

УДК 621.771.001

Фирсова Т. И.

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ УПРОЧНЕНИЯ-РАЗУПРОЧНЕНИЯ РЕОЛОГИЧЕСКИ СЛОЖНЫХ МЕТАЛЛОВ ПО ПЛАСТОМЕТРИЧЕСКИМ КРИВЫМ

Развитие методов экспериментальной механики: поляризационно-оптического, муар и особенно пластометрии открыло возможность фундаментального изучения закономерностей пластического формоизменения металлов в зависимости от их реологических свойств. По результатам экспериментальных исследований этих закономерностей металлы и сплавы классифицированы по степени реологической сложности: реологически простые – неупрочняющиеся и монотонно упрочняющиеся (I и II классы); реологически сложные металлы – динамически аномально разупрочняющиеся, кривые $\sigma - \bar{\varepsilon}$ которых имеют один (III класс) или более экстремумов (IV и V классы) [1, 2]. Как показали исследования последних лет, закономерности пластического течения металла определяются не только реологической сложностью, но и параметрами интенсивности упрочнения и разупрочнения при его деформировании [3].

С развитием реологической концепции пластического формоизменения металлов пластометрические кривые из справочных данных ограниченного использования превратились в информационное поле, возможности которого для получения сведений о свойствах металлов еще далеко не исчерпаны. Это хорошо согласуется с утверждением академика Кайбышева О. А. о том, что диаграммы растяжения в интегральной форме содержат данные о структурных изменениях в материале, происходящих в процессе его пластического течения, о величинах напряжений, об интенсивностях процессов упрочнения и разупрочнения, о протяженности стадий стабильной деформации до начала разрушения [4]. Еще более информативными являются семейства кривых деформационного упрочнения – реологические кривые.

Цель статьи – предоставить методику оценки параметров упрочнения-разупрочнения по семействам пластометрических кривых, значительно упрощающую анализ реологических свойств металлов при создании новых технологий.

В настоящее время основными опытными данными по реологии металлов являются результаты испытаний однородной осадкой цилиндрических образцов на пластометрах при постоянной скорости деформации и температуре, которые представляют в виде семейств кривых в координатах $\sigma - \bar{\varepsilon}$:

$$\sigma = \sigma(\bar{\varepsilon}, \dot{\varepsilon}, T), \quad (1)$$

где σ – сопротивление деформации;

$\bar{\varepsilon}$ – степень деформации;

$\dot{\varepsilon}$ – скорость деформации;

T – температура деформируемого металла.

Анализ научно-технической литературы позволяет представить (1) в виде:

$$\sigma = f_{\varepsilon}(\bar{\varepsilon}), f_{\dot{\varepsilon}}(\dot{\varepsilon}), f_T(T), \quad (2)$$

что свидетельствует о возможности отдельного исследования взаимосвязи параметров.

На рис. 1 схематично представлены реологические кривые металлов II-го, III-го и IV-го реологических классов. На практике используются семейства пластометрических кривых, уже давно получивших статус реологических паспортов металлов, из справочной литературы, например [5].

Методика оценки упрочнения-разупрочнения рассматривается при примере металлов III-го реологического класса. Металлы этого класса: упрочняются до некоторой степени деформации $\bar{\varepsilon}_{x1}$, которая называется характеристической. Сопротивление деформации достигает максимального значения σ_{\max} при $\varepsilon = \bar{\varepsilon}_{x1}$. При разупрочнении значение σ_2 соответствует степени деформации $\varepsilon = \bar{\varepsilon}_{x2}$ (необходимое условие при выборе точки σ_2 – монотонный либо близкий к нему характер изменения функции $\sigma(\bar{\varepsilon})$ в интервале $[\varepsilon_{x1}, \varepsilon_{x2}]$), см. рис. 1.

