

ВЛИЯНИЕ МЕХАНИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ЧИСТОЙ И МИКРОЛЕГИРОВАННОЙ ИТТРИЕМ МЕДИ

И. М. Неклюдов, С. В. Шевченко

ИНЦ Харьковский физико-технический институт

Н. В. Камышанченко, И. А. Беленко

Белгородский государственный университет

Рассмотрена зависимость относительного остаточного электросопротивления чистой и микролегированной иттрием меди от степени деформации и температуры отжига. Показано, что для микролегированной меди наблюдается малая интенсивность падения относительного остаточного электросопротивления с увеличением степени деформации и отсутствие падения проводимости при температурах отжига выше 600°C по сравнению с чистой медью. Результаты исследований объясняются процессами взаимодействия атомов иттрия с вакансиями и сопутствующими примесями.

Чистая медь и ее сплавы находят широкое использование в электронной, ускорительной, электровакуумной и других отраслях техники. Высокие электро- и теплопроводность меди являются основным преимуществом среди других материалов.

По тепло- и электропроводности наиболее удовлетворяющей является высокочистая медь, получаемая различными методами очистки и переплавов. Однако снижение общего содержания примесей в высокочистой меди сопровождается снижением ее прочности и тепловой стойкости, повышением неоднородности структуры и т.п. В связи с этим актуальным является изготовление сплавов, обладающих тепло- и электропроводностью на уровне чистой меди, но проявляющих повышенные эксплуатационные характеристики.

В качестве рафинирующего, модифицирующего и микролегирующего воздействия на чистые металлы широкое применение нашли редкие и редкоземельные элементы (РЗЭ) [1-4], в частности иттрий [4,5]. Ранее проведенные исследования показали, что легирование меди иттрием приводит к улучшению прочностных и пластических характеристик чистой меди [6]. Хотя микролегирование меди при вакуумной плавке добавками иттрия незначительно повышает нижние значения относительного электросопротивления (~0,5%) по сравнению с нелеги-

рованной медью, для практического использования очень важным фактором является существенное сокращение ингервала разброса величины ее электросопротивления [6]. Малое изменение величины электросопротивления микролегированной меди, по сравнению с чистой, свидетельствует о рафинирующем действии иттрия на матрицу.

В настоящей работе представлены результаты исследований изменения электросопротивления образцов чистой и микролегированной меди в зависимости от степени деформации и температуры отжига.

Материал и методика исследований. Объектами исследований являлись поликристаллические образцы чистой меди, выплавленной в вакуумной электронно-лучевой печи (МВЭ) и меди, микролегированной добавками (0,02 % по массе иттрия) (ММВ).

Электросопротивление определялось с использованием четырехточечной методики на базе потенциометра Р-348. В токовой цепи образца использовали стабильный источник питания П-138. Максимальная чувствительность установки для определения электросопротивления составляла 2×10^{-9} Ом.

Измерения электросопротивления проводились на образцах размером (0,2x2,5x40) мм, вырезанных из темплетов слитков. Предварительно образцы отжигали

лись в вакууме при $520\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение одного часа. Скорость охлаждения образцов после отжига составляла $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ в минуту.

Результаты и их обсуждение. Исследовалась зависимость электросопротивления чистой и микролегированной меди от термомеханической обработки.

На рис. 1 показано соотношение между относительным остаточным электросопротивлением и величиной деформации для меди МВЭ (кривая 1), меди ММВ с 0,02% иттрия (кривая 2).

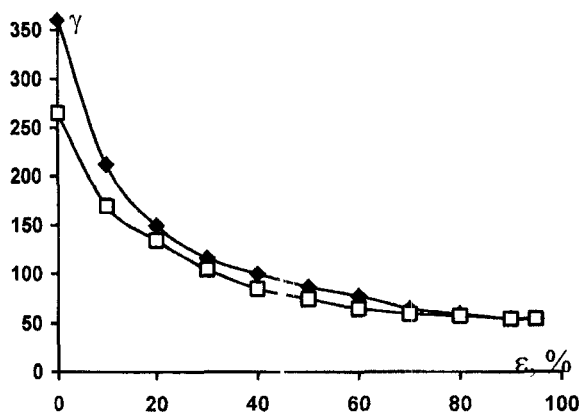


Рис. 1 Зависимость относительного остаточного электросопротивления для меди МВЭ (1) и ММВ (2) от величины деформации.

