

УДК 539.376

## ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ПОЛЗУЧЕСТИ И ВОЗВРАТА У МЕТАЛЛОВ

ГОРЕЛОВ В. И.

В [1] предложены кинетические уравнения ползучести, конкретные варианты которых представлены в [2, 3], а в [4] обсуждались достоинства и недостатки предложенных уравнений. В [5, 6] сближение предсказаний теории с экспериментальными данными достигается путем введения структурных параметров с помощью разделения неупругой деформации, входящей в уравнения, на две или три составляющих. В данной работе дается экспериментальное обоснование этого разделения.

1. Изучение свойств деформации ползучести и мгновенной пластической деформации проводилось на отожженной в вакуумных печах технически чистой меди. Для испытаний на ползучесть использовалась машина типа АИМА 5-2. Образцы были разделены на три партии. Первая партия оставалась недеформированной. Во второй и третьей партиях предусматривалось получить при комнатной температуре 22% неупругой деформации. Образцы второй партии получали остаточную деформацию при быстром и непрерывном увеличении нагрузки, при этом деформации ползучести не успевали появляться. В образцах третьей партии деформация накапливалась в течение 120 ч.

Используя способ определения свободной энергии через электродвижущую силу [7], из трех пар образцов 1-2, 1-3 и 2-3 составлялись гальванические элементы, электролитом в которых являлся водный раствор медного купороса. Измерение напряжений в элементах осуществлялось микровольтметром типа В2-15 с разрешающей способностью  $10^{-7}$  В. Результаты экспериментов показали, что наибольшей свободной энергией обладает пара 1-2 ( $U=1,46 \cdot 10^4$  мкВ), а наименьшей — пара 1-3 ( $U=10^4$  мкВ).

На тех же образцах проводились эксперименты по определению декремента затухания, который измерялся на приборе Elastomat 1,015. Эксперименты показали, что образцы, подвергнутые мгновенной пластической деформации, имеют декремент затухания  $\delta=1,0749 \cdot 10^{-3}$ , а образцы, деформированные в условиях ползучести, —  $\delta=1,2063 \cdot 10^{-3}$ .

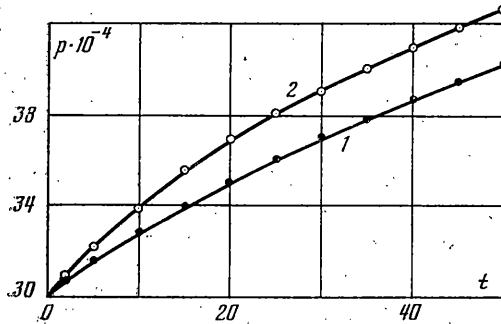
Таким образом, мгновенная пластическая деформация по сравнению с деформацией ползучести оказывает более сильное воздействие на свойства материала. Отсюда следует вывод, что изучаемые деформации существенно различны.

Перейдем к обоснованию разделения деформаций ползучести. Рассмотрим следующий эксперимент: задаются напряжения  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$  и определенная величина деформации ползучести; заданная деформация на одном образце накапливается при  $\sigma_1$ , а на другом — при  $\sigma_3$ ; после этого каждый из образцов перегружается на  $\sigma_2$ .

Испытанию подвергались образцы из отожженного материала. Геометрия образцов, измерение деформаций и контроль температур были стандартными для машин типа ЦСТ-3/Э. Программа исследований сведена в табл. 1, где  $\sigma$  представлены в МПа, а  $\tau$  — в часах. Результаты исследований после перегрузок для стали 5ХН1М представлены на фиг. 1. Эксперименты показывают, что образцы, накопившие равную деформацию ползучести при разных уровнях напряжений, при адекватных условиях вторичной ползучести имеют различие в поведении.

