

## ВЛИЯНИЕ МИКРОЛЕГИРОВАНИЯ МЕДИ ИТТРИЕМ НА ПАРАМЕТРЫ УРАВНЕНИЯ ХОЛЛА – ПЕТЧА

С. В. Шевченко

*ИНЦ Харьковский физико-технический институт*

И. А. Беленко

*Белгородский государственный университет*

Исследована зависимость предела текучести  $\sigma_T$  от среднего размера зерна  $d$  меди. Изучено влияние микродобавок иттрия (0,02 вес.%) на упрочнение тела зерна и границ зерен образцов меди, отожженной в широком интервале температур (20...600°C).

На механические свойства поликристаллических металлов и сплавов существенное влияние оказывают протяженность и состояние границ зерен [1]. Зависимость напряжения течения (предела текучести) поликристаллов от среднего размера зерна  $d$  хорошо описывается соотношением Холла-Петча:

$$\sigma_T = \sigma_i + K_y d^{1/2}, \quad (1)$$

где  $\sigma_i$  - напряжение трения, параметр, характеризующий упрочнение тела зерна, то есть общее сопротивление движению дислокаций по плоскостям скольжения;  $K_y$  - константа, связанная с распространением деформации через границы зерен, напряжение разблокировки дислокаций и начала действия источников дислокаций в зернах.

Для вывода соотношения (1) использовалась модель дислокаций, исходящих из находящегося внутри зерна источника и скапливающихся на границах зерна. Эти дислокации вызывают концентрацию напряжений в соседних зернах. По достижению критической величины напряжения источник в соседнем зерне начинает испускать дислокационные петли. Дислокации, создаваемые новым источником, в свою очередь будут создавать концентрацию напряжений в другом зерне, что приводит к возникновению в нем пластической деформации. Таким образом, пластическое течение распространяется от одного зерна к другому, и происходит распространение полосы Чернова-Людерса через образец.

Вследствие сильного взаимодействия

точечных дефектов с дислокациями можно ожидать, что присутствие атомов иттрия в микролегированной меди будет влиять на значение  $\sigma_i$  и  $K_y$ . С целью выяснения этого влияния исследовалась зависимость предела текучести от средней величины зерна чистой и микролегированной меди.

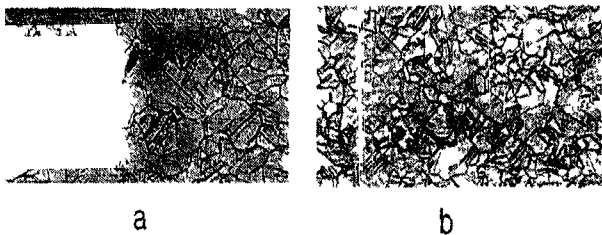
**Материал и методика.** Объектом исследований являлись поликристаллические образцы чистой меди, выплавленной в вакуумной электронно-лучевой печи (МВЭ), и меди, микролегированной добавками (0,02 % по массе иттрия) (ММВ).

Образцы для исследований структуры и механических свойств вырезались из лент, полученных прокаткой темплетов из соответствующих сплавов до толщины примерно 0,2 мм. Деформация лент составляла 50%. Как показали ранее проведенные исследования, наибольший эффект по упрочнению и сопротивлению тепловому воздействию наблюдалось у меди, предварительно деформированной прокаткой на 50-60% [2].

Образцы для механических испытаний изготавливались штамповкой из лент толщиной 0,2 мм и имели прямоугольную форму с размерами рабочей части 25x2,5 мм. Ось образцов совпадала с направлением прокатки лент.

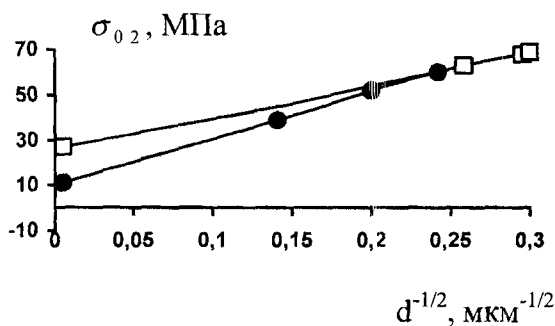
Выявление микроструктуры меди осуществлялось с помощью водного раствора азотной кислоты. Металлографические исследования проводились на оптическом микроскопе МИМ-8. Линейный размер зерна определялся по методу С. А.Салтыкова [3].

**Результаты и их обсуждение.** Микролегированная медь, деформированная на 50%, после отжига при 550°C имеет более однородную и мелкозернистую микроструктуру по сравнению с нелегированной (рис.1).



Р и с 1 Микроструктура исходной чистой меди МВЭ (а) и разбавленного сплава ММВ с 0,02% иттрия

Так как для медных поликристаллов со слабо выраженной текстурой [4,5] и при низких скоростях нагружения [6]  $\sigma_T$  хорошо согласуется с уравнением (1), значит, изменение величины зерна вследствие микролегирования иттрием оказывает влияние на свойства меди. Упрочнение вследствие измельчения зерна при микролегировании, в отличие от упрочнения вследствие деформации, имеет ту благоприятную особенность, что не только не вызывает охрупчивания, но даже, наоборот, - повышает пластичность [7], что подтверждается экспериментальными данными [2]



Р и с 2 Зависимость  $\sigma_{0.2} = f(d^{1/2})$  для образцов чистой (МВЭ) (1) и микролегирующей меди (2)

На рис. 2 приведена зависимость  $\sigma_{0.2} = f(d^{1/2})$  микролегирующей и чистой меди, прокатанной на 50%. Эта зависимость

изображается прямой линией [8] и позволяет определить ( $\sigma_0$  находится графически как отрезок, отсекаемый прямой на оси ординат) параметры уравнения (1) (см. табл.)