Выпишем параметры пластометрической кривой металла III-го реологического класса при фиксированных степени деформации и температуре:

$$\sigma_0, \sigma_{\max}, \sigma_2, \varepsilon_0, \varepsilon_{x1}, \varepsilon_{x2}, \quad (3)$$

где σ_0 – сопротивление деформации при малых значениях деформации, например, $\bar{\varepsilon}_0 = 0,05$;

σ_{\max}, σ_2 – значения сопротивления деформации при $\varepsilon = \varepsilon_{x1}$ и $\varepsilon = \varepsilon_{x2}$ соответственно.

Для монотонно упрочняющихся металлов (II класс) на кривой упрочнения выбираются точки $(\sigma_0, \bar{\varepsilon}_{0,05})$, $(\sigma_1, \bar{\varepsilon}_1)$, где $\bar{\varepsilon}_1$, значение близкое к средней степени деформации исследуемого процесса.

Для металла IV-го класса реологической сложности без учета ветви вторичного упрочнения список параметров соответствует (3).

Интенсивность упрочнения – разупрочнения металлов разной реологии оценивается при помощи коэффициентов:

$$k_y = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_0}{\sigma_{\max}} / (\varepsilon_{x1} - \varepsilon_0); \quad k_p = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_2}{\sigma_{\max}} / (\varepsilon_{x2} - \varepsilon_{x1}), \quad (4)$$

где k_y – коэффициент упрочнения; k_p – коэффициент разупрочнения.

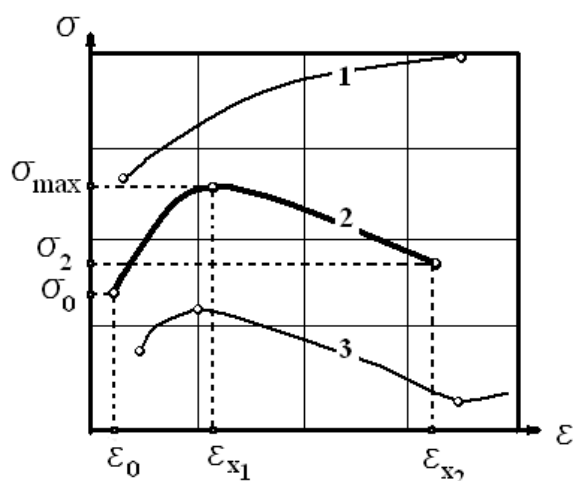


Рис. 1. Реологические кривые:
1 – II-го, 2 – III-го, 3 – IV-го
реологических классов

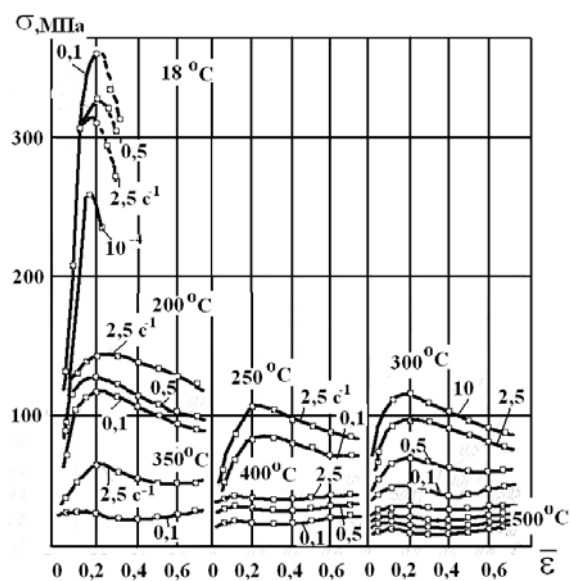


Рис. 2. Кривые испытаний на сжатие магния (99,9 %) после прессования, холодного волочения и отжига [5]

Коэффициенты упрочнения рассчитываются по значениям сопротивления деформации восходящих ветвей кривых при соответствующих степенях деформации и характеризуют интенсивность упрочнения металла при данной скорости и степени деформации, чем больше значение коэффициента k_y , тем интенсивнее упрочняется металл.

