

05;12

## Влияние промежуточного воздействия всестороннего давления на высокотемпературную ползучесть и долговечность меди

© 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

(Поступило в Редакцию 30 мая 2006 г.)

Изучены закономерности промежуточного воздействия всестороннего сжатия на разных стадиях испытания меди в области высокотемпературной ползучести. Испытания, проведенные при постоянной величине растягивающего напряжения 12.5 МПа при 773 К, показали, что наложение давления на третьей стадии ползучести ведет к уменьшению скорости стационарной ползучести и росту времени до разрушения; на стационарной стадии ползучести воздействие давления не сказывается. Выявлено, что при давлении до 1 ГПа данный эффект связан только с залечиванием зернограничной пористости. При больших давлениях, помимо залечивания пор, вклад в изменение скорости стационарной ползучести связан со структурными изменениями.

PACS: 62.20.Ng

Известно [1–3], что воздействие всестороннего давления ведет к залечиванию микроскопических пор и трещин, образующихся по границам зерен при испытании металлов и сплавов в условиях высокотемпературной ползучести. Процесс залечивания под давлением связан с движением дислокаций от пор в тело зерна под действием сдвиговых напряжений, возникающих у пор под давлением [4]. С ростом давления увеличивается как степень залечивания пор, так и плотность дислокаций, испущенных порами [5]. С этой точки зрения обнаруженный ранее [2,6] эффект роста долговечности металлов во время их испытаний в режиме ползучести при  $T = 0.57T_m(K)$  за счет промежуточного (после разгрузки и охлаждения образцов до комнатной температуры) воздействия давления может быть связан как с уменьшением степени пористости по границам зерен, так и с изменением плотности дислокаций в теле зерна, либо с их перераспределением при повторном нагреве образца до температуры испытания. Настоящая работа была проведена с целью выявления причин наблюдаемого упрочнения.

Исследование проводили на образцах Cu (99.9%), предварительно отожженных при температуре 800°C в течение 10 h. Размер зерна после отжига составил 0.15 мкм. Образцы имели форму двойной лопатки с объемом рабочей части  $50 \times 9 \times 3.3$  мм. Механические испытания образцов осуществлялись в режиме ползучести при температуре 500°C. Измерение степени пористости образцов, относительное разуплотнение  $\Delta\rho/\rho$  после испытания проводили методом гидростатического взвешивания (точность  $10^{-4}$ ). Всестороннее давление до 1500 МПа создавали в канале бомбы высокого давления; средой, передающей давление, служило силиконовое масло, а при давлении больше  $P \geq 700$  МПа — бензин Б-70. Для изучения влияния давления на долговечность и ползучесть образцы испытывали при по-

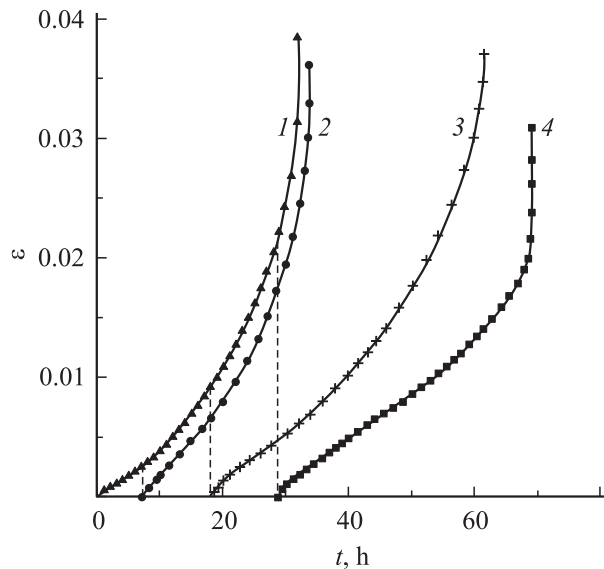
стоянном напряжении в течение 0.2–0.8 от времени до разрушения. После разгрузки и охлаждения образцы подвергали воздействию давления при комнатной температуре. Затем образцы медленно (в течение 4 h) нагревали до температуры испытания, нагружали при той же величине растягивающего напряжения и доводили до разрыва.