Как видно из рис. 1, для обоих сортов меди даже небольшие величины деформации снижают значение относительного остаточного электросопротивления, т.е. вызывают рост электросопротивления.

Зависимость $\Delta\rho(\sigma)$ можно представить функцией [7]:

$$\Delta\rho = A'\sigma^2, \quad (1)$$

где A' – константа, σ – напряжение течения.

Для поликристаллических образцов металлов с ГЦК-решеткой характерна параболическая зависимость напряжения течения от деформации [8]:

$$\sigma = \sigma_0 + A''\epsilon^n, \quad (2)$$

где σ_0 – напряжение, соответствующее началу пластической деформации; A'' – константа материала; n – показатель деформационного упрочнения.

Сравнивая (1) и (2), можно считать,

что изменение остаточного электросопротивления металла от степени деформации зависит следующим образом:

$$\Delta\rho \sim A\epsilon^n. \quad (3)$$

Таким образом, с увеличением степени деформации электросопротивление образцов должно непрерывно возрастать. Это связано с накоплением при деформации структурных дефектов в кристаллической решетке материала, которые обеспечивают увеличение электросопротивления согласно правилу Маттисена:

$$\rho = \rho_0(T) + \sum \rho_i(C_i), \quad (4)$$

где ρ_0 – электросопротивление идеального металла, зависящее от температуры T ; ρ_i – прирост электросопротивления за счет дефектов i -го типа (зависит от концентрации C_i).

Из рис. 1 видно, что микролегированной меди ММВ свойственна меньшая интенсивность падения относительного остаточного электросопротивления по сравнению с медью МВЭ.

Принято считать, что основным видом точечных дефектов, образующихся при деформации в меди, являются вакансии [9]; причем в сильнодеформированном состоянии вклад вакансий в деформационный прирост электросопротивления существенно превосходит вклад дислокаций [10]. Наличие ловушек точечных дефектов, которыми являются атомы примеси с большим атомным радиусом ($\rho > \rho_c \cong 2^{1/3}$ [11], где ρ – отношение атомов примеси и матрицы; для атомов иттрия и меди $\rho \cong 1.42 > \rho_c$) увеличивает скорость их взаимной рекомбинации [12], что и объясняет меньшую интенсивность накопления точечных дефектов в меди ММВ по сравнению с чистой медью МВЭ.

Так как холодная обработка снижает проводимость медных материалов, за ней должна следовать термическая обработка для устранения структурных дефектов и восстановления проводимости, характерной для отожженного материала.

Предварительная деформация образцов (рис. 2) составляла 50%, время отжига 1 час. Практически полное восстановление проводимости для исследуемой меди наблюдается после отжига при $300\text{ }^{\circ}\text{C}$. Дальнейшее

повышение температуры отжига образцов меди МВЭ выше 600°C приводит к резкому снижению проводимости по сравнению с отжигом при температурах 300-600°C.

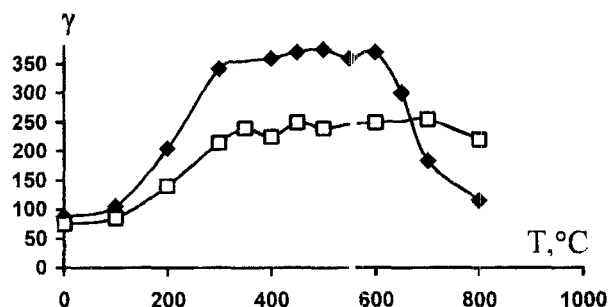


Рис. 2. Зависимость относительного остаточного электросопротивления меди МВЭ (1) и ММВ (2) от температуры отжига.

