

ВЛИЯНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ И ОТЖИГОВ НА НАПРЯЖЕНИЕ ТЕЧЕНИЯ И МОДУЛЬ НОРМАЛЬНОЙ УПРУГОСТИ МИКРОЛЕГИРОВАННОЙ ИТТРИЕМ МЕДИ

И.М. Неклюдов, В.И. Сытин, В.Н. Воеводин, С.В. Шевченко

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

Приведены результаты исследований влияния предварительных деформаций и отжигов на упругие и упругопластические характеристики вакуумплавленной и микролегированной иттрием меди. Показана взаимосвязь между упругими и упругопластическими характеристиками: напряжением течения S , удлинением ϵ , модулем нормальной упругости E и эффективным критическим напряжением течения S_c . Показано, что напряжение течения и модуль нормальной упругости существенно зависят от предварительных деформаций и отжигов и являются структурно чувствительными характеристиками.

Явление деформации твёрдого тела сопровождается характерным для твёрдого тела проявлением упругости. Упругость отражает свойство твердых тел восстанавливать свою форму при прекращении действия сил, изменивших форму или размеры тел. Явление упругости металлов проявляется в обратимых смещениях атомов из положения равновесия в кристаллической решетке. Результатом необратимых смещений атомов в кристаллах под воздействием внешних напряжений является пластическая деформация и упрочнение металлов.

В настоящей работе рассмотрено влияние микродобавок иттрия, предварительных деформаций и отжигов на напряжение течения и модуль нормальной упругости вакуумплавленной и микролегированной иттрием меди.

Редкоземельные добавки привлекают исследователей своими особыми физическими и химическими свойствами. Уникальные свойства редкоземельные металлы проявляют и при легировании ими других металлов. Среди них следует выделить иттрий. Малые добавки иттрия в медь могут существенно изменять её структуру, повышать температуру рекристаллизации, менять механизмы пластической деформации [1].

Микролегированные иттрием сплавы известны давно [2,3], однако до сих пор не проведены систематические исследования влияния микродобавок иттрия на упругие и упругопластические свойства меди.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исходными материалами при изготовлении слитков вакуумплавленной и микролегированной иттрием меди была катодная медь марки М0к и металлический иттрий марки ИтМ-1. Выплавку экспериментальных слитков проводили в вакууме не хуже $1 \cdot 10^{-5}$ мм рт.ст. Кристаллизация расплава осуществлялась

в охлаждаемых кристаллизаторах с графитовой вставкой.

Механические характеристики вакуумплавленной и микролегированной иттрием меди получали из диаграмм растяжения при постоянной скорости растяжения. Образцы вакуумплавленной и микролегированной иттрием меди перед испытаниями подвергались предварительным деформациям на 40, 60, 90% и термической обработке при температурах 150...700°C в течение одного часа. Скорость деформации образцов при растяжении составляла $2,85 \cdot 10^{-3}$ с⁻¹. Направление растяжения образцов при испытаниях совпадало с направлением предварительной деформации при изготовлении лент.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Поведение металлов при упругой деформации принято описывать известным законом Гука, которым определяется пропорциональность между напряжением и упругой деформацией:

$$S = E\epsilon \quad (1)$$

где S – напряжение; ϵ – удлинение в направлении действия напряжения S ; E – коэффициент пропорциональности, предполагаемый постоянным для данного материала при заданных условиях эксперимента. Величину E можно рассматривать как характеристику упругого сопротивления или упругой упрочняемости материала, т.е. как характеристику интенсивности нарастания напряжения с увеличением деформации.

Диаграммы растяжения дают наглядное представление о поведении материалов и их механических свойствах в упругопластической области.

Результаты, иллюстрирующие влияние микролегирования, предварительных деформаций и отжигов на изменение временного сопротивления меди приведены на рис.1 и 2. Приведённые результаты (см. рис.1 и 2) показывают, что временное сопротив-

ление меди в зависимости от термомеханических обработок изменяется немонотонно. Медь, содержащая добавку 0,02% иттрия по массе при одинаковых температурах отжига и величинах предварительной деформации, проявляет более высокую прочность по сравнению с исходной. Небольшие добавки иттрия (~0,01%) в исходную медь вакуумной плавки при предварительной деформации на 90% и термообработках до 500°C снижают прочностные характеристики.

