

(Институт ядерной физики, Алматы, Республика Казахстан)

## **СТРУКТУРА ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ СООСАЖДЕНИЕМ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ АЛЮМИНИЯ И МАГНИЯ**

**Аннотация.** В результате соосаждения ультрадисперсных частиц алюминия и магния, распыленных в плазме низкого давления на необогреваемую подложку, получены сплавные покрытия, при исследовании структуры которых установлено значительное расширение концентрационных границ существования твердых растворов: магния в алюминий до 21,9 ат. % Mg и алюминия в магний до 21,4 ат. % Al, а также области гомогенности интерметаллического соединения  $Al_3Mg_2$ , определены параметры решетки фаз. Причиной расширения полей существования фаз на диаграмме состояния является размерный фактор.

**Ключевые слова:** алюминий, магний, покрытие, концентрация, твердый раствор, интерметаллическое соединение, кристаллическая решетка.

**Тірек сөздер:** алюминий, магний, жабын, концентрация, қатты ерітінді, интерметалдық қосылыс, кристалдық тор.

**Keywords:** aluminum, magnesium, coating concentration, solid solution, intermetallic compound, the crystalline lattice.

В системе Al-Mg, полученной традиционным плавлением компонентов, образуются фазы  $\beta$  ( $Al_3Mg_2$ ),  $\gamma$  ( $Al_{12}Mg_{17}$ ),  $\xi$  ( $Al_{52}Mg_{48}$ ) и  $\epsilon$  ( $Al_{30}Mg_{23}$ ) [1]. Фазы  $\beta$  и  $\gamma$  плавятся конгруэнтно при температурах 453 и 460°C. Фазы  $\xi$  и  $\epsilon$  образуются по перитектическим реакциям при 452 и 450°C.

Известно [2], что формирование материалов соосаждением распыленных ультрадисперсных частиц металлов позволяет получить сплавы, запрещенные равновесными диаграммами состояния, интерметаллические соединения при низких (менее 200°C) температурах и значительно расширить их области гомогенности.

В этой связи выполнено исследование, имеющее целью получение сплавных покрытий в системе алюминий-магний и исследование их структуры.

Методика получения пленочных образцов системы алюминий-магний с использованием размерного фактора заключалась в следующем. Пленочные покрытия формировали соосаждением распыленных в плазме низкого давления ультрадисперсных частиц субнанометрового размера. Соотношение осажденных компонентов контролировали весовым способом – по количеству распыленного и осажденного

металла во время формирования покрытия. Точность определения концентрации компонентов составляла 0.2%. В экспериментах использованы алюминий и магний, содержащие не менее 99,99 мас. % основного элемента. Удельная скорость распыления алюминия определена равной  $68 \pm 1$  мкмоль/(Вт·час), магния -  $199 \pm 13$  мкмоль/(Вт·час).

Рентгеноструктурные исследования выполнены на дифрактометре D8 Advance фирмы Bruker с медным излучением  $\lambda_{\text{CuK}\alpha} = 0.154051$  нм с графитовым монохроматором. Значение параметра решет-ки вычислено как среднее при использовании всех дифракционных линий от данной фазы.

Сформировано 4 состава покрытий, содержащих 21,9; 33,7; 57,6 и 78,6 ат. % Mg.

Дифрактограммы покрытий приведены на рисунке 1.

Покрытие с концентрацией магния 21,9 ат. % (рисунок 1,1) представляет собой твердый рас-твор магния в алюминии, имеющий гранецентрированную кубическую решетку с параметром  $a=0,4072 \pm 0,0001$  нм. Очевидно, что все составы пленочных образцов системы алюминий магний до указанной концентрации магния будут также представлены твердым раствором Mg в Al.

Система с содержанием магния 33,7 ат.% (рисунок 1,2) представлена гексагональной фазой  $\text{Al}_{0,58}\text{Mg}_{0,42}$  с параметрами решетки  $a=0,7669$  нм и  $c=1,9847$  нм. Однако из [1] известно, что темпе-ратурный порог образования этой фазы сплавлением компонентов в обычных условиях составляет  $450^\circ\text{C}$ , в то время как температура получения покрытия с помощью соосаждения ультрадисперс-ных частиц не превышает  $150^\circ\text{C}$ . То есть в этом случае происходит прямой синтез интерметал-лического соединения.

