

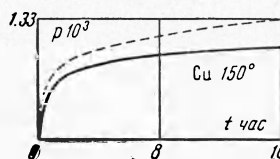
ПОЛЗУЧЕСТЬ ТЕХНИЧЕСКИ ЧИСТОЙ МЕДИ ПРИ СЛОЖНОМ  
НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ

В. С. Наместников

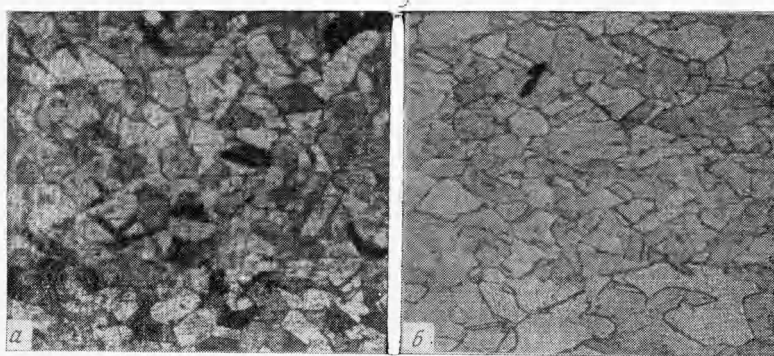
(Новосибирск)

Приводятся результаты экспериментального исследования ползучести технической чистой меди при постоянных и переменных нагрузках, проведенного на тонкостенных трубчатых образцах, подвергнутых различным комбинациям растяжения и кручения. Описание установки, на которой проводились испытания и методики, приводились ранее [1]. Температура испытаний  $150^\circ$ , продолжительность не более 100 час.

Материал был поставлен в виде прутка диаметром 30 мм. Перед испытаниями была проведена проверка исходной изотропии, для чего из прутка вырезались малые продольные и поперечные образцы и испытывались на ползучесть под одной и той же нагрузкой и при температуре основных испытаний. Как видно из фиг. 1, где сплошной линией представлена усредненная по нескольким опытам кривая ползучести продольного образца, а штриховой — поперечного ( $p$  — деформация ползучести), материал имеет в исходном состоянии небольшую анизотропию. Попытки низкой термообработкой получить лучшее состояние материала не привели к заметному улучшению. Более высокая термообработка привела бы к значительному размягчению материала, и он не мог бы быть испытан на имевшихся установках. Поэтому было решено пренебречь обнаруженной незначительной анизотропией и испытывать материал в состоянии поставки, если не считать почти четырехчасовой выдержки при температуре испытаний, в течение которой стабилизировалась температура. Из каждого прутка были сделаны микрошлифы, и для испытаний отобраны только те, у которых была одинаковая мелкозернистая структура. На фиг. 2 даны примеры фотографии продольного ( $\zeta$ ) и поперечного ( $a$ ) микрошлифов ( $\times 120$ ). Как видно, структура материала мелкозернистая, и признаки анизотропии едва заметны. По толщине стенки образца насчитывалось не менее 15 зерен.



Фиг. 1



Фиг. 2

Была выполнена следующая программа экспериментов: восемь образцов испытаны при простом кручении при постоянном крутящем моменте, девять — при простом растяжении и постоянной осевой силе, пять — при совместном кручении и растяжении. В последних экспериментах нагрузка изменялась ступенчато, причем осуществлялось каждый раз условие пропорционального нагружения, т. е. выполнялось в течение каждого опыта равенство

$$\tau / \sigma = \lambda = \text{const} \quad (1)$$

Здесь  $\tau$  — касательное, а  $\sigma$  — нормальное напряжения. В этих испытаниях величина  $\lambda = 0.35$  и  $0.89$ . На каждом образце проделано до четырех ступеней, а длительность ступени около суток. По такой же программе проведено по одному испытанию при простом кручении и простом растяжении. Кроме того, проделано 14 экспе-

риментов при постоянной скорости изменения напряжения. Были использованы три скорости нагружения  $\sigma_i \approx 8, 0.8$  и  $0.08 \text{ кг/мм}^2 \text{ час}$ ; здесь  $\sigma_i = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2}$ .