Ранее было показано [3], что в области межзеренного разрушения при температуре испытания  $T = 773$  К зависимость скорости стационарной ползучести  $\dot{\epsilon}_{ss}$  от величины растягивающего напряжения в диапазоне изменения  $\sigma$  от 10 до 75 МПа описывается степенной зависимостью.

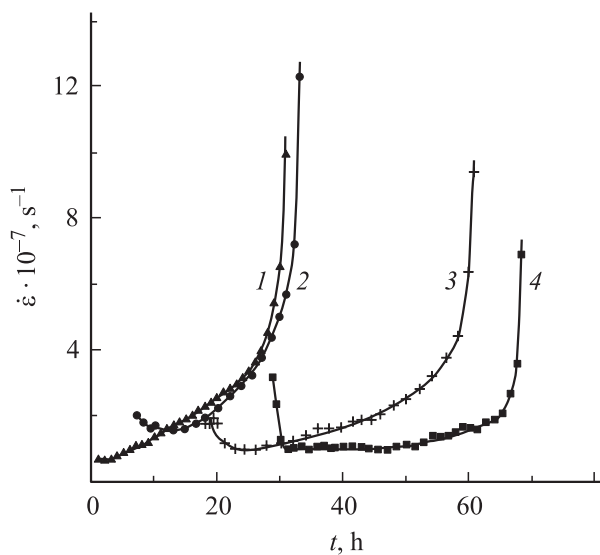
$$\dot{\epsilon}_{ss} = A\sigma^n, \quad (1)$$

в которой  $A$  — постоянная, а  $n = 5.3 \pm 0.1$ , т.е. близка к 5.

Изучение влияния промежуточного воздействия давления на ползучесть и долговечность меди проводили при постоянном напряжении 12.5 МПа; среднее время до разрушения  $t_f$  составило 36 h, разброс значений долговечности — не более 10%. На рис. 1 и 2 представлены данные по влиянию наложения давления  $P = 1$  ГПа при разных временах испытания на ползучесть  $t_1$ , составляющих 0.2, 0.5, 0.8 от времени до разрушения  $t_f$ . Из приведенных данных видно, что наложение давления на ранних стадиях испытания при  $t_1 = 0.2t_f$  практически не повлияло на ход кривой ползучести и суммарную долговечность образца  $t_1 + t_2$  ( $t_2$  — время жизни при повторном нагружении). В то же время промежуточная обработка на поздних стадиях испытания при  $t_1 = 0.5$  и 0.8 от  $t_f$  привела к заметному снижению скорости деформирования и увеличению долговечности меди. Из приведенных на рис. 2 данных видно также, что при  $t_1 \geq 0.5t_f$  скорость стационарной ползучести  $\dot{\epsilon}_{ss}$  (минимальное значение скорости ползучести) после воздей-



**Рис. 1.** Кривые ползучести меди при температуре 773 К при  $\sigma = 12.5$  МПа после воздействия давления 1 ГПа на разных стадиях испытания: 2 — 0.2; 3 — 0.5; 4 — 0.8 от времени до разрушения исходного (кривая 1) образца.



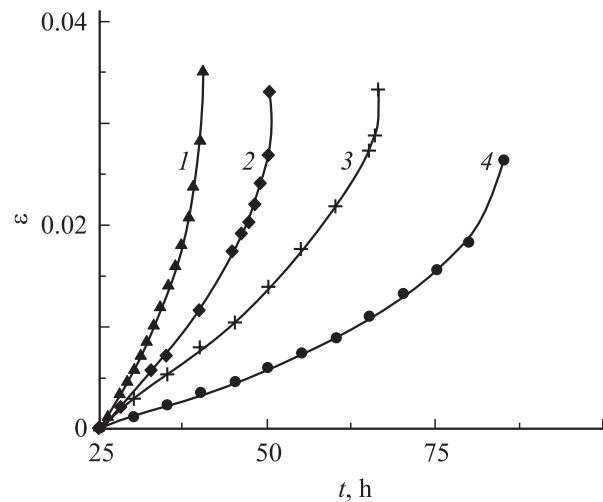
**Рис. 2.** Зависимость скорости ползучести меди от времени испытания. Обозначения те же, что на рис. 1.

