

А. А. ПРЕДВОДИТЕЛЕВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЗУЧЕСТИ СЕРЕБРЯНОЙ ПРОВОЛОКИ

Специальная установка с фиксацией момента начала процесса ползучести позволила получить более надежные кривые ползучести серебряных проволок. Показано, что существующие теории ползучести не описывают с достаточной степенью точности экспериментальные данные. Лучшее соответствие наблюдается для теорий, приводящих к логарифмической зависимости деформации от времени.

Установление закономерностей ползучести металлов представляет большой интерес. Ползучесть является непосредственным продолжением процесса активного нагружения, так что начальный участок кривой ползучести характеризуется большой скоростью деформации. Поэтому даже весьма малая погрешность в определении начального момента ползучести вносит существенную ошибку в величину общей деформации. Специальный прибор, описанный в работе [1], исключает эту возможность эту ошибку, что позволяет получить более надежные кривые изменения размеров образца во времени, характеризующие процесс ползучести.

В качестве образцов для исследования была использована серебряная проволока чистоты 99,99%, длиной 36—40 см, диаметром 0,3 мм. Перед испытанием образцы отжигались в вакууме при 700°С в течение 6 час. Режим отжига определялся из условия снятия внутренних напряжений и диаграмм рекристаллизации [2]. Испытания проводились при комнатной температуре. Продолжительность опытов составляла 300—400 час. Кривые ползучести представлены на рис. 1. Из графиков видно сильное возрастание деформации ползучести при увеличении напряжения. Начальный участок кривых характеризуется большой скоростью деформаций, затем скорость быстро уменьшается, пока не достигается участок с некоторой очень небольшой скоростью, изменяющейся весьма слабо. При более внимательном анализе кривых оказалось, что не наблюдается стационарного участка ползучести, а существует лишь *асимптотическое* приближение кривой и некоторой прямой. Это означает, что кривая ползучести может быть описана соотношением

$$\varepsilon = \varepsilon^* t + f(t),$$

где $f(t)$ удовлетворяет следующим условиям: $f(0) \approx 0$ и $\lim_{t \rightarrow \infty} f(t) = \text{const} \neq 0$.

На подобный характер кривых ползучести указывают также некоторые теоретические соображения о природе процесса [3, 4].

Член $\varepsilon^* t$ характеризует асимптоту, к которой стремится кривая ползучести. Константа ε^* определяет наклон этой асимптоты и пред-

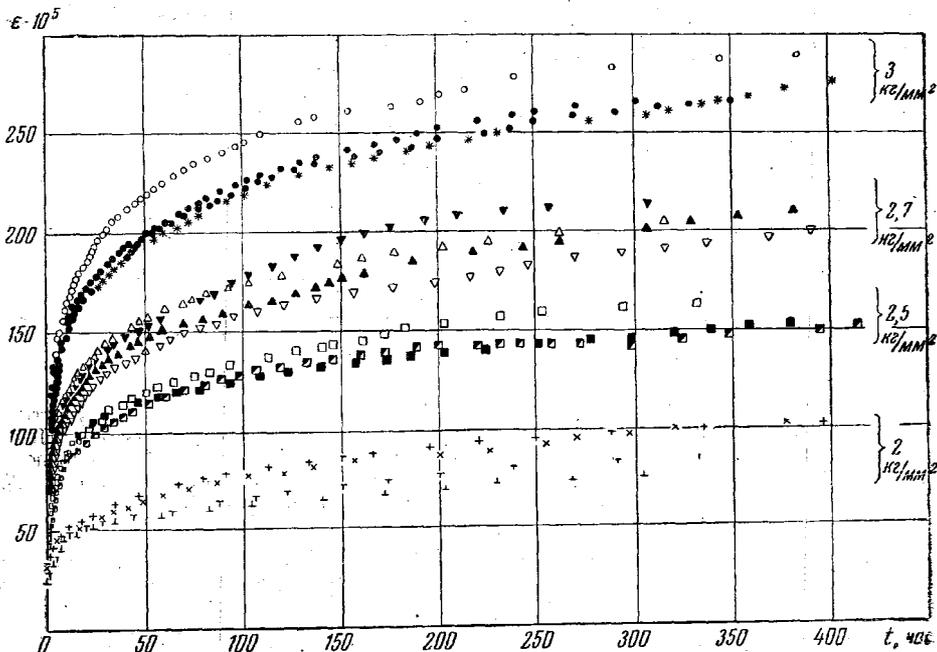


Рис. 1. Кривые ползучести серебряной проволоки при напряжениях 2; 2,5; 2,7 и 3 кг/мм²

