

# СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ И СВОЙСТВА ДИСПЕРСНО-ТВЕРДЕЮЩИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ СОВМЕСТНЫМ СООСАЖДЕНИЕМ ОТДЕЛЬНЫХ КОМПОНЕНТ ПАРОВОЙ ФАЗЫ С ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ТЕРМООБРАБОТКОЙ

*А.И.Зубков, А.И.Ильинский, В.М.Шулаев\*, О.А.Подгорная, А.В.Субботин*

*НТУ ХПИ г. Харьков, Украина;*

*\*Национальный научный центр ХФТИ, г. Харьков, Украина*

Методами рентгенодифрактометрії та просвічуючої електронної мікроскопії досліджена структура плівок сплавів міді з тугоплавкими металами (Mo, W, Ta), отриманих кристалізацією із парової фази у вакуумі. Показано, що ці елементи, що не розчиняються в рівноважних умовах, утворюють пересичені тверді розчини з аномально високим рівнем фізико-механічних властивостей. При подальшій термообробці вихідних сплавів виявлено ефект незворотного розпаду пересиченого твердого розчину. Отримані структури сплавів це типові дисперсно зміцнені матеріали.

Методами рентгенодифрактометрии и просвечивающей электронной микроскопии исследована структура пленок сплавов меди с тугоплавкими металлами (Mo, W, Ta), полученных кристаллизацией из паровой фазы в вакууме. Показано, что указанные элементы, не растворимые в равновесных условиях, образуют пересыщенные твердые растворы, отличающиеся аномально высоким уровнем физико-механических свойств. При последующей термообработке исходных сплавов обнаружен эффект необратимого распада пересыщенного твердого раствора. Полученные структуры сплавов представляют собой типичные дисперсно-упрочненные материалы.

The structure of films consisting of copper alloys with high-melting metals (Mo, W and Ta) prepared by vapor phase crystallization in vacuum has been studied using X-ray diffractometry and transmission electron microscopy. The mentioned elements, being insoluble in equilibrium conditions, have been shown to form supersaturated solid solutions characterized by uniquely high physical and mechanical properties. At the subsequent heat treatment of initial alloys the effect of irreversible disintegration oversaturated a firm solution is found out. The received structures of alloys represent typical age-hardened materials.

## Введение

Как известно, принцип упрочнения дисперсными частицами используется для повышения механических свойств металлических материалов. Наиболее известны два типа объектов этого класса – дисперсионно-твердеющие (стареющие) сплавы и дисперсно-упрочненные композиционные материалы. Первые отличаются высокой прочностью при умеренных температурах, вторые – термической стабильностью структуры и соответственно повышенной прочностью при высоких температурах.

## Цель, методика

Практически возможно получение новых композиционных материалов, сочетающих достоинства стареющих сплавов и композитов.

Изучали кристаллизуемые из паровой фазы фольги бинарных систем Cu-Mo, W, Ta толщиной 20...40 мкм. Отметим, что изучаемые системы Cu-Mo, W, Ta не имеют взаимной растворимости в равновесных условиях [1]. Содержание Mo, W, Ta в объектах составляло до 2 ат. % и контролировалось рентгенофлуоресцентным спектральным анализом. Структуру изучали методами просвечивающей электронной микроскопии и рентгеновской дифрактомет-

рии по методике, изложенной в работах [2, 3]. Измерения прочностных свойств проводили в режиме активного растяжения [4], электросопротивление фольг контролировали компенсационным способом [5].

## Результаты и их обсуждение

После конденсации смеси паров основного компонента – меди и легирующей примеси – структура объектов является двухфазной [6, 7]. Матрица представляет собой пересыщенный раствор легирующего компонента в кристаллической решетке меди с размером зерна 0,2...0,5 мкм. Вторая фаза – частицы Mo, W, Ta, равномерно распределенные по объему матрицы. Факт образования пересыщенных растворов Mo, W, Ta на основе меди убедительно подтверждают данные по измерению периода решетки и электросопротивления (рис.1, 2). В исходном состоянии фольги обладают высокими прочностными свойствами (рис. 3). Видно, что легирование меди молибденом, вольфрамом и танталом в небольших количествах (до 1,5 ат. %) приводит к резкому возрастанию прочностных свойств. Так, например, для системы Cu-Ta при содержании тантала около 1 ат. % предел текучести возрастает почти на порядок. Подобный эффект в массивных

композициях реализуется лишь при содержании легирующего компонента около 8...10 ат. %.

Столь высокая прочность фольг, по-видимому, объясняется суммарным действием твердорастворного, дисперсного и зернограничного упрочнения. Действительно, из рис. 1, 2 видно, что период решетки и электросопротивление в системе Cu-Ta имеют повышенное значение по сравнению с другими объектами. Вместе с тем, образование твердого раствора существенно снижает электрофизические свойства (рис. 2). Видно, что в системе Cu-Ta это проявляется наиболее резко.

Структура и соответственно физические свойства изучаемых объектов являются стабильными в широком температурном интервале. Так, например, данные рис.4 свидетельствуют о том, что распад

пересыщенных растворов в изучаемых системах происходит в области температур 600 °С. Для сравнения отметим, что верхняя граница стабильности известных пересыщенных растворов на основе меди не превышает 400 °С [8]. Необходимо подчеркнуть то важное обстоятельство, что распад пересыщенного раствора имеет необратимый характер. Последующий нагрев фольг, вплоть до температуры плавления матрицы, не приводит к обратному растворению легирующего элемента в решетке меди. Это отличие от обычных сплавов металлургического происхождения позволяет избавиться от существенного недостатка стареющих сплавов обратного растворения частиц второй фазы и, вледствие этого, разупрочнения при нагреве.