В некоторых экспериментах по прошествии определенного отрезка времени скорость нагружения мгновенно уменьшалась до нуля, и образец испытывался при постоянном значении напряжения, а затем снова мгновенно увеличивалась до прежнего уровня. Однако всегда в этих случаях выдерживалось условие (1). В опытах с постоянной скоростью нагружения  $\lambda$  выбиралась в пределах от 0.43 до 0.60.

Анализ существующих теорий ползучести показывает, что большинство из них содержит три основные гипотезы.

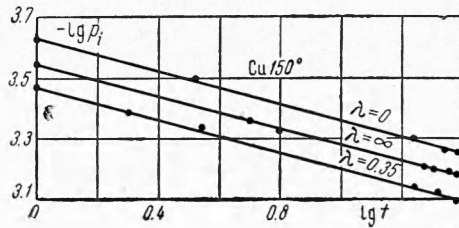
1. Изменение объема упруго

$$p_{jj} = 0 \tag{2}$$

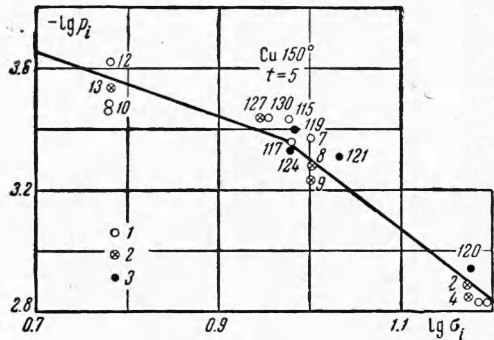
Компоненты тензоров деформаций ползучести

$$p_{jk} = \varepsilon_{jk} - e_{jk} \tag{3}$$

Здесь  $\varepsilon_{jk}$  — полные, а  $e_{jk}$  — мгновенные (упругие или пластические) деформации.



Фиг. 3



Фиг. 4

Следовательно, в логарифмических координатах  $\lg p_i, \lg t$  экспериментальные точки должны располагаться вдоль параллельных прямых. Примеры, приведенные на фиг. 3, показывают, что это условие удовлетворительно выполняется. Величина  $m = 0.28$  ( $\alpha = 2.57$ ).

При фиксированном значении времени в октаэдрической плоскости  $p_i \sigma_i$  должна получаться единая кривая для всех напряженных состояний. Как видно из фиг. 4, это условие выполняется: разброс опытных данных, имеющий место, является обычным для ползучести.

Наиболее употребительные выражения функции

$$f = k\sigma_i^n \text{ или } f = \kappa \exp \sigma_i / A \tag{9}$$

требуют, чтобы в координатах  $\lg p_i - \lg \sigma_i$  или  $\lg p_i - \sigma_i$  получилась прямая. Однако, как видно из фиг. 4, в случае степенной функции этого не наблюдается; этот же результат получается и при экспоненциальной функции  $f$ . В дальнейшем использовалась степенная аппроксимация функции  $f$  при следующих значениях констант:

$$\begin{aligned} n = 3.84, & \quad k = 1.067 \cdot 10^{-17} \text{ час}^{-1} \text{ при } \sigma \leq 9.34 \text{ кг/мм}^2 \\ n = 8.23, & \quad k = 5.87 \cdot 10^{-22} \text{ час}^{-1} \text{ при } \sigma \geq 9.34 \text{ кг/мм}^2 \end{aligned}$$

Здесь и в дальнейшем пользуемся символикой тензорного исчисления. Точка означает дифференцирование по времени.

2. Девiator напряжений

$$(\sigma_{jk}^* = \sigma_{jk} - \delta_{jk} \sigma', \quad 3\sigma' = \sigma_{jj})$$

пропорционален девiatorу скоростей деформаций ползучести

$$p_{jk} = \Lambda \sigma_{jk}^*$$

( $\delta_{jk}$  — символы Кронеккера)  $\tag{4}$

3. Инварианты тензоров напряжений, деформаций ползучести и их скоростей связаны зависимостью, не зависящей от вида напряженного состояния. Например,

$$\Phi(\sigma_i, p_i, \dot{p}_i) = 0 \tag{5}$$

$$p_i = \int (\dot{p}_i^2 / \sigma_i) p_{ik} \dot{p}_{jk} dt$$

$$\sigma_i^2 = 3/2 \sigma_{jk} \sigma_{jk}^* \tag{6}$$

Часто употребляемым частным случаем соотношения (5) является зависимость

$$p_i \dot{p}_i^\alpha = f(\sigma_i) \tag{7}$$

При постоянном напряжении отсюда следует  $\tag{8}$

$$\begin{aligned} p_i &= (t/m)^m f^m(\sigma) \\ (m &= 1/(1+\alpha)) \end{aligned}$$

