

05

Влияние микроструктурных параметров пористости на разрушение и деформацию меди в процессе ползучести при 773 К

© 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 18 ноября 2015 г.)

Определены параметры межзеренного разрушения при ползучести меди в условиях растяжения при $T = 773$ К и $\sigma = 12.5$ МПа и проведена оценка вклада зернограницной пористости в увеличении скорости ползучести на стадии III. Показано, что увеличение скорости ползучести происходит не только вследствие уменьшения площади границ зерен из-за роста зернограницных пор, но также за счет увеличения плотности подвижных дислокаций и деформации материала вследствие образования самих пор и трещин.

Известно, что при высоких температурах разрушение металлов и сплавов происходит путем слияния пор или трещин, расположенных вдоль границ зерен примерно перпендикулярно приложенному напряжению [1–3]. Установлено, что поры образуются на ранних стадиях деформации и генерируются в течение всего крипа, особенно при температурах и напряжениях, при которых имеет место значительное скольжение зерен друг относительно друга. Показано, что диффузия вакансий оказывает определяющее влияние на рост пор и таким образом вакансионный процесс управляет ростом пор до тех пор пока процесс ползучести определяется движением и скольжением дислокаций [4–6].

Рост зернограницной пористости должен заметно влиять на долговечность и скорость ползучести металлов, поскольку образование пор сопровождается уменьшением живого сечения и ростом эффективного напряжения. Данная точка зрения обсуждается в ряде работ [7,8], однако количественных оценок влияния пористости, например, на скорость ползучести не проводилось.

Целью настоящей работы является оценка роста зернограницной пористости в процессе ползучести меди при $T = 0.5T_mK$, а также количественная оценка роли пор в ускорении скорости ползучести на стадии III и наступлении разрушения образца. Проводилась оценка изменения скорости крипа за счет различных факторов, обусловленных ростом зернограницной пористости, таких как уменьшение живого сечения, роста плотности дислокаций, увеличения их подвижности и деформации материала вследствие накопления самих пор.

Исследование проводили на образцах меди коммерческой чистоты 99.9% после прокатки и отжига при температуре 1073 К в течение 10 h в вакууме. Размер зерна составил $d = 1.5 \cdot 10^{-4}$ м. Образцы имели форму двойной лопатки с размером рабочей части $50 \times 9 \times 3 \cdot 10^{-3}$ м. Механические испытания осуществляли в режиме ползучести при температуре 500°C и напряжении 12.5 МПа. После испытания на ползучесть образцы использовали для определения количественных оценок межзеренного разрушения. Стереографическим

методом оценивали относительную долю площади границ зерен, занятую порами или трещинами (ξ), и объемную долю зернограницных пор (V_V). Величину V_V сопоставляли со степенью пористости $\Delta\rho/\rho$, которую определяли методом гидростатического взвешивания с точностью $1 \cdot 10^{-4}$. Методика измерения указанных величин рассмотрена в [9].

Рассмотрим экспериментальные данные. На рис. 1, 2 представлены зависимости деформации ε и скорости деформации $\dot{\varepsilon}$ от времени испытания в процессе ползучести меди при $\sigma = 12.5$ МПа и $T = 773$ К. Минимальная скорость ползучести $\dot{\varepsilon}_{ss}$ составляет $1 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ и наблюдается при времени испытания, равном 0.2 от времени до разрушения $t_f = (33 \pm 3)h$; максимальная скорость ползучести $\dot{\varepsilon}_t = 10 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ зафиксирована при времени испытания (t) $t = 0.93t_f$ (t_f — время до разрушения).

Наблюдаемое на третьей стадии заметное увеличение скорости ползучести может быть связано с ростом пористости в процессе испытания. На рис. 3, 4 представлены зависимости микроструктурных параметров пористости от времени испытания. Видно, что величина указанных

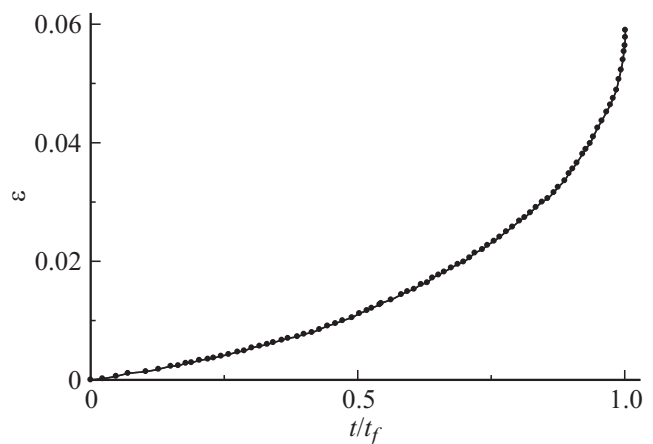


Рис. 1. Кривая ползучести меди при температуре 773 К и напряжении 12.5 МПа.

