

## ПРОЧНОСТЬ НАНО- И СУБМИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ВАКУУМНЫХ КОНДЕНСАТОВ Cu-Mo

Зубков А.И., Соболев О.В., Жадько М.А., Зозуля Э.В., Бармин А.Е.  
 Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина, anatoly.i.zubkov@gmail.com

Пленки, фольги, покрытия бинарной системы Cu-Mo, получаемые вакуумными технологиями, в зависимости от соотношения компонентов и условий синтеза могут иметь широкий спектр структурных состояний. [1]. Эти материалы демонстрируют высокие прочностные свойства в широком диапазоне температур [2]. Вместе с тем, закономерности влияния молибдена на структуру медной матрицы и вклад в достигаемый уровень прочностных свойств конкретных структурных параметров к настоящему времени является дискуссионным и недостаточно экспериментально изучен. В этой связи целью данной работы явилось дальнейшее изучение влияния содержания молибдена на структуру и прочностные свойства конденсатов меди.

Объектами исследований являлись фольги однокомпонентных конденсатов меди и двухкомпонентных Cu-Mo толщиной 30 - 50 мкм, полученных в одинаковых технологических условиях. Варьировали только содержание молибдена в диапазоне 0,1 - 2,5 ат. %. Структуру изучали методами просвечивающей электронной микроскопии и рентгеновской дифрактометрии. Прочностные свойства изучали в режиме активного растяжения. Электросопротивление измеряли компенсационным методом.

На рис. 1 представлены концентрационные зависимости размера зерна ( $L$ ) и периода кристаллической решетки ( $a$ ) медной матрицы от содержания молибдена. Видно, что при малых концентрациях молибдена до  $\sim 0,5$  ат. % происходит резкое снижение величины  $L$  с 2,8 мкм до  $\sim 100$  нм. При таких содержаниях молибдена заметного изменения периода ГЦК кристаллической решетки меди не происходит (рис. 1, кривая 2). На электронограммах образцов, соответствующих ниспадающей ветви зависимости  $L - f(C_{Mo}, \text{ ат. \%})$  присутствуют только дифракционные рефлекссы, принадлежащие меди. Дальнейшее увеличение концентрации молибдена приводит к увеличению периода кристаллической решетки меди, что свидетельствует о формировании пересыщенного раствора молибдена в меди и появлению частиц молибдена в объеме медной матрицы, а величина зерна остается постоянной.

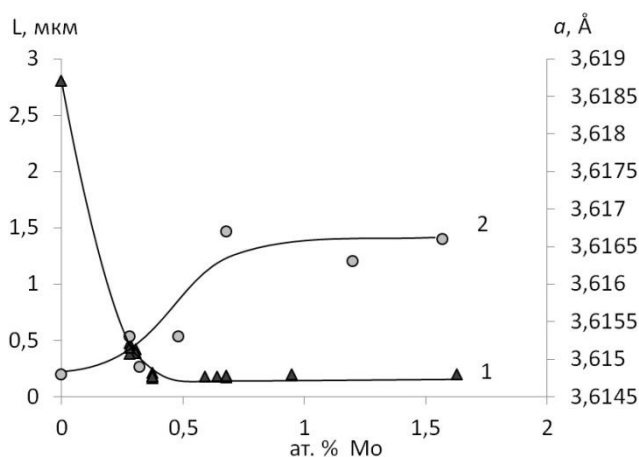


Рисунок 1 - Размер зерна (1) и период решетки (2) вакуумных конденсатов Cu-Mo

На рис. 2 представлены результаты исследований прочностных свойств от содержания молибдена. Все экспериментальные кривые имеют два участка: при содержании молибдена примерно до 0,5 ат. % наблюдается резкое повышение всех прочностных характеристик и снижение деформации до разрушения. Дальнейшее увеличение содержания молибдена приводит к снижению интенсивности роста прочностных свойств и уменьшению деформации до разрушения.