Это связано с изменением структуры в результате протекания вторичной рекристаллизации в чистой меди, а также с переходом в твердый раствор сопутствующих примесей. Важным обстоятельством является то, что резкого падения проводимости для микролегированной меди с повышением температуры не наблюдается. Это также свидетельствует о сильной связи иттрия с сопутствующими примесями. Взаимодействуя с атомами других примесей и вакансиями, атомы иттрия образуют с ними комплексы [1, 13] и тем самым очищает матрицу, что способствует снижению электросопротивления.

Выводы

1. Установлено падение относительного остаточного электросопротивления с увеличением степени деформации образцов чистой и микролегированной меди.

2. Показано, что для микролегированной меди наблюдается малая интенсивность падения относительного остаточного электросопротивления с увеличением степени деформации по сравнению с чистой медью. Это объясняется увеличением степени рекомбинации точечных дефектов в меди с микродобавками иттрия.

3. При отжиге деформированных образцов чистой и микролегированной меди практически полное восстановление проводимости наблюдается после отжига при 300°C.

4. Установлено отсутствие падения проводимости микролегированной меди при температурах отжига выше 600°C по сравнению с чистой медью. Малое изменение величины электросопротивления микролегированной меди при повышении температуры свидетельствует о рафинирующем действии иттрия.

Библиографический список

1. Воронцова Л. М., Селезнев Л. П. Влияние РЗМ на свойства проводниковой меди // ИТОМ. – 1977. – №3. – С. 41-44.
2. Савицкий Е. М. Перспективы развития металлургии. – М.: Наука, 1972. – 128 с.
3. Зеленский В. Ф., Неклюдов И.М. Влияние РЗЭ на радиационную стойкость материалов // Радиационное материаловедение. – Харьков: ХФТИ, 1990. – Т.2. – С.45-57.
4. Гуляев Б. Б., Камышанченко Н. В., Неклюдов И. М., Паршин А. М. Структура и свойства сплавов. – М.: Металлургия, 1993. – 317 с.
5. Федоров В. Н., Журба А. А. Влияние иттрия на свойства меди // Изв. АН СССР. Металлы. – 1975. – №1. – С. 166-169.
6. Неклюдов И. М., Воеводин В. Н., Шевченко С. В., Камышанченко Н. В., Беленко И. А. Влияние легирования иттрием на механические свойства чистой меди // Научные ведомости БГУ. – 1997. – №2. – С. 66-74.
7. Гиндин И. А., Неклюдов И. М. Физика программного упрочнения. – Киев: Наукова Думка, 1979. – 240 с.
8. Соколов Л. Д. Механические свойства редких металлов. – М.: Металлургиздат, 1972. – 288 с.
9. Козинец В. В., Хоткевич В. И., Филипс А. Х. Дефекты, возникающие при низкотемпературном деформировании меди // ФНТ. – 1977. – Вып. 3. – № 12. – С. 1531-1537.
10. Ловчиков А. В., Бейлин В. М., Федоров В. Н. Возврат механических и электрических свойств медных микролегированных сплавов при нагреве после деформации // ММ. – 1989. – Т. 68. – Вып. 5. – С. 997-1002.
11. Бакай А. С., Зеленский В. Ф., Неклюдов И. М. Центры рекомбинации переменной полярности в кристаллах // ВАНТ. Сер. ФРП и РМ. – 1986. – Вып 1(38). – С. 3-6.
12. Ахизер И. А., Давыдов Л. Н. Введение в теоретическую радиационную физику металлов и сплавов. Киев. Наукова Думка, 1985. – 142 с.
13. Бейлин В. М., Ловчиков А. В., Федоров В. Н. и др. О возможности улучшения свойств проводниковой меди путем легирования РЗМ // Цветные металлы. – 1981. – №2. – С. 80-82.