

УДК: 669.187.001.2

DOI: 10.20310/1810-0198-2016-21-3-930-932

ЗЕРНОГРАНИЧНОЕ УПРОЧНЕНИЕ НАНО- И СУБМИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ МЕДИ, ПОЛУЧЕННЫХ КОНДЕНСАЦИЕЙ В ВАКУУМЕ

© М.А. Глущенко¹⁾, Е.В. Луценко²⁾, О.В. Соболев¹⁾, А.И. Зубков¹⁾

¹⁾ Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, Украина, e-mail: anzubkov@km.ru

²⁾ Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт», г. Харьков, Украина, e-mail: lutsenkoev@mail.ru

Исследована структура и прочностные свойства в режиме активного растяжения конденсатов Cu-Co, Cu-Ta и Cu-Mo, полученных электронно-лучевым испарением из различных источников в вакууме. Показано, что легирование конденсатов меди кобальтом, танталом и молибденом диспергирует зеренную структуру медной матрицы в результате формирования этими элементами зернограничных сегрегаций, которые образуются на поверхности растущих зерен медной матрицы. Для предела текучести конденсатов построены зависимости Холла–Петча, наклон которых увеличивается с ростом температуры плавления второго компонента.

Ключевые слова: медь; предел текучести; зернограничные сегрегации; размер зерна; зависимость Холла–Петча.

Обогащение границ зерен металлических материалов «полезными» или «вредными» [1–2] примесями и легирующими элементами может как улучшать, так и снижать свойства этих материалов и изменять характер размерных зависимостей.

Несмотря на большое количество работ, посвященных этой проблеме, в настоящее время отсутствуют общепринятые представления об этих процессах.

В этой связи целью данной работы явилось изучение влияния зернограничных сегрегаций атомами кобальта, молибдена и тантала на зависимость Холла–Петча для меди. Объектами исследований являлись двухкомпонентные конденсаты 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 неориентирующей подложке в вакууме $\sim 10^{-3}$ Па. Концентрацию легирующих элементов 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.

На рис. 1 представлены концентрационные зависимости условного размера зерна медной матрицы указанных объектов, полученных в одинаковых технологических условиях. Видно, что функции $L-f(C \text{ ат.})$ имеют два участка. При концентрациях кобальта, молибдена и тантала до 1,5, 0,55 и 0,4 ат.%, соответственно, происходит резкое снижение величины зерна с последующим выходом на пологий участок. Анализ данных рентгеновской дифрактометрии и просвечивающей электронной микроскопии свидетельствует, что на ниспадающих ветвях зависимостей $L-f(C \text{ ат.})$ структура конденсатов является однофазной, также не обнаружена заметная растворимость кобальта, молибдена и тантала в указанном диапазоне концентраций. Эти ре-

зультаты и данные работ [3–4] позволяют сделать заключение, что атомы кобальта, молибдена и тантала сосредоточены в границах зерен меди в виде монослойных сегрегаций.

На рис. 2 представлены зависимости Холла–Петча для предела текучести ($\sigma_{\text{пт}}$) однокомпонентной меди и конденсатов Cu-Co, Cu-Mo и Cu-Ta, полученных в одинаковых технологических условиях:

$$\sigma_{\text{пт}} = \sigma_0 + kL^{-1/2}.$$

Для конденсатов меди величина коэффициента k составляет $0,117 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$, а σ_0 – 20 МПа, что хорошо

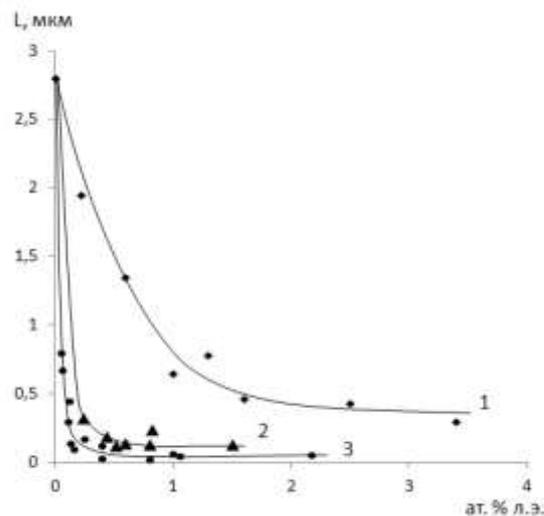


Рис. 1. Концентрационные зависимости размера зерна вакуумных конденсатов Cu-Co (1), Cu-Mo (2), Cu-Ta (3)