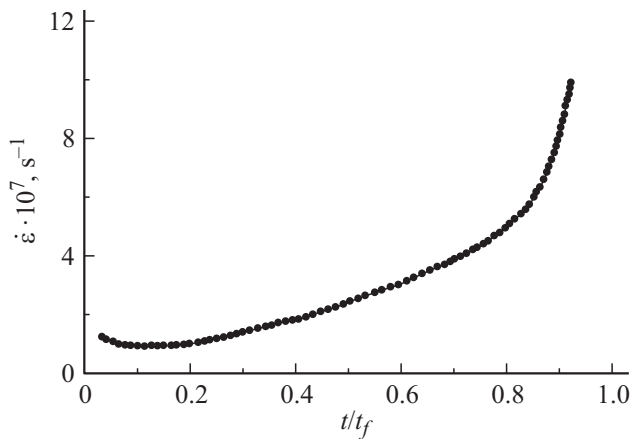


Рис. 2. Зависимость скорости ползучести образца меди от времени испытания.

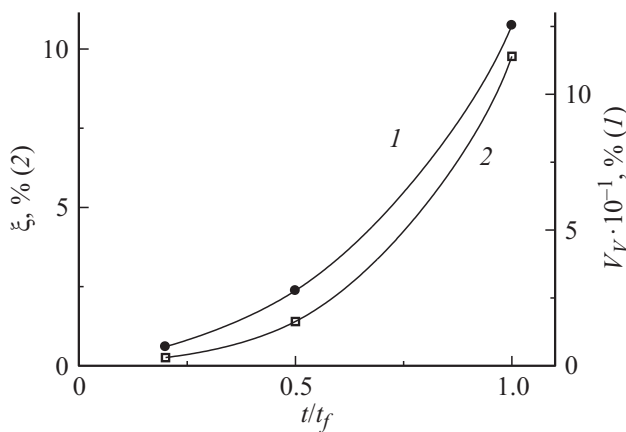


Рис. 3. Зависимость интегрального объема пор V_V (1) и зернограничной пористости ξ (2) в меди от времени испытания.

параметров также возрастает с увеличением продолжительности пребывания под нагрузкой. Возникает вопрос, какой из указанных параметров пористости в конечном итоге ответствен за макроразрушение: интегральная пористость V_V или пористость по границам зерен ξ . С этой целью определяли величину отношения межпорового расстояния L к диаметру пор D . В случае объемной пористости это отношение равно [10]

$$L/D = \frac{1}{(2V_V)^{1/3}} - 1 \quad (1)$$

и при $t = t_f$, $V_V = 1.2 \cdot 10^{-2}$, $L/D = 2.5$.

Для зернограничной пористости, согласно [10],

$$L/D = \frac{1}{(2\xi)^{1/2}} - 1 \quad (2)$$

и при $t = t_f$, $\xi = 10.75 \cdot 10^{-2}$, $L/D = 1.2$.

Сделанные оценки показывают, что в случае зернограничной пористости величина L/D близка к единице, что, согласно [11,12], означает перекрытие полей

напряжений у близко лежащих пор, их взаимодействие и последующее слияние с образованием микротрещин. Действительно, микроскопический анализ шлифов показывает, что в разорванных образцах по границам зерен встречаются как одиночные поры, так и трещины, состоящие в среднем из 4–5 слившихся пор. Следовательно, критерием перехода к макроразрушению в данном случае является критическая величина зернограничной пористости $\xi \approx 10.8 \cdot 10^{-2}$, в то время как интегральный объем пор V_V является лишь косвенной характеристикой процесса разрушения.

Рассмотрим возможные причины влияния роста зернограничной пористости на увеличение скорости крипа на III стадии ползучести. Известно, что ползучесть меди в области межзеренного разрушения контролируется скольжением и переползанием дислокаций, а рост пор происходит за счет вакансий, диффундирующих к границам зерен [6]. Известна модель, которая связывает увеличение скорости деформации на стадии III с уменьшением площади границ зерен за счет увеличения площади, занятой порами. (В этой модели предполагается, что средняя нагрузка на каждую границу зерна та же самая, что и средняя нагрузка на образце.) Связь скорости ползучести в момент времени t с удельной зернограничной пористостью ξ дается выражением [7,13]

$$\dot{\epsilon}_t = \dot{\epsilon}_{ss} (1 - \xi)^{-n}, \quad (3)$$

где $\dot{\epsilon}_{ss}$ — минимальная скорость ползучести, n — показатель чувствительности к напряжению в уравнении для скорости стационарной ползучести $\dot{\epsilon}_{ss} = k\sigma^n$ (для Cu $n = 5.3$ [9]). Из выражения (3) видно, что скорость деформации на стадии III является не только функцией приложенного напряжения σ , но зависит дополнительно от величины ξ .