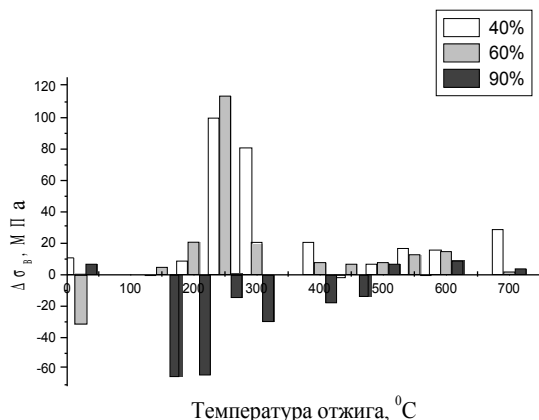


Рис.1. Влияние добавки 0,01% иттрия на изменение временного сопротивления меди, $\Delta\sigma_{\text{в}}$

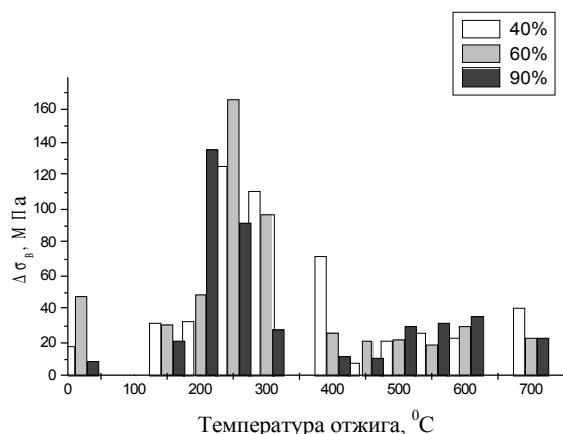


Рис.2. Влияние добавки 0,02% иттрия на изменение временного сопротивления меди, $\Delta\sigma_{\text{в}}$

ЭФФЕКТИВНОЕ КРИТИЧЕСКОЕ НАПРЯЖЕНИЕ ТЕЧЕНИЯ МЕДИ

Одной из физических характеристик, представляющих интерес, с точки зрения понимания процессов деформационного упрочнения, возникающего в поликристаллических материалах при воздействии внешних сил, является эффективное критическое напряжение течения. При исследовании реальных материалов эффективное критическое напряжение течения S_c , необходимое для перемещения незакрепленных дислокаций с некоторой скоростью может быть определено по пересечению упругого и пластического участков диаграммы растяже-

ния, представленной в «истинных» координатах. Для математического описания пластического участка кривой растяжения целесообразно использовать уравнение вида [4,5,6,7]:

$$S = D \varepsilon^n \quad (2)$$

где n - показатель упрочнения; ε - удлинение; D - коэффициент пропорциональности который по аналогии с модулем нормальной упругости можно определить как модуль пластичности, т.е. напряжение, необходимое для увеличения при упругопластической деформации длины образца в два раза. При постоянной скорости и неизменной температуре деформирования значения модуля пластичности D и показателя упрочнения n постоянны [4,5].

В реальных кристаллических материалах при малых пластических деформациях экспериментальная кривая растяжения может отличаться от полученной по уравнению (2) [7]. При малых пластических деформациях такое различие между экспериментальными значениями и значениями, полученными в результате экстраполяции, связано с наличием в структуре реального кристаллического материала сетки высокоугловых границ, примесей, микродефектов, субструктуры и неустановившимся динамическим равновесием между подвижными и заблокированными дислокациями.

Значения эффективного критического напряжения течения меди в зависимости от температуры отжига и степени деформации приведены в табл.1.

Эффективное критическое напряжение течения меди с изменением температуры отжига и степени деформации также изменяется немонотонно (см. табл.1). Немонотонное поведение эффективного критического напряжения течения может происходить из-за наличия малых, зачастую не контролируемых, примесей, характерных для меди.

