

УДК 621.7.011;539.374

**МЕТОДИКА ИДЕНТИФИКАЦИИ ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ СООТНОШЕНИЙ  
ДЛЯ БОЛЬШИХ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ**

© 2011 г.

А.С. Смирнов, А.В. Коновалов

Институт машиноведения УрО РАН, Екатеринбург

smirnov@imach.uran.ru

Поступила в редакцию 15.06.2011

Описываются определяющие соотношения для изотропных изотермических упруговязкопластических сред, в которых при деформации протекают физические процессы, связанные с возвратом, рекристаллизацией и старением, а также методика для идентификации определяющих соотношений.

*Ключевые слова:* определяющие соотношения, большие пластические деформации, динамическая рекристаллизация, динамический возврат, динамическое деформационное старение.

При горячей деформации наряду с упрочнением в металле интенсивно происходят процессы разупрочнения, которые обусловлены в отсутствие фазовых превращений динамическим возвратом, полигонизацией и рекристаллизацией. В [1] получены определяющие соотношения для металлов. Принята модель упруговязкопластической изотропной и изотропно упрочняющейся среды. Упругие деформации – малые и удовлетворяют закону Гука, пластические – большие и подчиняются ассоциированному закону пластического течения с функцией нагружения Мизеса. Вязкие свойства материал проявляет только при сдвиговых деформациях, как при упругих, так и упругопластических. Изменение объема – чисто упругое. Основные уравнения этих соотношений имеют вид

$$\begin{aligned} \sigma &= \sigma^{ep} + S^v, \\ \dot{\sigma}^{ep} &= \lambda \dot{\Theta} + 2(\lambda \Theta + \mu) D - \nabla v \cdot \sigma^{ep} - \\ &\quad - \sigma^{ep} \cdot \nabla v^T - 2\sqrt{3} J \mu \dot{\epsilon}^p S / |S|, \\ S^v &= \nu B, \quad B = D - 1/3 \dot{\Theta} I, \quad v = c q(\dot{\epsilon}) / \dot{\epsilon}, \\ 0.5 S \cdot S - k^2 &= 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь  $\lambda, \mu$  – коэффициенты Ламе;  $D$  – тензор скоростей деформаций;  $\nabla v$  – градиент скорости перемещений;  $S$  – девиатор тензора  $\sigma^{ep}$ ;  $I$  – единичный тензор;  $\Theta$  – относительное изменение объема частицы среды;  $\dot{\epsilon}^p$  – скалярная мера скорости пластической деформации;  $J$  – индикаторная функция;  $\nu$  – коэффициент вязкости;  $\dot{\epsilon}$  – скорость деформации;  $q(\dot{\epsilon})$  – функция вязких свойств среды;  $c$  – коэффициент, учитывающий различное проявление вязких свойств при упругих и упругопластических деформациях;  $k$  – напряжение текущей части в условии текучести Мизеса (2).

Ранее была предложена модель сопротивления деформации, описывающая реологическое поведение сплавов в условиях, когда в процессе пластической деформации имеет место упрочнение за счет увеличения плотности дислокаций и разупрочнение посредством динамической рекристаллизации и возврата. На ее основе построена вязкопластическая модель сопротивления деформации, дополнительно учитывающая динамическое деформационное старение и представляющая следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned} \sigma_s &= \sqrt{3} k + \sqrt{3} / 2 q, \quad q = a_8 \ln(1 + a_9 \dot{\epsilon}), \\ k &= a_0 + \rho V_n (a_{10} + a_{11} V_p)^{a_{12}}, \\ \dot{\rho} &= a_1 \exp(-a_2 \rho) \dot{\epsilon} - a_3 \rho, \\ \dot{V}_r &= \begin{cases} a_5 \varepsilon_r R^2 \frac{dR}{dt}, & \text{если } V_r \leq a_6, \\ \dot{V}_r^* \left( \frac{1 - V_r}{1 - a_6} \right)^{a_7}, & \text{если } V_r > a_6, \\ \dot{V}_r^*, & \text{если } V_r = a_6, \end{cases} \\ V_n &= 1 - V_r - V_p, \quad \dot{V}_p = a_{13} \dot{\epsilon} - a_{14} \frac{V_n}{1 + \rho}, \\ \varepsilon_r &= \int_0^{t_r} \dot{\epsilon} dt, \quad \frac{dR}{dt} = \dot{\epsilon} \rho \quad \text{при } \rho > a_4. \end{aligned}$$

Здесь  $\sigma_s$  – напряжение сжатия (растяжения) при одноосном напряженном состоянии (сопротивление деформации);  $a_0 = k(t_0)$ ,  $t_0$  – момент времени начала пластической деформации;  $q$  – функция, описывающая вязкие свойства материала;  $\rho$  – величина, пропорциональная приращению плотности дислокаций за счет пластической деформации.