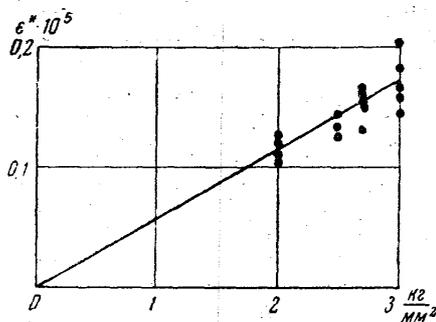


Рис. 2. Зависимость минимальной скорости ползучести от напряжения

ставляет собой предельную минимальную скорость, которая играет важную роль при анализе полученных результатов. Поэтому определение предельно минимальной скорости ползучести приобретает весьма большое значение. Однако для нахождения точного асимптотического значения кривой мы сталкиваемся с некоторыми трудностями. В настоящей работе для нахождения асимптоты кривой был применен аналитический метод с использованием системы асимптотических функций и способа наименьших квадратов. На рис. 2 представлена

зависимость минимальной скорости ползучести ε^* от напряжения. Из рисунка видно, что наблюдается приблизительно линейное возрастание минимальной скорости ползучести с увеличением нагрузки, что соответствует данным других авторов [5] и отвечает некоторым теоретическим представлениям [6].

Минимальная скорость ε^* оказывается в 10^2 — 10^3 раз меньше скорости ползучести в начале процесса. Так, скорость через 1 мин после начала процесса для напряжений 2; 2,5; 2,7 и 3 кг/мм² в среднем со-

ответственно составляет 21, 52, 74 и 86 час^{-1} , а минимальная скорость для тех же напряжений и в той же последовательности равна соответственно 0,114; 0,3; 0,164 и 0,18 час^{-1} . Видно также, что уменьшение скорости для больших нагрузок больше, чем для меньших.

Обсуждение полученных результатов

Полученные результаты дают возможность провести некоторый анализ различных теоретических представлений о природе ползучести. Рассмотрение существующих теорий ползучести показывает, что последние в основном приводят к одной из следующих зависимостей деформации от времени:

$$\{\varepsilon \propto t^{1/3}\} [3, 7]; \{\varepsilon \propto \ln t\} [8, 9, 10, 11]; \{\varepsilon \propto (\ln t)^{3/2}\} [12].$$

Это означает, что кривые ползучести в координатах $(\varepsilon, t^{1/3})$, $(\varepsilon, \ln t)$ и $(\varepsilon^{3/2}, \ln t)$ должны изображаться прямыми линиями.

Проведенный анализ экспериментальных данных показал, что зависимость полной деформации ползучести от времени не описывается

