

УДК: 669.187.001.2

DOI: 10.20310/1810-0198-2016-21-3-1124-1126

## ОСОБЕННОСТИ УПРОЧНЕНИЯ НАНО- И СУБМИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ КОНДЕНСАТОВ Al-Fe

© Е.В. Луценко<sup>1)</sup>, О.В. Соболев<sup>2)</sup>, А.А. Подтележников<sup>2)</sup>, А.И. Зубков<sup>2)</sup><sup>1)</sup> Национальный научный центр Харьковский физико-технический институт, г. Харьков, Украина, e-mail: lutsenkoev@mail.ru<sup>2)</sup> Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, Украина, e-mail: anzubkov@km.ru

Изучено влияние концентрации железа на структуру, микротвердость и удельное электросопротивление конденсатов Al-Fe. Обнаружено, что легирование конденсатов алюминия железом диспергирует зеренную структуру матричного металла, повышает микротвердость и удельное электросопротивление. Установлено, что при конденсации паров алюминия и железа формируются пересыщенные растворы железа в ГЦК кристаллической решетке алюминия. Показано, что для конденсатов Al-Fe зависимость Холла–Петча имеет больший наклон по сравнению с однокомпонентным алюминием.

*Ключевые слова:* алюминий; конденсат; микротвердость; размер зерна; интерметаллид; электросопротивление.

Для сплавов и композиционных материалов на основе алюминия сочетание высоких прочностных и проводящих свойств, а также их стабильность в широком температурном интервале являются основными факторами, определяющими области их применения. В этом плане возможности вакуумно-плазменных технологий, позволяющих получать пленки, фольги, покрытия любого состава с широким спектром структурных состояний, являются перспективными и далеко не исчерпанными. В этой связи целью настоящей работы является изучение характера упрочнения вакуумных конденсатов Al-Fe, полученных PVD методом. Особенностью этой бинарной системы является низкая (примерно 0,03 ат.%) растворимость железа в алюминии в равновесных условиях.

Объектами исследований служили отделенные от неориентирующихся подложек конденсаты Al-Fe толщиной до 50 мкм, полученные при одинаковых технологических параметрах. Содержание Fe варьировали в диапазоне от 1 до 4 ат.%. Структурные исследования проводили методами рентгеновской дифрактометрии на ДРОН-3 и просвечивающей электронной микроскопии на JEM-2100, оборудованном приставкой для определения элементного состава. Измеряли удельное электросопротивление и микротвердость.

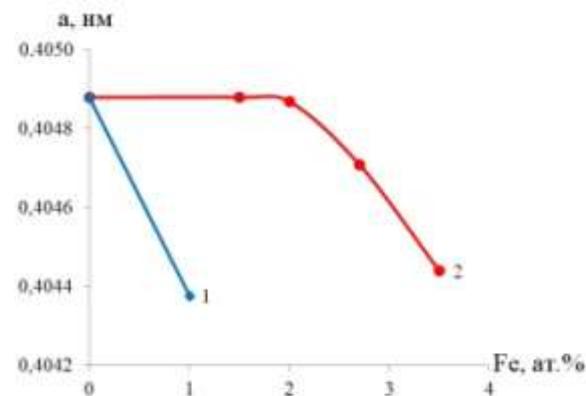
На рис. 1 представлена зависимость периода кристаллической решетки алюминиевой матрицы ( $a$ , Å) от концентрации железа в конденсатах. Видно, что до содержания железа  $\sim 2$  ат.% величина « $a$ » остается постоянной и равной табличному значению для химически чистого алюминия металлургического происхождения.

В этом же диапазоне концентрацией железа происходит резкое снижение размеров областей когерентного рассеяния (ОКР) и зерна ( $L$ ) алюминиевой матрицы, определяемых рентгенографически, металлографиче-

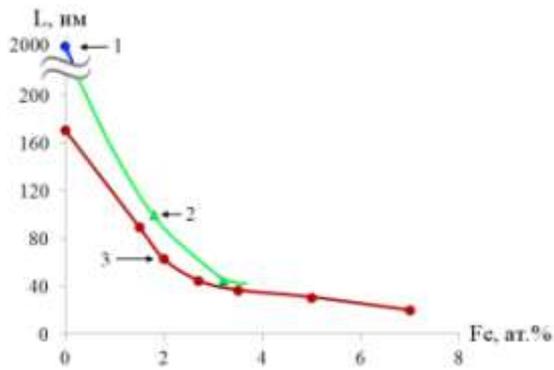
ски и просвечивающей электронной микроскопией ( $L$ ) соответственно (рис. 2).

