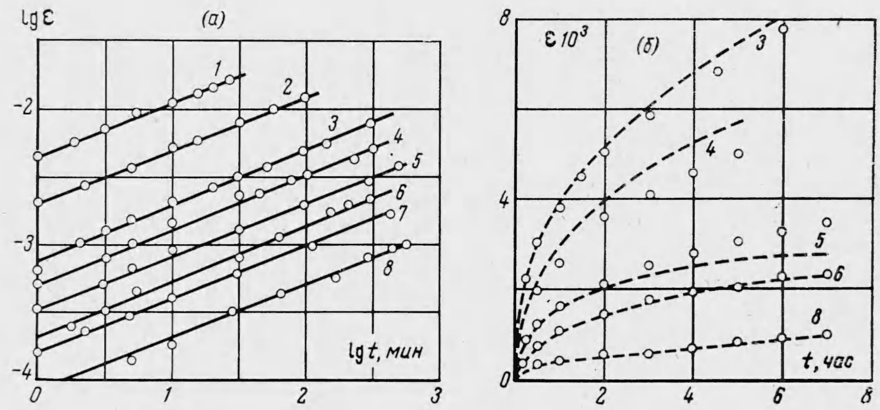
ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПОЛЗУЧЕСТИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ ПЛЕНОК МЕДИ

К. К. Зилинг, В. Ю. Пчелкин

(Новосибирск)

Определяются характеристики кратковременной ползучести конденсированных пленок меди и рассматривается возможность применения для данного материала различных вариантов гипотезы упрочнения.

Эксперимент проведен на пленках толщиной 5—7 *мк*, полученных испарением материала чистотой 99.997% из молибденового тигля в вакууме (3—5) $\times 10^{-6}$ *тор*. Осаждение проводилось на нагретые до $(200 \pm 10)^\circ$ С стеклянные подложки, покрытые буферным слоем NaCl. Техника препарирования описана в [1]. Плоские образцы с размерами рабочей части 12×1 *мм*^{2} испытывались в условиях ползучести при одноосном растяжении на микроразрывной установке [2], усовершенствованной для этих целей. Точность измерения перемещений составляла 1 *мк*. Испытания проведены при температуре $(21 \pm 1.5)^\circ$ С. В случае изменения температуры на 1—2° в процессе эксперимента учитывалась поправка на тепловое расширение образца и деталей установки. Испытания проведены при постоянной силе, однако, поскольку деформация образцов, как правило, была менее 1%, изменение напряжения не учитывалось вследствие малости.



Фиг. 1

Ползучесть при постоянном напряжении. Найдем вид зависимости пластической деформации ε от напряжения σ и времени *t*.

На фиг. 1, *а* приведены типичные кривые ползучести пленок, построенные в двойных логарифмических координатах. Нумерация на фиг. 1, *а* (и на фиг. 1, *б*) соответствует следующим значениям σ в *кг/мм*^{2}:

	1	2	3	4	5	6	7	8
σ =	25.8	24.5	23.9	23.1	20.8	19.9	19.0	17.0

Видно, что зависимость ε от *t* может быть описана степенной функцией. При этом показатель степени *m*, определенный по наклону прямых на фиг. 1, в первом приближении может считаться независимым от величины σ. Исключение для некоторых партий составляли σ, близкие к пределу прочности, при которых иногда наблюдалось резкое повышение *m* от 0.40—0.45 до 0.70—0.80.

Записав зависимость ε = ε (σ, *t*) как

$$\varepsilon = [f(\sigma)/m]^m t^m$$

найдем вид $f(\sigma)$. По аналогии с массивными материалами примем, что

$$f(\sigma) = k e^{\sigma/A}$$

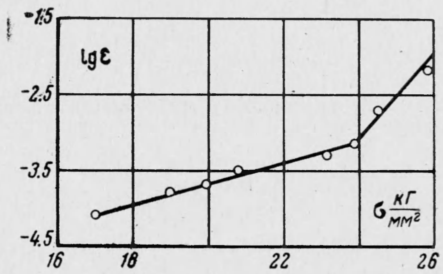
где *A* и *k* — константы материала. Тогда