Коэффициенты разупрочнения – по значениям сопротивления деформации нисходящих ветвей кривых при соответствующих степенях деформации. Они характеризуют интенсивность разупрочнения металла, чем меньше значение коэффициента k_p , тем более пологой является ветвь разупрочнения металла.

При помощи введенных коэффициентов удается свести функцию $f_\varepsilon(\bar{\varepsilon})$ выражения (2) при данной температуре и скорости деформации к двум значениям k_y , k_p . А все семейство реологических кривых заменяется двумя кривыми $k_y(\dot{\varepsilon}, T)$, $k_p(\dot{\varepsilon}, T)$ для реологически сложного металла.

На рис. 2 приведены семейства реологических кривых чистого магния, который является реологически сложным металлом III и IV-го классов. Температурный интервал изменения параметров 18–500 °С. Провести анализ общих закономерностей изменения реологических свойств по многообразию кривых этого семейства даже при сравнительно небольшом разбеге скоростей деформации ($0,5 \dots 2,5 \text{ c}^{-1}$) весьма затруднительно.

На рис. 3 представлены зависимости $k_y(\dot{\varepsilon}, T)$, $k_p(\dot{\varepsilon}, T)$ чистого магния. Вместо многообразия кривых (см. рис. 2) получены семейства, анализировать которые значительно проще. Из рис. 3 следует, что процессы разупрочнения чистого магния зависят от температуры значительно меньше, чем процессы упрочнения. С повышением температуры до 300 °С коэффициенты упрочнения уменьшаются (т. е. интенсивность упрочнения падает) во всем исследуемом интервале скоростей деформации. Дальнейшее повышение температуры приводит к увеличению коэффициента упрочнения при скоростях деформации $0,1 \text{ c}^{-1}$, при больших значениях скорости деформации тенденция к уменьшению $k_p(\dot{\varepsilon}, T)$ сохраняется. Из приведенного анализа можно сделать вывод, что температура 300 °С является наиболее благоприятной для деформирования чистого магния.

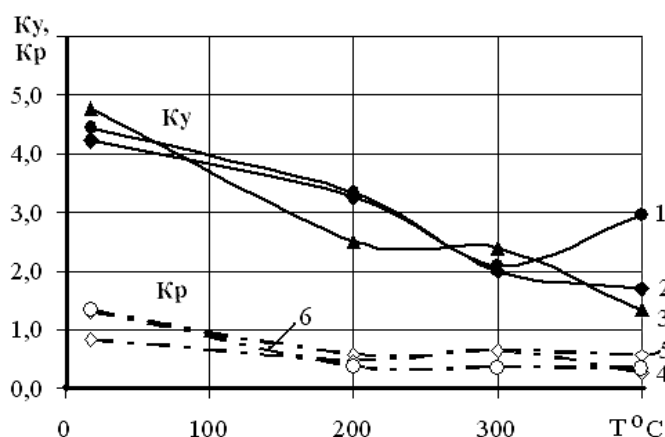


Рис. 3. Зависимости интенсивности упрочнения k_y (кривые 1, 2, 3) и разупрочнения k_p (кривые 4, 5, 6) чистого магния. Скорости деформации для кривых:

$$1, 4 - 0,1 \text{ c}^{-1}; 2, 5 - 0,5 \text{ c}^{-1}; 3, 6 - 2 \text{ c}^{-1}$$

Для сравнения на рис. 4 приведено семейство пластометрических кривых чистого цинка, а на рис. 5 зависимости $k_y(\dot{\varepsilon}, T)$, $k_p(\dot{\varepsilon}, T)$ для этого семейства.