Материал	T, К	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$	$p \cdot 10^{-2}$	$\tau, \sigma_1$	$\tau, \sigma_3$
40ХСН2МВФ	698	400	375	350	0,3	126,4	336
5ХН1М	698	350	325	300	0,3	18,5	117
ЭИ 437Б	1073	200	160	120	0,2	0,9	6

Кривые ползучести, представленные на фиг. 1, согласно теории упрочнения, должны совпадать. Эффект, полученный в экспериментах, можно объяснить только за счет усложнения определяющих соотношений теории, например положив  $p^* = f(p, \sigma, \kappa)$ , где  $\kappa$  — некоторый структурный параметр. В [6, 8] получены определяющие уравнения, объясняющие этот эффект,



Фиг. 1

причем при построении моделей использовались экспериментальные кривые ползучести и возврата.

Рассматривая экспериментальные данные по ползучести [8] для неустановившейся стадии получена закономерность

$$\Gamma = \ln[a(\sigma)/(a(\sigma) - p_0(t) - v(\sigma)t)] = mt + b \quad (1.1)$$

где  $a(\sigma)$  — полная деформация неустановившейся ползучести;  $p_0(t)$  — полная неупругая деформация;  $v(\sigma)$  — скорость ползучести на установившейся стадии. Из соотношения (1.1) следуют выражения для мгновенной пластической деформации и полной неупругой деформации

$$p_s = a(\sigma)(1 - e^{-b}), \quad p_0 = v(\sigma)t + a(\sigma)\{1 - \exp[-(mt + b)]\} \quad (1.2)$$

Из этих соотношений получаем деформацию ползучести

$$p = p_0 - p_s = v(\sigma)t + a(\sigma)e^{-b}(1 - e^{-mt}) \quad (1.3)$$

В [8] было проведено разделение деформации ползучести на вязкую деформацию и деформацию неустановившейся ползучести. Аналитическое разделение было предложено в [5].

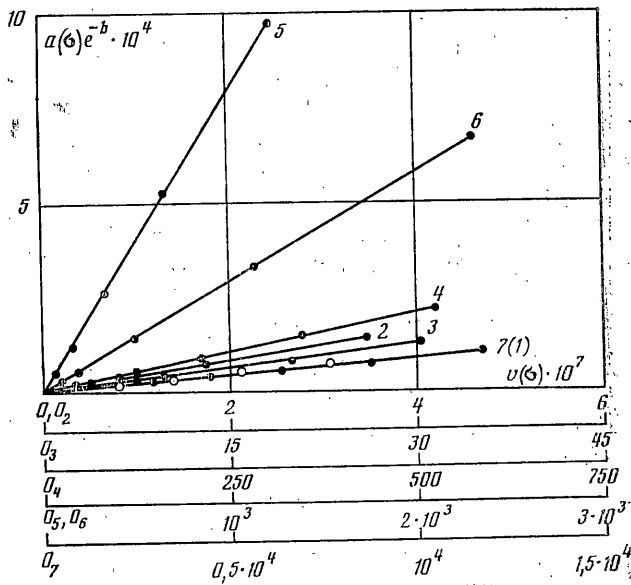
Используя (1.3) и величину деформации возврата, в [6] были предложены определяющие уравнения ползучести

$$p^* = a(\sigma)c^{-1}(\sigma)e^{-b\kappa} + v(\sigma) + ma(\sigma)e^{-b}, \quad \kappa^* = -m\kappa - m^2c(\sigma) \quad (1.4)$$

где  $\kappa$  — структурный параметр,  $c(\sigma)$  — величина полной деформации возврата, полученной после снятия нагрузки на установившейся стадии ползучести.

Таким образом, для конкретизации определяющих уравнений (1.4) необходимо знать  $v(\sigma)$ ,  $a(\sigma)$ ,  $c(\sigma)$ ,  $m$ ,  $b$ .

Разделение деформаций ползучести на мгновенную пластическую деформацию, деформацию неустановившейся ползучести и вязкую деформацию позволяет проанализировать гипотезу подобия кривых ползучести. Ранее гипотеза подобия проверялась для полной неупругой деформации



Фиг. 2

$p_0(t)$  [4]. Ниже показано, что эта гипотеза лучше выполняется для деформаций  $p(t)$ .