Рисунок 1 –  
Дифрактограммы покрытий  
системы алюминий-магний:

1 – при содержании магния в сплаве 21,9 ат. %;

2 – то же 33,7; 3 – то же 57,6; 4 – то же 78,6;

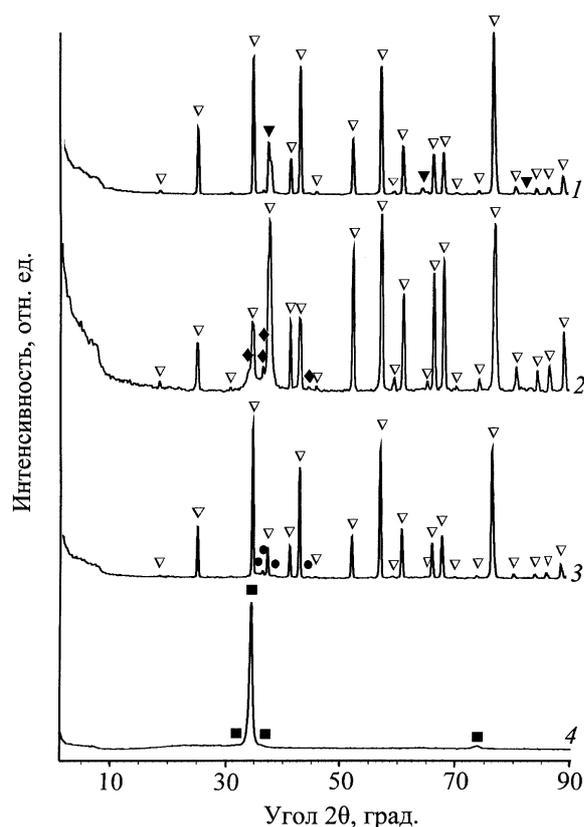
▽ – твердый раствор магния в алюминии;

◆ – гексагональная фаза  $Al_{0,58}Mg_{0,42}$ ;

● – гексагональная фаза  $Al_3Mg_2$ ;

■ – твердый раствор алюминия в магнии;

▽ – поликор (подложка)



Фазовый состав покрытия с содержанием магния с содержанием 57,6 ат. % (рисунок 1,3) и параметры решетки ( $a=0,5899$  нм и  $c=0,9541$  нм) достаточно точно соответствуют известной фазе  $Al_3Mg_2$  (карточка ASTM №44-1154). Но из того же источника известно, что температура образования этой фазы составляет  $460^{\circ}C$ . Таким образом, в данном случае также наблюдается подпороговый механизм образования интерметаллида при пониженных температурах.

Покрытие с содержанием магния 78,6 ат.% (рисунок 1,4) представляет собой твердый раствор алюминия в магнии с запрещенной согласно известной фазовой диаграмме концентрацией магния. Покрытие сильно текстурировано в плоскости (002) кристаллической решетки магния, принадлежащей к гексагональной сингонии. Данный факт хорошо коррелирует с известным правилом кристаллизации металлов из паровой фазы, согласно которому кристаллизация идет в направлении наиболее плотных упаковок атомов.

Области существования твердых растворов и интерметаллических соединений нанесены (рисунок 2) на равновесную диаграмму состояния алюминий-магний [1] в концентрационных границах полученных нами систем. При этом соединение  $Al_{0,58}Mg_{0,42}$  отнесено к области гомогенности  $Al_3Mg_2$ . Совершенно очевидно, что концентрационные границы фаз на диаграмме, равно как и температурные, не являются окончательными и требуют дополнительных исследований.

Таким образом, покрытия, полученные соосаждением ультрадисперсных частиц расплывенных в плазме низкого давления металлов в системе, допускающей существование промежуточных фаз и имеющей ограниченную взаимную растворимость

компонентов, показывают возможность создания твердых растворов с значительно большим уровнем растворимости, а также возможность низкотемпературного синтеза интерметаллидов.

