

УДК 339.216:539.376

ПОЛЗУЧЕСТЬ И РЕЛАКСАЦИЯ КОНДЕНСИРОВАННЫХ ПЛЕНОК СПЛАВА *Cu-Be*

К.К. Зининг, М.Н. Ильин, В.Д. Пчелкин

Рассматривается задача определения характеристик ползучести и релаксации конденсированных пленок берилл-бронзы и выяснения возможности применения для данного материала некоторых моделей, используемых в механике ползучести.

Эксперимент был проведен на пленках толщиной 2 мк, полученных испарением исходного сплава *Cu-4%Be* из тигля *BeO* в вакууме $(3-5) \times 10^{-6}$ тор. Осаждение осуществлялось со скоростью 0,1 мк/мин на нагретые до $(185 \pm 5)^\circ\text{C}$ стеклянные подложки, покрытые буферным слоем *NaCl*. Конденсаты содержали 2% *Be* (весовых). Плоские образцы с размерами рабочей части $12 \times 0,5 \text{ мм}^2$ испытывались при комнатной температуре в условиях ползучести при одноосном растяжении на микропорывной установке, обеспечивающей точность измерения перемещений $\pm 0,3 \text{ мк}$. Длительность экспериментов составляла 100 час.

Релаксация напряжений определялась по изменению резонансной частоты поперечных механических колебаний пленочного образца. Длительность испытаний составляла 700 час. Для уменьшения влияния внешней среды на результат эксперимента испытания проводились в изолированной камере при постоянной температуре

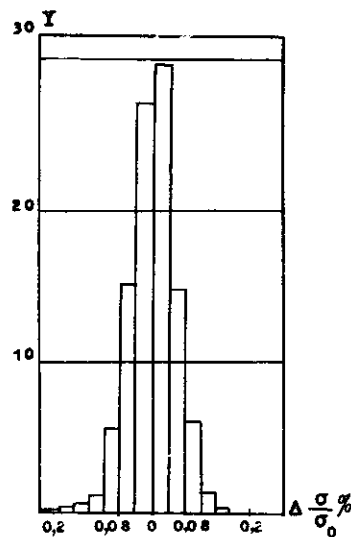


Рис. 1.

Ползучесть при постоянном напряжении

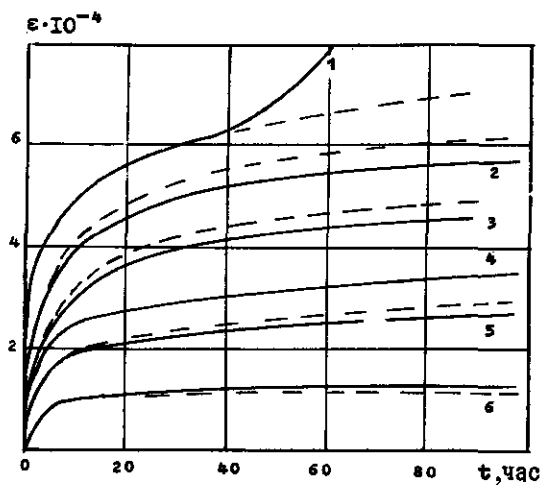


Рис. 2.

30°C. Расчетные значения систематической погрешности находились в пределах $(0-9)(1 - \frac{\sigma}{\sigma_0})\%$, где σ_0 и σ — соответственно начальное и текущее значения напряжения. Экспериментальная гистограмма распределения вероятностей (χ) появления случайной погрешности, построенная по 1250 измерениям, представлена на рис. 1. Из-за невозможности полностью изолировать образцы от внешней среды при долговременных опытах значение случайной погрешности несколько возрастало, однако не превышало $\pm 0,25\%$.