Немонотонное поведение эффективного критического напряжения течения и временного сопротивления вакуумплавленной и микролегированной меди в процессе одноосного растяжения может быть связано с перераспределением примесей при механико-термических обработках. Перераспределение примесей при механико-термических обработках приводит к изменению напряжений трения решетки, напряжений отрыва дислокации от атмосфер примесей, напряжений прохождения дислокации сквозь лес других дислокаций, напряжений, приводящих в действие источники Франка-Рида и др. [8]. При перераспределении примесей в деформируемом материале может возникать ситуация, при которой растворенные атомы диффундируют со скоростью, соответствующей скорости дислокаций. При этом будет происходить устойчивое торможение дислокаций, что может обеспечивать получение повышенных значений напряжений течения [9], а также может приводить к формированию деформационной анизотропии [10].

ВЗАИМОСВЯЗЬ МЕЖДУ НАПРЯЖЕНИЯМИ ТЕЧЕНИЯ, УДЛИНЕНИЕМ И МОДУЛЕМ НОРМАЛЬНОЙ УПРУГОСТИ МЕДИ

Основной целью изучения свойств материалов при воздействии на них внешних нагрузок является установление связи между напряжениями, с одной стороны, и деформациями, с другой.

Наиболее проста эта зависимость в области упругих деформаций из-за наличия прямой пропорциональности между нагрузкой и деформацией (закон Гука) (1).

В упругопластической области для большинства металлических материалов напряжение S функционально зависит от деформации ε . Для описания диаграммы растяжения математическими средствами наиболее пригодной как по простоте, так и по точности совпадения является степенная функция (2).

Совместное решение уравнений (1) и (2) даёт связь между модулем нормальной упругости E , напряжением течения S , удлинением ε и эффективным критическим напряжением течения S_i :

$$S = E^n S_i^{1-n} \varepsilon^n \quad (3)$$

В общем случае связь между напряжениями S и S_i и соответствующими им удлинениями ε и ε_i определяется соотношением:

$$\frac{S}{S_i} = \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_i} \right)^n \quad (4)$$

Для меди, как и для большинства металлических материалов, при одноосном нагружении значение показателя упрочнения n численно равно максимальному значению равномерного удлинения ε_b [5]. Исходя из этого, используя уравнение (3), при известных значениях эффективного критического напряжения S_i , предела прочности S_b и деформации ε_b , можно определить значение модуля нормальной упругости исследуемого материала:

$$E = \left(\frac{S_b}{S_i^{1-\varepsilon_b} \varepsilon_b^{\varepsilon_b}} \right)^{\frac{1}{\varepsilon_b}} \quad (5)$$

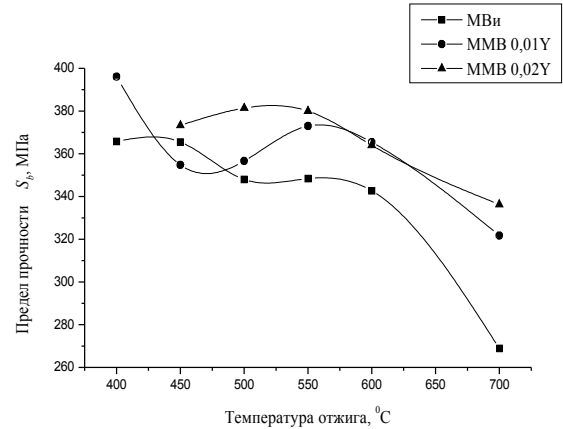


Рис. 3. Зависимость предела прочности меди от температуры отжига

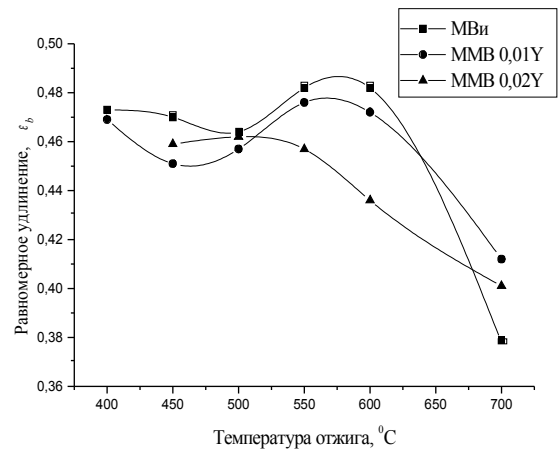


Рис. 4. Зависимость равномерного удлинения меди от температуры отжига

Таблица 1

Эффективное критическое напряжение течения меди в зависимости от температуры отжига и степени деформации

