

## Влияние давления на долговечность, ползучесть металлов и параметры кинетического уравнения

© А.И. Петров, М.В. Разуваева

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,  
194021 Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: An.Petrov@mail.ioffe.ru, M.Razuvaeva@mail.ioffe.ru

(Поступило в Редакцию 29 января 2015 г.)

Приведены результаты оценки влияния всестороннего давления на активационные параметры кинетического уравнения, описывающего экспоненциальную зависимость скорости стационарной ползучести и долговечности поликристаллических металлов от напряжения и температуры. Показано, что в условиях давления параметрами, определяющими поведение металлов под нагрузкой, являются энергия активации и величина внутренних напряжений. Выявлена зависимость этих параметров от величины приложенного давления.

Согласно [1], скорость стационарной ползучести  $\dot{\epsilon}$  и долговечность  $t_f$  чистых металлов в зависимости от величины сдвигового напряжения  $\tau$  и температуры  $kT$  в области температур испытания  $(0.3-0.5)T_m$  описываются выражениями

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_0 \exp\left(-\frac{H_0 - V(\tau - \tau_\mu)}{kT}\right), \quad (1)$$

$$\dot{\epsilon} t_f = \dot{\epsilon}_0 t_{f_0} = 10^{-1} - 10^{-2}. \quad (2)$$

Здесь  $\dot{\epsilon}_0 = 10^7 \text{ s}^{-1}$  — константа,  $H_0$  — энергия активации, равная энергии самодиффузии [2],  $(\tau - \tau_\mu)$  — эффективное напряжение в местах термофлуктуационных перестроек,  $\tau_\mu$  — дальнедействующее внутреннее напряжение, создаваемое дислокациями,  $V$  — активационный объем, величина которого определяется размером сетки дислокаций в границах блоков [3].

В работах [4,5] для ряда чистых металлов показано, что уравнение (1) выполняется как в условиях, когда все параметры, входящие в (1), постоянны в широком диапазоне изменения температуры и напряжения, так и в условиях, когда величина  $\tau_\mu$  заметно уменьшается с ростом температуры испытания при сохранении постоянными остальных параметров уравнения.

Показано [6,7], что при испытании в условиях всестороннего давления время до разрушения увеличивается, а скорость стационарной ползучести уменьшается; при этом связь между ними остается такой же, как и при обычных условиях испытания, т.е. подчиняется уравнению (2). В то же время остается невыясненным вопрос о том, с изменением каких параметров уравнения (1) связаны долговечность и ползучесть в условиях давления. С целью выяснения этого вопроса в настоящей работе были проведены измерения долговечности и скорости ползучести в широком диапазоне изменения сдвигового напряжения и величины всестороннего сжатия. Измерения проводили как в условиях, когда нагружение образцов осуществляли после создания давления, так и в условиях циклического наложения — снятия давления на стационарной стадии ползучести.

Механические испытания — определение долговечности и скорости стационарной ползучести в зависимости от величины приложенного напряжения — проводили в условиях одноосного растяжения при комнатной температуре и давлениях от 0.1 до 1450 МПа. Подробно методика испытаний рассмотрена в [8]. Исследованию подвергали образцы наклепанного Al (99.96%), степень прокатки 96%, прокатанного цинка (99.9%) и образцы меди (99.9%) предварительно отожженные при 250°C, 1 h. Образцы имели форму двойной лопатки с длиной рабочей части  $22 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ , шириной  $3 \cdot 10^{-3} \text{ m}$  и толщиной  $1 \cdot 10^{-4} \text{ m}$  (Al, Zn). Размеры образцов меди составили  $(1 \cdot 10^{-2}) \times (1 \cdot 10^{-3}) \times (4.5 \cdot 10^{-5} \text{ m})$ .