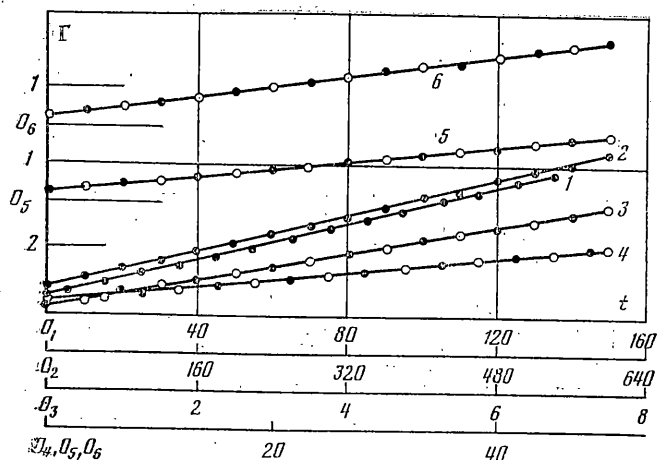
Из закономерности (1.1) следует подобие деформаций  $p_{1,i}$ . Если семейство кривых ползучести подобно, то для любой из пар, составленных из  $p_{1,i}$  и соответственно из  $p_{2,i}$ , коэффициенты подобия равны. Для выполнения этого условия достаточно, чтобы семейство асимптот к кривым ползучести пересекалось в одной точке (центре гомотетии), лежащей на оси абсцисс.

Из уравнения кривых ползучести (1.3) получаем уравнение их асимптот  $p^* = v(\sigma)\tau + a(\sigma)e^{-b}$ , из которого определяем точку пересечения асимптот с осью абсцисс

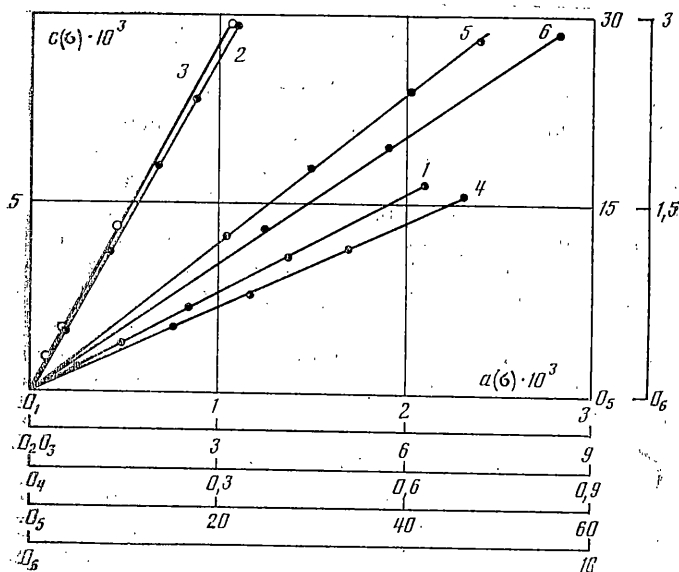
$$\tau = a(\sigma)e^{-b}/v(\sigma) \quad (1.5)$$

Таким образом, чтобы убедиться в подобии кривых ползучести, необходимо показать, что  $\tau$  не зависит от  $\sigma$ . Испытания проводились на сталях 40ХСН2МВФ, 3ХВ4СФ, 5ХН1М и сплаве ЭИ437Б. Методика испытания изложена ниже. Графики строились в координатах  $(a(\sigma)e^{-b}, v(\sigma))$ . Результаты экспериментов представлены на фиг. 2, где прямые 4-7 относятся к сталям 40ХСН2МВФ, 3ХВ4СФ, 5ХН1М при  $T=723$  К и сплаву ЭИ437Б при  $T=1073$  К; прямые 1-3 относятся к меди (прямая 1 — светлые точки, сливаются с прямой 7) при  $T=438$  К (опыты Дэвиса) [9], стали с содержанием 12% Сг при  $T=727$  К [10] и хромомолибденовой стали при  $T=798$  К (опыты Джонсона) [11].

