

ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИЯ НАНОРАЗМЕРНОЙ ЗЕРЕННОЙ СТРУКТУРЫ МЕДИ И АЛЮМИНИЯ ЗЕРНОГРАНИЧНЫМИ СЕГРЕГАЦИЯМИ ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ

Жадько М.А., Луценко Е.В., Зубков А.И., Соболев О.В., Зозуля Э.В., Зеленская Г.И.
Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина, maglushchenko@gmail

Основными факторами, способствующими повышению термической стабильности металлов с наноразмерной зеренной структурой, являются частицы второй фазы и зернограничные сегрегации веществ, обладающих определенными эксклюзивными свойствами по отношению к матричному металлу [1, 2]. Эти структурные элементы могут формироваться в определенной последовательности как при получении металла, так и в процессе последующей термообработки [3]. В объеме матричного металла, содержащего даже малое количество второго компонента, могут находиться только частицы второй фазы или зернограничные сегрегации или те и другие одновременно. Поэтому роль каждого из этих параметров в рекристаллизационных процессах в наноразмерных структурах практически не изучена и является дискуссионной [4-6].

Ранее проведенные исследования влияния температуры отжига на наноразмерную структуру и свойства конденсатов бинарных систем Cu-Mo, Cu-Ta, Cu-Co, Al-Fe, Fe-W [7-11] показали, что эти объекты обладают способностью сохранять исходное состояние при нагреве до $0,7 - 0,9 T_{пл}$ матричного металла. В этой связи целью данной работы явилось дальнейшее исследование влияния температуры отжига и установление доминирующих факторов, влияющих на способность сохранять исходное структурное состояние конденсатов Cu-Mo, Cu-Ta, Cu-Co и Al-Fe.

Объектами исследований являлись фольги указанных бинарных систем на основе меди и алюминия толщиной до 50 мкм, полученные раздельным испарением составляющих компонентов и последующей конденсацией смесей их паров на неориентирующих подложках в вакууме $\sim 10^{-3}$ Па. Структуру объектов изучали рентгеновской дифрактометрией и просвечивающей электронной микроскопией. Элементный состав определяли рентгеноспектральным методом. Концентрацию легирующих элементов варьировали в диапазоне 0,1-5 ат. %.

В исходном конденсированном состоянии структура объектов зависит от концентрации легирующих элементов (рис. 1). При содержании тантала или молибдена до $\sim 0,4$ ат.%, кобальта и железа примерно до 1,5 ат.% структура конденсатов является однофазной, атомы легирующих элементов сконцентрированы в границах зерен матричных металлов в виде адсорбционных слоев. При большей концентрации легирующих элементов, в структуре происходит формирование пересыщенных твердых растворов и частиц второй фазы сначала на границах зерен, а затем и в объеме матричных металлов.

Отжигали конденсаты как в однофазном, так и двухфазном состояниях с концентрациями, соответствующими ниспадающим и пологим участкам зависимостей $L - f(C)$ (рис. 1).

Установлено, что конденсаты Cu-Ta и Cu-Mo, в которых легирующие элементы находились в матричном металле – меди в зернограничных сегрегациях в виде ненасыщенных адсорбционных слоев [3], демонстрируют более высокую термическую стабильность по сравнению с промышленными сплавами на основе меди (рис. 2, кривые 1, 2). В образцах с повышенным содержанием Ta, Mo, Co, Fe, (рис. 2, кривые 3-6) дополнительное стабилизирующее действие оказывают частицы второй фазы, образующиеся как при конденсации так и при отжиге в результате распада пересыщенных растворов легирующих элементов в кристаллических решетках меди и алюминия.

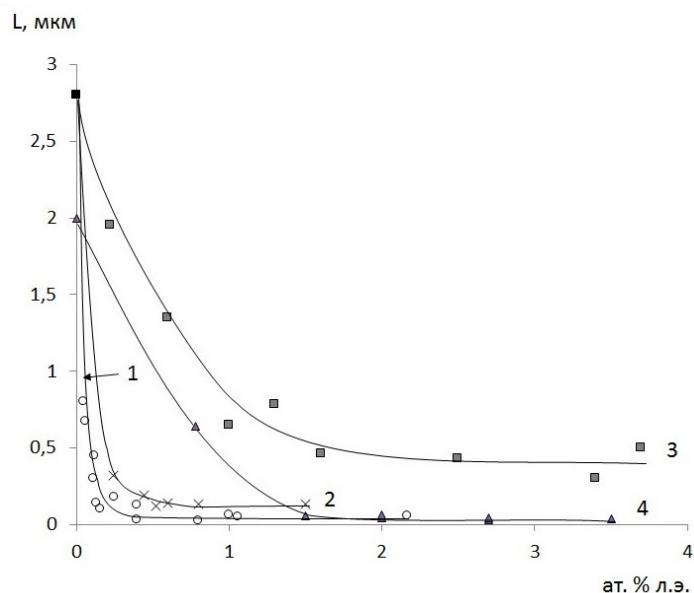


Рисунок 1- Концентрационные зависимости среднего условного размера зерна вакуумных конденсатов: 1 – Cu-Ta, 2– Cu-Mo, 3 – Cu-Co, 4 – Al-Fe.