Следует заметить, что в том диапазоне напряжений, в котором проведены испытания при постоянных нагрузках, хорошую аппроксимацию опытных данных дает

$$f = \kappa \exp \frac{\sigma_i^2}{A} \quad \left( A = 34.74 \text{ кг}^2/\text{мм}^4 \right) \quad (10)$$

$$\left( \kappa = 4.37 \cdot 10^{-15} \text{ час}^{-1} \right)$$

Однако при малых значениях  $\sigma_i$  эта зависимость некорректна.

Обратимся теперь ко второй гипотезе. При пропорциональном нагружении (в частности, при нагружении с постоянной скоростью и при постоянных нагрузках) зависимость (4) в условиях данных экспериментов сводится к

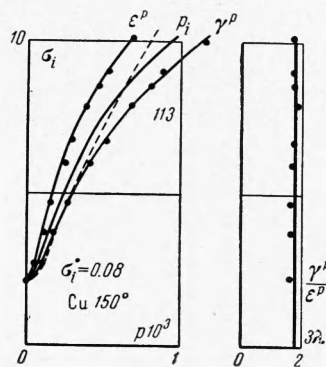
$$\gamma^p / \epsilon^p = 3\lambda \quad (11)$$

Здесь  $\epsilon^p$  — осевая деформация ползучести, а  $\gamma^p$  — сдвиговая деформация ползучести. В опытах измеряются полные деформации; получить деформацию ползучести при ступенчато изменяющихся нагрузках не представляет труда. Чтобы получить деформации ползучести при напряжении, изменяющемся с постоянной скоростью, нужно знать кривые мгновенного деформирования или, по крайней мере, модули упругости, если ограничиться упругим участком, что и было принято в данной работе. При этом были найдены следующие значения упругих констант:

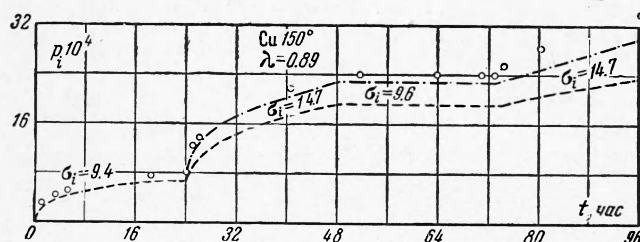
$$E = 10 \cdot 10^3 \text{ кг / мм}^2, \quad G = 3.85 \cdot 10^3 \text{ кг / мм}^2$$

Поскольку ранее была детально рассмотрена эта гипотеза при ступенчато изменяющихся нагрузках на примере алюминиевого сплава [2], не будем останавливаться на этом случае. Укажем только, что зависимость (11) выполняется почти с той же точностью, что и для алюминиевого сплава (в отдельных случаях отклонения правой и левой частей достигают 30%).

Более интересным является случай ползучести при нагрузке, изменяющейся с постоянной скоростью (типичный пример приведен на фиг. 5). В правой части фиг. 5 сплошная прямая изображает величину  $3\lambda$  (правая часть соотношения (11)), а точки изображают отношение  $\gamma^p / \epsilon^p$  (левая часть соотношения (11)). Анализ всех полученных результатов показал, что гипотеза о пропорциональности девиаторов удовлетворительно выполняется. Отклонения правой и левой частей в (11) в основном не превышают 15%. Этот результат аналогичен результату, полученному на алюминиевом сплаве при ступенчатом изменении нагрузки [2].



Фиг. 5



Фиг. 6

Остановимся теперь на третьей гипотезе. При постоянном напряжении вопрос исчерпывается полностью всем изложенным.

При ступенчатом изменении нагрузки (типичный пример приведен на фиг. 6) после увеличения нагрузки экспериментальная кривая располагается выше кривой, предсказываемой зависимостью (штриховая кривая) (7).