Увеличение взаимной растворимости металлов в этом случае объясняется с позиции представления о термофлуктуационном плавлении [3-6], в соответствии с которым существование малой частицы в квазижидком состоянии ограничено некоторым максимальным размером, при превышении которого условия термофлуктуирования исключаются. Увеличение размера частицы до критического приведет к кристаллизации и образованию твердой фазы.

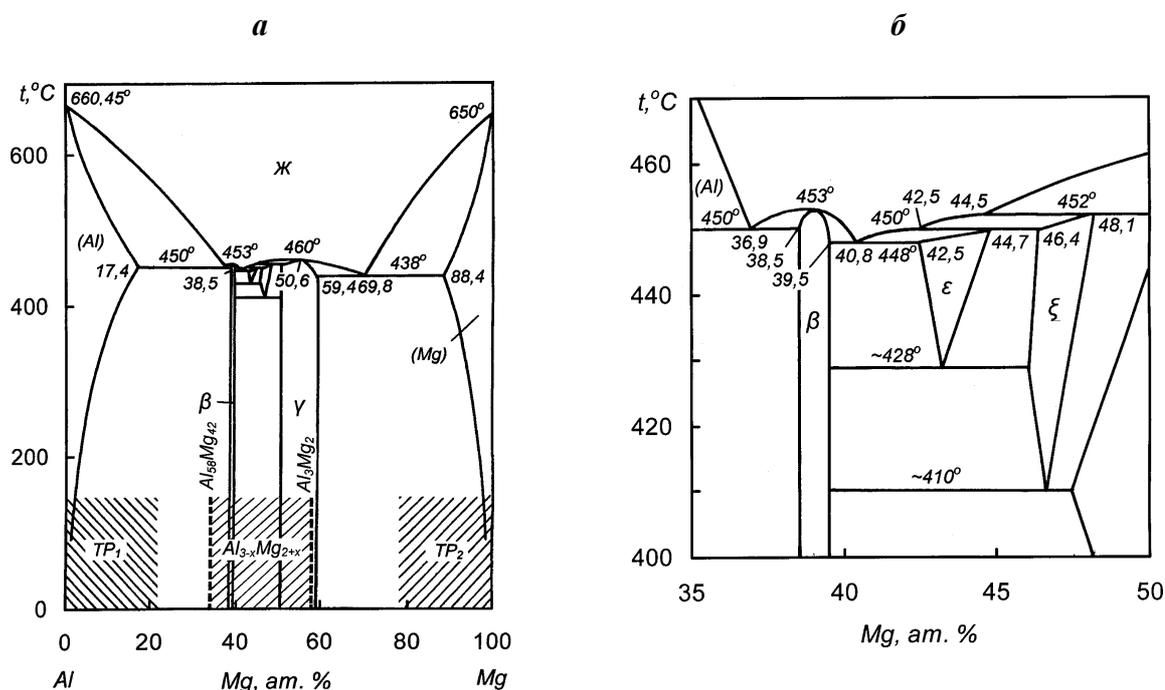


Рисунок 2 – Диаграмма состояния системы алюминий-магний (а) и фрагмент (б) области существования интерметаллических соединений в увеличенном масштабе

При слиянии разноименных металлов, находящихся в квазижидком состоянии в малые капли, размер которых менее критического, будет происходить образование жидкого раствора. Достижение критического размера приведет к его кристаллизации. Но в связи с тем, что растворимость металлов в жидкой фазе часто неограниченна, будет кристаллизоваться твердый раствор высокой концентрации, значительно пересыщенный относительно приведенного на равновесных фазовых диаграммах, полученных плавлением компонентов.

