

ИЗМЕНЕНИЕ МОДУЛЯ НОРМАЛЬНОЙ УПРУГОСТИ МЕДИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ НАПРАВЛЕНИЙ ДЕФОРМАЦИИ

В.И. Сытин, В.Н. Воеводин, С.В. Шевченко, Н.Д. Рыбальченко
 Институт физики твердого тела, материаловедения и технологий ННЦ ХФТИ,
 г. Харьков, Украина

Приведены результаты исследований влияния микродобавок иттрия, предварительной деформации и отжига на модуль нормальной упругости меди в зависимости от направлений деформации. Показано, что модуль нормальной упругости вакуумплавленной и микролегированной иттрием меди существенно зависит от ориентации образца по отношению к направлению предварительной деформации.

Модуль нормальной упругости является расчетным параметром в аналитическом аппарате физической теории деформации и разрушения твердого тела, входит в большинство уравнений физики твердого тела и служит основным параметром в конструкторских расчетах сооружений, машин и механизмов.

Для модулей упругости поликристаллических тел характерны широкие пределы рассеяния экспериментальных значений, полученных для одного и того же материала на образцах, различающихся по химическому составу (по примесям), дефектности, изотропности. Сводные данные об упругих постоянных и модулях упругости меди ограничены по объему информации и степени надежности [1].

В данной работе приведены результаты исследований зависимости модуля нормальной упругости вакуумплавленной и микролегированной иттрием меди от ориентации образца по отношению к направлению предварительной деформации.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исходными материалами при изготовлении лент вакуумплавленной и микролегированной иттрием меди была катодная медь марки М0к и металлический иттрий марки ИтМ-1.

Образцы вакуумплавленной и микролегированной иттрием меди перед испытаниями подвергались предварительной деформации на 90% и термической обработке при температуре 500°C в течение 1 ч. Скорость деформации образцов при растяжении была равна $2,85 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$. Направление растяжения образцов при испытаниях составляло с направлением предварительной деформации углы 0, 15, 30, 45, 60, 75 и 90°.

Для определения модуля нормальной упругости лент меди использовали метод, приведенный в работе [2], позволяющий по известным значениям эффективного критического напряжения течения, предела прочности и удлинения определить значения модуля нормальной упругости.

Металлографические исследования структуры лент вакуумплавленной и микролегированной ит-

трием меди проводили на продольных и поперечных шлифах с использованием микроскопа МИМ-8М.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Наглядное представление о поведении материала и его механических свойствах в упругопластической области получают из диаграмм растяжения образцов при постоянной скорости деформирования. Результаты, иллюстрирующие влияние микролегирования, предварительной деформации и отжига на изменение предела прочности и эффективного критического напряжения течения меди, полученные в результате обработок диаграмм растяжения, приведены на рис.1 и 2.

В табл.1 приведены значения модуля нормальной упругости меди в зависимости от ориентировки образца по отношению к направлению предварительной деформации. Относительная погрешность значений модуля нормальной упругости не превышает $\pm 7\%$.

Приведённые на рис.1 экспериментально определённые значения предела прочности показывают, что прочность меди значительно изменяется в зависимости от ориентировки образца по отношению к направлению предварительной деформации и наличия добавок иттрия.

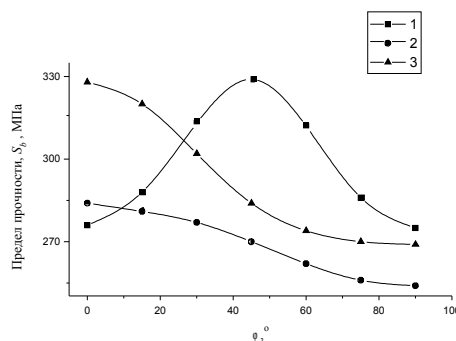


Рис.1. Зависимость предела прочности от угла между направлениями растяжения и предварительной деформации меди: 1 – вакуумплавленная; 2 – с добавкой 0,01% иттрия; 3 – с добавкой 0,02% иттрия

Экспериментально определённые значения эффективного критического напряжения течения вакуумплавленной и микролегированной иттрием меди (рис.2) также существенно зависят от угла между направлениями растяжения и предварительной деформации.

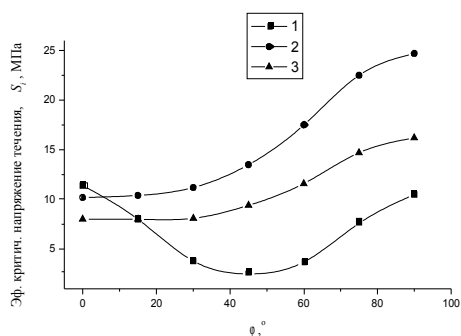


Рис.2. Зависимость эффективного критического напряжения течения от угла между направлениями растяжения и предварительной деформации меди:

1 – вакуумплавленная; 2 – с добавкой 0,01% иттрия; 3 – с добавкой 0,02% иттрия

Медь, содержащая добавку 0,01% иттрия, при одинаковых условиях эксперимента проявляет более высокие значения эффективного критического напряжения течения по сравнению с вакуумплавленной и микролегированной 0,02% иттрия медью.