$$\varepsilon = (kt/m)^m e^{m\sigma/A} \quad (1)$$

Зависимость (1) в координатах $\lg \varepsilon$ и σ при $t = 1$ должна давать прямую, наклон которой определяется величиной A, а расстояние от начала координат — значением k. Результаты экспериментов, проведенных при $m = 0.40$, ложатся на ломаную с точкой излома, соответствующей для данной партии $\sigma_* = 23.9$ *кг/мм*^{2} (фиг. 2). В этом случае для $\sigma \geqslant \sigma_*$ и $\sigma \leqslant \sigma_*$ необходимо пользоваться различными значениями A и k, а именно

$$k = 7.53. \times 10^{-18}\ \text{мин}^{-1}, \quad A = 1.15\ \text{кг/мм}^2 \quad \text{при } \sigma \leqslant 23.9$$
$$k = 1.26 \times 10^{-33}\ \text{мин}^{-1}, \quad A = 0.37\ \text{кг/мм}^2 \quad \text{при } \sigma \geqslant 23.9$$

Точность описания экспериментальных результатов выражением (1) при данных m, k, A иллюстрируется фиг. 1, *б*. Расчетные кривые изображены пунктиром. Для всех кривых $\sigma \leqslant \sigma_*$. Учитывая, что даже для массивных материалов разброс между отдельными образцами при одном и том же σ может достигать 15—20%, наблюдаемая точность может считаться вполне удовлетворительной.



Фиг. 2

Ползучесть при переменных напряжениях. Рассмотрим возможность применения к тонким пленкам некоторых гипотез, используемых в механике ползучести для описания поведения массивных металлов. Согласно [3, 4] при постоянной температуре скорость ползучести $\dot{\varepsilon}$ есть функция текущего значения σ и некоторого набора n параметров q_i, причем

$$dq_i = a_i d\varepsilon + b_i d\sigma + c_i dt$$

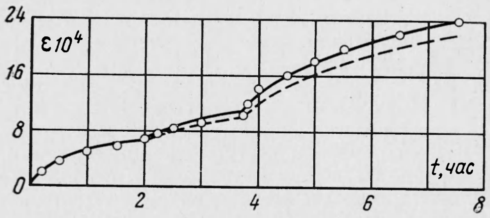
где a_i, b_i, c_i — в общем случае функции σ, ε, t, q_k. Поскольку в данном случае пленки осаждались на подложку с высокой температурой, заметное изменение их структуры со временем при комнатных температурах представлялось маловероятным. Поэтому проверке подвергалась гипотеза упрочнения как в ее обычном варианте

$$n = 1, \qquad dq = d\varepsilon \tag{2}$$

так и в случае, когда при $n = 1$ за параметр упрочнения принята величина

$$dq = \sigma d\varepsilon, \qquad q = \int \sigma d\varepsilon \tag{3}$$

Для получения контрастных результатов испытания проведены при ступенчатом увеличении напряжения. На фиг. 3 приведены типичные результаты испытаний в таких условиях. Точками обозначены экспериментальные значения ε. Пунктирная кривая получена на основании гипотезы (2), а сплошная соответствует гипотезе (3). Интервалам времени $\Delta t = 120$, 100, 260 *мин* соответствовали значения действующих напряжений $\sigma = 17.6$, 19.0, 24.2.



Фиг. 3

Видно, что при незначительном увеличении напряжения обе рассмотренные гипотезы дают результаты, близкие к экспериментальным данным. При более резком увеличении σ использование параметра упрочнения (3) дает лучшие результаты, как это, по-видимому, имеет место и для массивных материалов [5].

Рассчитаем теперь кривые релаксации, используя две названные выше гипотезы. Переходя к безразмерным переменным

$$\sigma' = \sigma / A, \quad \varepsilon' = \varepsilon E / A, \quad t' = k (E / A)^{1+\alpha} t$$

и дифференцируя (1), имеем

$$\dot{\varepsilon}' \varepsilon'^{\alpha} = e^{\sigma'} \qquad (\alpha = m^{-1} - 1) \tag{4}$$

Здесь E — модуль Юнга.

