

О ВЕЛИЧИНЕ КОЭФФИЦИЕНТА ХОЛЛА-ПЕТЧА ДЛЯ ВАКУУМНЫХ КОНДЕНСАТОВ НА ОСНОВЕ МЕДИ

Глущенко М.А., Соболев О.В., Субботин А.В., Зеленская Г.И., Зубков А.И.
Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, Украина, E-mail: maglushchenko@gmail.com

Достижимый уровень прочностных свойств металлических материалов обусловлен совместным влиянием нескольких упрочняющих факторов: твердорастворного, дисперсного, дислокационного, зернограничного. Последний из них играет особую роль для наноструктурного состояния.

Влияние размера зерна на прочность поликристаллических материалов описывается зависимостью Холла-Петча, на которую оказывают влияние величина зерна, технология получения металла, химическая чистота, состояние границ зерен и т.д. Вместе с тем, влиянию зернограничных сегрегаций, их строению, физико-химическим свойствам сегрегирующего вещества посвящены единичные исследования [12, 13]. В этой связи целью данной работы явилось изучение влияния зернограничных сегрегаций атомами кобальта, молибдена и тантала на структурное состояние, прочностные свойства и зависимости Холла-Петча для конденсатов на основе меди.

Объектами исследований являлись однокомпонентные конденсаты Cu и двухкомпонентные Cu-Co, Cu-Mo и Cu-Ta в виде фольг толщиной до 50 мкм, которые получали путем испарения компонентов из различных источников и последующей конденсацией смесей их паров на неориентирующих подложках в вакууме $\sim 10^{-3}$ Па. Концентрацию легирующих элементов (С) варьировали в диапазоне от 0,1 до 2 ат. % и контролировали рентгеноспектральным методом. Структуру изучали рентгеновской дифрактометрией и просвечивающей электронной микроскопией. Прочностные свойства определяли в режиме активного растяжения.

Отметим, что молибден и тантал не имеют растворимости в меди ни в жидком, ни в твердом состояниях, кобальт ограниченно растворим в твердом и неограниченно - в расплаве меди. Во всех бинарных системах отсутствуют химические соединения.

На рисунке 1 представлены концентрационные зависимости физического предела текучести (σ_T) изучаемых конденсатов бинарных систем Cu-Co, Cu-Mo, Cu-Ta. Как следует из представленных данных, на экспериментальных зависимостях для конденсатов Cu-Mo и Cu-Ta наблюдается два участка: до содержания легирующего элемента $\sim 0,7$ и $0,4$ ат. %, соответственно, наблюдается сильный рост предела текучести, при дальнейшем повышении концентрации зависимости выходят на насыщение. Видно, что максимальное упрочнение оказывает тантал, минимальное – кобальт.

Для объяснения полученных результатов были проведены исследования структуры этих объектов и получены концентрационные зависимости размера зерна (L) (рис. 2). Из приведенных данных следует, что при концентрациях кобальта, молибдена и тантала до $\sim 1,5$, $0,55$ и $0,4$ ат. %, соответственно, происходит резкое снижение величины зерна до субмикро- и нанометровой размерности с последующим выходом на пологий участок. При этом в образцах с концентрациями, соответствующими ниспадающим ветвям зависимостей $L-f(C, \text{ ат. \%})$ не образуется вторая фаза (рис. 3), а период решетки соответствует периоду ГЦК кристаллической решетки меди.

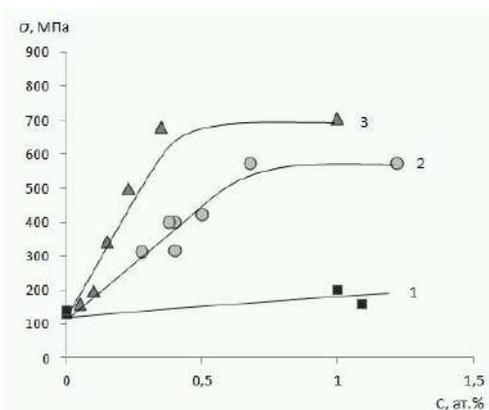


Рисунок 1 – Концентрационные зависимости предела текучести для вакуумных конденсатов Cu-Co (1), Cu-Mo (2), Cu-Ta (3)

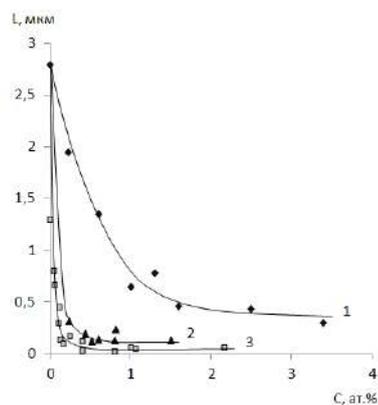


Рисунок 2 – Зависимости размера зерна медной матрицы от концентрации кобальта (1), молибдена (2), тантала (3)

Таким образом, основной прирост предела текучести происходит при тех концентрациях легирующих элементов, при которых наблюдается существенное снижение размер зерна.

