

УДК 539.376:677.861.81:539.23

# ВЛИЯНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА ПОЛЗУЧЕСТЬ И РЕЛАКСАЦИЮ КОНДЕНСИРОВАННЫХ ПЛЕНОК МЕДИ

К.К. Зилинг, В.Ю. Пчелкин

В работе оценивается влияние предварительной пластической деформации на ползучесть и релаксацию конденсированных пленок. Результаты сопоставляются с данными, полученными на массивных материалах.

Эксперимент проведен на пленках меди толщиной 3 мк, полученных испарением материала чистотой 99.997% из молибденового тигля в вакууме  $(3-5) \cdot 10^{-6}$  тор. Осаждение производилось на нагретые до  $(200 \pm 10)^{\circ}\text{C}$  стеклянные подложки, покрытые слоем *NaCl* толщиной 0,1 мк. После отделения от подложки плоские образцы с размерами рабочей части 12 x 1 мм испытывались на релаксацию или ползучесть при одноосном растяжении на микроразрывной установке [1] при комнатной температуре. На этой же установке определялся модуль Юнга  $E$ . Испытания на ползучесть проведены при постоянной силе, однако, поскольку деформация образцов была менее 1%, изменение действующего напряжения не учитывалось вследствие малости.

## Результаты

На рис. I приведены кривые релаксации, полученные при одном и том же начальном напряжении  $\sigma_0 = 15,5 \text{ кг/мм}^2$ , но различной предварительной механической обработке образцов. Образец № I испытан непосредственно после получения, образец № 2 - после кратковременной пластической деформации на величину

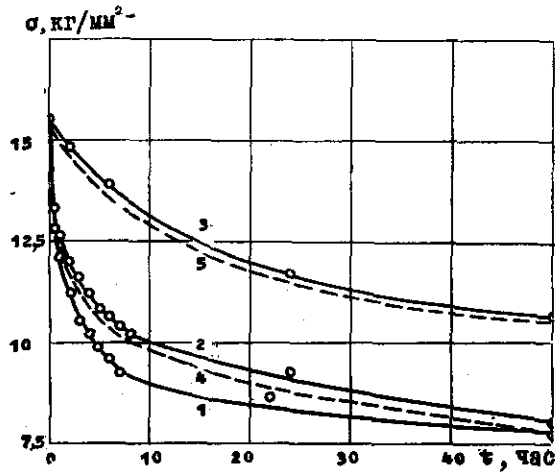


Рис. I

ку  $\epsilon_0 = 0,25\%$ , образец № 3 - после ползучести при напряжении  $\sigma = \sigma_0 = 15,5 \text{ кг/мм}^2$  до деформации  $\epsilon_0 = 0,075\%$ . Цифры на графике соответствуют номерам образцов. На этом же графике приведены кривые, полученные в результате расчетов, проведенных на основе гипотезы упрочнения. Расчеты проведены следующим образом. Как показано в работе [2], уравнение ползучести аналогичных пленок имеет обычный вид:

$$\dot{\epsilon} \epsilon^\alpha = k \exp \sigma / A, \quad (1)$$

где  $A$ ,  $k$  и  $\alpha$  - величины, определяемые из эксперимента. В этом случае уравнение релаксации с учетом предварительной деформации может быть записано в виде:

$$\sigma = \sigma_0 + \epsilon \epsilon_0 - A \varphi^{-1} \left[ \varphi \left( \frac{\epsilon \epsilon_0}{A} \right) + k \left( \frac{\epsilon}{A} \right)^{1+\alpha} \exp \left( \frac{\sigma_0}{A} + \frac{\epsilon \epsilon_0}{A} \right) \right], \quad (2)$$

где  $t$  - время,

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

$\varphi^{-1}$  - функция, обратная  $\varphi$ .

