

Влияние скорости деформации на упрочнение меди

В.Д. Соловей, А.Н. Мушников

Институт машиноведения УрО РАН, Екатеринбург, 620049, Россия

При решении технологических задач деформации металлов необходимо иметь данные о свойствах металлов. Пластические свойства металлов описываются кривыми упрочнения. В работе находятся приближенно кривые упрочнения при сжатии образцов технической чистой меди, содержащей не менее 99,2 % меди, в зависимости от скорости деформации.

В работе [1] получены диаграммы деформации для сжатия образцов технической чистой меди, содержащей не менее 99,2 % меди, в зависимости от скорости деформации (Рис. 1). В работе не приводятся данные о жесткости испытательных

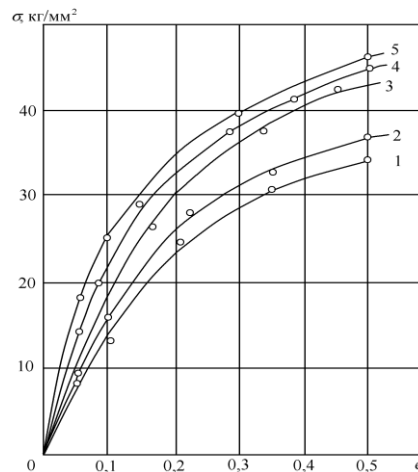


Рис. 1. Диаграммы деформаций меди при 20°C

и различных скоростях деформации ξ :

$$1 - 2 \times 10^{-3} \text{ сек}^{-1}; \quad 2 - 1,6 \times 10^{-2}; \quad 3 - 1,5 \times 10^2;$$

$$4 - 2,0 \times 10^3; \quad 5 - 1,33 \times 10^4.$$

машин, поэтому, исходя из приведенных диаграмм, нельзя построить кривые упрочнения известными методами.

В настоящей работе кривые упрочнения технической чистой меди для упомянутых скоростей деформации строятся приближенно на основании данных, приведенных в [1,2].

Будем использовать следующие обозначения для скоростей деформаций (в сек^{-1}):

$$\xi_1 = 2 \times 10^{-3}; \quad \xi_2 = 1,6 \times 10^{-2}; \quad \xi_3 = 1,5 \times 10^2; \quad \xi_4 = 2,0 \times 10^3; \quad \xi_5 = 1,33 \times 10^4.$$

На рис. 2 приводится кривая упрочнения меди $M4$, содержащей не менее 99,0 % меди, полученная при статическом сжатии образца [2].

О близости кривой упрочнения, приведенной на рис. 2, к диаграммам деформаций, приведенными на рис. 1, можно судить по напряжениям только для больших деформаций, поскольку для малых деформаций, по определению, напряжения вообще должны быть разными.

Из всех диаграмм деформаций, приведенных на рис. 1, диаграмма деформаций 1 наиболее близка к кривой упрочнения 2. Действительно, для деформации $e = 0.5$ напряжения для кривой упрочнения и диаграммы деформации 1 отличаются на 1%. Для этой же деформации напряжения для кривой упрочнения и диаграммы деформации 2 отличаются на 6%.

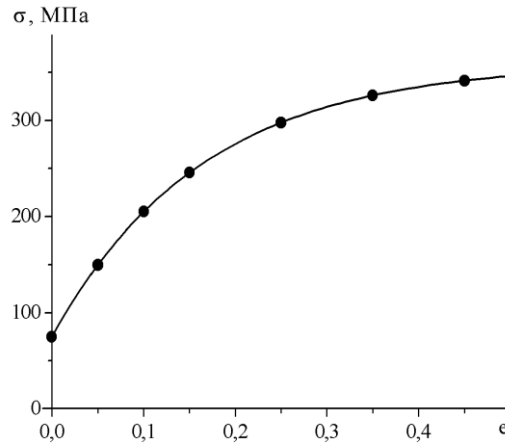


Рис.2. Кривая упрочнения меди M4 для статического сжатия при $20^{\circ}C$.

На основании сказанного можно утверждать, что кривая упрочнения, представленная на рис. 2, приближенно описывает упрочнение технической чистой меди для скорости деформации $\xi = \xi_1$. Аппроксимация этой кривой упрочнения приводит к следующему выражению:

$$\sigma = 75 + 285 * [1 - \exp(-e/0.1644)] \quad (1)$$

Из рис. 1 и рис. 2 видно, что начало однородной пластической деформации образца на диаграмме деформаций e_p для скорости деформации $\xi = \xi_1$ приближенно равно $e_p = 0.05$.

Сделаем допущение, что начала пластической деформации e_p для всех диаграмм деформаций равны. Кривые упрочнения для различных скоростей деформаций можно получить приближенно из диаграмм деформаций, выделяя из диаграмм пластические части с помощью преобразования $e \rightarrow e - e_p$ и аппроксимируя последние. Расчеты показывают, что каждая такая функция достаточной точностью аппроксимируется с помощью двух трехпараметрических функций. Для того, чтобы описать каждую кривую упрочнения более компактно (в виде одной трехпараметрической функции) за кривую упрочнения 1 ($\xi = \xi_1$) примем кривую (1), а остальные кривые упрочнения будем генерировать из кривой 1 следующим образом.

В работе [1] установлено, что для диаграмм деформаций скоростная зависимость сопротивления деформации σ может быть представлена выражением

$$\lg \frac{\sigma}{\sigma_0} = n \lg \frac{\xi}{\xi_0} \quad (2)$$

где σ и σ_0 -сопротивления деформации при скоростях деформации ξ и ξ_0 соответственно; $n(e)$ -показатель, зависящий от деформации.