Структура конденсатов с концентрацией легирующих элементов, соответствующих пологим участкам зависимостей $L - f(C)$, является двухфазной (рис. 4). Сначала на границах зерен, а затем по мере увеличения концентрации легирующих элементов и в объеме зерен меди появляются частицы кобальта, молибдена и тантала. При этом наблюдается также увеличение периода кристаллической решетки меди, что указывает на образование пересыщенных растворов кобальта, молибдена и тантала в меди.

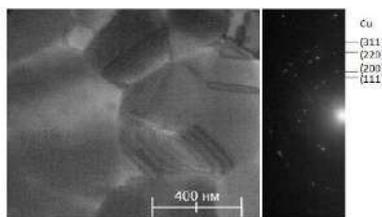


Рисунок 3 – Электронно-микроскопические изображения структуры конденсатов Cu-Mo, соответствующие ниспадающей ветви зависимости $L - f(C)$

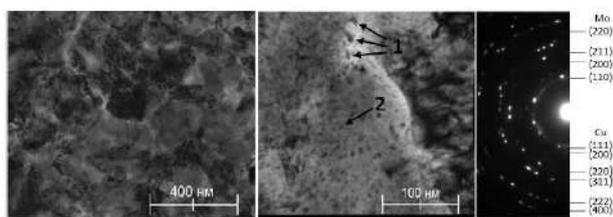


Рисунок 4 – Электронно-микроскопические изображения структуры конденсатов Cu-Mo, соответствующие горизонтальному участку зависимости $L - f(C)$: 1 – частицы Mo на границах зерен меди, 2 – в объеме зерна

На рисунке 5 представлены зависимости Холла-Петча для предела текучести (σ_T) однокомпонентной меди и конденсатов Cu-Co, Cu-Mo и Cu-Ta. Для конденсатов меди величина коэффициента k составляет $0,117 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$, легирование конденсатов меди повышает значения этого параметра для Cu-Mo и Cu-Ta до значений $0,21$ и $0,37 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ соответственно, а для Cu-Co эта величина составляет $0,09 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$. Необходимо отметить, что все образцы двухкомпонентных конденсатов получены в одинаковых технологических условиях, а размер зерна медной матрицы изменяли варьированием содержания легирующих элементов, находящихся в границах зерен.

Теоретические оценки адсорбционной емкости границ зерен для конденсатов Cu-Mo и Cu-Ta показали, что количество атомов легирующих элементов, содержащихся на границах, достаточно для покрытия границ зерен ~ 1 монослоем. Для кобальта эта величина на порядок больше.

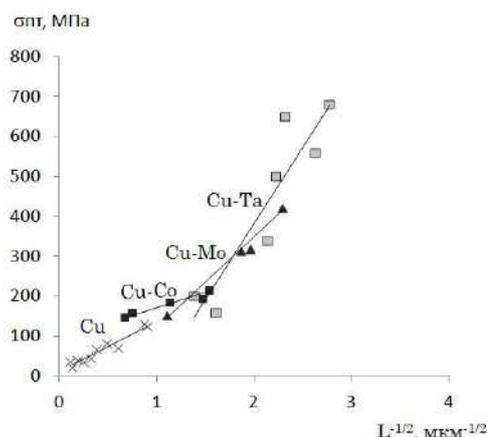


Рисунок 5 – Зависимости Холла-Петча для конденсатов Cu, Cu-Co, Cu-Mo, Cu-Ta

Полученные результаты являются экспериментальным подтверждением теоретических представлений [3], предсказывающих увеличение когезионной прочности границ зерен матричного металла с увеличением температуры плавления сегрегирующего вещества и разницы их атомных размеров с матричным металлом.

Выводы:

1. Установлено, что легирование конденсатов меди кобальтом, молибденом и танталом снижает величину зерна медной матрицы до субмикро- и нанометровой размерности. Эффективность диспергирования зеренной структуры конденсатов меди увеличивается по мере роста температуры плавления легирующего элемента.

2. Показано, что наклон зависимости Холла-Петча для конденсатов Cu-Mo и Cu-Ta повышается, а для Cu-Co остается неизменным по сравнению с аналогичной функцией для однокомпонентной меди.

3. Повышение коэффициента Холла-Петча для систем Cu-Ta и Cu-Mo объясняется монослойным характером сегрегаций атомов тантала и молибдена на границах зерен медной матрицы и, соответственно, образованием сильных связей между атомами меди и тантала или молибдена.

Список литературы:

1. T.D. Shen, R.B. Schwarz, S. Feng, J.G. Swadener, J.Y. Huang, M. Tang, Acta Mater 55, 5007 (2007).
2. T.D. Shen, S.W. Xin, B.R. Sun, Mat Sci Eng A-Struct 627, 139 (2015).
3. M.P. Sean, Acta Metall Mater 28 No7, 955 (1980).