Изменение параметров соотношения Холла-Петча при микролегировании меди

Тип меди	$\sigma_0$ , МПа	$K_y$ , Н/мм <sup>3/2</sup>
МВЭ	11	6,4
ММВ	27	4,4

Полученные результаты показывают, что легирование меди иттрием приводит к существенному увеличению значения  $\sigma_0$ , которое характеризует общее сопротивление движению дислокаций в плоскости скольжения внутри зерна без учета влияния внутренних напряжений от границ зерна. Рост  $\sigma_0$  связан с закреплением в микролегирующей меди дислокаций атомами примеси, появлением дополнительного сопротивления при их смещении от атомов примеси и мелкодисперсных выделений.

Значение  $K_y$ , определяющее трудность передачи деформации от зерна к зерну, уменьшается. Это можно объяснить, с одной стороны, оттоком «вредных» примесей из границ зерен к атомам иттрия в приграничную зону, с другой - сегрегацией иттрия на границы зерен. Последнее приводит к снятию некоторой доли упругой энергии границ зерен и, как следствие, способствует проникновению дислокаций через границы зерен. В результате этого уменьшается степень закрепления дислокационных источников в области границы зерен и облегчается процесс передачи через нее скольжения [9]. Подобное изменение параметров уравнения Холла-Петча наблюдалось также в опытах со сталью ОХ16Н15М3Т, легированной примесью с большим атомным радиусом (Sc) [9].

### Выводы

- 1 Микролегирование меди способствует формированию при отжиге более однородной и мелкозернистой структуры и повышению предела текучести чистой меди
- 2 Исследована зависимость предела текучести от среднего размера зерна образцов

чистой и микролегированной меди. Показано, что эта зависимость хорошо описывается соотношением Холла-Петча.

3. Установлено, что микродобавки иттрия приводят к повышению сопротивления движению дислокаций в теле зерна ( $\sigma_i$ ) и снижению трудности «передачи» деформации через границы зерен ( $K_y$ ).

*Авторы выражают глубокую благодарность Неклюдову И. М., Камышанченко Н. В. и Пархоменко А. А. за внимание к работе и полезные критические замечания.*

#### Библиографический список

1. Мак Лин Д. Механические свойства металлов. - М.: Металлургия, 1965 - 420 с
2. 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.
3. Салтыков С. А. Стереометрическая металлография. - М.: Металлургия, 1976. - 272 с
4. Ono Naboru, Karashima Seiichi. Grain size dependence of flow stress in copper polycrystals. //Scr met - 1982. - Vol. 16. - № 4. - P. 381-384
5. Hansen N., Ralph B. The strain and grain size dependence of the flow stress of copper. //Acta met.. - 1982. - Vol. 30. - № 2. - P. 411-417.
6. Кузнецов Л. К., Леонтьев Е. А. Обобщение модели предела текучести Петча на широкий интервал скоростей нагружения // Письма в ЖТФ. 1987. - 13, № 24. - С.1525-1529.
7. Горелик С. С. Рекристаллизация металлов и сплавов. - М.: Металлургия, 1978. - 567 с.
8. Хоникомб Г. Пластическая деформация металлов. - М.: Мир, 1972. - 408с.
9. Пархоменко А. А. Влияние легирования скандием и облучения высокоэнергетичными ( $e$ ,  $\gamma$ ) пучками на параметры уравнения Холла-Петча стали ОХ16Н15М<sub>3</sub>Т // ВАНТ. Сер. ФПИ и РМ. - 1998. - Вып. 6 (72). - С. 54-58.

УДК 621 039

## О ДАЛЬНЕЙШЕМ РАЗВИТИИ В РОССИИ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ ПРИ НЕИЗБЕЖНОСТИ ОСЛАБЛЕНИЯ РАДИАЦИОННОЙ ОБСТАНОВКИ

А. М. Паршин, Ю. П. Добренякин, Г. Д. Никишин

*Санкт-Петербургский государственный технический университет*

До конца века к 29 действующим на российских стационарных АЭС реакторам должны прибавиться еще три, а к 2010 году число блоков увеличится еще на четыре. Этот план развития отечественной энергетики предложен Минатомом РФ и утвержден постановлением Правительства [1].

Реализация программы оценивается в 113,9 млн. рублей, более половины из этой суммы вложат концерн «Росэнергопром», эксплуатирующий АЭС, и предприятия топливного цикла. Однако доля госсредств может измениться, поскольку, как отмечается в документе, экономические показатели «подлежат ежедневному уточнению, исходя из возможностей бюджета».

Новые реакторы должны появиться на действующих ныне Калининской, Курской, Ленинградской, Нововоронежской,

Кольской и Смоленской АЭС. Кроме того, планируется построить новые станции: Кольскую-2, Ленинградскую-2, Нововоронежскую-2, Воронежскую атомную станцию теплоснабжения (АСТ), Томскую АСТ, АСТ в Приморском крае, плавучую станцию на Чукотке и Южно-Аральскую АЭС для переработки оружейного плутония.

Вместе с тем в 2006–2010 годах намечается вывести из эксплуатации 9 устаревших блоков на Кольской, Нововоронежской, Ленинградской и Билибинской АЭС.

Да, в России поистине готовится специальный атомный бум. А что было совсем недавно: в 1963 году один из авторов статьи (А.М. Паршин), молодой начальник отдела № 27 ЦНИИ Минсудпрома (и весьма молодой кандидат технических наук) возглавил одну из первых научных комиссий по соз-