

УДЕЛЬНАЯ РАБОТА УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ МЕДИ

*Б.В. Борц, В.Н. Воеводин, В.И. Сытин, Н.Д. Рыбальченко,
С.В. Шевченко, А.Ф. Ванжа*

*Институт физики твердого тела, материаловедения и технологий ННЦ ХФТИ,
г. Харьков, Украина*

Описан метод определения удельной работы деформации с использованием математической аппроксимации диаграмм деформирования. Приведены зависимости удельной работы упругопластической деформации вакуум-плавленной и микролегированной иттрием меди после предварительных деформаций и термообработок. Показано, что склонность к диссипации энергии деформирования для микролегированной иттрием и вакуум-плавленной меди существенно зависит от ориентировки образцов.

Удельная работа деформации может являться мерой энергетической емкости (работоспособности) материала и служить общей характеристикой его механических качеств [1]. Удельную работу деформации в металловедении и физике металлов иногда обозначают термином «вязкость», т.е. термином, которым в физике, физической химии и гидродинамике обозначают совершенно иное свойство. Однако в металловедении и физике металлов под «вязкостью» принято понимать именно удельную работу деформации [2].

В процессе деформации материала происходит обмен энергией деформируемого тела с окружающей средой, возникают изменения в микроструктуре материала. Физически обоснованные представления о перераспределении (рассеянии) энергии в процессе формирования прочностных и пластических свойств необходимы для понимания физической природы возникновения хрупкого или вязкого состояния конструкционных материалов в процессе его эксплуатации. В реальных условиях эксплуата-

ции конструкционный материал целесообразно рассматривать как диссипативную систему, полная механическая энергия которой в указанный период претерпевает изменения.

В настоящей работе приводятся результаты исследований удельной работы упругопластической деформации вакуум-плавленной и микролегированной иттрием меди с учетом анизотропии механических свойств при одноосном растяжении.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектом исследования являлись ленты вакуум-плавленной и микролегированной иттрием меди, исходными материалами при изготовлении которых была катодная медь марки М0к и металлический иттрий марки ИтМ-1. Выплавку экспериментальных слитков проводили в вакууме не хуже $1,3 \cdot 10^{-3}$ Па. Химический состав характерных марок меди приведен в таблице.

Химический состав исследуемой меди

Марка меди	Содержание примеси, (мас. %) · 10 ⁻³								
	Zn	Bi	P	As	Si	Fe	Se	Ni	Na
Вакуум-плавленная (МВи)	3,0	< 1	< 1	< 1	1,5	0,3	1,5	0,2	< 1
ММВ с 0,01 мас.% Y	1,0	< 1	< 1	< 1	1,2	0,3	0,8	0,2	< 1
ММВ с 0,02 мас.% Y	< 1	< 1	< 1	< 1	1,2	0,3	0,8	0,2	< 1

Образцы вакуумплавленной и микро-легированной иттрием меди перед испытаниями подвергались предварительным деформациям на 25, 40, 60, 90% и термической обработке при температурах 500 и 600 °С в течение 1 ч. Механические испытания проводились со скоростью растяжения $2,85 \cdot 10^{-3}$ с⁻¹. Ориентация образцов по отношению к направлению предварительной деформации составляла углы 0, 15, 30, 45, 60, 75 и 90°.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Удельная работа деформации a при одноосном растяжении может быть определена из диаграммы деформирования $S = f(\varepsilon)$, представленной в истин-

ных координатах как площадь под кривой растяжения, ограниченная осями деформирования.

С учетом изменения начальных размеров работа растяжения элемента объема с начальной длиной l_0 и сечением F_0 определяется соотношением:

$$a = \frac{P_1 \Delta l_1}{F_1 l_1} + \frac{P_2 \Delta l_2}{F_2 l_2} + \frac{P_3 \Delta l_3}{F_3 l_3} + \dots + \frac{P_n \Delta l_n}{F_n l_n} = \sum_{k=1}^n \frac{P_k \Delta l_k}{F_k l_k}, \quad (1)$$

где P – нагрузка; $\frac{P_1}{F_1}, \frac{P_2}{F_2}, \dots, \frac{P_n}{F_n}$ представляют собой истинные напряжения S , а соотношения $\frac{\Delta l_1}{l_1}, \frac{\Delta l_2}{l_2}, \dots, \frac{\Delta l_n}{l_n}$ – истинные удлинения ε .

Соотношение (1) можно переписать в следующем виде:

$$a = \frac{1}{V} \int_{l_0}^{l_k} P dl = \int_{l_0}^{l_k} P \frac{dl}{Fl} = \int_0^{\varepsilon_k} S d\varepsilon. \quad (2)$$

В процессе механического испытания образец проявляет упругую и пластическую деформацию. При этом стадию упругой деформации образцы проходят при всех без исключения видах механических испытаний. Поведение металлов при упругой деформации можно описать исходя из известного закона Гука, которым установлена прямая пропорциональность между напряжением и упругой деформацией.