На участке, следующем за частичной нагрузкой, расхождение между теорией и экспериментом увеличивается. Это согласуется с ранее полученными нами результатами на других материалах.

При нагрузке, увеличивающейся с постоянной скоростью, зависимость (7) (фиг. 5, штриховая линия) предсказывает также заниженные величины деформации ползучести по сравнению с опытными. Однако в этом случае теория менее расходится с экспериментом, чем при ступенчатом изменении нагрузки.

Ю. Н. Работновым [3] в качестве меры упрочнения была предложена величина

$$a = \int \sigma_{jk} dp_{jk} \quad (12)$$

Интеграл берется по всему пути деформирования.

Гипотеза упрочнения (7) тогда может быть заменена следующей:

$$p_i \cdot a^\alpha = k \varepsilon_i^{n+\alpha} \quad (13)$$

Нетрудно показать, что

$$a = \int \sigma_i dp_i \quad (14)$$

Следовательно, при постоянном  $\sigma_i$  уравнение (13) сводится к (7), а значит, константы в соотношении (13) те же, что и в уравнении (7). Несмотря на то, что теория претерпела, казалось бы, малые изменения, и не были добавлены новые константы, тем не менее, соответствие нового варианта теории с опытами лучше, чем старого. Это видно из фиг. 6, где штрих-пунктирная кривая подсчитана по соотношению (13).

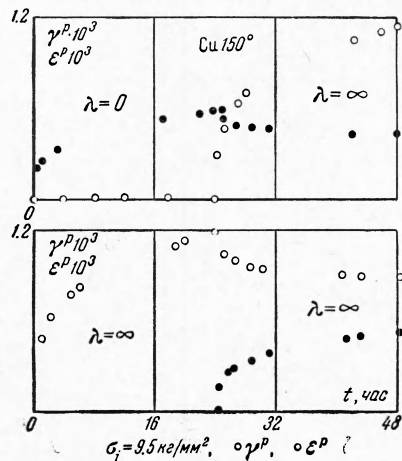
Кроме указанных выше, было проведено еще шесть опытов по следующей программе. Образец испытывался при простом кручении (растяжении) при постоянной величине  $\sigma_i$  в течение  $t_0$  час. Затем разгружался и тут же нагружался на растяжение (кру-

чение) до той же величины  $\sigma_i$  и испытывался еще  $t_0$  час.

На фиг. 7 приведены типичные результаты этих испытаний. В верхней части фиг. 7 изображены данные опыта, в котором кручение сменяет растяжение, а в нижней — опыта, в котором растяжение сменяет кручение. Если сопоставить кривую деформаций сдвига второго участка верхней кривой и первого участка нижней, то, как нетрудно заметить, они совпадают. Точно так же кривая растяжения первого участка верхней кривой совпадает со вторым участком нижней.

Таким образом, приходим к заключению, что предварительное кручение (растяжение) не влияет на последующее растяжение (кручение) при одной и той же величине интенсивности напряжений. Этот результат ранее наблюдался на стали ЭИ-257 [4].

Из фиг. 7 видно, что после замены растяжения кручением убывает деформация удлинения, а после замены кручения растяжением убывает деформация сдвига. То же самое



Фиг. 7

наблюдалось ранее на стали ЭИ-257, но в меньшей степени, и не было отмечено в [4].

Интересно отметить, что подобное явление обнаружено в опытах по пластическому деформированию [5].

Обнаруженные в последних экспериментах факты не согласуются ни с одной из существующих теорий ползучести.

Поступила 13 V 1964

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Наместников В. С. О ползучести при постоянных нагрузках в условиях сложного напряженного состояния. Изв. АН СССР, ОТН, 1957, № 4.
2. Наместников В. С. О гипотезе пропорциональности девиаторов в условиях ползучести при переменных нагрузках и неизменных главных осях. ПМТФ, 1960, No. 3.
3. Работнов Ю. Н. On the Equation of State for creep. Progr. Appl. Mech., Macmillan, Co, 1963
4. Наместников В. С. О ползучести при переменных нагрузках в условиях сложного напряженного состояния. Изв. АН СССР, ОТН, 1957, № 10.
5. Фейгин М. Неупругое поведение при растяжении и кручении. Механика. Сб. перев. и обз. ин. период. лит., 1956, № 3.