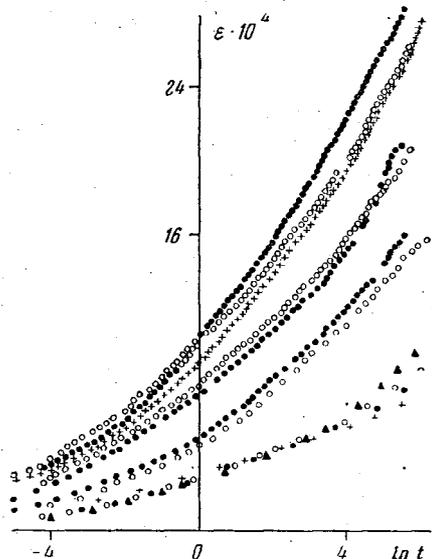


Рис. 3. Зависимость полной деформации ползучести от $\ln t$

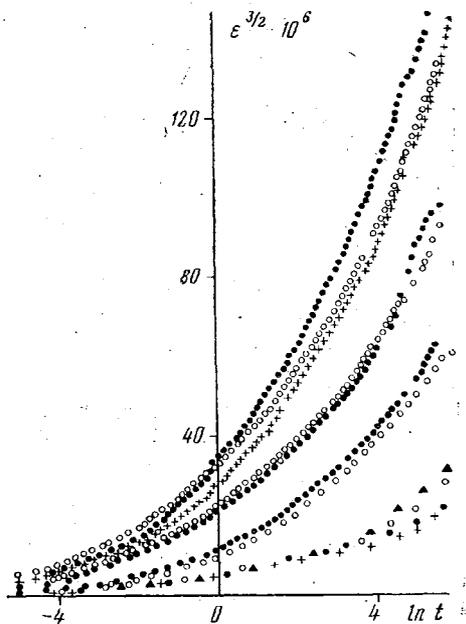


Рис. 4. Зависимость полной деформации ползучести от $(\ln t)^{3/2}$

с достаточной степенью точности ни одной из упомянутых теорий (рис. 3 и 4). График зависимости ε от $t^{1/3}$ не приводится в силу очевидной неудовлетворительности данной закономерности. Однако это несоответствие может быть связано с тем, что рассмотренные теории относятся к типу теорий «истощения», т. е. в образце постепенно происходит истощение ресурсов, приводящих к деформации образца. В этом случае, очевидно, деформация образца должна обладать насыщением. В действительности же процесс ползучести может состоять из нескольких процессов, идущих одновременно.

Андрате [5, 13], по-видимому, первый предложил рассматривать кривую ползучести складывающейся из двух частей: одна учитывает факторы, которые вызывают ползучесть, затухающую во времени (затухающая ползучесть), другая объединяет те факторы, которые вызывают процесс с приблизительно постоянной скоростью (установившаяся ползучесть или квазивязкое течение). Поэтому представляет интерес выделить из кривых ползучести затухающую часть ϵ_3 и ее сравнить с упомянутыми теориями.

Результаты подобного сравнения приведены на рис. 5 и 6. Из рассмотрения графиков видно, что наилучшим образом выполняется соот-

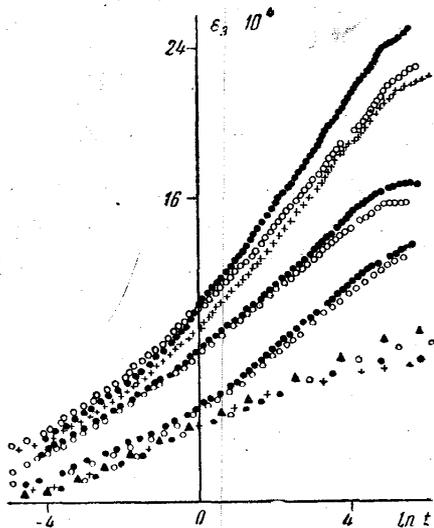


Рис. 5. Зависимость затухающей ползучести от $\ln t$

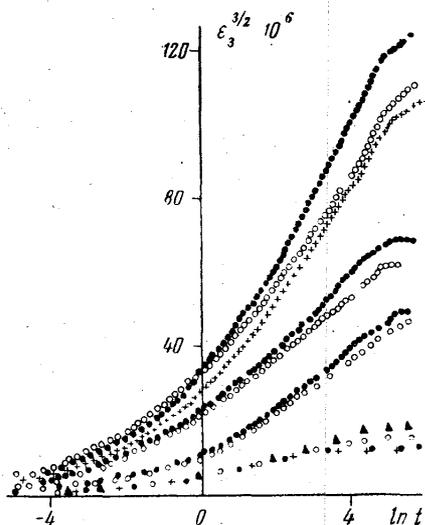


Рис. 6. Зависимость затухающей ползучести от $(\ln t)^{2/3}$

ношение ϵ_3 и $\ln t$. Однако и логарифмическая зависимость недостаточно точно отражает поведение материала. Как видно на рис. 5, линии не являются вполне прямыми. Помимо этого логарифмическая зависимость приблизительно соблюдается лишь в ограниченном интервале времени от 3 мин до 150 час, что следует из того, что для затухающей ползучести логарифмическая зависимость для малых и больших значений аргумента теряет смысл. Лучшее соответствие теории и экспериментальных данных наблюдается при меньших нагрузках.