ствия давления практически не зависит от величины предварительной деформации  $\varepsilon$  и скорости деформации, достигнутых к моменту наложения давления.

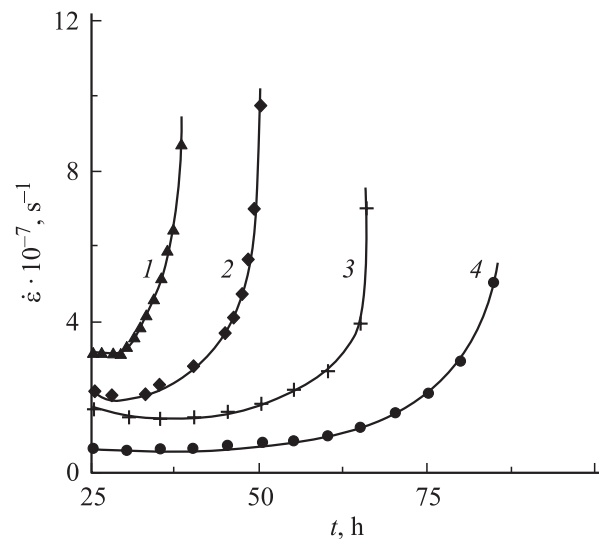
На рис. 3 и 4 представлены кривые ползучести и зависимость от времени скорости ползучести после воздействия различных по величине давлений в диапазоне от 0.1 до 1450 МПа. Давление прикладывали после испытания образцов в течение  $t_1 = 0.7t_f = 25$  h. Видно, что с ростом давления увеличивается время до разрушения и уменьшается скорость стационарной ползучести. Из рис. 5 видно, что полученные после наложения

давления значения  $\dot{\varepsilon}_{ss}$  (кривая 1), как и относительное разуплотнение  $\Delta\rho/\rho$  (кривая 2), уменьшаются с ростом величины давления. Воздействие давления практически не повлияло на деформацию до разрыва при повторном нагружении и форму кривых ползучести: в координатах  $\varepsilon - t/t_f$  кривые ползучести, полученные после воздействия различных по величине давлений практически совпадают. Последнее означает, что после наложения давления произведение скорости стационарной ползучести на время до разрушения постоянно.

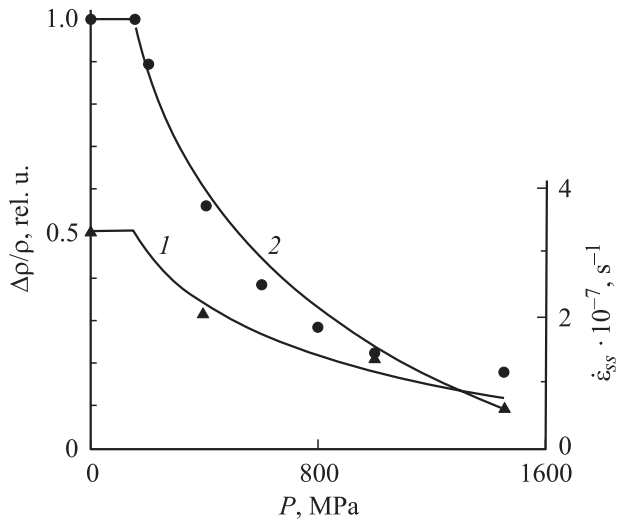
Ранее [2] было показано, что промежуточная обработка давлением не влияет на кинетику накопления интегральной пористости по границам зерен и величину критической дилатации ( $\Delta\rho/\rho \approx 1.2 \cdot 10^{-2}$ ), при дости-



**Рис. 3.** Кривые ползучести меди при  $T = 773$  К и  $\sigma = 12.5$  МПа после промежуточного наложения различных по величине давлений: 1 — 0.1; 2 — 400; 3 — 1000; 4 — 1450 МПа. Образцы предварительно испытывали в течение  $t = 0.7 \cdot t_f = 25$  h.