Для описания пластической равномерной деформации было использовано функциональное соотношение $S(\varepsilon) = E^n S_i^{1-n} \varepsilon^n$, полученное нами путем математической аппроксимации диаграмм растяжения [3]. Параметры S_i и ε_i определяются по пересечению упругого и пластического участков диаграммы и представляют собой эффективное критическое напряжение течения, необходимое для перемещения незакрепленных дислокаций с некоторой скоростью, и соответствующее ему эффективное удлинение; E – модуль нормальной упругости; n – показатель упрочнения.

Механическую энергию, затраченную на деформирование образца при одноосном растяжении, можно определить следующим образом:

$$a = a_u + a_p, \quad (3)$$

где $a_u = \int_0^{\varepsilon_u} S_u(\varepsilon) d\varepsilon = \int_0^{\varepsilon_u} E\varepsilon d\varepsilon = \frac{S_i^2}{2E}$ – работа упругой

деформации; $a_p = \int_{\varepsilon_u}^{\varepsilon} S_p(\varepsilon) d\varepsilon$ – работа пластической деформации.

В области равномерного удлинения

$$a_p = \int_{\varepsilon_i}^{\varepsilon_b} E^n S_i^{1-n} \varepsilon^n d\varepsilon = \frac{1}{1+n} [S_b \varepsilon_b - S_i \varepsilon_i].$$

Используя полученные соотношения для удельной работы упругопластической деформации в области равномерного удлинения, имеем следующее уравнение:

$$a = \frac{S_i^2}{2E} + \frac{1}{1+n} [S_b \varepsilon_b - S_i \varepsilon_i] = \frac{(n-1)S_i^2}{2(1+n)E} + \frac{S_b \varepsilon_b}{1+n}. \quad (4)$$

Пользуясь соотношением (4) и экспериментальными данными, приведенными в работах [3-5], были получены зависимости удельной работы упругопластической деформации вакуум-плавленной и микролегированной иттрием меди после предварительных деформаций на 25, 40, 60 и 90% при температурах отжига 500 и 600 °C и различной ориентировки образцов относительно направления предварительной деформации (рис. 1, 2).

Приведенные результаты исследований удельной работы упругопластической деформации вакуум-

плавленной и микролегированной иттрием меди при одноосном растяжении показывают, что значения удельной работы при равномерной деформации для микролегированной иттрием и вакуум-плавленной меди существенно зависят от ориентировки образцов.

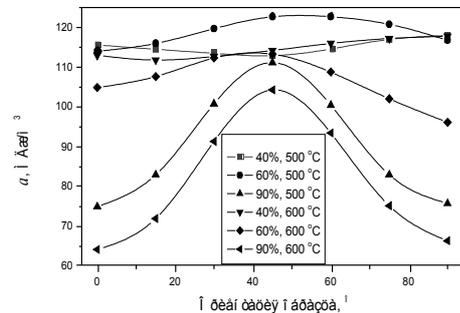


Рис. 1. Удельная работа при равномерной деформации лент вакуум-плавленной меди

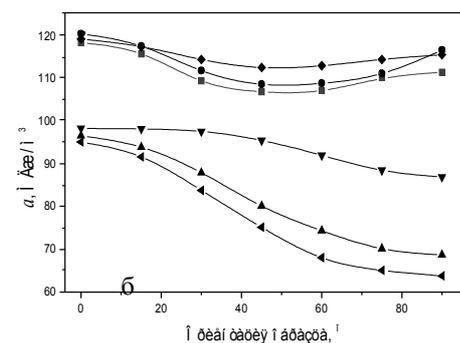
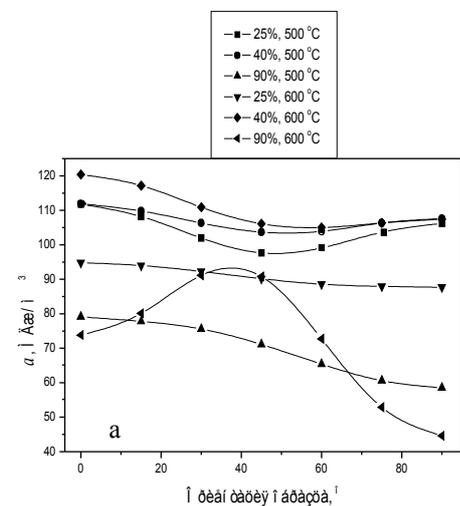


Рис. 2. Удельная работа при равномерной деформации лент микролегированной меди: 0,01% иттрия (а); 0,02% иттрия (б)