Допустим, что соотношение (1) применимо и к кривым упрочнения. Показатель $n(e)$ найдем, используя соотношение (2) для вышеупомянутых кривых упрочнения, получаемых после выделения из диаграмм деформации пластической части. Аппроксимация соответствующих данных дает следующее выражение для показателя $n(e)$:

$$n(e)=0.0538-0.4119 e+2.1515 e^2-5.2360 e^3+4.6862 e^4. \quad (3)$$

При нахождении кривых упрочнения для скоростей деформаций $\xi_2, \xi_3, \xi_4, \xi_5$ с помощью (2) скорость деформации ξ_0 и напряжение σ_0 относились к кривой упрочнения $\xi = \xi_1$. Построение искомых кривых упрочнения (по точкам) с последующей их аппроксимацией дают следующие соотношения:

$$\begin{aligned} \sigma &= 84 + 288 * [1 - \exp(-e / 0.1604)] ; \\ \sigma &= 137 + 296 * [1 - \exp(-e / 0.1444)] ; \\ \sigma &= 158 + 295 * [1 - \exp(-e / 0.1411)] ; \\ \sigma &= 175 + 293 * [1 - \exp(-e / 0.1387)] \end{aligned} \quad (4)$$

для скоростей деформаций $\xi = \xi_2, \xi_3, \xi_4, \xi_5$ соответственно. Найденные таким образом кривые упрочнения для технически чистой меди представлены на рис. 3.

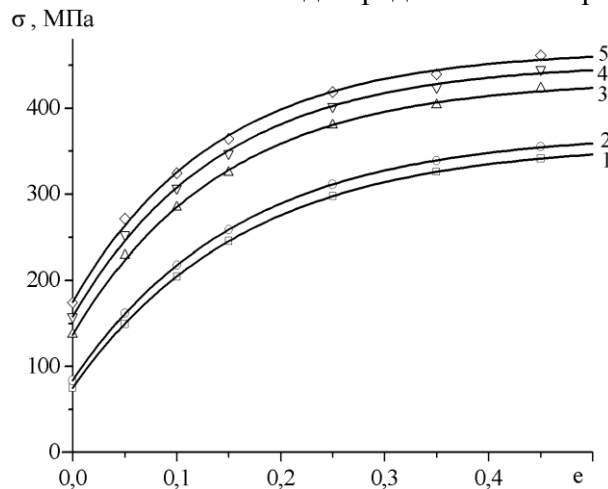


Рис. 3. Кривые упрочнения меди при $20^{\circ} C$

и различных скоростях деформации ξ :

$$\begin{aligned} 1 - 2 \times 10^{-3} \text{ сек}^{-1}; \quad 2 - 1,6 \times 10^{-2}; \quad 3 - 1,5 \times 10^2; \\ 4 - 2,0 \times 10^3; \quad 5 - 1,33 \times 10^4. \end{aligned}$$

Найдем аналитическое выражение, описывающее кривые упрочнения в диапазоне деформаций $0.0 \leq e \leq 0.45$ и скоростей деформаций $0.002 \leq \xi \leq 13300.0 \text{ сек}^{-1}$. Зависимость напряжения от деформации и скорости деформации будем искать в виде

$$\sigma(e, \xi) = a_0(e) + a_1(e) \ln \xi + a_2(e) \ln^2 \xi + a_3(e) \ln^3 \xi + a_4(e) \ln^4 \xi. \quad (5)$$

Аппроксимация кривых упрочнения методом наименьших квадратов дает следующие выражения для коэффициентов в (5):

$$a_0 = -0.295176\sigma_1(e) + 0.738723\sigma_2(e) + 1.555170\sigma_3(e) - 1.536610\sigma_4(e) + 0.537891\sigma_5(e) ;$$

$$a_1 = 0.057448\sigma_1(e) - 0.203548\sigma_2(e) + 0.257945\sigma_3(e) - 0.150359\sigma_4(e) + 0.038513\sigma_5(e) ;$$

$$a_2 = 0.013110\sigma_1(e) - 0.006722\sigma_2(e) - 0.066298\sigma_3(e) + 0.096590\sigma_4(e) - 0.036680\sigma_5(e) ; \quad (6)$$

$$a_3 = -0.003547\sigma_1(e) + 0.005223\sigma_2(e) - 0.005656\sigma_3(e) + 0.005223\sigma_4(e) - 0.001243\sigma_5(e) ;$$

$$a_4 = 0.000197\sigma_1(e) - 0.000328\sigma_2(e) + 0.000838\sigma_3(e) - 0.001256\sigma_4(e) + 0.000549\sigma_5(e) ,$$

где $\sigma_1(e), \sigma_2(e), \sigma_3(e), \sigma_4(e), \sigma_5(e)$ - напряжения для формации e , относящиеся к кривым упрочнения 1, 2, 3, 4, 5 соответственно.

Соотношения (5) и (6) определяют приближенно кривую упрочнения технической чистой меди для любой скорости деформации, лежащей в рассматриваемом диапазоне скоростей деформаций.

Публикации

1. Дьяков А.П., Ишуткин С.И., Соколов Л.Д. Скоростная зависимость прочностных характеристик некоторых металлов // Сб. научн. трудов «Обработка металлов давлением», Изд-во УПИ, Свердловск, Вып. 1, Стр. 28-32.
2. Третьяков А.В., Зюзин В.И. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением. Справочник. М: Металлургия, 1973, 224 с.