Процедура обработки экспериментальных данных была следующей. Из экспериментальных кривых вычиталась упругая деформация  $\sigma/E$ , т. е. определялись кривые ползучести  $p_0(t)$ . Скорость установившейся ползучести  $v(\sigma)$  определялась методом наименьших квадратов как прямая, проходящая через экспериментальные точки установившегося участка ползучести. Из начала координат проводилась прямая параллельная прямой установившегося участка. Деформация  $a(\sigma)$  определялась как разность ординат кривой  $p_0 = p_0(t)$  и прямой  $p_0 = v(\sigma)t$  на установившемся участке кривой ползучести. По методике, предложенной в [8], определялись постоянные  $m$  и  $b$  для каждого материала. Мгновенная пластическая деформация определялась по (1.2) и вычиталась из  $p_0(t)$ . Гипотеза подобия проверялась для кривых  $p = p_0 - p_3$ . При этом центр гомотетии находился в одной точке, лежащей на оси ординат  $t$ . Постоянная  $\tau$  для разных материалов определялась по формуле (1.5). Линейная зависимость, показанная на фиг. 2, позволяет заключить, что гипотеза подобия выполняется



Фиг. 3



Фиг. 4

с большой точностью. Гипотеза о подобии кривых ползучести, проверенная на перечисленных выше материалах, позволяет упростить определяющие уравнения (1.4), так как  $a(\sigma)$  и  $v(\sigma)$  связаны линейной зависимостью.

2. Известно, что деформация обратной ползучести оказывает существенное влияние на поведение материала при перегрузках. Аналитические аппроксимации для  $c(\sigma)$  обсуждались в [4, 12-14]. Дальше устанавливается эмпирическая закономерность для деформации возврата.

По аналогии с [8], при обработке экспериментальных кривых возврата установлена закономерность

$$\Gamma_1 = \ln [c(\sigma) / (c(\sigma) - p_4(t))] = m_1 t + b_1 \quad (2.1)$$

где  $c(\sigma) = p_4(\infty)$  — полная деформация возврата,  $m_1$ ,  $b_1$  — постоянные материала, не зависящие от напряжений.

Если принять, что зависимость (2.1) аппроксимирует  $\Gamma_1(t)$  и при  $t=0$ , то получаем ( $\gamma(\sigma)$  — мгновенная деформация при разгрузке):

$$\Gamma_1 = \ln [c(\sigma) / (c(\sigma) - \gamma(\sigma))] = b_1 \quad (2.2)$$

Полученная закономерность (2.1) подвергалась экспериментальной проверке. Исследования проводились на сталях 40ХСН2МВФ, 3ХВ4СФ,

Материал	T, К	$m$	$b$	$q$	$q_1$
40ХСН2МВФ	698	0,0291	0,335	75,2	0,26
	723	0,0283	0,518	39,7	0,26
	748	0,0386	0,142	78,3	0,22
ЗХВ4СФ	673	0,0344	0,225	29,92	0,3
	698	0,0307	0,305	63,14	0,31
	723	0,0340	0,270	78,95	0,29
5ХН1М	673	0,0330	0,598	183,33	0,32
	698	0,0461	0,270	192,27	0,30
	723	0,0338	0,507	28,95	0,30
ЭИ437Б	1073	5,568	0,2	0,79	0,75

5ХН1М и сплаве ЭИ437Б. Стали испытывали в отожженном и закаленном состояниях при трех температурах. Надежность экспериментальных результатов обеспечивалась тем, что каждое испытание повторялось на десяти образцах. Испытания проводились на машинах ЦСТ-3/Э. Методика испытаний изложена в [15]. На установившейся стадии ползучести образец разгружался до  $\sigma=0$  и измерялась деформация возврата.

Экспериментальные данные подвергались статической обработке. Результаты обработки представлены на фиг. 3, где прямые 4–6 относятся к сталям 40ХСН2МВФ, ЗХВ4СФ6, 5ХН1М при  $T=723$  К; прямые 1–3 относятся к сталям с содержанием 0,35% С при  $T=723$  К [10], АТВ при  $T=810$  К [10] и к сплаву Д16 при  $T=473$  К [12]. Из графиков видно, что экспериментальные точки в исследуемом диапазоне группируются вдоль прямой.