Определим вид зависимости деформации ползучести ϵ от напряжения σ и времени t . Кривые ползучести $\epsilon-t$ приведены на рис. 2 (сплошные линии) и в двойных логарифмических координатах — на рис. 3. Нумерация кривых соответствует следующим значениям σ в кг/мм²:

N/N	1	2	3	4	5	6
σ кг/мм²	63,5	54,1	44,7	32,9	28,2	23,5

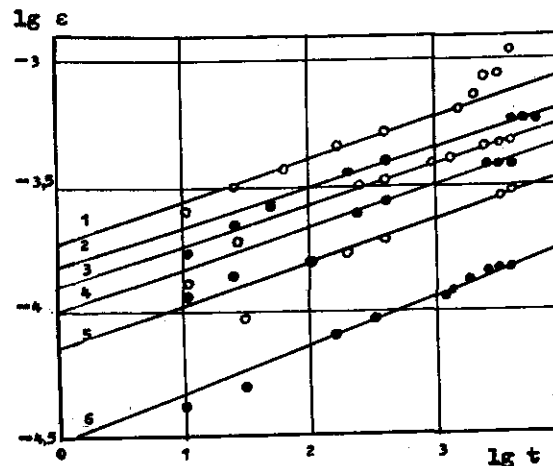


Рис. 3

Обработка кривых показала, что наилучшее совпадение с экспериментом получается при использовании зависимости Уатта [1], то есть при комбинации степенной и логарифмической функций времени, причем вклад последней падает по мере увеличения действующих напряжений. При не слишком низких σ зависимость ϵ от t за исключением первых минут может быть описана только степенной функцией, как это видно из рис. 3.

Записав зависимость $\epsilon = \epsilon(\sigma, t)$ как

$$\epsilon = \left(\frac{f(\sigma)}{m} \right)^m t^m,$$

найдем вид $f(\sigma)$. На рис. 4 приведена зависимость $\lg \epsilon$ при $t = 1$ от σ , показывающая, что $f(\sigma)$ может быть записана в виде

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

где k и A — константы материала; тогда

$$\epsilon = \left(\frac{k t}{m} \right)^m e^{\frac{m \sigma}{A}} \quad (1)$$

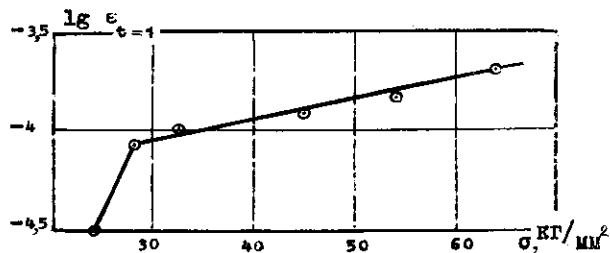


Рис. 4.

При $\sigma_* \approx 29 \text{ кг/мм}^2$ кривая на рис. 4 имеет излом, и, следовательно, выше и ниже σ_* необходимо пользоваться различными значениями A и k , которые определяются из равенств:

$$\frac{m}{2,3A} = 7,7 \cdot 10^{-2}, \quad m \lg\left(\frac{k}{m}\right) = -6,33 \quad \text{для } \sigma \leq \sigma_*,$$

$$\frac{m}{2,3A} = 1,27 \cdot 10^{-2}, \quad m \lg\left(\frac{k}{m}\right) = -4,60 \quad \text{для } \sigma \geq \sigma_*.$$

Точность описания экспериментальных кривых выражением (1) при данных m , k , A иллюстрируется рис. 2 (расчетные кривые даны пунктиром).

Учитывая, что даже для массивных материалов разброс между отдельными образцами может достигать 20%, наблюдаемую точность можно считать вполне достаточной.

Ползучесть при переменных напряжениях

Рассмотрим возможность применения к исследуемым пленкам гипотез, используемых в механике ползучести для описания поведения массивных материалов. При постоянной температуре скорость ползучести $\dot{\epsilon}$, согласно [2], есть функция текущего значения σ и некоторого количества n параметров q_i , причем в общем случае

$$dq_i = a_i d\epsilon + b_i d\sigma + c_i dt.$$

Величины a_i , b_i , c_i могут быть функциями σ , ϵ , t , q_k . Поскольку, судя по данным рентгеноструктурного анализа, испытанные пленки были двухфазными и содержание бериллия в твердом растворе не превышало 0,22%, существенное изменение их структу-

ры со временем при комнатной температуре представлялось мало вероятным.

