и 2337, в табл. 2 – их механические характеристики.

Сравнение данных, представленных в табл. 1 и 2, показывает, что химический состав и механические характеристики при кратковременном разрыве сталей ЭИ756 и НТ9 близки. Аналогичная близость свойств имеет место и для аустенитных сталей 1Х18Н12Т и 2337.

На рис. 1–6 приведены экспериментальные зависимости деформации ползучести  $p$  от времени  $t$  для исследуемых сталей при температуре  $T = 600^\circ\text{C}$ .

Т а б л и ц а 1

Химический состав сталей (%)

Сталь	C	Mn	Si	P	Cr	Ni	Cu	Mo	V	W	S
ЭИ756	0,120	0,50	0,30	0,025	10,08	0,10	0,14	0,70	0,30	1,75	0,006
НТ9	0,210	0,50	0,37	0,016	11,80	0,48	–	0,99	0,29	0,51	0,005
1Х18Н12Т	0,070	1,42	0,53	0,022	17,66	11,83	0,48 Ti	–	–	–	0,009
2337	0,062	1,78	0,66	0,029	17,60	10,60	0,43 Ti	–	–	–	0,009

Т а б л и ц а 2

Механические характеристики исследуемых сталей при кратковременном разрыве

Сталь	$T$ , °C	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_b$ , МПа	$\varepsilon^*$ , %	$\psi^*$ , %	Термическая обработка
ЭИ756	20	544	737	21,0	60,1	Нормализация при 1020...1050°C в течение 1 ч. Отпуск при 720...750°C в течение 3 ч
	20	592	791	21,0	60,4	
	600	354	378	23,3	87,1	
	600	325	360	16,6	91,2	
НТ9	20	574	798	23,3	55,3	Нормализация при 1050°C в течение 30 мин. Отпуск при 750°C в течение 2,5 ч
	20	548	750	26,6	55,2	
	600	333	383	10,0	88,8	
	600	339	392	16,6	88,9	
1Х18Н12Т	20	263	554	65,0	55,2	Аустенизация при 1060°C, охлаждение в воде. Стабилизация при 800°C, охлаждение в воде
	20	257	555	68,3	60,0	
	600	175	339	20,0	55,9	
	600	177	337	31,0	53,7	
2337	20	218	599	73,3	67,9	Нормализация при 1130°C в течение 20 мин
	20	227	603	72,3	75,2	
	600	148	438	27,8	43,7	
	600	152	436	30,0	55,3	

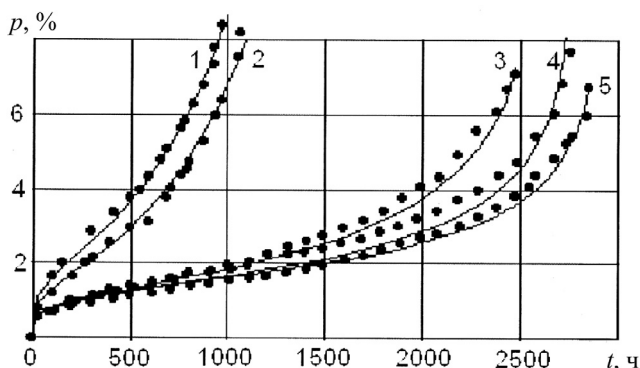


Рис. 1. Зависимость деформации ползучести  $p$  от времени  $t$  при напряжении 180 (1, 2) и 160 МПа (3–5) для стали ЭИ756. (Здесь и на рис. 2–6: точки – эксперимент; линии – расчет.)