Приведенные в табл.1 данные показывают, что значения модуля нормальной упругости меди существенно изменяются в зависимости от угла между направлениями растяжения и предварительной деформации, а также наличия добавок 0,01 и 0,02% иттрия.

В теории упругости зависимость постоянных упругости от направления определена на основе представления о том, что постоянные упругой деформации образуют в трехмерном пространстве симметричный тензор 4-го ранга [3,4]. При известных упругих постоянных для главных направлений определение их в направлении, составляющем определенные углы с главными, равнозначно соответствующему повороту осей координат и вычислению новых постоянных через направляющие косинусы указанных углов.

Таблица 1

Модуль нормальной упругости вакуумплавленной и микролегированной иттрием меди после предварительной деформации на 90% и отжига при T=500°C 1 ч

Направление растяжения, φ°	Модуль нормальной упругости меди E, ГПа:		
	вакуумплавленной	с добавкой 0,01% иттрия	с добавкой 0,02% иттрия
0	154	148,5	140
15	132	149,1	138,3
30	88,3	152,7	136
45	68	163,8	142,7
60	87	178,3	154,9
75	128	189,5	169,8
90	147,6	193,8	176,1

В случае нагружения для ортотропного материала в одной из плоскостей симметрии, для листового материала – в плоскости листа, уравнение, позволяющее рассчитать значения модуля нормальной упругости, может быть записано [5]:

$$E_{\varphi} = \frac{E_0}{\cos^4 \varphi + b \sin^2 2\varphi + c \sin^4 \varphi}, \quad (1)$$

где φ – угол между направлениями растяжения и предварительной деформации; $b = \frac{E_0}{E_{45}} - \frac{c + 1}{4}$ и

$c = \frac{E_0}{E_{90}}$ – показатели анизотропии модуля упругости; E₀, E₉₀ и E₄₅ – модули упругости, определяемые экспериментально, соответственно в продольном, поперечном и диагональном направлениях.

На рис.3 приведена зависимость модуля нормальной упругости от угла между направлениями растяжения и предварительной деформации вакуумплавленной и микролегированной иттрием меди.

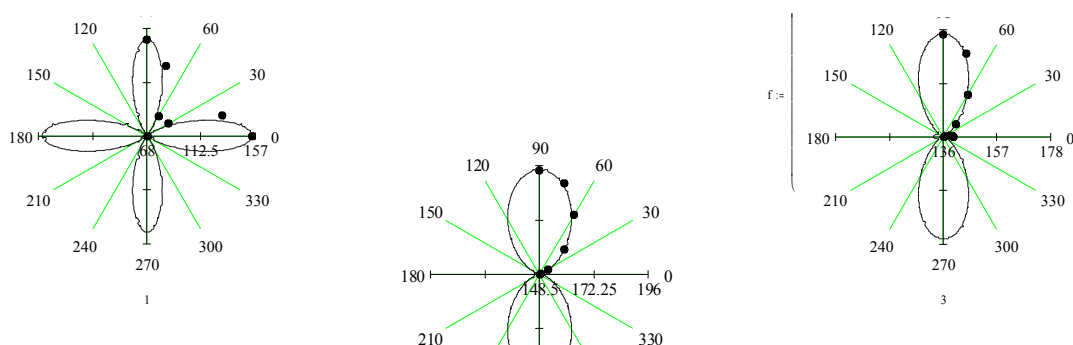


Рис.3. Зависимость модуля нормальной упругости (ГПа) от угла между направлениями растяжения и предварительной деформации меди (град.): 1 – вакуумплавленная; 2 – с добавкой 0,01% иттрия; 3 – с добавкой 0,02% иттрия. Линии – расчётные значения, полученные по соотношению (1); точки – экспериментальные данные, взятые из табл.1

Приведенные результаты (рис.3) показывают, что значения модуля нормальной упругости вакуумплавленной и микролегированной иттрием меди после механико-термических обработок (табл.1) достаточно хорошо согласуются со значениями модуля нормальной упругости, рассчитанными по соотношению (1).