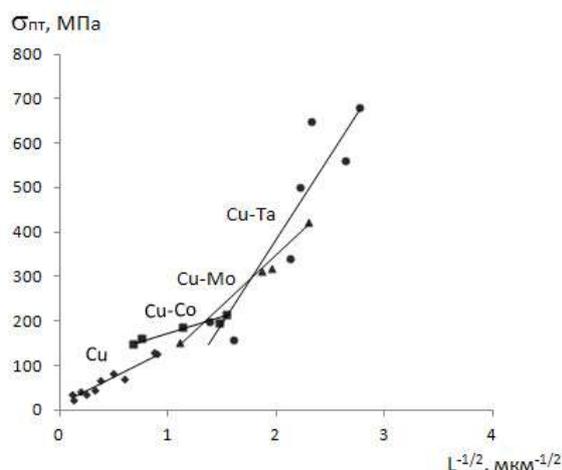


Рис. 2. Зависимости Холла–Петча конденсатов меди Cu-Co, Cu-Mo, Cu-Ta

совпадает с литературными данными [5]. Легирование конденсатов меди повышает значения этого параметра для Cu-Mo и Cu-Ta до значений 0,21 и 0,37 МПа·м^{1/2}, соответственно, а для Cu-Co эта величина составляет 0,09 МПа·м^{1/2}.

Отметим, что структура конденсатов с концентрацией легирующих элементов, соответствующих полному участкам зависимостей $L-f$ (C % ат.), является двухфазной. Сначала на границах зерен, а затем по мере увеличения концентрации Co, Mo или Ta и в объеме зерен меди появляются частицы кобальта, молиб-

дена и тантала. При этом наблюдается также увеличение периода кристаллической решетки меди, что указывает на образование пересыщенных растворов кобальта, молибдена и тантала в кристаллической решетке меди.

Таким образом, в данной работе установлен факт повышения коэффициента Холла–Петча для меди такими элементами, как молибден и тантал.

Полученные результаты являются экспериментальным подтверждением теоретических представлений [6], предсказывающих увеличение когезионной прочности границ зерен матричного металла с увеличением температуры плавления сегрегирующего вещества и разницы их атомных размеров с матричным металлом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Винаров С.М. Прокаливаемость стали с небольшим содержанием бора // Журнал технической физики. 1949. Т. 19. Вып. 2. С. 243-250.
2. Гликман Е.Э., Брувер Р.Э. Равновесная сегрегация на границах зерен и интеркристаллитная хладноломкость твердых растворов // Металлофизика. 1972. № 43. С. 42-63.
3. Зубков А.И., Глушченко М.А. Структура вакуумных псевдосплавов Cu-Mo. Влияние концентрации молибдена и условий конденсации // Вестник НТУ «ХПИ». 2012. С. 186-189.
4. Бармин А.Е., Соболев О.В., Зубков А.И., Мальцева Л.А. Модифицирующее влияние вольфрама на вакуумные конденсаты железа // ФММ. 2015. № 4. С. 70-86.
5. Козлов Э.В., Жданов А.Н., Конева Н.А. Барьерное торможение дислокаций. Проблема Холла–Петча // Физ. мезомех. 2006. Т. 9. № 3. С. 81-92.
6. Sean M.P. Adsorption-induced interface decohesion // Acta Metallurgica. 1980. V. 28. Issue 7. P. 955-962.

Поступила в редакцию 10 апреля 2016 г.