Видно, что для экспериментальных кривых ползучести высокохромистых сталей ЭИ756 и НТ9 (рис. 1–3) характерно наличие на каждой кривой

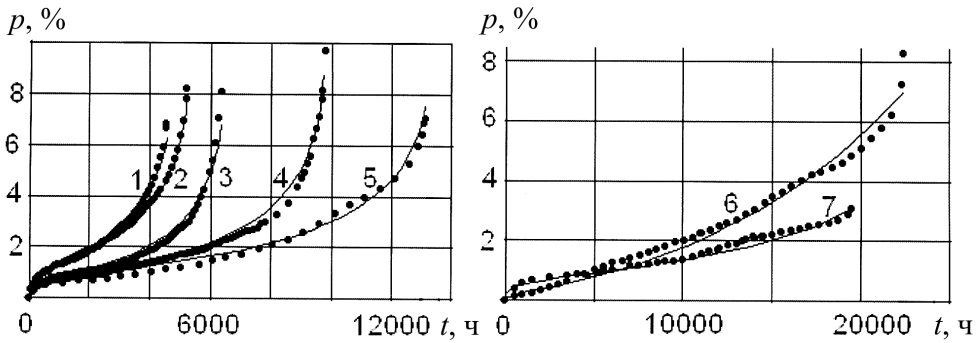


Рис. 2. Зависимость деформации ползучести  $p$  от времени  $t$  при напряжении 140 (1, 2), 120 (3–5) и 100 МПа (6, 7) для стали ЭИ756.

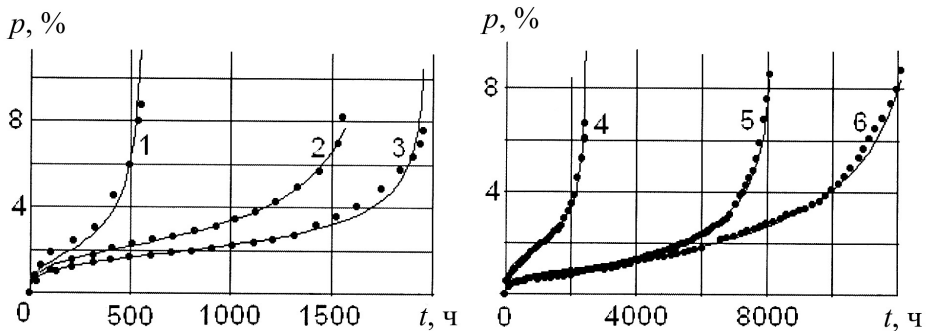


Рис. 3. Зависимость деформации ползучести  $p$  от времени  $t$  при напряжении 160 (1), 140 (2, 3), 120 (4) и 100 МПа (5, 6) для стали НТ9.

четко выраженного участка затухающей ползучести, который сменяется коротким почти прямолинейным участком установившейся ползучести и затем – участком ускоренной ползучести. Некоторым исключением является кривая ползучести 6 на рис. 2, на которой участок затухающей ползучести весьма непродолжителен и быстро сменяется участком ускоренной ползучести.

На кривых ползучести аустенитных сталей 1X18H12T и 2337 (рис. 4–6) участок затухающей ползучести выражен заметно слабее по сравнению с таковым высокохромистых сталей. Это достаточно хорошо видно из рис. 4 (кривые 1–4) и 6 (1–7) для больших номинальных напряжений. Участок ускоренной ползучести занимает на этих кривых большую часть. Анализ кривых ползучести, представленных на рис. 4 (кривые 5–7), 5 (1, 2) и 6 (8, 9) для малых номинальных напряжений  $\sigma_0$ , показывает, что участок затухающей ползучести выражен довольно слабо и почти незаметен, отмечаются в основном участки ускоренной ползучести.

Кроме участков затухающей и ускоренной ползучести наблюдается значительный разброс кривых ползучести, при одном и том же напряжении, который носит случайный характер. Представляется, что разброс обусловлен изменением структурных свойств материала, влияющих на ползучесть образцов. Ползучесть является, по сути, случайным процессом, а определяемые на основе экспериментов кривые ползучести – случайной его реализацией.