В случае чистой релаксации $\sigma' + \varepsilon' = \text{const}$; однако в данных экспериментах длина образцов несколько менялась за счет перемещения жесткой силоизмерительной пружины. В этом случае

$$M\sigma' + \varepsilon' = \text{const} \quad \left(M = 1 + \frac{csE}{L}\right) \tag{5}$$

Здесь c — податливость пружины, L — длина образца, s — его поперечное сечение. Для исследованных образцов значение M находилось в пределах 1.5—1.6.

При условии $\varepsilon = 0$ при $t = 0$ функция $\sigma' = \sigma'(\sigma'_0, t)$ может быть найдена из (4) и (5) в виде

$$\sigma' = \sigma_0' - \varphi_* \left(t' \frac{e^{\sigma_0'}}{M^{\alpha+1}}\right) \tag{6}$$

Здесь φ_* — функция, обратная φ, где

$$\varphi(x) = \int_0^x z^\alpha e^z dz$$

Если за параметр упрочнения принято выражение (3), уравнение (4) можно написать в виде

$$q^{\cdot\prime} q'^{\alpha} = \sigma'^{\alpha+1} e^{\sigma'} \tag{7}$$

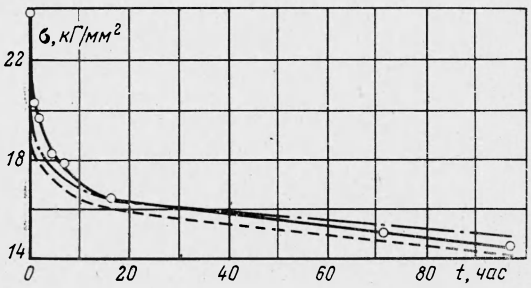
В случае релаксации

$$q' = {}^1\!/_2 (\sigma_0'^2 - \sigma'^2) \tag{8}$$

Из (7) и (8), учитывая поправку на перемещение пружины, при тех же начальных условиях имеем

$$t' = \frac{M^{\alpha+1}}{2^\alpha} \int_{\sigma'}^{\sigma_0'} \left(\frac{\sigma_0'^2 - \sigma'^2}{\sigma'}\right)^\alpha e^{-\sigma'} d\sigma' \tag{9}$$

На фиг. 4 приведены результаты сопоставления экспериментальных данных (кружки и сплошная линия) и расчетов по формулам (6) и (9) для образца с модулем Юнга 9600 *кг/мм²* и начальным напряжением σ_0, равным 23.9 *кг/мм²*. Значения констант A и k приведены выше. Пунктирная линия соответствует расчету по формуле (6), штрих-пунктирная — по формуле (9). Видно, что, хотя выражение (9), как и следовало ожидать, дает более низкую скорость релаксации, обе гипотезы приводят в данном случае к весьма близким результатам, вполне удовлетворительно описывающим экспериментальные данные.



Фиг. 4

Таким образом, показано, что, несмотря на существенные отличия в геометрических размерах и структуре, поведение исследованных пленок и массивных материалов в условиях ползучести качественно одинаково. Применяемые для описания ползучести структурно-устойчивых массивных металлов механические модели, судя по приведенным данным, с равным успехом могут быть использованы и для пленок.

Поступила 29 VI 1970

ЛИТЕРАТУРА

1. Зилинг К. К., Покровский Л. Д., Пчелкин В. Ю. Связь механических свойств со структурой конденсированных пленок меди. Физика металлов и металловедение. 1970, № 5.
2. Костюк В. Г., Зилинг К. К., Серебряков А. В. Прочностные свойства металлических нитевидных кристаллов с примесями. Физика твердого тела, 1963, т. 5, вып. 11.
3. Rabotnov Y. N. On the equation of state of creep. Proc. J. Internat. Conf. on Creep, 1963.
4. Rabotnov Y. N. On the equation of state for creep. Progr. Appl. Mech., Prager Anniversary Volume, N. Y., Macmillan Co., 1963.
5. Вилесова Н. С., Наместников В. С. Об одном параметре упрочнения. ПМТФ, 1964, № 3.