На основании полученных данных можно оценить некоторую константу τ , характеризующую процесс релаксации напряжений в зернах металла [10]: для $\sigma = 2 \text{ кг/мм}^2$ $\tau = 210 \text{ сек}$; для $\sigma = 2,5 \text{ кг/мм}^2$ $\tau = 175 \text{ сек}$; для $\sigma = 2,7 \text{ кг/мм}^2$ $\tau = 112 \text{ сек}$ и для $\sigma = 3,0 \text{ кг/мм}^2$ $\tau = 100 \text{ сек}$. Таким образом, скорость релаксации напряжений в зернах возрастает с увеличением нагрузки.

Используя полученные экспериментальные данные, можно также оценить весьма важный параметр, характеризующий поведение дислокаций в кристалле [12]. Согласно Мотту и Набарро, ν характеризует частоту колебаний дислокации в потенциальной яме и имеет порядок $10^8 \frac{1}{\text{сек}}$. Однако из экспериментальных данных получаются значения: для $\sigma = 2 \text{ кг/мм}^2$ $\nu = 0,002 \text{ сек}^{-1}$; для $\sigma = 2,5 \text{ кг/мм}^2$ $\nu \approx 0,003 \text{ сек}^{-1}$; для

$\sigma = 2,7 \text{ кг/мм}^2$ $\nu = 0,005 \text{ сек}$ и для $\sigma = 3 \text{ кг/мм}^2$ $\nu = 0,009 \text{ сек}^{-1}$. Таким образом, необходимо сделать заключение, что теория Мотта и Набарро требует существенного уточнения как с точки зрения характера полученной зависимости, так и, в особенности, физического смысла входящих в нее констант. По-видимому, константу ν в логарифмических соотношениях нужно интерпретировать не как величину, характеризующую частоту колебания дислокации в потенциальной яме, а как величину, характеризующую ее дрейф под действием внешнего поля напряжений, т. е. в конечном счете как величину, характеризующую процесс релаксации напряжений за счет перемещения дислокаций.

Возможно также, что ползучесть является процессом, который определяется только одной причиной и не является суммой нескольких параллельно идущих процессов. Если принять эту точку зрения, то теории ползучести не должны относиться к теориям «истощения». Иными словами, при ползучести должно наблюдаться непрерывное движение дислокаций и они не должны выключаться из игры, как предполагается в работе [8, 12]. Последнее в свою очередь означает, что функция распределения по энергиям активации дислокаций не должна быть стационарна, она существенно должна быть функцией времени [14]. К сожалению, за недостатком соответствующих данных в настоящее время пока не представляется возможным определенно высказаться в пользу первой или второй точек зрения. Для решения этого вопроса необходимо непосредственно исследовать характер движения дислокаций в условиях длительного нагружения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Предводителев А. А. «Приборы и техника эксперимента», 164, 1961.
2. Рогельберг И. Л., Шепиченецкий Е. С. Диаграммы рекристаллизации металлов и сплавов. Металлургиздат, М., 1950.
3. Салли А. Ползучесть металлов и жаропрочные сплавы. Металлургиздат, М., 1953.
4. Одинг И. А. Вопросы металловедения котлотурбинных материалов. Машгиз, М., 1955, стр. 86.
5. Nda E., Andrade C. Proc. Roy. Soc., 84 A, 1, 1910.
6. Orowan E. West. Scot. Iron. Steel Inst., 54, 1947.
7. Cottrell A. N., Aytakin V. J. Inst. Metals., 77, 389, 1950.
8. Smith C. L. Proc. Phys. Soc., 161, 201, 1948.
9. Дехтер И. Я. Вопросы физики металлов и металловедения. Изд. АН УССР, 1950.
10. Becker P. Z. Phys., 33, 185, 1925.
11. Laurent P. M. Endier, Rev de Metall., 47, 39, 1950.
12. Mott N. F. Nabarro F. R. H. Report of a conference on strength of Solids, 1948, p. 1.
13. Andrade E. N. Nature, 162, 410, 1948.
14. Щукин Е. Д., Смирнова Н. В. «Кристаллография», 6, 787, 1961.

Поступила в редакцию
26. 10 1963 г.

Кафедра
физики кристаллов