## ЛИТЕРАТУРА

- 1 Диаграммы состояния двойных металлических систем / Под ред. Н. П. Лякишева. – М.: Машиностроение, 1996. – Т. 1. – 992 с.
- 2 Тулеушев Ю.Ж., Володин В.Н., Жаканбаев Е.А. Наноразмернолегированные медью покрытия из бета-тантала: получение, структура и свойства // ФММ. – 2013. – Т. 114, № 7. – С. 625-632.
- 3 Петров Ю.И. Физика малых частиц. – М.: Наука, 1982. – 359 с.
- 4 Морохов И.Д., Трусов Л.И., Лаповок В.Н. Физические явления в ультрадисперсных средах. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 224 с.
- 5 Скрипов В.П., Коверда В.П. Спонтанная кристаллизация переохлажденных жидкостей. – М.: Наука, 1984. – 232 с.
- 6 Родунер Э. Размерные эффекты в наноматериалах. – М.: Техносфера, 2010. – 350 с.

## REFERENCES

- 1 Diagrammy sostojanija dvojnyh metallicheskih sistem / Pod red. N. P. Ljakisheva. – M.: Mashinostroenie, 1996. – T. 1. – 992 s.
- 2 Tuleushev Ju.Zh., Volodin V.N., Zhakanbaev E.A. Nanorazmernolegirovannye me-d'ju pokrytija iz beta-tantala: poluchenie, struktura i svojstva // FMM. – 2013. – T. 114, № 7. – S. 625-632.
- 3 Petrov Ju.I. Fizika malyh chastic. – M.: Nauka, 1982. – 359 s.
- 4 Morohov I.D., Trusov L.I., Lapovok V.N. Fizicheskie javlenija v ul'tradispers-nyh sredah. – M.: Jenergoatomizdat, 1984. – 224 s.
- 5 Skripov V.P., Koverda V.P. Spontannaja kristallizacija pereohlazhdennyh zhid-kostej. – M.: Nauka, 1984. – 232 s.
- 6 Roduner Je. Razmernye jeffekty v nanomaterialah. – M.: Tehnosfera, 2010. – 350 s.

## Резюме

*В. Н. Володин, Ю. Ж. Төлеушев, Е.А. Жақанбаев*

(Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан Республикасы)

### АЛЮМИНИЙ МЕН МАГНИЙ УЛЬТРАДИСПЕРСТІК БӨЛШЕКТЕРІН БІРГЕ ТҰНДЫРУМЕН

#### АЛЫНҒАН ЖАБЫНДАРДЫҢ ҚҰРЫЛЫМЫ

Қыздырылмайтын төсемге төменгі қысымды плазмада тозаңдатылған алюминий мен магний ультра-дисперстік бөлшектерін бірге тұндыру нәтижесінде қорытпа жабындар алынды, олардың құрылымын зерттеу кезінде қатты ерітінділер болуының концентрациялық шекарасының едәуір кеңеюі белгілі болды: алюми-нийдегі магнийдікі 21,9% Al – дейін және де  $Al_3Mg_2$  металаралық қосылысының гомогендік аймағы, фазалар торының параметрлері анықталды. Фазалардың болу өрісінің кеңею себебі өлшемдік фактордың болуы.

**Тірек сөздер:** алюминий, магний, жабын, концентрация, қатты ерітінді, интерметалдық қосылыс, кристал-дық тор.

## Summary

*V. N. Volodin, Yu. Zh. Tuleushev, Y. A. Zhakanbaev*

(Institute of nuclear physics, Almaty, Republic of Kazakhstan)

### STRUCTURE OF THE COATING PRODUCED BY CO-PRECIPITATION

#### ULTRAFINE PARTICLES OF ALUMINUM AND MAGNESIUM

As a result, co-deposition of ultrafine particles of aluminum and magnesium, sputtered in low-pressure plasma, obtained on unheated substrate alloy coating to investigate the structure of which found a significant expansion of the boundaries of existence of the concentration of solid

solutions: magnesium in aluminum up to 21.9 at. % Mg and aluminum magnesium to 21.4 at. % Al, as well as the homogeneity of the intermetallic compound  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$ , the parameters of the phase grating. The reason for the existence of a field extension phase is the size factor.

**Keywords:** aluminum, magnesium, coating concentration, solid solution, intermetallic compound, the crystalline lattice.

*Поступила 2.09.2013г.*