

Согласно модели Wynblatt и Ku, наиболее эффективным металлом, среди рассмотренных, понижающим зернограничную энергию железа и соответственно повышающий термическую стабильность является иттрий, в то время как никель будет давать обратный эффект, при условии, что данные металлы будут сегрегировать в приграничные области железной матрицы.

Таким образом, экспериментальные данные и результаты теоретических расчетов свидетельствуют о том, что зернограничные сегрегации вольфрама в железной матрице, приводят к снижению энергии границ зерен железа.

#### Список литературы

1. Носкова Н.И., Мулюков Р.Р. Субмикроструктурные и нанокристаллические металлы и сплавы. Екатеринбург: УрО РАН, 2003.
2. Андриевский Р.А. Термическая стабильность наноматериалов // Успехи химии, 2002, т.71, №10. – с. 967-981.
3. Бармин А. Е., Ильинский А. И., Зубков А. И. Субмикро- и нанокристаллические вакуумные конденсаты (фольги) на основе железа // Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии. 2010, т. 8, № 3, с. 547—551.
4. Бармин А. Е., Ильинский А. И., Зубков А. И. Сегрегационные явления в вакуумно-осажденных нанокompозитах Fe-W // Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии. - 2012, т. 10, № 2, с. 387—391.
5. Barmin A.E., Zubkov A.I., Il'inskiĭ A.I. Structural features of the vacuum condensates of iron alloyed with tungsten // Functional Materials 2012 – Vol. 19, №2. – p. 256-259.
6. Бармин А.Е. Термическая стабильность структуры и свойств вакуумных конденсатов Fe и Fe-W // Вестник НТУ «ХПИ», Сборник научных трудов, Тематический выпуск «Новые решения в современных технологиях» В. 9. – Харьков, 2012. – с. 82-87.
7. Wynblatt P., Chatain D., // Metall. Mater. Trans. A 37A – 2006, p.2595.
8. Darling K.A., VanLeeuwen B.K., Semones J.E., Koch C.C., Scattergood R.O., Kecskes L.J., Mathaudhu S.N. Stabilized nanocrystalline iron-based alloys: Guiding efforts in alloy selection //Materials Science and Engineering, A 528 – 2011, pp.4365–4371.
9. Boer F.R., Boom R., Mattens W.C.M., Miedema A.R., Niessen A.K. Cohesion in Metals: Transition Metal Alloys. North-Holland 1988.
10. Vitos L., Ruban A.V., Skriver H.L., Kollar J. The Surface Energy of Metals // Surf. Sci., - 1998,411, pp.186-202.

## СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ВАКУУМНЫХ ПСЕВДОСПЛАВОВ Cu-W

Зубков А.И., Зозуля Э.В., Афанасьева А.А., Власов В.В., Родкина Ю.Е.

*Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»,  
г. Харьков, Украина,  
[anzubkov@km.ru](mailto:anzubkov@km.ru)*

Работа посвящена изучению структуры и физико-механических свойств вакуумных псевдосплавов Cu-W. Следует отметить, что в бинарной системе Cu-W в равновесных условиях отсутствуют взаимная растворимость. В массивном состоянии такие материалы, получаемые порошковыми технологиями, называют – псевдосплавами.

Объектом исследований являлись отделенные от не ориентирующей подложки конденсаты Cu-W, полученные кристаллизацией смесей их паров в вакууме. Испарение меди и вольфрама осуществляли из разных источников путем их нагрева электронными пучками. Образцы получали при различных температурах полужки ( $T_p$ ). Концентрацию вольф-

рама варьировали в диапазоне 0,1–0,5 ат. %. Структуру фольг в исходном конденсированном состоянии изучали методами просвечивающей электронной микроскопии и рентгеновской дифрактометрии. Элементный состав определяли рентгеноспектральным методом. Исследовали механические свойства в режиме активного растяжения, микротвердость и удельное электросопротивление ( $\rho$ ).

Структурное состояние псевдосплава зависит от содержания вольфрама. На рис.1 представлены концентрационные зависимости условного размера зерна ( $L$ ) медной матрицы и периода ее решетки ( $a$ ), для образцов полученных при фиксированной температуре порошки ( $T_n$ ). Их характерной особенностью является – двухстадийность. При концентрации вольфрама менее ~0,35 ат. % наблюдается резкое снижение величины зерна и увеличение периода решетки, что свидетельствует о формировании аномального пересыщенного твердого раствора вольфрама в кристаллической решетке меди. Механизм этого ранее обнаруженного явления обсуждается в работе [1]. В объеме конденсата, в данном диапазоне концентраций вольфрама, не удалось используемыми методами обнаружить второй фазы. Дальнейшее увеличение содержания  $W$  приводит к незначительному росту величины периода решетки и выходу на насыщение зависимости  $L \sim f(C_W \text{ ат. \%})$ . При этом в объеме медной матрицы обнаруживаются высокодисперсные частицы ОЦК вольфрама. Их средний размер составляет 5–8 нм и практически не зависит от концентрации вольфрама.