UDC 669.187.001.2

DOI: 10.20310/1810-0198-2016-21-3-930-932

GRAIN-BOUNDARY HARDENING OF NANO- AND SUBMICROCRYSTALLINE COPPER-BASED ALLOYS OBTAINED BY CONDENSATION IN VACUUM

© M.A. Glushchenko¹, E.V. Lutsenko², O.V. Sobol¹, A.I. Zubkov¹

¹ National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkov, Ukraine, e-mail: anzubkov@km.ru

² National Science Center Kharkov Institute of Physics and Technology, Kharkov, Ukraine, e-mail: lutsenko@mail.ru

The structure and mechanical properties of Cu-Co, Cu-Ta, and Cu-Mo condensates produced by electron-beam evaporation from different sources in vacuum is investigated. It is shown that alloying of copper condensates with cobalt, tantalum and molybdenum disperses the grain structure of copper matrix due to the formation the grain boundary segregation of these elements which are formed on the surface of growing grains of the copper matrix. The Hall–Petch dependences is built for the yield stress. The slope of the dependence increases with growing melting temperature of the second component.

Key words: copper; yield strength; grain boundary segregation; grain size; the Hall–Petch relationship.

REFERENCES

1. Vinarov S.M. Prokalivaemost' stali s nebol'shim sodержaniem bora. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki – Technical physics. The Russian journal of applied physics*, 1949, vol. 19, no. 2, pp. 243-250.

2. Glikman E.E., Bruver R.E. Ravnovesnaya segregatsiya na granitsakh zeren i interkristallitnaya khladnolomkost' tverdykh rastvorov. *Metallofizika – Metallofizika*, 1972, no. 43, pp. 42-63.
3. Zubkov A.I., Glushchenko M.A. Struktura vakuumnykh psevdospavov Cu-Mo. Vliyanie kontsentratsii molibdena i usloviy kondensatsii. *Vestnik Natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta "Khar'kovskiy politekhnicheskii institut"*, 2012, pp. 186-189.
4. Barmin A.E., Sobol' O.V., Zubkov A.I., Mal'tseva L.A. Modifitsiruyushchee vliyanie vol'frama na vakuumnye kondensaty zheleza. *Fizika metallov i metallovedenie – The Physics of Metals and Metallography*, 2015, no. 4, pp. 70-86.
5. Kozlov E.V., Zhdanov A.N., Koneva N.A. Bar'ernoe tormozhenie dislokatsiy. Problema Kholla-Petcha. *Fizicheskaya mezomekhanika – Physical Mesomechanics*, 2006, vol. 9, no. 3, pp. 81-92.
6. Sean M.P. Adsorption-induced interface decohesion. *Acta Metallurgica*, 1980, vol. 28, no. 7, pp. 955-962.

Received 10 April 2016

Глушенко Мария Александровна, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, Украина, аспирант, e-mail: maglushchenko@gmail.com

Glushchenko Mariya Aleksandrovna, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkov, Ukraine, Post-graduate Student, e-mail: maglushchenko@gmail.com.

Луценко Евгений Валентинович, Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт», г. Харьков, Украина, младший научный сотрудник, e-mail: lutsenkoev@mail.ru

Lutsenko Evgeniy Valentinovich, National Science Center Kharkov Institute of Physics and Technology, Kharkov, Ukraine, Junior Research Worker, e-mail: lutsenkoev@mail.ru

Соболь Олег Валентинович, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, Украина, доктор физико-математических наук, профессор, зав. кафедрой материаловедения, e-mail: sool@kpi.kharkov.ua

Sobol Oleg Valentinovich, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkov, Ukraine, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Head of Materials Science Department, e-mail: sool@kpi.kharkov.ua

Зубков Анатолий Иванович, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, Украина, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры материаловедения, e-mail: anzubkov@km.ru

Zubkov Anatoliy Ivanovich, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkov, Ukraine, Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor, Associate Professor of Material Science Department, e-mail: anzubkov@km.ru