Закономерность (2.1) аналогична закономерности (1.1). С целью установления зависимости между константами  $m$  и  $m_1$ ,  $b$  и  $b_1$  проводилось сопоставление графиков  $\Gamma-t$  и  $\Gamma_1-t$ . Результаты сопоставления показаны крестиками на фиг. 3 (прямые 3–6) и представлены в табл. 2 ( $m$  имеет размерность час<sup>-1</sup>). Видно, что в исследуемом диапазоне напряжений функции  $\Gamma(t)$  и  $\Gamma_1(t)$  совпадают. Последнее обстоятельство позволяет сделать заключение, что  $m=m_1$ ,  $b=b_1$ .

Из соотношений (2.1), (2.2) следует, что кривые обратной ползучести, также как и кривые неустановившейся ползучести, являются подобными:  $p_4=c(\sigma)f(t)$ ,  $p_1=a(\sigma)e^{-bf(t)}$ . Кривые  $p_1(t)$  и  $p_4(t)$  будут подобными, если отношение  $q_1=c(\sigma)/a(\sigma)$  не зависит от напряжений и является константой. Предположение о подобии проверялось в экспериментах, изложенных ниже. Результаты проверки представлены на фиг. 4, где прямые 1–4 относятся к сталям 40ХСН2МВФ, 5ХН1М при  $T=723$  К и сплавам ЭИ437Б при  $T=1073$  К; прямые 5, 6 относятся к сплаву Д16 при  $T=473$  К [12] и сплаву ЭИ723 при  $T=853$  К [14].

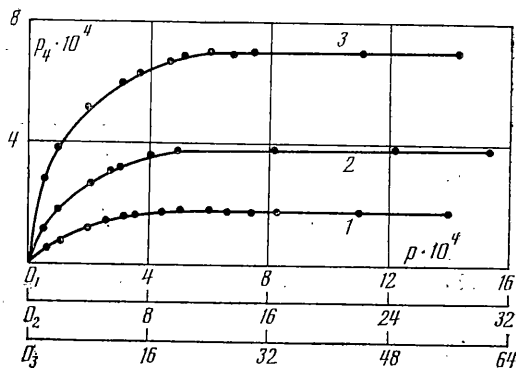
Методика обработки экспериментальных данных была следующая. Методом наименьших квадратов определялась прямая, проходящая через экспериментальные точки установившегося участка кривой возврата, при этом прямая ограничивает оставшуюся после возврата деформацию  $p(\infty)$ . Из деформации, полученной к моменту разгрузки  $p(t_1)$ , вычиталась деформация  $p(\infty)$  и мгновенная деформация  $\gamma(\sigma)$ , полученная по формуле (2.2). Гипотеза подобия проверялась для кривых  $p(t_1)-[p(\infty)-\gamma(\sigma)]=c(\sigma)e^{-b}$ . Линейная зависимость, показанная на фиг. 4, позволяет заключить, что гипотеза подобия выполняется с большей точностью.

Таким образом, вместо трех функций  $v(\sigma)$ ,  $a(\sigma)$ ,  $c(\sigma)$ , входящих в уравнения (1.4), необходимо определить одну из них, другие находятся с помощью коэффициентов  $q=a(\sigma)e^{-b}/v(\sigma)$  и  $q_1=c(\sigma)/a(\sigma)$  (табл. 2). Необходимо отметить, что коэффициенты  $q$  и  $q_1$  при заданной температуре являются постоянными, не зависящими от напряжений.

Накопление деформации возврата  $p_4$  в зависимости от деформации  $p$  изучали на сплаве ЭИ437Б при температуре  $T=1073$  К. Испытания проводили по двум программам. По первой программе образцы деформировались при напряжениях  $\sigma=\text{const}$ , затем через заданные промежутки времени ( $t=0,25; 0,5; 0,75; 1,0; 1,5; 2,0$  ч) производилась разгрузка ( $\sigma=0$ ) и измерялась деформация возврата. После прекращения обратной ползучести образцы дальнейшему испытанию не подвергались. Вторая программа предусматривала на одном образце при циклической ползучести с постоянной амплитудой напряжений полностью реализовать первую программу.