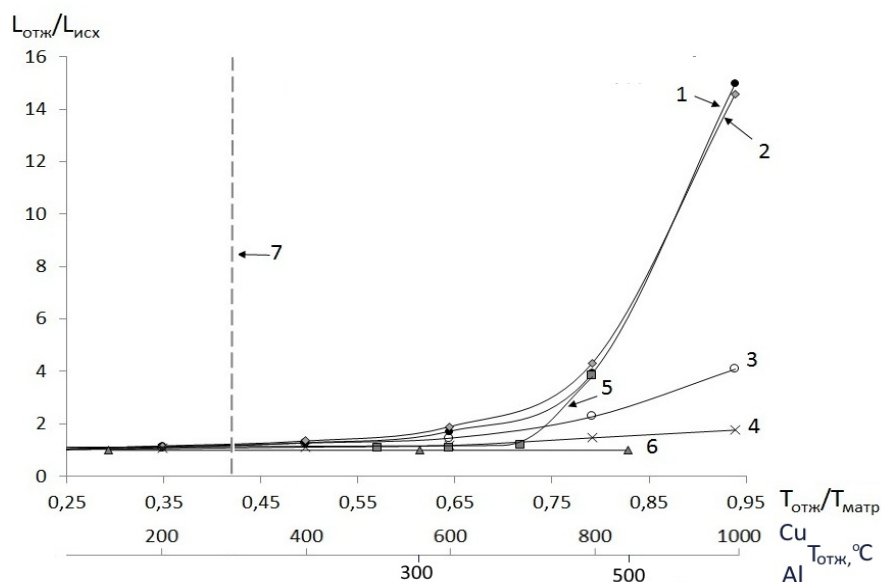


Рисунок 2- Влияние температуры отжига на размер зерна вакуумных конденсатов:
 $L_{отж}$, $L_{исх}$ – размеры зерен после и до отжига, соответственно,
 1 – Cu-0,25 ат.% Ta; 2 – Cu-0,45 ат.% Mo; 3 – Cu-0,4 ат.% Ta;
 4 – Cu-1 ат.% Mo; 5 – Cu-3 ат.% Co; 6 – Al-3 ат.% Fe; 7 – температура начала
 рекристаллизации металлургических сплавов на основе меди и алюминия

Как следует из представленных экспериментальных результатов, температуры начала роста зерна матричных металлов зависят от содержания, физико-химических свойств легирующих элементов, состояния адсорбционных слоев и могут превышать 0,8 температуры плавления матричного металла (рис. 2, кривые 3, 4, 6). Показано, что максимальное стабилизирующее действие на зеренную структуру меди и алюминия оказывают Ta, Mo и Fe, соответственно, которые формируют зернограничные сегрегации в виде моноатомных адсорбционных слоев [3, 7]. Кобальт, который находится в границах зерен медной матрицы в ином состоянии [8] оказывает меньшее стабилизирующее влияние на исходную зеренную структуру (рис. 2, кривая 5).

Следует отметить, что частицы тантала и молибдена могут иметь ГЦК кристаллическую решетку, которая не свойственна этим металлам. Показано, что этот эффект связан с определенным кристаллографическим соответствием ГЦК решетки меди и высокодисперсных частиц тантала или молибдена, формирующихся при распаде пересыщенного раствора [3].

Таким образом, в данной работе показано, что стабилизацию наноразмерной исходной структуры матричных металлов можно осуществлять не только за счет Зинеровского торможения границ зерен частицами второй фазы, но и моноатомными зернограницными сегрегациями более тугоплавких металлов.

Список литературы:

1. Андриевский Р.А. Термическая стабильность наноматериалов // Успехи химии. 2002. 71. С. 967-984.
2. Sean M.P. Adsorption-induced interface decohesion // *Acta Metall. Mater.* 1980. 28. No 7. P. 955-962.
3. Zubkov A.I. Zubarev E.N., Sobol O.V., Hlushchenko M.A., Lutsenko E.V. Structure of vacuum Cu-Ta condensates // *Physics of Metals and Metallography.* 2017. Vol. 118. No. 2. P. 158-163.
4. Özerinç S., Tai K., Vo N.Q., Bellon P., Averback R.S., King W.P. Grain boundary doping strengthens nanocrystalline copper alloys // *Scripta Materialia.* 2012. Vol. 67. P. 720–723.
5. Rajagopalan M., Darling K., Turnage S., Koju R.K., Hornbuckle B., Mishin Y., Solanki K.N. Microstructural evolution in a nanocrystalline Cu-Ta alloy: A combined in-situ TEM and atomistic study // *Materials and Design.* 2017. 113. P. 178–185.
6. Зубков А.И. Термическая стабильность нанокомпозитов, кристаллизующихся в вакууме // Вестник ТГУ. 2010. Т. 15. Вып. 3. С. 846 – 848.
7. Луценко Е.В., Соболев, О.В., Зубков А.И. О модифицирующем влиянии железа на вакуумные конденсаты алюминия // Журнал нано- и электронной физики. 2015.Т. 7. № 3. С. 03042(4pp).
8. 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 (4cc).
9. Глущенко М.А., Луценко Е.В., Соболев О.В., Зубков А.И. Термическая стабильность структуры и свойств вакуумных псевдосплавов на основе меди и алюминия // Вестник Тамбовского университета. Сер: Естественные и технические науки. 2016. Т. 21, Вып. 3. С. 933-935.
10. Glushchenko M.A. Sobol' O.V., Zubkov A.I. On the increase in the recrystallization temperature of nanostructured vacuum copper based condensates // *Proceedings of the International Conference on Nanomaterials: Application & Properties (NAP-2017).* 2017. P. 01FNC11 (4 pp).
11. 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).* 2016. P. 01FNC02 (3 pp).