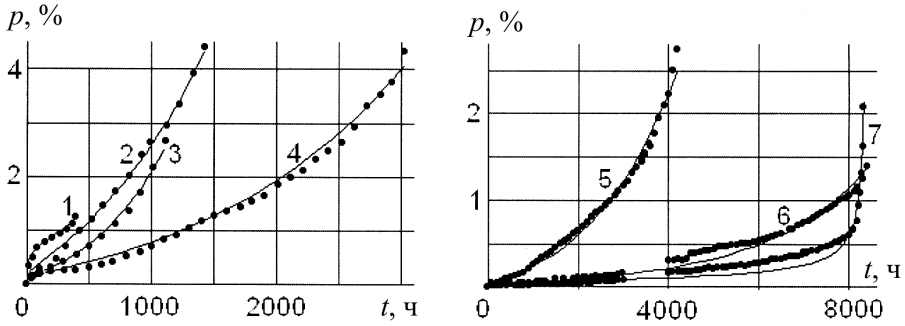


Рис. 4. Зависимость деформации ползучести  $p$  от времени  $t$  при напряжении 180 (1), 160 (2–4), 140 (5) и 120 МПа (6, 7) для стали 1X18H12T.

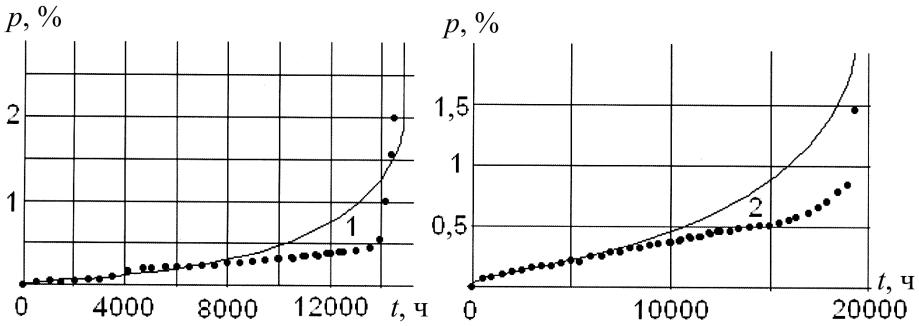


Рис. 5. Зависимость деформации ползучести  $p$  от времени  $t$  при напряжении 100 МПа (1, 2) для стали 1X18H12T.

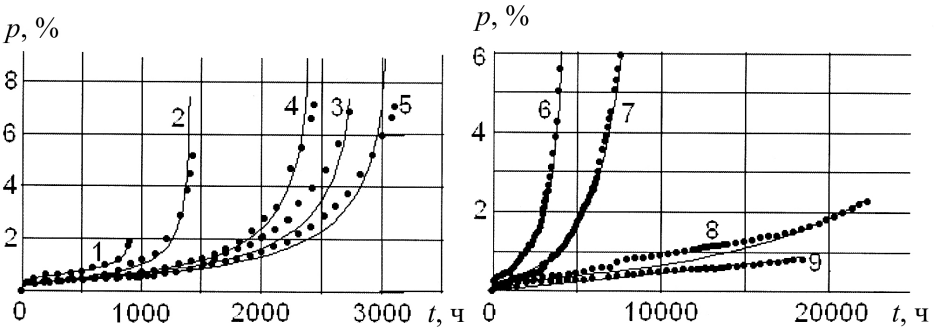


Рис. 6. Зависимость деформации ползучести  $p$  от времени  $t$  при напряжении 220 (1–3), 200 (4, 5), 160 (6, 7) и 120 МПа (8, 9) для стали 2337.

Отмеченные особенности экспериментальных кривых ползучести необходимо учитывать при теоретическом описании явления ползучести, которое целесообразно проводить на теоретико-вероятностной основе.

**Аналитическое описание процесса ползучести.** При теоретическом описании кривых ползучести (рис. 1–6) используем теорию ползучести, в которой скорость ползучести  $dp/dt$  равна сумме двух слагаемых:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{dp_1(t)}{dt} + \frac{dp_2(t)}{dt}. \quad (1)$$

Первое слагаемое  $dp_1(t)/dt$ , определяющее вклад в скорость ползучести механизма случайных движений (однократных скачков) дислокационных петель в зернах кристаллов, достаточно подробно рассматривалось ранее [6]. Для математического ожидания  $p_1(t)$  случайной деформации ползучести от скачков дислокационных петель на основе схемы испытаний Бернулли в [6] была получена формула

$$p_1(t) = p_0(1 - e^{-r(t)}), \quad r(t) = \int_0^t \varphi(\tau, \sigma_0, T) d\tau. \quad (2)$$

