

05

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 τ 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, τ_μ — 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 τ_μ 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-

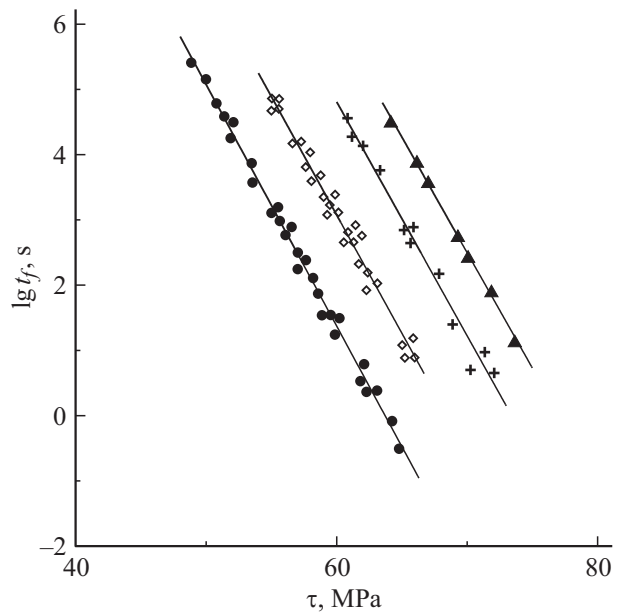


Рис. 1. Зависимость долговечности Al от величины сдвигового напряжения при разных давлениях: ● — 0.1, ◇ — 270, + — 540, ▲ — 1150 МПа.

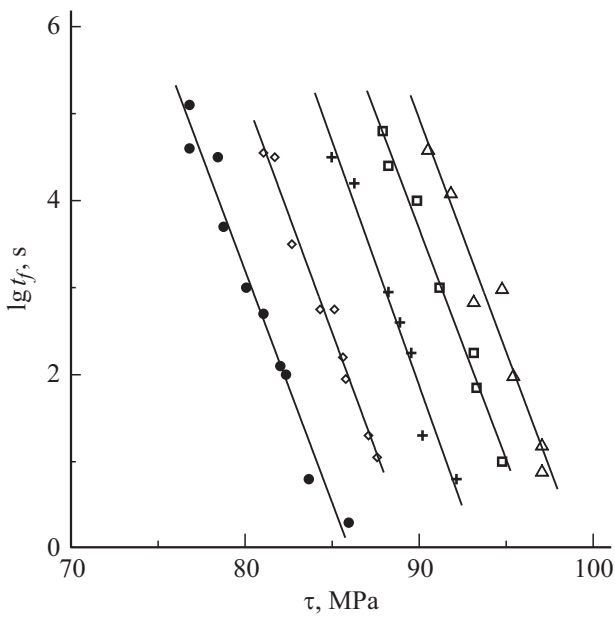


Рис. 2. Зависимость долговечности Cu от величины сдвигового напряжения при разных давлениях: ● — 0,1, ◇ — 270, + — 540, □ — 1000, △ — 1450 МПа.

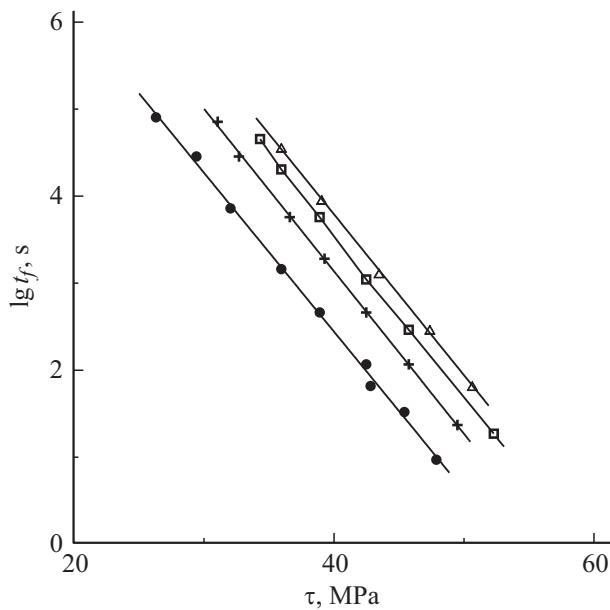


Рис. 3. Зависимость долговечности Zn от величины сдвигового напряжения при разных давлениях: ● — 0,1, + — 540, □ — 1000, △ — 1450 МПа.