**Рис. 4.** Зависимость скорости ползучести образцов меди от времени испытания. Обозначения те же, что на рис. 3.



**Рис. 5.** Зависимость скорости стационарной ползучести (кривая 1) и относительного разуплотнения (кривая 2) от величины давления. За единицу  $\Delta\rho/\rho$  принято значение разуплотнения ( $0.5 \cdot 10^{-2}$ ) для исходного образца, испытанного в течение 25 h.

жении которой наступает разрушение образца. После обработки давлением сохраняется также линейная зависимость скорости накопления пористости от деформации.

Полученные данные показывают, что промежуточное воздействие давления оказывает заметное влияние на скорость стационарной ползучести. Уменьшение  $\dot{\epsilon}_{ss}$ , в свою очередь, ведет к снижению скорости деформации (рис. 4), уменьшению скорости накопления несплошностей по границам зерен [2] и росту долговечности образцов.

Наблюдаемое изменение скорости стационарной ползучести и долговечности меди может быть обусловлено изменением структуры материала вследствие роста плотности дислокаций под действием давления и последующего нагрева до температуры испытания, либо оно связано только с залечиванием зернограницных пор и трещин.

Металлографический анализ образцов показал [6], что в процессе ползучести размер зерна  $D$  сохраняется постоянным. Промежуточная обработка давлением также не оказывает влияние на величину  $D$ . Электронно-микроскопическое исследование образцов меди, испытанных до разрыва при 12.5 МПа как без, так и после промежуточной ( $t_1 = 0.5t_f$ ) обработки давлением 1 ГПа показало [6], что дислокационная структура в обоих случаях качественно подобна и состоит из блоков с сильно размытыми границами. Субзеренная структура, как и в [7], при данных условиях испытания не наблюдается. Был сделан вывод, что промежуточная обработка давлением не оказывает заметного влияния на плотность и распределение дислокаций. Следовательно, избыточные дислокации, образовавшиеся при залечивании пор под давлением полностью отжигаются. Это дает основание

полагать, что изменение скорости ползучести после воздействия давления связано только с залечиванием пористости.

Известно, что рост пористости по границам зерен в процессе высокотемпературной ползучести ведет к увеличению действующего напряжения [8]:

$$\sigma_i = \sigma(1 - \xi)^{-1}, \quad (2)$$

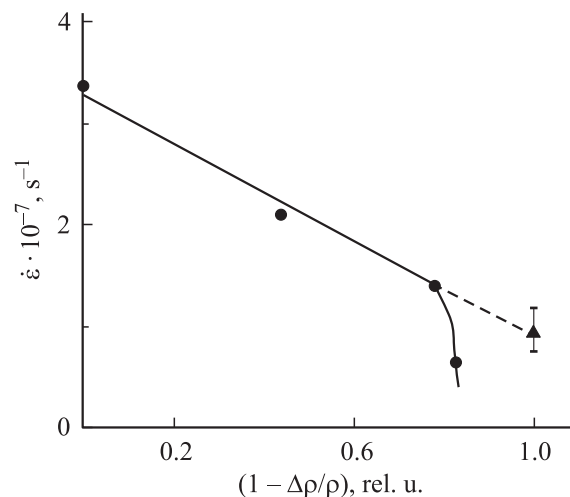
где  $\xi$  — доля площади сечения, занятая порами. Увеличение напряжения приводит к появлению третьей, ускоренной стадии ползучести. Скорость ползучести на этой стадии определяется как

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

Из данных предыдущей работы авторов [6] следует, что качественно значение  $\xi$  возрастает в процессе ползучести и уменьшается при залечивании пор под давлением, что свидетельствует в пользу предположения о связи залечивания пористости с ползучестью меди.

Для подтверждения этого предположения было проведено сопоставление скорости стационарной ползучести  $\dot{\epsilon}_{ss}$  с величиной  $(1 - \Delta\rho/\rho)$ , которая характеризует степень залечивания пористости под давлением (рис. 6). Экспериментальные точки, полученные после воздействия различных давлений, укладываются на прямую, экстраполяция которой на  $(1 - \Delta\rho/\rho) = 1$  (что соответствует полной степени залечивания) дает значение  $\dot{\epsilon}_{ss}$ , практически совпадающее со значением скорости стационарной ползучести, полученным для исходных образцов.