Значения модуля упругости зависят от силы межатомного взаимодействия. При пластической деформации изменение значений модуля нормальной упругости, связанное с созданием искажений в кристаллической решётке металла или сплава, не превышает 1...2% [5]. Однако созданием искажений в кристаллической решётке металла при пластической деформации изменения в структуре материала не ограничиваются. В процессе пластической деформации и последующих термообработок, как правило, происходит перераспределение микропримесей и микродобавок, нарушается изотропность материала, формируются преимущественные кристаллографические ориентировки – текстуры [6], что вызывает существенное изменение упругих модулей. Изменение модуля упругости, связанное с образованием или разрушением преимущественных ориентировок, может достигать десятков процентов, причём значения модуля упругости поликристаллических материалов при наличии текстур зависят от направления, в котором измеряется модуль.

Упругие характеристики поликристалла, состоящего из большого количества кристаллитов, обладающих в различных направлениях различными модулями упругости, могут рассматриваться как усреднённые свойства монокристалла. Для монокристалла меди максимальное и минимальное значение модуля упругости составляет 190 и 66,6 ГПа соответственно [6].

Представленные значения модуля нормальной упругости вакуумплавленной и микролегированной иттрием меди (табл.1, рис.3) свидетельствуют о том, что пластическая деформация вызывает в металле структурные изменения, которые могут включать изменение формы кристаллитов, их кристаллографическую ориентировку и внутреннее строение кристаллита. Основное изменение формы кристаллитов

состоит в том, что они в процессе растяжения вытягиваются в направлении деформации.

На рис.4 и 5 приведена структура лент вакуумплавленной и микролегированной иттрием меди. Как показали металлографические исследования, при отжиге 200°C для вакуумплавленной (рис.4-1) и 300°C микролегированной 0,02% иттрия (рис.5-1) в исследуемых лентах меди происходит первичная рекристаллизация. Объем деформационных волокон заполняется мелкими зёрнами. При этом наследственная текстура прокатки сохраняется. После отжига при температурах 500...600°C исследуемых лент меди (рис.4-2, 4-3, 5-2, 5-3) формируется неравносная разноразмерная структура, что связано с завершением процесса первичной рекристаллизации и началом процесса собирательной рекристаллизации.

При пластической деформации кристаллические решетки зёрен приобретают преимущественную пространственную ориентировку – возникает текстура деформации, которая зависит от вида и условий деформирования. Рентгеноструктурный анализ показал, что текстура прокатанной меди с деформацией до 90% приближается к системе (112)[111], ей сопутствуют следы системы (100)[001]. В процессе термообработки при 500...600°C в течение 1 ч формируется текстура куба (100)[001], которая и является причиной сильно выраженной анизотропии свойств материала в рекристаллизованном состоянии [7]. В табл.2 приведены сводные литературные данные по модулю нормальной упругости меди [1].

Таблица 2
Модуль нормальной упругости меди [1]

№ п/п	Температура, К	Модуль нормальной упругости E, ГПа
1	293	145,3
2	293	127,1
3	298	145,3
4	298	118,7
5	298	122,63
6	298	110
7	298	120,66
8	298	66,71...190,31
9	298	105,95...114,78

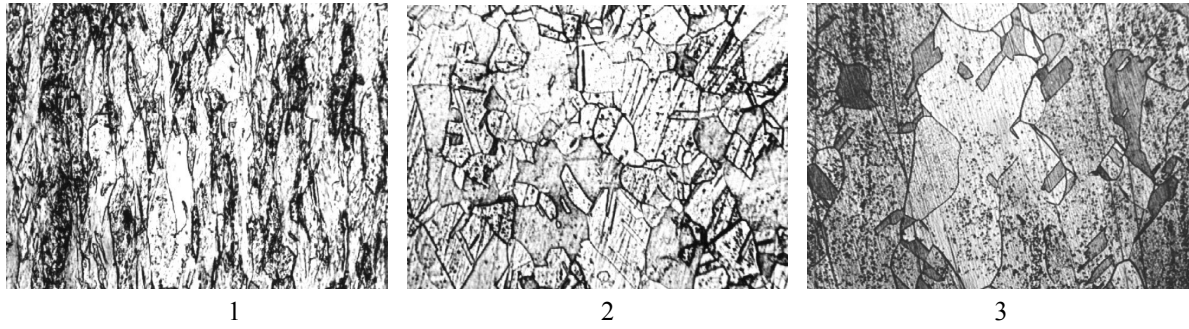


Рис.4. Структура лент вакуумплавленной меди после предварительных деформаций и отжигов: 1 – на 40%, 200°C; 2 – на 50%, 550°C; 3 – на 90%, 600°C (x200)