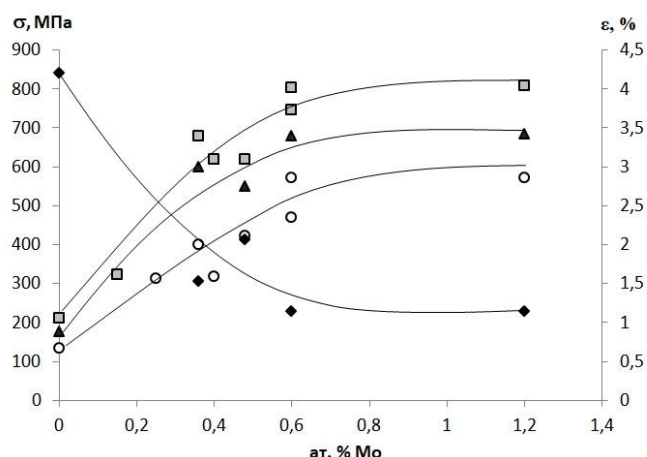


Рисунок 2 - Прочностные свойства вакуумных конденсатов Cu-Mo: ○ - физический предел текучести, ▲ - условный предел текучести, ■ - предел прочности, ◆ - пластичность

На рис. 3 представлены зависимости физического предела текучести ( $\sigma_0$ ) для однокомпонентных и двухкомпонентных конденсатов меди и Cu-Mo с содержанием молибдена, соответствующим ниспадающей ветви зависимости  $L - f(C_{Mo}, \text{ ат. \%})$ . Значения коэффициентов Холла-Петча, определенные из указанных зависимостей, составляют 0,11 и 0,25 МПа·м<sup>1/2</sup> для однокомпонентных и двухкомпонентных конденсатов меди и Cu-Mo, соответственно. Важно отметить, что во всех образцах, используемых для построения зависимости Холла-Петча, атомы молибдена сконцентрированы в границах зерен [3].

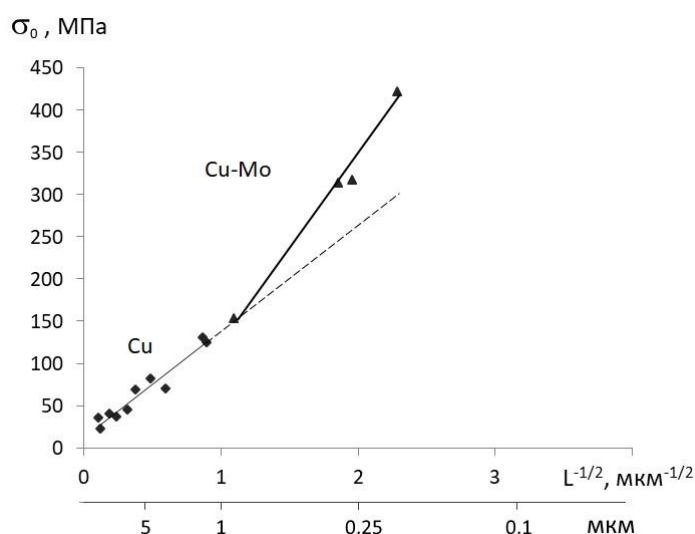


Рисунок 3 - Зависимости Холла-Петча для вакуумных конденсатов меди и Cu-Mo

Приведенные результаты свидетельствуют о различных механизмах упрочнения конденсатов при содержаниях молибдена, соответствующих возрастающим и пологим участкам концентрационных зависимостей прочностных свойств. Действительно, сопоставление данных, приведенных на рис. 1, 2 указывает на их определенную корреляцию. Прежде всего, обращает на себя внимание примерное равенство концентраций молибдена, при которой происходит изменение характера всех экспериментальных зависимостей, как структурных параметров, так и различных свойств. Это содержание молибдена, составляющее ~ 0,5 ат. %, как показано в работе [3], необходимо и достаточно для формирования на границах зерен медной матрицы сегрегаций атомов молибдена в виде моноатомных адсорбционных слоев, повышающих когезионную прочность границ зерен. Поэтому, при таком содержании молибдена величина физического предела текучести, составляющая примерно 500

МПа (рис. 2) определяется только зернограничным упрочнением, как за счет увеличения коэффициента Холла-Петча (рис. 3), так и вследствие уменьшения величины зерна. Дальнейшее увеличение концентрации молибдена в конденсатах приводит к незначительному росту прочностных свойств за счет дисперсного упрочнения.