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 τ_μ . 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 ΔV 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 ΔV и энергии ползучести с активационным объемом и энергией самодиффузии [9]. Для металлов с плотноупакованной решеткой величина ΔV 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 ΔV 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 ΔV практически не зависит от величины приложенного всестороннего давления.

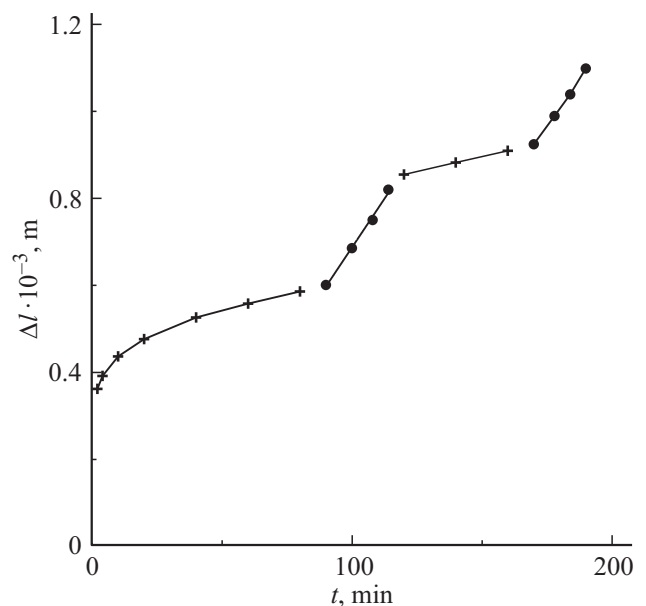


Рис. 4. Влияние циклической смены давления на скорость стационарной ползучести Al. Обозначения те же, что и на рис. 1.

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 τ_μ . Эта часть упрочнения в таблице обозначена как $[\Delta \lg t_f(\tau_\mu)]$.

Известно [1], что величина τ_μ связана с общей плотностью дислокаций ρ выражением

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

в котором τ_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 ρ происходит за счет уменьшения размера ячеек и уве-

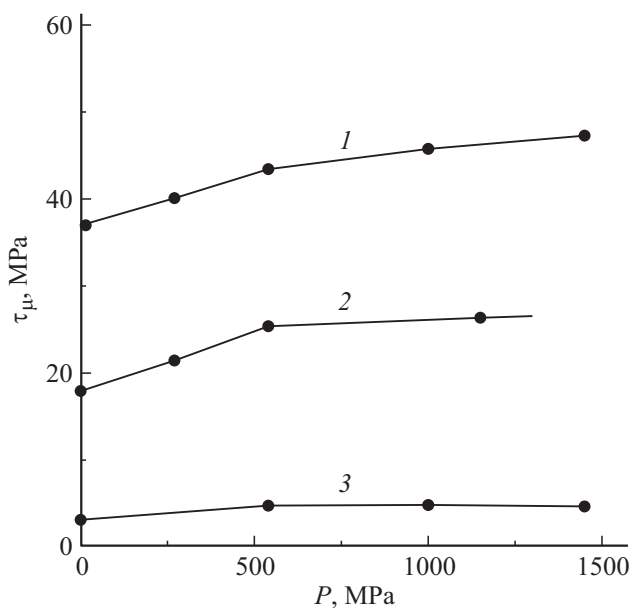


Рис. 5. Зависимость внутреннего напряжения τ_μ от величины давления для разных металлов: 1 — Cu, 2 — Al, 3 — Zn.

личения плотности дислокаций внутри ячеек. Это обстоятельство подтверждает справедливость сделанного заключения об увеличении под давлением внутреннего напряжения τ_μ .

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