Уравнение (2) получено для чистой релаксации, когда

$$\sigma + \epsilon \epsilon_0 = \text{const} \quad (3)$$

В настоящих экспериментах длина образца несколько менялась за счет перемещения жесткой силоизмерительной пружины, и условие (3) должно быть заменено на

$$M \sigma + \epsilon \epsilon_0 = \text{const} \quad (4)$$

Здесь  $M = 1 + CSE/L$ , где  $C$  - податливость пружины,  $L$  - длина образца,  $S$  - его поперечное сечение. Для исследованной пары образцов  $M = 1,25$ . Легко показать, что условие (4) приводит к замене в уравнении релаксации (2) величины  $\epsilon$  на  $\epsilon/M$ . Входящие в уравнения (1) и (2) константы были определены независимо из опытов на ползучесть. Среднее значение показателя степени  $\alpha$  было близко к 2, а величины  $A$  и  $k$  равнялись, соответственно,  $3,83 \text{ кг/мм}^2$  и  $1,3 \cdot 10^{-14} \text{ мин.}^{-1}$ . Полученные по этим данным расчетные кривые показаны пунктиром. Значению  $\epsilon_0 = 0$  соответствует кривая 4, значению  $\epsilon_0 = 0,075\%$  - кривая 5.

Из приведенных данных видно, что воздействие на последующую релаксацию кратковременной пластической деформации и деформации ползучести не эквивалентно. Деформация ползучести заметно увеличивает сопротивление пленок последующей релаксации, причем экспериментальные кривые хорошо совпадают с кривыми, рассчитанными на основе гипотезы упрочнения. В то же время равная или большая по величине кратковременная пластическая деформация существенного влияния на последующее поведение пленок не оказывает, и её можно в первом приближении не учитывать. (Расхождение кривых 1 и 2 лежит в пределах экспериментального разброса).

Приведенные результаты полностью соответствуют, судя по работе [4], данным, полученным на массивных материалах. Из экспериментов на массивной меди известно также, что упрочняющее действие кратковременной деформации начинает проявляться только при  $\epsilon_0 \gg 0,2\%$ . Данные работы [5] показывают, что предварительный наклеп может снизить скорость ползучести более, чем в 5 раз, и, следовательно, кратковременная пластическая деформация

ция является достаточно эффективным средством повышения сопротивления низкотемпературной ползучести и релаксации.

На рис.2 приведены кривые ползучести пленок меди при  $\sigma =$

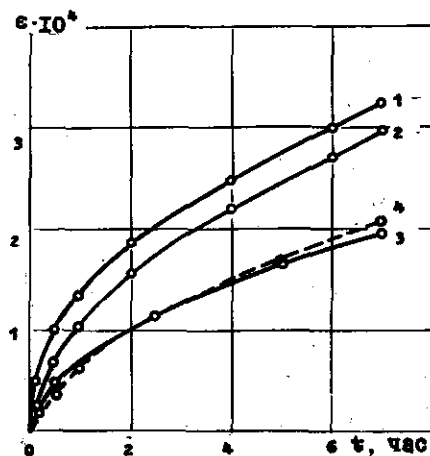


Рис. 2

$= 19,5 \text{ кг/мм}^2$  после предварительной деформации на 0,06, 0,14, 0,28 и 5% (кривые 1 - 4, соответственно). Деформации большей величины не задавались, поскольку относительное удлинение образцов не превышало 0,65%.

Видимо, хотя действие наклепа на ползучесть пленок и массивных материалов качественно одинаково (в обоих случаях при некоторых значениях  $\epsilon_0$  наблюдается прекращение упрочнения), но для пленок уменьшение скорости ползучести не прево-

сходит 35%, что близко к величине разброса.

Таким образом, приведенные результаты показывают, что предварительный наклеп исследованных пленок не может служить средством улучшения их характеристик ползучести.

## Л и т е р а т у р а

1. КОСТЮК В.Г., ЗИЛИНГ К.К., СЕРЕБРЯКОВ А.В. Прочностные свойства металлических нитевидных кристаллов с примесями. ФТТ, 1963, вып. II.
2. ЗИЛИНГ К.К., ПЧЕЛИН В.Д. Закономерности ползучести конденсированных пленок меди. ПМТФ, 1971, № 3.
3. РАБОТНОВ Ю.Н. Ползучесть элементов конструкций, М., "Наука", 1966.
4. ДАНИЛОВСКАЯ В.Н., ИВАНОВА Г.М., РАБОТНОВ Ю.Н. Ползучесть и релаксация хромо-молибденовой стали. Изв. АН СССР, ОТН, 1955, № 5.
5. КАПТЕЛИН Ю.П. Уравнение состояния для ползучести наклепанной меди. Сб. ЛИИИТ, 1962, вып. I2.

Поступила в ред.-мат.отд.  
26 июня 1972 г.