Из уравнения (3) следует, что, например, при $t = 0.9t_f$ $\xi = 8 \cdot 10^{-2}$ и $\dot{\epsilon}_t = 1.65 \cdot 10^{-7} s^{-1}$. Полученная величина

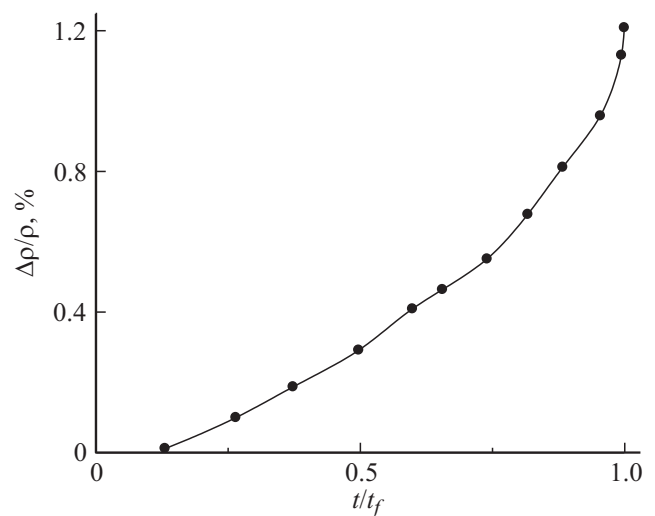


Рис. 4. Зависимость разуплотнения ($\Delta\rho/\rho$) в образце меди от времени испытания.

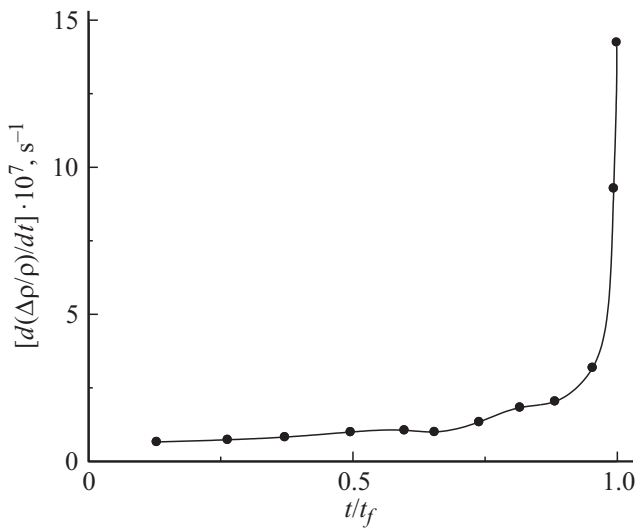


Рис. 5. Зависимость скорости накопления разуплотнения в меди от времени испытания.

на в 5 раз меньше наблюдаемого на опыте значения $\dot{\epsilon}_t = 8 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1}$.

Дополнительным фактором, который может привести к росту скорости ползучести, является деформация образца вдоль оси растяжения за счет образования пор: $\epsilon_Z = -1/3 \Delta\rho/\rho$ [14]. Из данных рис. 5 следует, что при времени $t = 0.9t_f$ прирост скорости ползучести за счет пор $\dot{\epsilon}_Z = -\frac{1}{3} \frac{d\Delta\rho/\rho}{dt}$ равен $0.7 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1}$.

Проведенная оценка показала, что вклад роста пористости в увеличение скорости ползучести составляет в сумме всего $2.35 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1}$. Это означает, что скорость ползучести на стадии III может также контролироваться увеличением плотности дислокаций или ростом скорости их движения. Рассмотрим эту возможность на примере модели, предложенной в работе [8].

В основе модели лежит представление о том, что диффузионный рост пор определяется ползучестью окружающего материала, т.е. они растут комбинацией крипа и диффузии. Полагают, что диффузионное поле растущих пор захватывает небольшую область по обе стороны от границы зерна шириной 2λ , зависящую от расстояния между центрами пор. Движение решеточных дислокаций, зародившихся уступами на границах зерен, происходит в указанной узкой области у границы зерна. (Отметим, что деформация за счет скольжения и переползания дислокаций рассматривается в качестве аккомодации зернограничного проскальзывания.)