Важным результатом является то, что на дифрактограммах и электронограммах образцов с таким содержанием железа отсутствуют дифракционные линии, принадлежащие интерметаллидам. Этот эффект вызван блокирующим влиянием сегрегаций атомов железа на границах зерен алюминия [1].

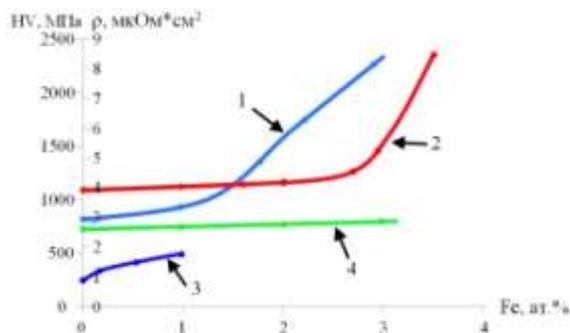
При дальнейшем увеличении концентрации железа период кристаллической решетки алюминиевой матрицы снижается, что указывает на формирование пересыщенного твердого раствора железа в кристаллической решетке алюминия при конденсации двухкомпонентного пара Al-Fe. Максимальная растворимость железа в алюминии, оцененная из зависимости построенной по правилу Вегарда, составляет  $\sim 1$  ат.% (рис. 1).



**Рис. 1.** Концентрационные зависимости периода кристаллической решетки конденсатов Al-Fe: 1 – зависимость по Вегарду; 2 – эксперимент



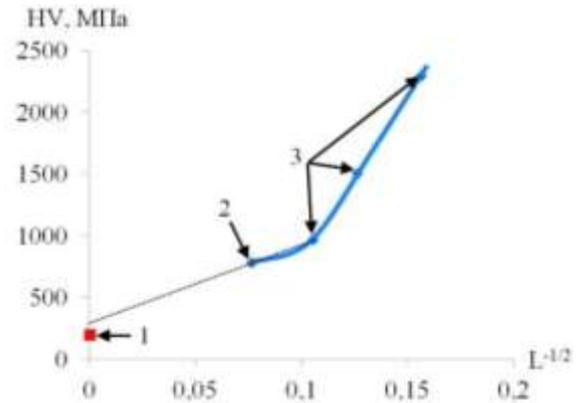
**Рис. 2.** Концентрационная зависимость размера ОКР и величины зерна конденсатов Al-Fe: 1 – металлография; 2 – размер зерна, определенный по темнопольным изображениям; 3 – ОКР



**Рис. 3.** Концентрационная зависимость микротвердости и удельного электросопротивления: 1 – твердость конденсатов Al-Fe; 2 – удельное электросопротивление конденсатов Al-Fe; 3 – твердость металлургического сплава Al-Fe; 4 – удельное электросопротивление металлургического сплава Al-Fe

Факт формирования пересыщенного твердого раствора указывает на возможность протекания процессов дисперсионного твердения в этих объектах при последующем нагреве.

Следует отметить, что в нелегированном конденсате алюминия величина  $L$  примерно в 15 раз больше ОКР, что свидетельствует о фрагментации зеренной структуры алюминия. По мере увеличения содержания железа различия в размерах ОКР и  $L$  уменьшаются и совпадают при снижении величины зерна алюминиевой матрицы до примерно 50 нм (рис. 2), что является характерным для нанокристаллических металлов. В области размеров менее 50 нм формируются образования, называемые обобщенным термином кристаллиты [2]. При этом содержании железа в структуре конденсатов формируются интерметаллиды, а зависимости ОКР и  $L$  от содержания железа изменяют наклон и переходят на пологий участок.