Постоянная величина  $p_0$  обозначает наибольшую деформацию ползучести, которая возникла бы при срыве с препятствий всех дислокационных петель. Функция старения  $\varphi(t, \sigma_0, T)$  при практических расчетах может быть задана в простейшем степенном виде [6]

$$\varphi(t, \sigma_0, T) = \lambda \frac{\sigma_0 T}{t^\beta}; \quad r(t) = \frac{\lambda}{1 - \beta} \sigma_0 T t^{1-\beta} \quad (3)$$

с постоянными величинами  $\lambda$  и  $\beta$ , причем  $\lambda > 0$ ,  $0 < \beta < 1$ .

Математическому ожиданию деформации ползучести  $p_1(t)$  (2) соответствует дисперсия  $D_1$ , которую рассчитываем по формуле  $D_1 = r_0 p_0 (1 - e^{-r(t)}) e^{-r(t)}$ , где  $r_0$  обозначает вклад одной дислокационной петли в деформацию ползучести образца. Однако из-за малости  $r_0$  дисперсия  $D_1$  слишком мала, что не позволяет объяснить наблюдаемый на рис. 1–6 существенный разброс экспериментальных кривых ползучести даже на участке затухающей ползучести. Полагаем, что этот разброс вызван случайным изменением структурных свойств материала и соответственно различием коэффициентов  $p_0$ ,  $\lambda$  и  $\beta$  при переходе от одного испытуемого образца к другому.

Вклад в скорость ползучести (1) механизма истощения ползучести вследствие “гибели” дислокационных петель определяем с помощью дифференцирования деформации ползучести  $p_1(t)$  (2) по времени  $t$ :

$$\frac{dp_1(t)}{dt} = p_0 \varphi(t, \sigma_0, T) e^{-r(t)}. \quad (4)$$

По мере роста пластической деформации в образце зарождается и накапливается поврежденность, которая приводит к ускорению процесса ползучести. Чтобы количественно описать влияние поврежденности на процесс ползучести, сделаем предположение, что при неупругом деформировании образца на границах многих зерен происходит рост микротрещин и слияние микропор. У каждого такого зерна в итоге образуется элементарная дефектная площадка некоторой малой, но ненулевой величины  $\omega_0$ .

Зарождение элементарной дефектной площадки на границе зерна является случайным событием, которое может как наступить, так и не наступить по достижении полной пластической деформации образца некоторой напе-

ред заданной величины  $\varepsilon$ . В дальнейшем эту деформацию будем представлять в виде суммы  $\varepsilon = \varepsilon_0 + p$ , где  $\varepsilon_0$  – мгновенная пластическая деформация образца;  $p$  – текущее значение деформации ползучести,  $p = p(t)$ . Мгновенная пластическая деформация  $\varepsilon_0$  определяется в зависимости от номинального напряжения  $\sigma_0$  с помощью диаграммы растяжения испытываемого материала.

Выделим какое-нибудь зерно и предположим, что при изменении пластической деформации от нулевого значения до некоторой величины  $\varepsilon$  реализуется случайное событие, при котором дефектная площадка  $\omega_0$  на границе этого зерна не возникает. При таком условии определим вероятность  $\Delta Q$  ее появления в бесконечно малом интервале изменения пластической деформации  $\varepsilon \dots \varepsilon + d\varepsilon$  с помощью равенства  $\Delta Q = h(\varepsilon)d\varepsilon$ , где  $h(\varepsilon)$  – функция старения. В эту функцию может входить температура испытания  $T$  в качестве независимого параметра. Тогда, проводя выкладки, аналогичные приведенным в [6, 7], получаем вероятность  $Q = Q(\varepsilon)$  случайного события, что по достижении пластической деформации  $\varepsilon$  на границе одного отдельно взятого зерна возникнет дефектная площадка  $\omega_0$ , причем

$$Q = Q(\varepsilon) = 1 - e^{-q(\varepsilon)}, \quad q(\varepsilon) = \int_0^{\varepsilon} h(s)ds. \quad (5)$$