Рассмотрим полученные данные. На рис. 1–3 приведены зависимости времени до разрушения, долговечности  $t_f$  от величины приложенного сдвигового напряже-

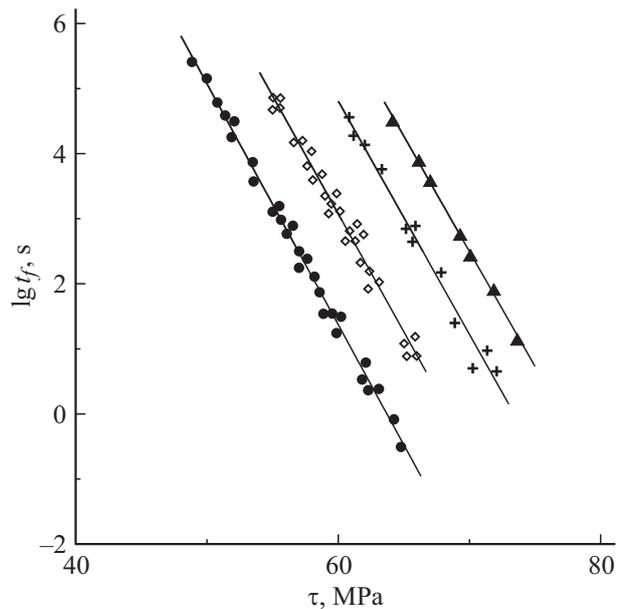


Рис. 1. Зависимость долговечности Al от величины сдвигового напряжения при разных давлениях: ● — 0.1, ◇ — 270, + — 540, ▲ — 1150 МПа.

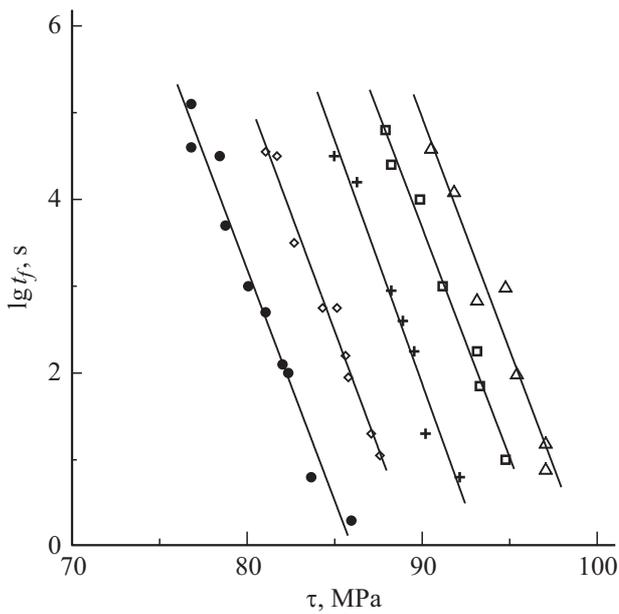


Рис. 2. Зависимость долговечности Cu от величины сдвигового напряжения при разных давлениях: ● — 0,1, ◇ — 270, + — 540, □ — 1000, △ — 1450 МПа.

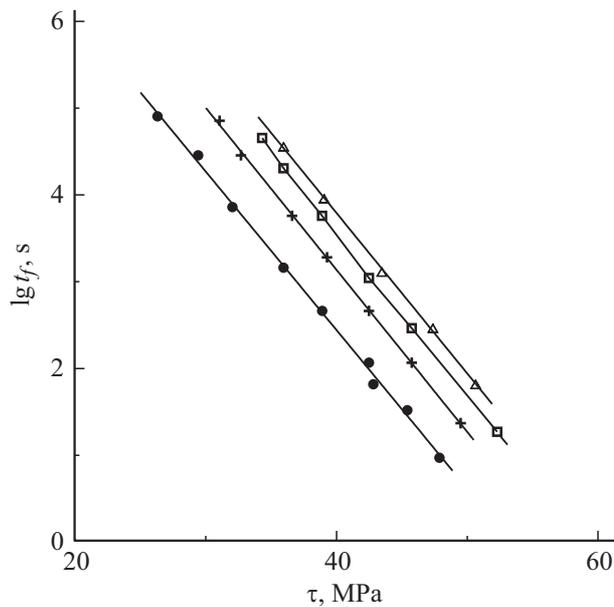


Рис. 3. Зависимость долговечности Zn от величины сдвигового напряжения при разных давлениях: ● — 0,1, + — 540, □ — 1000, △ — 1450 МПа.