**Рис. 4.** Зависимость твердости Холла–Петча для алюминия и Al-Fe: 1 – твердость массивного отожженного алюминия; 2 – твердость конденсата нелегированного алюминия; 3 – твердость конденсатов Al-Fe

На рис. 3 представлены концентрационные зависимости микротвердости и удельного электросопротивления. Видно, что легирование алюминия железом способствует повышению прочностных свойств и удельного электросопротивления. Твердость конденсатов значительно превышает аналогичный параметр металлургических сплавов Al-Fe с сопоставимым содержанием железа [3]. Отметим, что при концентрации железа больше 2 ат.% происходит резкое повышение удельного электросопротивления, что так же указывает на образование пересыщенного твердого раствора железа в ГЦК решетке алюминия [4].

На рис. 4 представлены зависимости прочностных свойств от размера зерна конденсатов Al-Fe, из которых следует, что легирование алюминия железом изменяет наклон зависимости  $H-f(L^{-1/2})$ , что может быть обусловлено формированием сегрегаций или интерметаллидов на границах зерен матричного металла – алюминия.

Таким образом, результаты, полученные в данной работе, свидетельствуют о совместном действии твердорастворного, зернограничного и дисперсного механизмов упрочнения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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 (4 p.).
2. Sobol O.V. // Phys. Solid State. 2011. V. 53. № 7. P. 1464.
3. Беляев А.И., Бочвар О.С., Буйнов Н.Н. Металловедение алюминия и его сплавов: справочник. М.: Металлургия, 1983.
4. Луценко Е.В., Белозеров В.В., Субботин А.В., Зубков А.И. Рентгенографические исследования структуры вакуумных конденсатов Al-Fe // Вестник ХАДИ. 2015. Вып. 70.

Поступила в редакцию 10 апреля 2016 г.

UDC 669.187.001.2

DOI: 10.20310/1810-0198-2016-21-3-1124-1126

## FEATURES OF STRENGTHENING OF NANO- AND SUBMICROCRYSTALLINE Al-Fe CONDENSATES

© E.V. Lutsenko<sup>1)</sup>, O.V. Sobol<sup>2)</sup>, A.A. Podtelezhnikov<sup>2)</sup>, A.I. Zubkov<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>National Science Center Kharkov Institute of Physics and Technology, Kharkov, Ukraine,  
e-mail: lutsenkoev@mail.ru

<sup>2)</sup>National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkov, Ukraine,  
e-mail: anzubkov@km.ru

The effect of iron concentration on the structure, microhardness and electrical resistivity of Al-Fe condensates is studied. It is found that alloying aluminum condensates with iron disperses the grain structure of the matrix metal, improves the microhardness and electrical resistivity. It is established that during the condensation of aluminum and iron vapor supersaturated solutions of iron in aluminum FCC crystalline lattice are formed. It is shown that for Al-Fe condensates the Hall–Petch dependence has a larger slope compared to the single component aluminum.

*Key words:* aluminum; condensates; microhardness; grain size; intermetallic compound; electrical resistivity.

### REFERENCES

1. Lucenko E.V., Sobol', O.V., Zubkov A.I. O modifizirujushhem vlijanii zheleza na vakuumnye kondensaty aljuminija. *Zhurnal nano- i jelektronnoj fiziki – Journal of Nano- and Electronic Physics*, 2015, vol. 7, no 3, p. 03042 (4 p).
2. Sobol O.V. *Phys. Solid State*, 2011, vol. 53, no. 7, p. 1464.
3. Beljaev A.I., Bocharov O.S., Bujnov N.N. *Metallovedenie aljuminija i ego splavov*. Moscow, Metallurgy Publ., 1983.
4. Lucenko E.V., Belozero V.V., Subbotin A.V., Zubkov A.I. Rentgenograficheskie issledovanija struktury vakuumnyh kondensatov Al-Fe. *Vestnik HADI*, 2015, vol. 70.

Received 10 April 2016

Луценко Евгений Валентинович, Национальный научный центр Харьковский физико-технический институт, 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

Подтележников Анатолий Александрович, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, Украина, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, e-mail: anzubkov@km.ru

Podtelezhnikov Anatoliy Aleksandrovich, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkov, Ukraine, Candidate of Physics and Mathematics, Senior Research Worker, e-mail: anzubkov@km.ru

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 Materials Science Department, e-mail: anzubkov@km.ru