В качестве простейшего примера функции старения  $h(\varepsilon)$  можно взять степенную функцию следующего вида:

$$h(\varepsilon) = \begin{cases} \frac{a}{(p_* - \varepsilon)^\gamma}, & 0 \leq \varepsilon < p_*, \quad \gamma \geq 1; \\ +\infty, & \varepsilon \geq p_*, \end{cases} \quad (6)$$

где  $a$ ,  $p_*$ ,  $\gamma$  – некоторые положительные постоянные величины, которые могут зависеть от температуры  $T$ . Постоянную величину  $p_*$  рассматриваем как некоторую предельную пластическую деформацию образца, по достижении которой на границе зерна обязательно зарождается элементарная дефектная площадка  $\omega_0$ . Представим также соответствующее выражение функции  $q(\varepsilon)$ , учитывая разложение  $\varepsilon = \varepsilon_0 + p$ :

$$q(\varepsilon) = \int_0^{\varepsilon} h(s)ds = \frac{a}{\gamma - 1} \left( \frac{1}{(p_* - \varepsilon_0 - p)^{\gamma-1}} - \frac{1}{(p_*)^{\gamma-1}} \right). \quad (7)$$

Рассмотрим произвольное поперечное сечение образца и обозначим  $N_0$  количество зерен в этом сечении, на границах которых могут зародиться дефектные площадки  $\omega_0$ . Тогда для математического ожидания дефектной площадки  $\omega$  получим следующую зависимость от  $\varepsilon$ :

$$\omega = \omega_0 N_0 Q(\varepsilon) = \omega_0 N_0 (1 - e^{-q(\varepsilon)}) = S_1 (1 - e^{-q(\varepsilon)}), \quad S_1 = \omega_0 N_0, \quad (8)$$

где постоянная  $S_1$  – наибольшая суммарная дефектная площадь поперечного сечения, которая может возникнуть на границах  $N_0$  зерен. В частности, допустимо равенство  $S_1 = S_0$ , тогда отношение площадей  $\alpha = S_1/S_0 = 1$ . Полагаем, что величина  $S_1$  является одинаковой для всех поперечных сечений образца, расположенных в пределах его рабочей длины.

Согласно (6)–(8) дефектная площадки  $\omega$  увеличивается по мере возрастания пластической деформации  $\varepsilon$  образца. Для частного случая функции старения (6) при  $\alpha = 1$  величина  $\omega$  приближается к номинальной площади образца  $S_0$ , если  $\varepsilon \rightarrow p_*$ .

Дисперсию  $D_2$  случайной дефектной площадки  $\omega$  определяем аналогично  $D_1$ , т.е. следуя схеме испытаний Бернулли, по формуле  $D_2 = \omega_0 S_1 (1 - Q(\varepsilon)) Q(\varepsilon)$ . Эта дисперсия пропорциональна малой величине  $\omega_0$  и, как и  $D_1$ , также мала, поэтому наличие дисперсии  $D_2$  не позволяет объяснить существенный разброс кривых ползучести при неизменных напряжениях и температуре испытания.

Определим истинное напряжение  $\sigma$  в образце:

$$\sigma = \frac{S_0}{S_0 - \omega} \sigma_0 = \frac{\sigma_0}{1 - \alpha(1 - e^{-q(\varepsilon)})} = \frac{\sigma_0}{1 - \Omega}, \quad 0 \leq \alpha \leq 1. \quad (9)$$

Входящую в формулу (9) величину  $\Omega = \alpha(1 - e^{-q(\varepsilon)})$  назовем относительной поврежденностью образца при ползучести.

Вклад поврежденности в скорость ползучести определяем в виде степенной функции от разности истинного  $\sigma$  и номинального  $\sigma_0$  напряжений. Тогда

$$\frac{dp_2}{dt} = C \sigma_0^k \frac{(1 - e^{-q(\varepsilon)})^k}{(1 - \alpha(1 - e^{-q(\varepsilon)}))^k}, \quad (10)$$

где  $C$  и  $k$  – некоторые положительные постоянные.