Температура отжига, °C	Эффективное критическое напряжения течения S_i меди, МПа,								
	вакуумплавленной			с 0,01% иттрия			с 0,02% иттрия		
	40%	60%	90%	40%	60%	90%	40%	60%	90%
250	8,2	5,9	9,1	-	-	-	-	-	-
300	6,0	5,7	7,9	-	-	-	-	-	-
400	4,5	5,0	7,9	5,2	6,1	9,9	-	4,2	9,7
450	4,7	5,2	9,1	5,7	6,3	10,4	5,5	4,4	8,3
500	4,8	5,3	11,8	5,3	5,9	10,4	5,4	5,0	8,0
550	3,8	5,1	12,2	4,4	5,6	10,1	5,7	6,6	8,5
600	3,7	4,7	12,2	4,5	5,9	9,3	7,1	7,7	10,3

700	10,5	10,1	17,2	8,4	9,3	12,8	10,0	10,2	14,3
-----	------	------	------	-----	-----	------	------	------	------

Таблица 2

Значения модуля нормальной упругости исследованных медных материалов

Модуль нормальной упругости E меди, ГПа, вакуумплавленной 0,01 иттрия 0,02 иттрия 400104116-450106119117,6500106114117,355091,5103121,560090103,9136700146142159

Экспериментально определённые значения предела прочности S_b и равномерного удлинения вакуумплавленной (МВи) и микролегированной (ММВ) меди после предварительной деформации на 40 % в зависимости от температуры отжига приведены на рис.3 и 4. Относительная погрешность значений предела прочности и равномерного удлинения не превышали $\pm 1,5$ и $\pm 1,2\%$ соответственно.

Приведённые на рис.3 экспериментально определённые значения предела прочности показывают, что прочность меди в зависимости от термомеханических обработок изменяется немонотонно. Медь, содержащая добавку 0,02% иттрия при одинаковых температурах отжига, проявляет более высокую прочность по сравнению с исходной. Небольшие добавки иттрия ($\sim 0,01\%$) в исходную медь при термообработках около 450°C снижают прочностные характеристики. Как видно из рис.4, значения равномерного удлинения меди в зависимости от термомеханических обработок также изменяются немонотонно. Добавки в медь 0,01 и 0,02% иттрия при термообработках до 650°C снижают значения ϵ_b .

На основании определенных экспериментальных значений S_b , ϵ_b и S_i , используя соотношение (5), были получены значения модуля нормальной упругости исследуемых медных материалов. В табл.2 приведены значения модуля нормальной упругости вакуумплавленной и микролегированной иттрием меди. Относительная погрешность значений модуля нормальной упругости не превышает $\pm 7\%$.

Значения модуля нормальной упругости (см. табл.2) существенно изменяются в зависимости от температуры отжига, от предварительной деформации и наличия добавок 0,01 и 0,02% иттрия. Изменение значений модуля упругости при термообработках может быть связано с изменением межатомного расстояния и сил межатомного взаимодействия [10].

Микродобавки могут как увеличивать, так и уменьшать модуль упругости. Направление влияния микролегирования на значение модуля упругости зависит от соотношения между силами связи атомов растворённого элемента и растворителя, с одной стороны, и силами межатомного взаимодействия в решётке растворителя, с другой. Если величина пер-

вых больше, то легирование приводит к повышению модуля упругости [11].