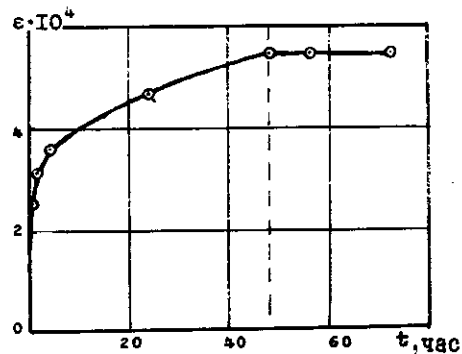


Рис. 5

На рис. 5 представлена типичная кривая ползучести со снятием напряжения. Первоначальное напряжение $\sigma = 30 \text{ кг/мм}^2$ было через 48 час снижено до $2,5 \text{ кг/мм}^2$. Видно, что деформации ползучести практически полностью необратимы даже в области микродеформаций. Поэтому основное внимание было уделено проверке гипотезы упрочнения как в

обычном её варианте

$$n=1, \quad dq = d\epsilon, \quad (2)$$

так и в случае, когда за параметр упрочнения принята величина работы внешних сил на деформациях ползучести, то есть

$$n=1, \quad dq = \sigma d\epsilon. \quad (3)$$

На рис. 6 приведены типичные результаты испытаний на ползучесть со ступенчатым увеличением напряжения. Экспериментальные данные обозначены кружочками.

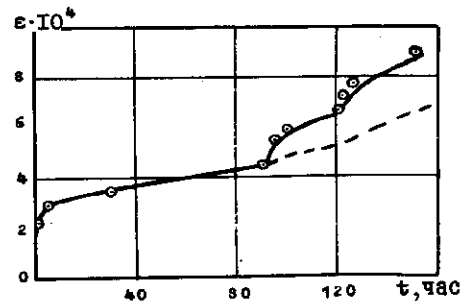


Рис. 6

Отрезкам времени $\Delta t = 93, 29, 30$ час соответствуют значения напряжений $\sigma = 40, 50, 60 \text{ кг/мм}^2$. Пунктирная кривая получена на основании гипотезы (2). Видно, что эта гипотеза неудовлетворительно описывает экспериментальные результаты, пред-

оказывая менее резкое изменение $\dot{\epsilon}$ при увеличении σ , чем это имеет место в действительности. Аналогичные результаты дает ис-

пользование гипотезы (3). Хорошего совпадения теории и эксперимента удалось добиться только в том случае, когда за параметр упрочнения была принята величина

$$\dot{\sigma} q = \sigma^z \dot{\epsilon} \quad (4)$$

при $z = 3$. Соответствующая расчетная кривая изображена на рис. 6 сплошной линией.

Указанная особенность характерна, по-видимому, только для хрупких и высокопрочных конденсаторов. Поведение более пластичных пленок меди вполне удовлетворительно описывается обычным вариантом гипотезы упрочнения [3].

Релаксация

Рассчитаем кривые релаксации, исходя из уравнения ползучести (I) и гипотезы упрочнения с параметром упрочнения (4).

Дифференцируя по t уравнение (I), имеем:

$$\dot{\epsilon} \epsilon^\alpha = k e^{\frac{\sigma}{A}} \quad (5)$$

где $\alpha = \frac{1}{m} - 1$.

При $\sigma = \text{const}$ из (4) получим:

$$q = \sigma^z \dot{\epsilon}, \quad \dot{\epsilon} = \sigma^{-z} \dot{q}.$$

Подставим последнее выражение в уравнение (5):

$$\dot{q} q^\alpha = \sigma^{z(\alpha+1)} k e^{\frac{\sigma}{A}} \quad (6)$$

В случае релаксации

$$\frac{\sigma_0}{E} + \epsilon_0 = \frac{\sigma}{E} + \epsilon$$

Здесь E — модуль Юнга, σ_0 и ϵ_0 соответственно напряжение и деформация непосредственно после приложения нагрузки. Полагаем, что в процессе нагружения пластическая деформация не успевает накапливаться ($\epsilon_0 = 0$). Тогда

$$\epsilon = \frac{\sigma_0 - \sigma}{E}, \quad d\epsilon = - \frac{d\sigma}{E} \quad (7)$$