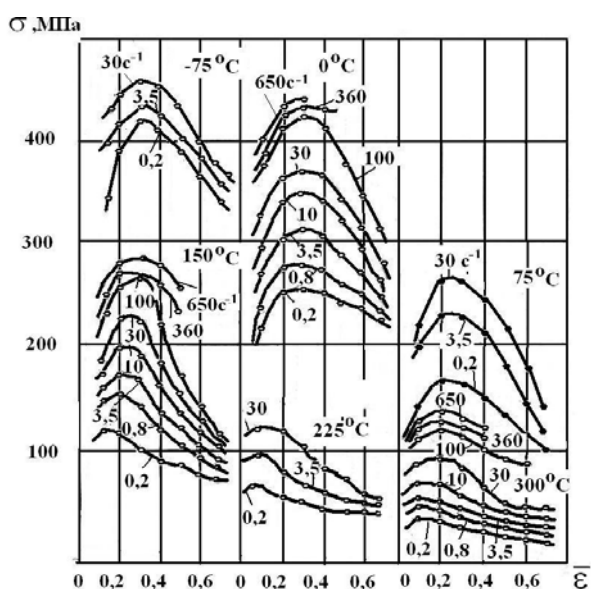


Рис. 4. Кривые испытаний на сжатие образцов высокочистого цинка (99,99 %) после горячей прокатки [5]

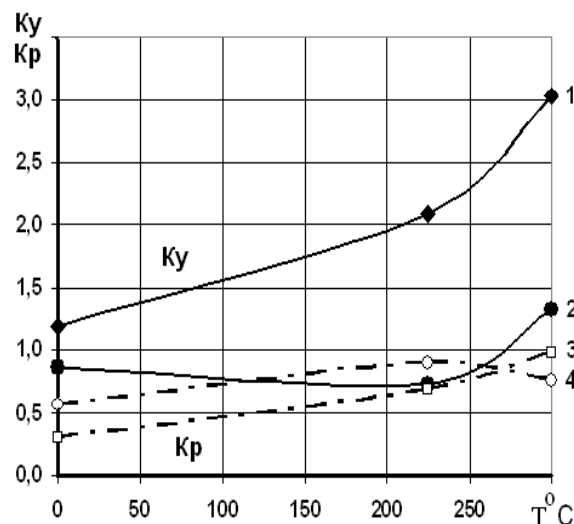


Рис. 5. Цинк (99,99 %). Коэффициенты упрочнения – кривые 1, 2; разупрочнения – кривые 3, 4 при скорости деформации 0,2 и 3,5 с⁻¹

Анализ коэффициентов интенсивности упрочнения-разупрочнения чистого цинка свидетельствует о том, что малые скорости деформации являются наименее благоприятными для деформирования этого металла. Чем выше скорость деформации, тем меньше коэффициент упрочнения и больше разупрочнения при температурах в интервале 200...250 °С, т. е. условия становятся более благоприятными с точки зрения энергетических затрат на деформирование.

ВЫВОДЫ

Представление характеристик пластометрических кривых в безразмерных параметрах упрощает анализ особенностей упрочнения-разупрочнения реологически сложных металлов и может быть использовано при разработке процессов пластического формоизменения этих металлов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шломчак Г. Г. Реологическая концепция в теории прокатки металлов / Г. Г. Шломчак // Теория и практика металлургии. – 2005. – № 3 (52). – С. 39–43.
2. Шломчак Г. Г. Установление закономерностей деформирования металлов со сложной реологией методами физического моделирования: дис... д-ра техн. Наук : 05.03.05 / Г. Г. Шломчак. – Днепропетровск : Нац. мет. академия, 2000. – 343 с.
3. Разработка процесса прокатки цветных металлов и сплавов со сверхбольшими деформациями с использованием методов физического моделирования : [Отчет по НИР. Закл.] / НМетАУ; рук. темы Г. Г. Шломчак. – Г172G400000; № ГР. 0110U003244. – Днепропетровск, 2011. – 101 с.
4. Кайбышев О. А. Пластичность и сверхпластичность металлов / О. А. Кайбышев. – М. : Металлургия, 1975. – 280 с.
5. Полухин П. И. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов : справочник / П. И. Полухин, Г. Я. Гун, А. М. Галкин. – М. : Металлургия, 1983. – 352 с.

Фирсова Т. И. – науч. сотрудник НМетАУ.

НМетАУ – Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепропетровск.

E-mail: firta2011@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 06.02.2012 г.