ния при растяжении образцов в условиях всестороннего давления. Наблюдаемое с ростом давления увеличение долговечности, согласно уравнению (1), может быть связано с ростом энергии активации  $H_0$  в условиях давления либо с изменением величины внутреннего напряжения  $\tau_\mu$ . На величину активационного объема  $V$  давление не оказывает заметного влияния, поскольку наклон прямых  $\lg t_f - \tau$  при разных давлениях практически одинаков.

Изменение энергии активации процесса ползучести в условиях всестороннего давления может быть записано в виде

$$H_0(P) = H_0 + \Delta V \cdot P, \quad (3)$$

в котором активационный объем  $\Delta V$  определяется как

$$\Delta V = kT \Delta \ln \dot{\epsilon} / \Delta P \quad (4)$$

и вычисляется в опытах по циклическому наложению-снятию давления на стационарной стадии крипа.

Отметим, что опыты по влиянию циклического наложения-снятия давления, проведенные в условиях высокотемпературной ползучести при  $T \geq 0.5T_m$ , которая, как известно, контролируется диффузионным механизмом, показали совпадение активационного объема  $\Delta V$  и энергии ползучести с активационным объемом и энергией самодиффузии [9]. Для металлов с плотноупакованной решеткой величина  $\Delta V$  составила  $(2/3 - 3/4)$  их атомного объема  $V_a$ , для менее упакованных —  $(1/3 - 1/2)V_a$  [10].

На рис. 4 в качестве примера приведена зависимость деформации от времени испытания в условиях циклического наложения-снятия давления на стационарной стадии испытания Al. Расчеты, согласно (4), показали, что величина активационного объема в Al составила  $0.85 - 0.08$  от атомного объема. Для меди  $\Delta V = (0.9 \pm 0.1)V_a$ . Для цинка величина активационного объема  $\Delta V$  оказалась равной  $(0.5 \pm 0.1)V_a$ . Эта величина близка к активационному объему самодиффузии в цинке вдоль базисной плоскости, равному  $0.59V_a$  [11]. Отметим, что в исследуемом диапазоне давлений для всех металлов активационный объем  $\Delta V$  практически не зависит от величины приложенного всестороннего давления.

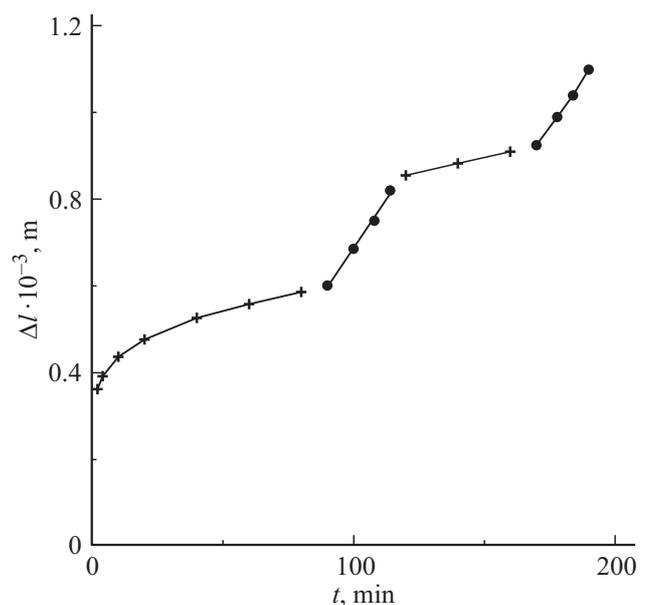


Рис. 4. Влияние циклической смены давления на скорость стационарной ползучести Al. Обозначения те же, что и на рис. 1.