Таким образом, обнаружено, что уменьшение пористости под действием всестороннего давления ведет к обратимому уменьшению действующего напряжения и стационарной скорости ползучести, а при полном залечивании пор материал должен возвратиться в исходное состояние, характеризуемое минимальным значением  $\dot{\epsilon}_{ss}$ .



**Рис. 6.** Зависимость скорости стационарной ползучести образцов меди от степени залечивания пористости под давлением.

Сделанное заключение о связи залечивания пор со скоростью стационарной ползучести, как видно из рис. 6, справедливо до 1000 МПа. При давлении 1450 МПа сравнительно небольшое, по сравнению с  $P = 1000$  МПа, уменьшение пористости (рис. 5) приводит к заметно большему, чем это следует из зависимости  $\dot{\epsilon}_{ss} - (1 - \Delta\rho/\rho)$ , уменьшению скорости стационарной ползучести (рис. 6). Это дает основание полагать, что после воздействия давления 1450 МПа уменьшение  $\dot{\epsilon}_{ss}$  обусловлено не только залечиванием пор, но и изменением дислокационной структуры. Из данных рис. 6 следует, что предполагаемое изменение структуры меди может привести к двукратному изменению скорости стационарной ползучести  $(1.3-0.6) \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ .

Согласно [9], для чистых металлов при  $T \approx 0.6T_m(K)$  и  $n = 5$  скорость стационарной ползучести при постоянном напряжении  $\sigma$  пропорциональна плотности подвижных дислокаций  $\rho_m = f_m \rho$  ( $\rho$  — общая плотность дислокаций, не связанная с границами субзерен,  $f_m$  — доля подвижных дислокаций). С этой точки зрения изменение скорости ползучести  $(1.3-0.6) \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1}$  при неизменной плотности дислокаций  $\rho$  может быть связано с уменьшением в 2 раза доли подвижных дислокаций, либо при  $f_m = \text{const}$  с уменьшением в 2 раза общей плотности дислокаций. Возможно также, что после воздействия давления величины  $\rho$  и  $f_m$  меняются одновременно.

Таким образом, анализ данных по влиянию промежуточного воздействия давления на высокотемпературную ползучесть меди показал, что скорость деформации и накопление пор и трещин по границам зерен являются обратимыми. Наблюдаемое с ростом давления уменьшение скорости стационарной ползучести коррелирует с уменьшением в условиях всестороннего сжатия зернограничной пористости таким образом, что при полном их залечивании материал возвращается в исходное состояние. При давлении свыше 1000 МПа вклад в изменение скорости ползучести меди помимо залечивания пористости могут внести структурные изменения, вызванные действием давления и последующим нагревом.

Авторы выражают признательность Г.А. Малыгину за обсуждение результатов и ценные замечания.

## Список литературы

- [1] Кутсар А.Р., Шалимова А.В. // ФММ. 1972. Т. 33. № 6. С. 1322–1324.
- [2] Бетехтин В.И., Петров А.И., Кадомцев А.Г. и др. // ФММ. 1990. Т. 51. № 5. С. 175–180.
- [3] Sklenicka V., Kucharova K. et al. // Scripta Metallurgica. 1991. Vol. 25. P. 2159–2164.
- [4] Гегузин Я.Е., Кононенко В.Г. // ФТТ. 1973. Т. 15. С. 3550–3557.
- [5] Петров А.И., Разуваева М.В. // ЖТФ. 2002. Т. 72. Вып. 8. С. 130–132.
- [6] Sklenicka V., Kucharova K. et al. // Kovove materialy. Bratislava. 1988. Vol. 5. N 26. P. 515–533.

- [7] Staker M.R., Holt D.L. // Acta Metall. 1972. Vol. 20. P. 569–579.
- [8] Dyson B.F., Verma A.K. et al. // Acta Metall. 1981. Vol. 29. P. 1573–1580.
- [9] Kassner M.T. // Acta Materialia. 2004. Vol. 52. P. 1–9.