Поскольку зарождение и движение дислокаций определяется модулем сдвига G , оценим изменение величины G в указанной, прилегающей к границе, узкой области.

На рис. 6 представлена зависимость модуля G от величины интегральной пористости $\Delta\rho/\rho$ для образцов меди, растянутых в условиях ползучести при разных условиях испытания. Полученная линейная зависимость

может быть представлена в виде

$$\frac{\Delta G}{G} = \alpha \frac{\Delta\rho}{\rho}, \tag{4}$$

где $\alpha = 7.4$. В выражении (4) величина $\Delta\rho/\rho$ приведена для образца в целом. Оценим величину интегральной пористости $\Delta\rho/\rho$ в приграничной диффузионной области, содержащей поры. Согласно [15], ширина диффузионной зоны 2λ зависит от расстояния между центрами пор l и для кристаллических материалов может быть взята равной $2l$. Из уравнения (2) следует, что при $t = 0.9t_f$, $\xi = 8 \cdot 10^{-2}$ и $2l = 3D$. Как показала оценка пористость в указанной области составляет примерно четвертую часть от величины зернограничной пористости ($\Delta\rho/\rho = 0.22\xi$). В этом случае, согласно (4), $\Delta G/G = 0.13$; и при $T = 500^\circ\text{C}$ $G_0 = 3.8 \cdot 10^4 \text{ МПа}$ [16], $\Delta G = 0.5 \cdot 10^4 \text{ МПа}$, $G_t = 3.3 \cdot 10^4 \text{ МПа}$ и $G_0/G_t = 1.15$.

Плотность дислокаций в диффузионной зоне может быть оценена с помощью эмпирического выражения [17,18]

$$N = \frac{1}{b^2} \left(\frac{\sigma}{G} \right)^2, \tag{5}$$

в котором напряжение σ возрастает вследствие роста зернограничной пористости [7]:

$$\sigma_t = \frac{\sigma_0}{1 - \xi} \tag{6}$$

и при $\xi = 8 \cdot 10^{-2}$ становится равным $\sigma_t = 1.1\sigma_0$.

Используя (5), при $\sigma_t = 1.1\sigma_0$ и $G_t = G_0/1.15$ плотность дислокаций в момент времени $t = 0.9t_f$ возрастает до значения $N_t = 1.2N_0$, где N_0 — плотность дислокаций на стационарной стадии крипа.

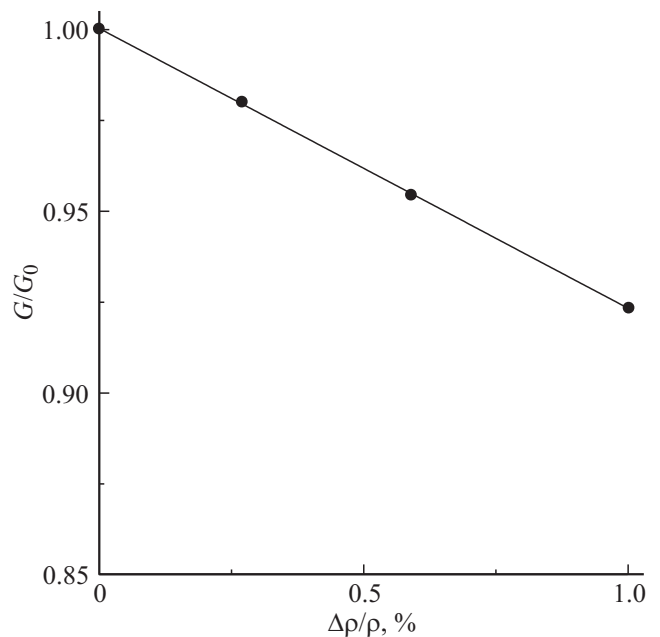


Рис. 6. Зависимость модуля сдвига от величины разуплотнения при испытании меди в режиме ползучести при 773 К и 12.5 МПа.

Увеличение плотности подвижных дислокаций в диффузионной зоне увеличивает скорость деформации

$$\dot{\epsilon} = Nb\vartheta, \quad (7)$$

где ϑ — скорость движения дислокаций, которая согласно [19], для меди в диапазоне изменения напряжения от 0.4 до 25 МПа пропорциональна величине приложенного напряжения и к моменту времени $t = 0.9t_f$, как и напряжение σ , возрастает в 1.1 раза. Следовательно, скорость деформации за счет роста плотности дислокаций в диффузионной зоне возрастает в 1.55 раза и составит $\dot{\epsilon}_t = 1.55\dot{\epsilon}_{ss} = 1.55 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1}$.