ции;  $\epsilon_p$  – степень деформации, накопленная до начала динамической рекристаллизации;  $V_n$ ,  $V_r$  – нерекристаллизованная и рекристаллизованная доли объема металла соответственно;  $V_p$  – приращение объема, характеризующего скопления дислокаций, заблокированные интерметаллидами и примесными атомами;  $R$  – радиус рекристаллизованного зерна,  $R(t_r) = 0$ ,  $t_r$  – момент времени начала динамической рекристаллизации, определяемый условием  $\rho = a_i$ ;  $a_i$  ( $i = 0, \dots, 14$ ) – параметры модели, подлежащие идентификации по опытным данным. Объемы  $V_n$ ,  $V_r$  и  $V_p$  должны удовлетворять следующему равенству:  $V_n + V_r + V_p = 1$ . В начальный момент времени до деформации  $V_n = 1$ ,  $V_r = 0$ ,  $V_p = 0$ .

На рис. 1 для сплава АМг6 при температуре деформации 400 °С приведена экспериментальная кривая зависимости скорости деформации образца  $\dot{\epsilon}$  от времени  $t$ , а на рис. 2 изображены соответствующие этому закону деформирования экспериментальная и рассчитанная по модели кривые сопротивления деформации  $\sigma_s$ .

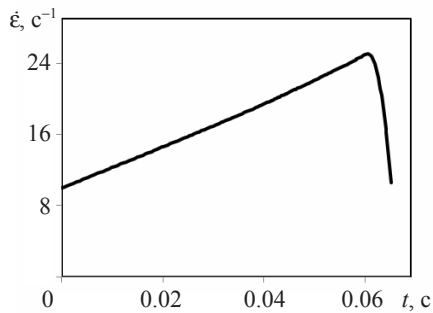


Рис. 1

Параметры модели нашли, минимизируя по результатам экспериментов среднеквадратичное отклонение расчетных значений сопротивления деформации  $\sigma(t)$  от экспериментальных  $z(t)$

$$J(a_0, \dots, a_{14}) = \int_0^T [\sigma_s(t) - z(t)]^2 dt,$$

где  $T$  – время деформации образца.

Полученные значения коэффициентов действительны для наблюдаемого в эксперименте диапазона изменения скорости деформации, поэтому для расширения скоростного диапазона используют одновременную идентификацию по нескольким экспериментам.

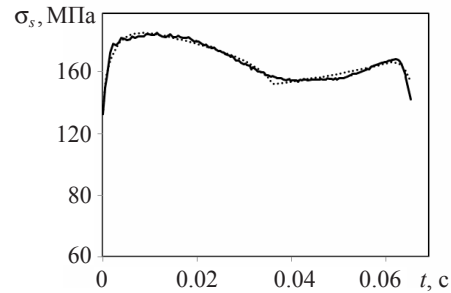


Рис. 2

Прохождение в сплаве при экспериментах физико-механических процессов, заложенных в структуру модели сопротивления деформации, подтверждено металлографическими исследованиями.

*Работа выполнена в рамках Программ фундаментальных исследований Президиума РАН №22 (проект 09-П-1-1008) в части металлографических исследований и ОЭМПУ РАН № ОЭ-12 в части методики проведения пластометрических испытаний и разработки реологической модели сплавов.*

#### Список литературы

1. Коновалов А.В. Определяющие соотношения для металлов при высокотемпературных пластических деформациях // Изв. РАН. Механика твердого тела. 2009. №1. С. 116–123.

## METHOD OF IDENTIFICATION OF CONSTITUTIVE EQUATIONS FOR LARGE HIGH-TEMPERATURE PLASTIC STRAINS

*A.S. Smirnov, A.V. Kononov*

The work describes constitutive equations for isotropic isothermal elaviscoplastic media in which in the course of deformation physical processes connected with recovery, recrystallization and aging take place. A method for the identification of constitutive equation is also presented.

*Keywords:* constitutive equation, large plastic strains, dynamic recrystallization, dynamic recovery, dynamic strain aging.