В процессе изотермического упругопластического деформирования энергия, необходимая для пластической деформации, будет рассеиваться в окружающей среде в виде тепла, а энергия упругой деформации, ответственной за упрочнение образца, будет поглощаться (накапливаться) образцом в виде

запасенной энергии. Эта накопленная (внутренняя) энергия будет ассоциироваться со структурными изменениями, приводящими к формированию анизотропии свойств. Структурные изменения, происходящие в процессе деформирования в образце, характеризуются взаимным расположением структурных составляющих образца: вакансий, междоузельных атомов, атомов примесей, дислокаций, границ раздела фаз, зерен, субзерен и другими дефектами кристаллической структуры, изменяющими свою форму и расположение в процессе деформирования и взаимодействия с внешней средой.

Из сравнения результатов, приведенных на рис. 1 и 2, следует, что для вакуум-плавленной меди характерна анизотропия удельной работы деформации, особенно выраженная после предварительной деформации на 90%.

Микролегирование меди иттрием приводит к снижению анизотропии меди. После предварительных деформаций до 40% и термообработок при 500...600 °С анизотропия работы деформации практически отсутствует.

Положительное влияние микродобавки иттрия, имеющего высокую температуру плавления, объясняется его химическим взаимодействием с примесями и связыванием их в более тугоплавкие химические соединения. Помимо указанного воздействия иттрия оказывает рафинирующее действие при добавке его в расплавленный металл, благоприятно влияет на состояние границ зерен, способствует повышению температуры начала рекристаллизации, уменьшению среднего размера зерна по сравнению с вакуум-плавленной медью [3-5]. Под влиянием теплового и механического воздействий в меди происходит перераспределение примесей и микродобавок, изменяется структурное состояние материала, формируются преимущественные кристаллографические ориентировки [4-5].

Минимальную склонность к диссипации энергии деформирования вакуум-плавленная и микро-легиро-

ванная иттрием медь проявляет после предварительной деформации на 90% и термообработок выше 500 °С. Максимальную работу деформации проявляет вакуум-плавленная медь при ориентировке образцов 40...60° по отношению к направлению прокатки после предварительной деформации на 60 % и термообработки при 500 °С.

Приведенные результаты показывают, что удельная работа деформации является комплексной характеристикой, включающей в себя более «простые» механические свойства материала (соотношение 4). Она может быть использована для оценки изменений структурного состояния материала и его диссипативных свойств.

ЛИТЕРАТУРА

- 1.Н.Н. Давиденков. *Динамическая прочность и хрупкость металлов*. Киев: «Наукова думка», 1981, т. 1, 703 с.
- 2.Я.Б. Фридман. *Механические свойства металлов*. М.: «Машиностроение», 1974, т. 1, с. 472.
- 3.И.М. Неклюдов, В.Н. Воеводин, В.И. Сытин и др. Изменение прочностных и пластических свойств меди под влиянием микролегирования иттрием, деформаций и отжигов // *МФУНТ*. 2005, т. 27, № 3, с. 309–318.
- 4.И.М. Неклюдов, В.И. Сытин, В.Н. Воеводин, С.В. Шевченко. Влияние предварительных деформаций и отжигов на напряжение течения и модуль нормальной упругости микролегированной иттрием меди // *ВАНТ. Серия «Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники» (13)*. 2003, №5, с. 41–45.
- 5.В.И. Сытин, В.Н. Воеводин, С.В. Шевченко, Н.Д. Рыбальченко. Изменение модуля нормальной упругости меди в зависимости от направлений деформации // *ВАНТ. Серия ФРП и РМ (84)*. 2003, №6, с. 32–35.

ПИТОМА РОБОТА ПРУЖНОПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ МІДІ

Б.В. Борц, В.М. Воеводин, В.І. Ситін, Н.Д. Рибальченко, С.В. Шевченко, О.Ф. Ванжа

З використанням математичної апроксимації діаграм деформації описано метод визначення питомої роботи деформації. Наведено залежність питомої роботи пружнопластичної деформації для вакуум-плавленої та мікролегованої ітрієм міді після попередніх деформацій і термообробок. Показано, що схильність мікролегованої ітрієм і вакуум-плавленої міді до дисипації енергії деформації істотно залежить від напрямку деформування зразків.

WORK OF ELASTOPLASTIC DEFORMATION OF COPPER

B.V. Borts, V.N. Voyevodin, V.I. Sytin, N.D. Rybalchenko, S.V. Shevchenko, A.F. Vanzha

Determination method of deformation work using mathematical approximation of tension diagrams is described. Dependences of elastoplastic deformation work of vacuummelting and yttrium doped copper after predeformations and heat treatments are resulted. It is shown that propensity to dissipation of deformation energy for vacuummelting and yttrium doped copper essentially depends on orientation of samples.