Параметр упрочнения в этом случае имеет вид:

$$q = \frac{\sigma_0^{z+1} - \sigma^{z+1}}{(z+1)E}, \quad \dot{q} = - \frac{\sigma^z}{E} \frac{d\sigma}{dt} \quad (8)$$

Подставляя в (6) значение q и $\dot{q}$ из (8), имеем уравнение

$$- \frac{\sigma^z (\sigma_0^{z+1} - \sigma^{z+1})}{(z+1)^\alpha E^{\alpha+1}} \frac{d\sigma}{dt} = \sigma^{z(\alpha+1)} k e^{\frac{\sigma}{A}} \quad (9)$$

Разделяя в (9) переменные, переходя к новой переменной $\frac{\sigma}{\sigma_0} = x$ и интегрируя, получаем уравнение релаксации в виде:

$$t = \alpha \varphi(x, \sigma_0), \quad (10)$$

где

$$\alpha = \left(\frac{\sigma_0}{E} \right)^{\alpha+1} \frac{1}{k(z+1)^\alpha}$$

$$\varphi(x, \sigma_0) = \int_x^1 \left(\frac{1}{\xi^z} - \xi \right)^\alpha e^{-\frac{\sigma_0 \xi}{A}} d\xi.$$

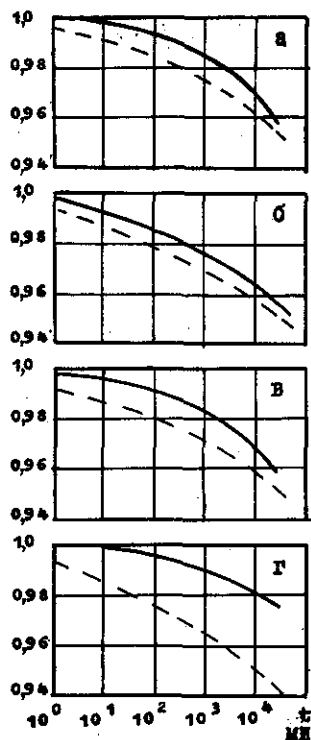


Рис. 7

На рис. 7 представлены экспериментальные (сплошная линия) и рассчитанные по формуле (10) (пунктир) кривые. Кривые а-г соответствуют начальным напряжениям 56, 48, 37, 32,5 кг/мм². При расчете использовались значения A и k , определенные из приведенных выше равенств и величины $\varphi(x, \sigma_0)$, протабулированные на ЭВМ. Величина модуля Юнга для используемых образцов составляла $12 \cdot 10^3$ кг/мм².

Видно, что при больших σ расчет дает удовлетворительное совпадение с экспериментом и, следовательно, гипотеза упрочнения может с успехом применяться и для исследованных пленок, хотя параметр упрочнения несколько отличается от применяемого для массивных материалов.

При уменьшении начального напряжения соответствие теории и эксперимента ухудшается. Это связано с тем, что при малых σ перестает выполняться степенная зависимость деформации от времени, ис-

пользованная при выводе формулы (10). Совпадение может быть, по-видимому, улучшено применением зависимости Уатта, однако в этом случае расчетные формулы чрезмерно усложняются.

Л и т е р а т у р а

1. WYATT O.H. Transient Creep in Pure Metals. Proc. Phys. Soc. (1963), 66B, p. 459.

2. РОБОТНОВ Ю.Н. Ползучесть элементов конструкции. М., Металлургия, 1965.

3. ЗИЛИНГ К.К., ПЧЕЛКИН В.Ю. Закономерности ползучести конденсированных пленок меди. ПМТФ, 1971, № 3, стр. 110-112.

Поступила в ред.-изд.отд.

15 июня 1972 г.