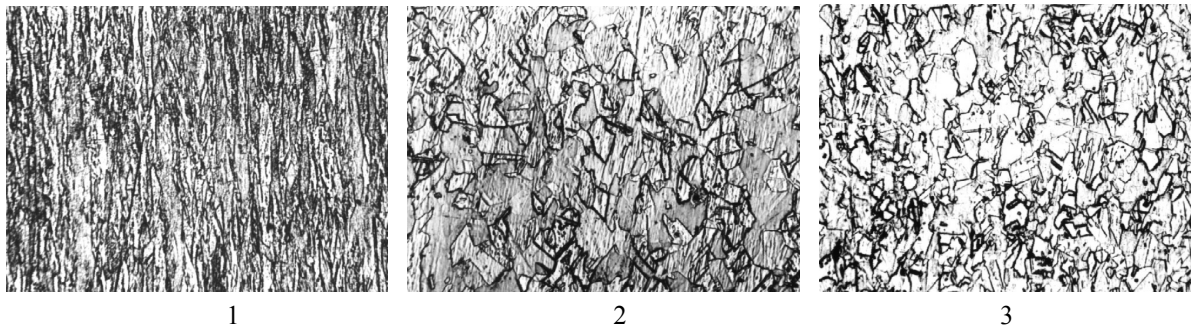


Рис.5. Структура лент микролегированной иттрием меди после предварительных деформаций и отжигов: 1 – на 40%, 300°C (0,02% Y); 2 – на 60%, 500°C (0,01% Y); 3 – на 60%, 550°C (0,02% Y) (x200)

Приведенные в табл.2 [1] значения модуля нормальной упругости меди не совпадают с данными, представленными в табл.1 и на рис.3.

При определении модуля упругости данные о режимах механических и термических обработок, ориентировке зерен в образце, направления приложения нагрузки в литературе обычно не приводятся. Поэтому нет уверенности, что имеющиеся в литературе значения модулей упругости действительно определены на изотропных поликристаллических материалах с полностью беспорядочной ориентацией зерен, к которым относится теоретическое усреднение.

Приведенные в табл.1 и на рис.3 результаты показывают, что обычно принимаемое при расчёте упругих «постоянных» допущение об изотропности поликристаллической меди является не корректным. Выводы о квазиизотропности материала, сделанные на основании сравнения свойств, полученных при испытании образцов в продольном и поперечном направлениях, могут быть ошибочными.

Работа выполнена при финансовой поддержке НТЦУ, проект №1760.

ЛИТЕРАТУРА

- 1.И.Н. Францевич, Ф.Ф. Воронов, С.А. Бакута. *Упругие постоянные и модули упругости металлов и неметаллов*: Справочник. К.: «Наукова думка», 1982, 430 с.
- 2.В.И. Сытин, И.М. Неклюдов, С.В. Шевченко, А.Т. Лопата. Влияние добавок редкоземельных элементов на механические характеристики меди // *Труды XV Междунар. конф. по физике радиационных явлений и радиационному материаловедению*. Алушта, 2002, с. 244–245.
- 3.С.Г. Лехницкий. *Теория упругости анизотропного тела*. М.: «Наука», 1977, 416 с.
- 4.Е.К. Ашкенази, Э.В. Ганов. *Анизотропия конструкционных материалов*: Справочник. Л.: «Машиностроение», 1972. 216 с.
- 5.Я.Б. Фридман. *Механические свойства металлов*. М.: «Машиностроение», 1974, т.1, 472 с.
- 6.И.П. Кудрявцев. *Текстуры в металлах*. М.: «Металлургия», 1965, 292 с.
- 7.Дослідження впливу мікродмішок хімічно-активних елементів та розробка міді з наперед заданими властивостями: Отчет ІНТЕІ №0194у025160.-1996; 35с.

ЗМІНА МОДУЛЯ НОРМАЛЬНОЇ ПРУЖНОСТІ МІДІ У ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД НАПРЯМКІВ ДЕФОРМАЦІЇ

V.I. Sytin, V.N. Voyevodin, S.V. Shevchenko, N.D. Rybalchenko

Приведено результати досліджень впливу мікродобавок ітрію, попередньої деформації та відпалу на модуль нормальної пружності міді в залежності від напрямків деформації. Показано, що модуль нормальної пружності вакуумплавленої та мікролегованої ітрієм міді істотно залежить від орієнтації зразка відносно напрямку попередньої деформації.

CHANGE OF THE MODULUS OF ELONGATION OF COPPER DEPENDING ON DEFORMATION DIRECTIONS

V.I. Sytin, V.N. Voyevodin, S.V. Shevchenko, N.D. Rybalchenko

The researches results of influence of yttrium microadditives, predeformation and annealing on modulus of elongation of copper depending on deformation directions are given. It is shown that the modulus of elongation of vacuummelting and yttrium doped copper essentially depends on orientation of a sample in relation to a direction of predeformation.