Таким образом, приведенные результаты свидетельствуют, что оптимальным структурным состоянием изучаемых объектов, при котором реализуются высокие прочностные и электропроводящие свойства конденсатов, превосходящие аналогичные по значению сплавы на основе меди [4] (рис. 4), является то, при котором атомы молибдена находятся в границах зерен в виде равновесных зернограничных сегрегаций в виде моноатомных адсорбционных слоев.

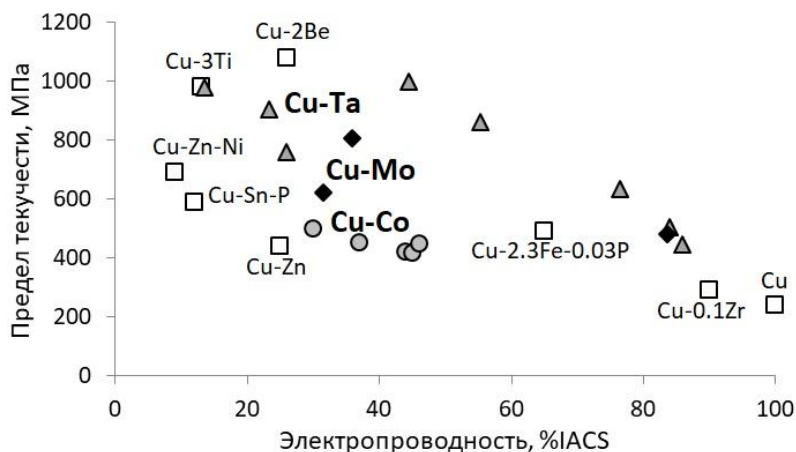


Рисунок 4 – Прочность и электропроводность сплавов на основе меди: □ – [4], ○ – вакуумные конденсаты Cu-Co [5], △ – Cu-Ta [6], ◆ – Cu-Mo

#### Список литературы

1. Мовчан Б.Н. Жаростойкие покрытия, осаждаемые в вакууме / Б.Н. Мовчан, И.С. Малашенко. – Киев: Наук. думка, 1983. – 232 с.
2. Зубков А.И. Термическая стабильность нанокompозитов, кристаллизуемых в вакууме // Вестник ТГУ, 2010. – Т. 15. № 3. – С. 846 – 848.
3. Глущенко М.А., Луценко Е.В., Соболев О.В., Бармин А.Е., Зубков А.И. Влияние легирования конденсатов меди переходными металлами Co, Mo, Ta на структуру и зависимость Холла-Петча // Журнал нано- и электронной физики, 2016. – Т. 8, №3. – С. 03015 (4с).
4. Miyake J., Ghosh G., Fine M.E. Design of high-strength, high-conductivity alloys // MRS Bulletin, 1996. – 21. Iss. 6. – P. 13.
5. Glushchenko M.A., Sobol' O.V., Zozulya E.V., Zubkov A.I. Structure and properties of Cu-Co vacuum condensates // Proceedings of the International Conference on Nanomaterials: Application & Properties (NAP-2016), Lviv, 2016. – P. 01FNC02 (3 pp).
6. Zhadko M.A., Zubkov A.I., Sobol' O.V., Subbotin A.V., Zozulya E.V., Zelenskaya G.I. Structure, Strength and Conductive Properties of Vacuum Cu-Ta Condensates // Journal of Nano- and Electronic Physics, 2018. – V. 10, №3. – P. 03003 (4pp).