Материал	$\Delta \lg t_f, s$	$\Delta \lg t_f(p\Delta V), s$	$\Delta \lg t_f(\tau_\mu), s$
Cu	4.2	0.6	3.6
Al	3.6	0.85	2.75
Zn	0.8	0.45	0.35

Оценим вклад роста в условиях давления энергии активации ползучести в увеличение долговечности под нагрузкой. В таблице для исследованных металлов приведены значения общего прироста долговечности  $\Delta \lg t_f$  при давлении 540 МПа по сравнению с испытанием при  $P = 0.1$  МПа и прироста долговечности за счет энергии активации  $[\Delta \lg t_f(P\Delta V)]$ . Из приведенных данных следует, что прирост долговечности за счет роста энергии составляет лишь небольшую долю от величины общего прироста долговечности. Согласно выражению (1), это означает, что вклад в увеличение долговечности под давлением, помимо энергии, может внести уменьшение под давлением эффективного напряжения  $(\tau - \tau_\mu)$  за счет увеличения внутреннего напряжения  $\tau_\mu$ . Эта часть упрочнения в таблице обозначена как  $[\Delta \lg t_f(\tau_\mu)]$ .

Известно [1], что величина  $\tau_\mu$  связана с общей плотностью дислокаций  $\rho$  выражением

$$\tau_\mu = \tau_0 + \alpha m G b \rho^{1/2}, \quad (5)$$

в котором  $\tau_0$  — напряжение трения решетки,  $\alpha = 0.2-0.4$  — коэффициент, зависящий от механизма взаимодействия дислокаций,  $m = 3.06$  — фактор Тейлора,  $G$  — модуль сдвига,  $b$  — вектор Бюргерса дислокаций.

Увеличение плотности дислокаций в меди и алюминии при ползучести в условиях давления  $P = 1050$  МПа наблюдали в работе [12]. Отмечается, что увеличение  $\rho$  происходит за счет уменьшения размера ячеек и уве-

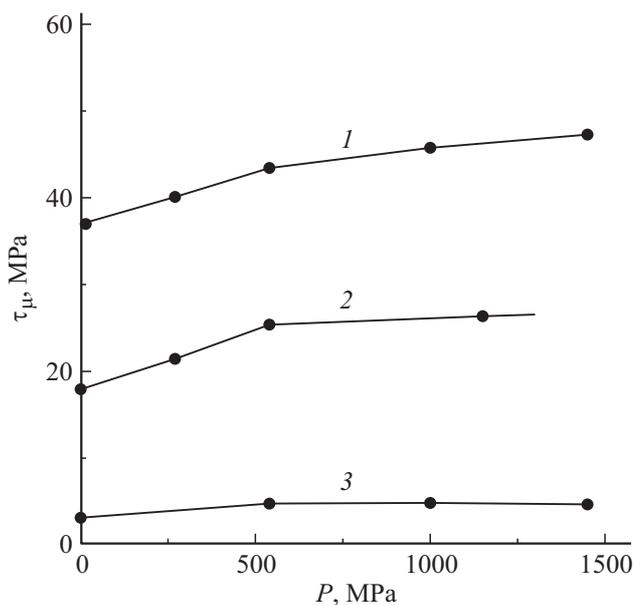


Рис. 5. Зависимость внутреннего напряжения  $\tau_\mu$  от величины давления для разных металлов: 1 — Cu, 2 — Al, 3 — Zn.

личения плотности дислокаций внутри ячеек. Это обстоятельство подтверждает справедливость сделанного заключения об увеличении под давлением внутреннего напряжения  $\tau_\mu$ .

Оценим изменение величины  $\tau_\mu$  с ростом давления. На рис. 5 приведены зависимости напряжения  $\tau_\mu$  от величины приложенного давления для исследованных металлов. Видно, что наиболее интенсивный рост величины  $\tau_\mu$  для всех металлов наблюдается в диапазоне давлений от 0.1 до 540 МПа. При больших давлениях имеет место незначительное увеличение  $\tau_\mu$  или его постоянство.

Выражение (5) справедливо при любом распределении дислокаций в металле, что позволяет оценить увеличение плотности дислокаций с ростом давления. Так, поскольку для меди величина  $\tau_0 = 0$  [13], то  $\rho_{P_2} \approx \rho_{P_1} (\tau_{\mu P_1} / \tau_{\mu P_2})^2$ , и при изменении давления от  $P_1 = 0.1$  МПа до  $P_2 = 540$  МПа плотность дислокаций возрастает в 1.4 раза.