Результаты исследований представлены на фиг. 5 точками, которые определялись как среднеарифметические величины по десяти экспериментам. Кривые 1–3 соответствуют напряжениям:  $\sigma=120, 160, 200$  Мн/м<sup>2</sup>. Во всех случаях с ростом деформаций ползучести деформации возврата  $p_4$  растут с убывающей скоростью. Асимптотически приближаясь к прямой, параллельной оси  $p$ . Отсюда следует, что накопление деформаций возврата происходит только на неустановившейся стадии ползучести; на установившемся участке деформация  $p_4$  сохраняется постоянной.

Таким образом, мгновенные пластические деформации и деформации ползуче-



Фиг. 5

сти имеют различную физическую природу, так как внутренняя энергия и декременты затухания различны при одинаковой необратимой деформации; деформации ползучести в свою очередь целесообразно разделить на вязкую деформацию и деформацию неустановившейся ползучести, что позволяет объяснить экспериментальные данные при перегрузке на среднее напряжение (фиг. 1) и установить подобие кривых ползучести и кривых возврата.

Автор выражает признательность Г. И. Быковцеву за обсуждение полученных результатов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Работнов Ю. Н.* On the equations of state for creep // *Progress in Applied Mechanics*. N. Y.: McMillan. 1963. P. 307–345.
2. *Вилесова Н. С., Наместников В. С.* Об одном параметре упрочнения // *ПМТФ*. 1964. № 3. С. 177–179.
3. *Наместников В. С., Работнов Ю. Н.* О гипотезе уравнения состояния при ползучести // *ПМТФ*. 1961. № 3. С. 101–102.
4. *Работнов Ю. Н.* Ползучесть элементов конструкций. М.: Наука. 1966. 752 с.
5. *Шестериков С. А., Юмашева М. А.* Конкретизация уравнения состояния в теории ползучести // *Изв. АН СССР. МТТ*. 1984. № 1. С. 86–91.
6. *Быковцев Г. И., Горелов В. И.* Феноменологическое построение кинетических уравнений теории ползучести // *Докл. АН СССР (ДАН СССР)*. 1985. Т. 283. № 1. С. 58–61.
7. *Пугилов К. А.* Курс физики. Т. 2. М.: Гостехиздат. 1954. 592 с.
8. *Быковцев Г. И., Горелов В. И.* Об одной закономерности в ползучести металлов // *Докл. АН СССР (ДАН СССР)*. 1983. Т. 273. № 5. С. 1080–1082.
9. *Надаи А.* Пластичность и разрушение твердых тел. Т. 2. М.: Мир. 1969. 863 с.
10. *Soderberg C. R.* The interpretation of creep tests for machine design // *Trans. ASME*. 1936. V. 58. No. 8. P. 733–743.
11. *Пономарев С. Д., Бидерман В. Л., Лихарев К. К. и др.* Расчеты на прочность в машиностроении. Т. 2. М.: Машгиз. 1958. 974 с.
12. *Вишневецкий Г. Д., Косоулина Н. С.* Принцип наложения деформаций обратной ползучести // *Сб. тр. Ленингр. инж.-строит. ин-та*. 1975. № 104. С. 44–52.
13. *Симонян А. М.* Исследование ползучести стали X18H10T при больших деформациях // *Проблемы прочности*. 1975. № 6. С. 63–66.
14. *Хейн Е. А.* Об описании ползучести металлов с учетом упругого последействия // *Инж. журн. МТТ*. 1966. № 2. С. 103–105.
15. *Горелов В. И., Денисов Г. А.* Исследование реологических свойств сталей прессового инструмента // *Технология легких сплавов*. 1984. № 2. С. 19–22.

Куйбышев

Поступила в редакцию  
25.XI.1985