Некоторое уменьшение модуля (не превышающее 1...2%) при пластической деформации связано с созданием искажений в кристаллической решётке металла или сплава. Однако созданием искажений в кристаллической решётке металла при пластической деформации изменения в структуре материала не ограничиваются. В процессе пластической деформации и последующих термообработок происходит перераспределение микропримесей и микродобавок, нарушается изотропность материала, формируются преимущественные кристаллографические ориентировки – текстуры [12], что вызывает существенное изменение модуля упругости. Изменения модуля упругости, связанные с образованием или разрушением преимущественных ориентировок, могут достигать десятков процентов, причём значения модуля упругости поликристаллических материалов при наличии текстур зависят от направления, в котором измеряется модуль.

Работа выполнена при финансовой поддержке НТЦУ, проект №1760.

ЛИТЕРАТУРА

- Дослідження впливу мікрододмішок хімічно-активних елементів та розробка міді з наперед заданими властивостями: Отчет ІНТЕІ №0194у025160.1996, 35с.
- В.Н.Фёдоров, А.А.Журба. Влияние иттрия на свойства меди // *Металлы*. 1975, №1, с.166-169.
- Е.М.Савицкий, В.Ф.Терехова, И.В.Буров. *Сплавы редкоземельных металлов*. М.: Изд. Ан.СССР, 1962, 271с.
- Хоникомб Р. *Пластическая деформация металлов*. М.: «Мир», 1972, 408с
- Т.Екобори. *Физика и механика разрушения и прочности твердых тел*. М.: «Металлургия», 1971, 264с.
- Formby C.L., Owen W.S. The strain-ageing and quench-ageing of tantalum // *Less-common metals*. 1965, V.9, №1, p.25-34.
- Испытание материалов* / Под ред. Х. Блюменауэра. М.: «Металлургия», 1979, 448 с.
- Ж.Фридель. *Дислокации*. М.: «Мир», 1967, 644с.
- Механизмы упрочнения твердых тел* / Под ред. М.Л.Берштейна. М.: «Металлургия», 1965, 368 с.

Я.Б.Фридман. *Механические свойства металлов*.
М.: «Машиностроение», 1974, т.1, 472 с.
М.В.Приданцев. *Влияние примесей и
редкоземельных элементов на свойства сплавов*. М.:

Изд. Лит. по черной и цветной металлургии, 1962,
208 с.

И.П.Кудрявцев. *Текстуры в металлах*. М.:
«Металлургия», 1965, 292 с.

ВПЛИВ ПОПЕРЕДНІХ ДЕФОРМАЦІЙ І ВІДПАЛУ НА НАПРУЖЕННЯ ПЛИНУ І МОДУЛЬ НОРМАЛЬНОЇ ПРУЖНОСТІ МІКРОЛЕГОВАНОЇ ІТРИЄМ МІДІ

І.М. Неклюдов, В.І. Ситін, В.М. Воєводін, С.В. Шевченко
Інститут фізики твердого тіла, матеріалознавства і технологій ННЦ ХФТІ
м. Харків, Україна

Приведено результати досліджень впливу попередніх деформацій і відпалу на пружні та пружньо-пластичні характеристики вакуумплавленої та мікролегованої ітрієм міді. Показано взаємозв'язок між пружними та пружно-пластичними характеристиками: напруженням плинку S , подовженням ε , модулем нормальної пружності E та ефективним критичним напруженням плинку S_c . Показано, що напруження плинку і модуль нормальної пружності істотно залежать від попередніх деформацій та відпалу і є структурно чутливими характеристиками.

THE INFLUENCE OF PREDEFORMATIONS AND ANNEALINGS ON YIELD STRESS AND MODULUS OF ELONGATION ESSENTIALLY YTTRIUM DOPED COPPER

I.M.Neklyudov, V.I.Sytin, V.N.Voevodin, S.V.Shevchenko
Institute of solid state physics, material science and technologies NSC KIPT
Kharkov, Ukraine

The researches results of influence of predeformations and annealings on elastic and plastic characteristics of vacuummelting and yttrium doped copper are given. The interrelation between elastic and plastic characteristics has been shown. It is shown that the yield stress and modulus of elongation essentially depend on predeformations and annealings and they are the structurally sensitive characteristics.