Отметим, что наблюдаемое для алюминия и цинка слабое изменение  $\tau_\mu$  при давлениях свыше 540 МПа означает, что прирост долговечности в алюминии и цинке при больших давлениях практически полностью обусловлен ростом энергии активации ползучести и не связан с дополнительным деформационным упрочнением. В то же время для меди при  $P > 540$  МПа рост  $t_f$  по-прежнему обусловлен как увеличением энергии активации, так и уменьшением эффективного напряжения  $(\tau - \tau_\mu)$ .

Возможные причины упрочнения металлов при растяжении в условиях всестороннего сжатия рассматривались и раньше. Так, в работе [14] наблюдаемое упрочнение связывали с торможением в условиях давления развития микропористости. Однако влияние давления на образование и развитие пор имеет место только на третьей стадии крипа в шеечной части образца [15], продолжительность которой мала по сравнению со временем жизни всего образца. Следовательно, торможение в условиях давления развитие пор в шейке не может повлиять на изменение долговечности и скорости стационарной ползучести.

Другая причина, помимо увеличения энергии активации, связывалась с ростом под давлением активационного объема  $V$  [12]. Выше отмечалось, что рост энергии на величину  $p\Delta V$  объясняет лишь сравнительно малую часть прироста долговечности под давлением. Увеличение активационного объема  $V$ , как следует из уравнения (1), может привести к уменьшению энергии активации и дополнительному уменьшению наблюдаемого под давлением упрочнения. Влияние давления на эффективное напряжение в работе [12] не рассматривалось.

Таким образом, рост долговечности и соответственно уменьшение скорости стационарной ползучести в условиях высокого давления обусловлены увеличением энергии активации ползучести и ростом внутреннего напряжения за счет увеличения плотности дислокаций. Вклад этих факторов в наблюдаемое упрочнение меняется с ростом давления.

## Список литературы

- [1] Фридель Ж. Дислокации. М.: Мир, 1967. 634 с.
- [2] Малыгин Г.А., Владимиров Г.В., Привалова Н.Н. // ФММ. 1983. Т. 55. Вып. 5. С. 1005–1015.
- [3] Малыгин Г.А., Владимиров Г.В. // Проблемы прочности и пластичности. Л.: Наука, 1979. С. 96–108.
- [4] Петров А.И., Разуваева М.В. // ЖТФ. 2010. Т. 80. Вып. 6. С. 90–95.
- [5] Петров А.И., Разуваева М.В. // ЖТФ. 2011. Т. 81. Вып. 10. С. 36–39.
- [6] Петров А.И., Бетехтин В.И. // ФТТ. 1970. Т. 12. С. 2587–2591.
- [7] Петров А.И., Бетехтин В.И. // ФММ. 1972. Т. 34. С. 39–43.
- [8] Петров А.И., Бетехтин В.И. // Заводская лаборатория. 1970. № 8. С. 1004–1006.
- [9] Фомченко В.А., Зайцев В.И., Преснякова О.В. // Влияние высокого давления на ползучесть меди. Физика и техника высоких давлений. Киев: Наукова думка, 1982. Вып. 8. С. 71–75.
- [10] Chevalier G.T., Mac Cormic P., Ruoff A.L. // J. Appl. Phys. 1967. Vol. 38. N 9. P. 3697–3704.
- [11] Шиняев А.Я. // Фазовые превращения и свойства сплавов при высоком давлении. М.: Наука, 1973. 155 с.
- [12] Zaitsev V.L., Presnyakova O.V., Fomchenko V.A. // Evolution of dislocation structure on creep of Al and Cu under high pressure. High Pressure in Research and Industry. 8 th AIRAPT. Conf. 19th EHPRG Conf., 17–22 August 1981. Institute of Physical Chemistry, Univ. of Uppsala, Sweden, P. 403–407.
- [13] Kassner M.E. // Acta Mater. 2004. Vol. 52. P. 1–9.
- [14] Бетехтин В.И., Мышляев М.М., Петров П.И. и др. // ФММ. 1972. Т. 36. Вып. 4. С. 863–865.
- [15] Brownzigg A., Spitzigg A. et al. // Acta Metall. 1983. Vol. 6. N 4. P. 785–790.