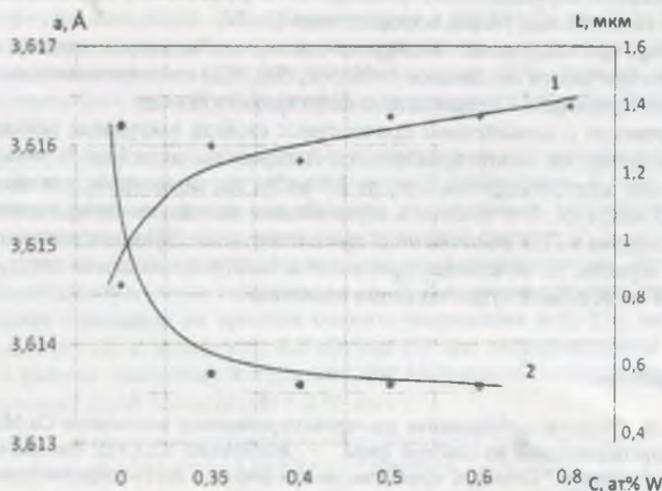


Рис. 1. Концентрационная зависимость периода решетки (1) и размера зерна (2) медной матрицы псевдосплава Cu-W

Увеличение температуры осаждения приводит к росту минимально достигаемого размера зерна от 0,2 до 0,6 мкм и уменьшению содержания  $W$ , соответствующего точке перегиба зависимости  $L \sim f(C_W \text{ ат. \%})$  от 0,35 ат. % до 0,1 ат. %. Такой характер концентрационных зависимостей величины  $L$  наблюдался и для вакуумных конденсатов Cu-Mo [2]. Наблюдаемое диспергирование зеренной структуры медной матрицы можно объяснить обогащением ее границ  $W$  при конденсации двухкомпонентного пара. Атомы  $W$ , диффундирующие по фронту кристаллизации скапливаются на поверхности зародышей меди, нарушают их рост и препятствуют коалесценции во время конденсации [3]. Указанные предположения подтверждаются грубой оценкой количества атомов  $W$  необходимого для образования на поверхности минимального размера зерна, который достигается при фиксированной  $T_n$ . Предположим, что это то количество атомов вольфрама, которое достаточно для полного блокирования роста зерна медной матрицы. Если в первом приближе-

нии принять форму зерна за сферу, например диаметром 300 нм, то при атомном радиусе Cu составляющем 0,128 нм [4], в нем будет содержаться примерно  $1,6 \times 10^9$  атомов меди. Атомный радиус W составляет 0,141 нм [4], тогда для покрытия поверхности зерна меди монослоем потребуется примерно  $4,5 \times 10^8$  атомов вольфрама, что составляет  $\sim 0,28$  ат.%. Экспериментально определенная концентрация W соответствующая точке перегиба концентрационной зависимости от размера зерна, полученных этих условиях составляет  $\sim 0,38$  ат.%. Таким образом, разница между оценкой и экспериментом составляет 0,1%, это примерно третья часть от общего количества сконденсированных атомов W. По-видимому, вольфрам также входит в кристаллическую решетку медного образца, образуя аномально пересыщенный твердый раствор, о чем свидетельствует повышение значений периода решетки Cu. Хорошее соответствие проведенных расчетов и экспериментальных данных еще не дает точной информации о структуре зернограничной сегрегации, толщине обогащенного слоя, характере изменения зернограничной энергии и других параметров, которые описывают состояние границ зерен вакуумных псевдосплавов. Вместе с тем эти представления позволяют объяснить некоторые свойства этих материалов, например высокую термическую стабильность структуры и свойств [5].

Высокая степень дисперсности зеренной структуры медной матрицы, наличие в ее объеме высокодисперсных частиц ОЦК вольфрама нанометровой размерности, формирование аномального пересыщенного раствора W в решетке Cu обуславливает высокие прочностные свойства вакуумных псевдосплавов Cu-W.

Например, при содержании вольфрама около 1 ат. %, микротвердость, предел текучести и предел прочности составляют 1600, 500, 600 МПа соответственно, что примерно в 3 раза выше по сравнению с конденсатами нелегированной меди.

Одновременно с повышением прочностных свойств вакуумных псевдосплавов наблюдается снижение их электропроводности. Легирование меди 1 ат. % вольфрама увеличивает удельное электросопротивление от 1,7 мкОм см, характерное для чистой меди, до примерно 3,5 мкОм см. Это связано с образованием аномально пересыщенного твердого раствора вольфрама в ГЦК решетке меди при конденсации двухкомпонентного пара.

Таким образом, по сочетанию прочности и электропроводности вакуумные псевдосплавы Cu-W не уступают существующим аналогам.

## Список литературы

1. Зубков А.И. Структурообразование дисперсноупрочненных композитов Cu-Mo, W, Ta, полученных кристаллизацией из паровой фазы – Материалы XXXVIII семинара “Актуальные проблемы прочности” Сплавы с эффектом памяти формы и другие перспективные материалы. – Санкт-Петербург. – 2001. – Ч. 2.
2. Зубков А.И., Панова Ю.В.//Структура и прочность нанофазных конденсатов Cu-Mo// Вестник НТУ «ХПИ»-2011г.-№.24-с.93-98.
3. Палатник Л.С., Фукс М.Я., Косевич В.М. Механизм образования и субструктура конденсированных пленок.- Москва:Наука, 1972.- 318 с
4. К. Дж. Смитлз. Металлы. Справочник. М., 1980г.,447с.
5. Зубков А.И. Термическая стабильность нанокompозитов кристаллизуемых в вакууме // Вестник Тамбовского университета том XV, Вып. 3, 2010 г., 846-848 с.