Заметим, что для учета влияния поврежденности вместо степенной функции (10) можно применить, например, логарифмическую функцию  $C \ln(\sigma/\sigma_0)$ . Тогда получим

$$\frac{dp_2}{dt} = C \ln \frac{\sigma}{\sigma_0}. \quad (11)$$

Суммируя вклад скоростей (4) и (10), получаем искомое уравнение ползучести:

$$\frac{dp}{dt} = p_0 \varphi(t, \sigma_0, T) e^{-r(t)} + C \sigma_0^k \frac{(1 - e^{-q(\varepsilon)})^k}{(1 - \alpha(1 - e^{-q(\varepsilon)}))^k}. \quad (12)$$

Если принять логарифмическую зависимость (11) и соотношение (4), то уравнение ползучести будет таким:

$$\frac{dp}{dt} = p_0 \varphi(t, \sigma_0, T) e^{-r(t)} + C \ln \frac{1}{1 - \alpha(1 - e^{-q(\varepsilon)})}. \quad (13)$$



При практических расчетах уравнения (12) и (13) решались относительно деформации ползучести  $p = p(t)$  при нулевом начальном условии  $p(0) = 0$  с учетом выражений (3), (7).

**Результаты расчетов.** Из рис. 1–6 видно, что номинальные напряжения  $\sigma_0$  меньше соответствующих пределов текучести  $\sigma_{0,2}$  сталей при температуре испытания  $T = 600^\circ\text{C}$  (табл. 2). Поэтому мгновенная пластическая деформация  $\varepsilon_0$  образцов в расчетах с использованием формулы (7) принималась равной нулю,  $\varepsilon_0 = 0$ ,  $\varepsilon = p$ . Как показали расчеты, оказалось возможным принять равенства  $\alpha = 1$ ,  $\beta = 0,66$  вследствие малой вариации этих величин. Отметим, что принятое численное значение показателя степени  $\beta = 0,66$  согласуется с теорией ползучести, предложенной Эндрейдом [3]. Остальные коэффициенты  $p_0$ ,  $\lambda$ ,  $p_*$ ,  $\gamma$ ,  $k$ ,  $a$ ,  $C$  находились достаточно простым в реализации методом последовательных приближений. С этой целью вводилась квадратичная невязка  $\Delta$  [8] как функция семи переменных  $\Delta = \Delta(p_0, \lambda, p_*, \gamma, k, a, C)$ , равная сумме квадратов разностей расчетных и экспериментальных ординат. Невязка  $\Delta$  непрерывно зависит от указанных семи переменных и характеризует отклонение теоретических кривых ползучести от экспериментальных (рис. 1–6).

На первом шаге этого метода задавались некоторые достаточно произвольные начальные значения коэффициентов  $p_0$ ,  $\lambda$ ,  $p_*$ ,  $\gamma$ ,  $k$ ,  $a$ ,  $C$ , с использованием которых решалось уравнение (12) и затем вычислялась невязка  $\Delta$ . Далее расчеты повторялись при изменении (уточнении) только одного из семи коэффициентов, начиная с того, который обеспечивал наиболее быстрое уменьшение невязки  $\Delta$ . Если в результате многократного повторного решения уравнения (12) и вычисления невязки  $\Delta$  изменение любого одного из семи коэффициентов не приводило к заметному уменьшению  $\Delta$ , уточняющие расчеты коэффициентов прекращались.

Окончательные результаты решения уравнения (12) показаны сплошными линиями на рис. 1–6. Сравнение теоретических результатов с экспериментальными свидетельствует об их удовлетворительном согласовании. То, что при некоторых напряжениях  $\sigma_0$  на рис. 1–6 приведены по две-три довольно разные экспериментальные кривые ползучести, можно объяснить как проявление случайности структурных свойств, влияющих на процесс ползучести сталей. Полученные для них расчетные коэффициенты являются случайной выборкой небольшого объема. Если усреднить эти коэффициенты обычным образом, можно было бы рассчитать и возможный ход осредненной кривой ползучести. Однако малый объем выборки, основанный на обработке данных всего лишь двух-трех экспериментов, не позволяет надежно предсказывать ни возможный вид осредненных кривых ползучести, ни тем более характеристики их разброса. По этой причине, а также чтобы не загромождать рис. 1–6 осредненные расчетные кривые ползучести не приведены.