В рассмотренной модели пластической деформации поликристаллического материала имеются области гомогенной и негомогенной деформации. В теле зерна, за исключением прилегающей к границе диффузионной зоне, скорость деформации постоянна в течение всего времени испытания и равна $\dot{\epsilon}_{ss}$. В приграничной области шириной 2λ деформация нарастает с увеличением степени зернограничной пористости. Скорость деформации в этой области определяется увеличением напряжения на границе зерна, образованием и ростом самих пор, и движением дислокаций в этой области, плотность которых также увеличивается с увеличением размера пор и уменьшением расстояния между ними. Следовательно, суммарная скорость деформации состоит из трех слагаемых и равна $\dot{\epsilon}_t = (1.65 + 0.7 + 1.55) \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1} = 3.9 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1}$, что в 2 раза меньше опытного значения $\dot{\epsilon}_t$. Таким образом, скорость деформации в негомогенной области значительно выше, чем скорость деформации в гомогенной области. Это позволяет думать, что процессы, проходящие в диффузионной зоне, и определяют скорость деформации образца в целом. Наблюдаемое различие в оценке скорости ползучести при $t = 0.9t_f$ по сравнению с опытным значением может быть обусловлено увеличением скорости деформации за счет образования трещин, напряженное состояние вблизи которых возрастает при увеличении числа трещин и росте их длины. Как показал металлографический анализ шлифов деформированной меди, образование трещин по границам зерен происходит при временах испытания свыше $0.8t_f$. Можно поэтому думать, что заметное увеличение скорости накопления разуплотнения (рис. 5) и скорости деформации (рис. 2), наблюдающееся при временах испытания свыше $0.8t_f$, обусловлено образованием и ростом зернограничных трещин.

Таким образом, показано, что разрушение меди в процессе ползучести при $T = 0.5T_mK$ происходит при достижении критического разуплотнения по границам зерен. Наблюдаемый в этих условиях рост скорости ползучести определяется не только увеличением действующего напряжения за счет уменьшения вследствие роста пор площади границ зерен, но и увеличением плотности дислокаций в узких приграничных зонах, а также накоплением самих пор и зернограничных трещин.

Список литературы

- [1] Venkiteswaran P.K., Taplin M.R. // Met. Sci. J. 1970. Vol. 4. P. 103.
- [2] Dayson B.F., Radgers M.J. // Metall. Sci. 1974. Vol. 8. P. 261.
- [3] Raj R. // Acta Metall. 1978. Vol. 26. P. 341–349.
- [4] Hull D., Rimmer R.E. // Phil. Mag. 1959. Vol. 4. P. 673.
- [5] Rarcliffe R.T., Greenwood R.I. // J. Inst. Metals. 1963. Vol. 12. P. 59.
- [6] Raj R., Ashby M.E. // Acta Metall. 1975. Vol. 23. P. 653.
- [7] Davies P.W., Evans R.W. // Acta Metall. 1965. Vol. 13. P. 353.
- [8] Edward G.H., Ashby M.E. // Acta Metall. 1979. Vol. 27. P. 1505–1518.
- [9] Sklenicka V., Kucharova K., Betechtina V.I., Kadomtsev A.G., Petrov A.I. // Kavove Materialy. 1988. Vol. 5. 26. P. 515–532.
- [10] Fullman R.L. // Trans. Am. Inst. Min. Engrs. 1953. Vol. 197. P. 447–451.
- [11] Макклинен Ф. Пластические аспекты разрушения. Т. 3 / Под ред. Г.М. Лабович. М.: Мир, 1967. 796 с.
- [12] Петров А.И., Разуваева М.В. // ЖТФ. 2015. Т. 85. Вып. 4. С. 130–133.
- [13] Dayson B.F., Verma A.K., Szkopiak Z.C. // Acta Metall. 1981. Vol. 29. P. 1573–1520.
- [14] Raj R. // Acta Metall. 1983. Vol. 31. P. 29–36.
- [15] Pavinich, Raj R. // Met. Trans. A. 1977. Vol. 8. P. 1917–1933.
- [16] Staker M.R., Holt D.L. // Acta Metall. 1972. Vol. 20. P. 569–579.
- [17] Weertman J. // Trans. ASM. 1968. Vol. 61. P. 681.
- [18] Spingarn J.R., Barnett D.M., Nix W.D. // Acta Metall. 1979. Vol. 2. P. 1549–1561.
- [19] Деформационное упрочнение и разрушение поликристаллических металлов / Под ред. В.И. Трефилова. Киев: Наукова думка, 1987. 245 с.