## Выводы

1. Предложено теоретико-вероятностное описание результатов испытаний материалов на длительную ползучесть (месяцы и годы), когда на обычной кривой ползучести можно условно выделить три участка: затухающей, установившейся и ускоренной ползучести.

2. Проведено сравнение теоретических кривых ползучести с экспериментальными для четырех марок стали (ЭИ756, НТ9, 1Х18Н12Т, 2337) при температуре испытания 600°C и различных номинальных напряжениях.

3. Для всех рассмотренных экспериментальных кривых ползучести оказалось возможным определить значения постоянных, входящих в уравнение ползучести, при которых расчетные кривые ползучести удовлетворительно согласуются с экспериментальными.

4. Предлагаемое уравнение ползучести может быть применено для обработки ряда экспериментальных данных по длительной ползучести материалов и теоретического описания случайного процесса ползучести.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 11-08-0000-7 и 11-08-90401).

## Резюме

Отримано скінченний вираз для відносної пошкоженості матеріалу зразка в залежності від повної непружної деформації і диференціальне рівняння повзучості, в якому швидкість повзучості записується у вигляді суми двох доданків. У скінченний вираз для відносної пошкоженості і в рівняння повзучості входять вісім коефіцієнтів. Підбираючи ці коефіцієнти методом мінімізації квадратичного відхилення, вдалося отримати задовільний збіг розрахункових кривих повзучості різних матеріалів з експериментальними. Відомий з літературних джерел розкид експериментальних кривих повзучості багатьох матеріалів, що має випадковий (непередбачуваний) характер, можна описати кількісно за допомогою того чи іншого набору коефіцієнтів, тобто припускаючи, що кожен із восьми коефіцієнтів, по суті, є випадковою величиною.

1. *Работнов Ю. Н.* Механика деформируемого твердого тела. – М.: Наука, 1979. – 744 с.
2. *Закономерности ползучести и длительной прочности* / Под ред. С. А. Шестерикова. – М.: Машиностроение, 1983. – 101 с.
3. *Локощенко А. М.* Моделирование процесса ползучести и длительной прочности металлов. – М.: Изд-во Моск. гос. индустр. ун-та, 2007. – 352 с.
4. *Коттрелл А. Х.* Дислокации и пластическое течение в кристаллах / Под ред. А. Г. Рахштадта. – М.: Металлургиздат, 1958. – 267 с.
5. *Веклич Н. А.* Математическое моделирование одномерной длительной ползучести некоторых жаропрочных сталей // Проблемы динамики и прочности в турбомашиностроении: Тез. докл. IV Междунар. науч.-техн. конф. / Под ред. В. Т. Трощенко, А. П. Зиньковского. – Киев: Ин-т проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, 2011. – С. 37 – 38.
6. *Веклич Н. А.* Математическое моделирование одномерной ползучести в условиях ступенчатого изменения напряжения во времени // Прочность материалов и элементов конструкций: Тр. междунар. науч.-техн. конф. “Прочность материалов и элементов конструкций” (Киев, 28–30 сент. 2010 г.) / Под ред. В. Т. Трощенко. – Киев: Ин-т проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, 2011. – С. 215 – 222.

7. *Усовершенствование* методов оценки жаропрочных характеристик (предел длительной прочности, длительная пластичность) на срок службы более 100000 часов. – М.: ЦНИИТМАШ, 1978. – 61 с.
8. *Кокс Д., Смит В.* Теория восстановления / Под ред. с доп. Ю. К. Беляева. – М.: Сов. радио, 1967. – 118 с.
9. *Веклич Н. А., Локощенко А. М.* Взаимосвязанное моделирование скорости установившейся ползучести и времени до разрушения металлов // *Успехи механики сплошных сред.* – Владивосток: Дальнаука, 2009. – С. 127 – 134.

Поступила 14. 03. 2012