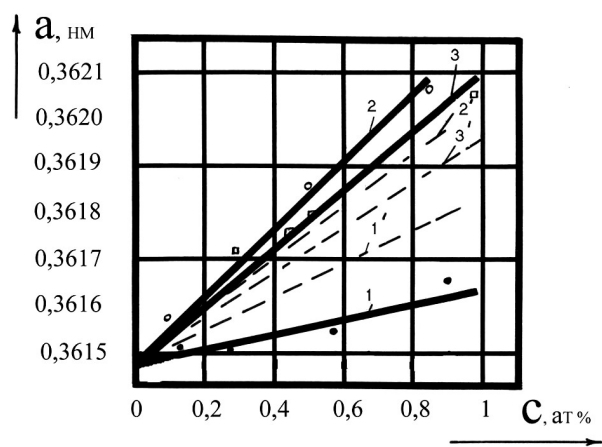


Рис.1. Зависимость периода решетки ГЦК – медной матрицы от содержания W, Ta, Mo: 1 – Cu-W; 3' – прямые Вегарда для Cu-W; 2 – Cu-Ta; 2' – прямые Вегарда для Cu-Ta; 3 – Cu-Mo; 1' – прямые Вегарда для Cu-Mo

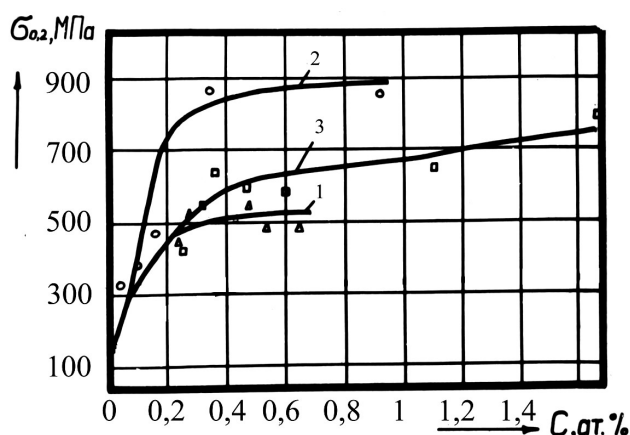


Рис. 3. Концентрационная зависимость предела текучести фольг: 1 – Cu-Mo; 2 – Cu-Ta; 3 – Cu-W

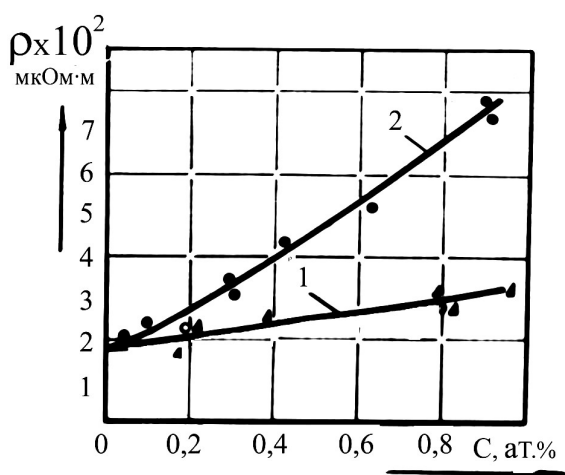


Рис.2. Концентрационная зависимость удельного электросопротивления фольг: 1 – Cu-W; 2 – Cu-Ta

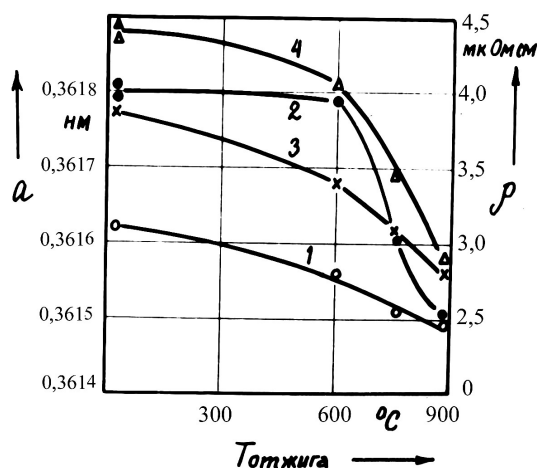


Рис.4. Влияние температуры отжига (время отжига 2 ч) на период решетки медной матрицы и удельное электросопротивление: 1,3 – Cu-Mo; 2,4 – Cu-W

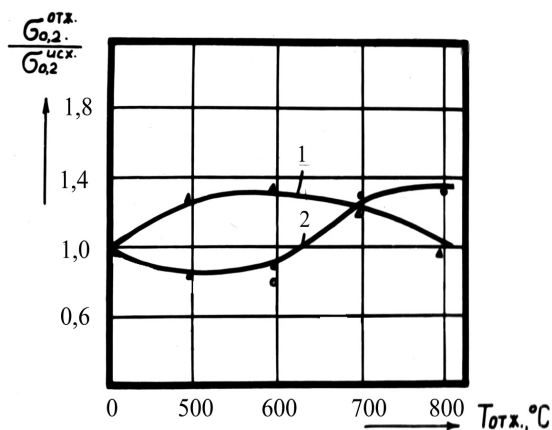


Рис. 5. Влияние температуры отжига (время отжига 0,5 ч) на предел текучести фольг:  
1 – Cu-W; 2 – Cu-Ta

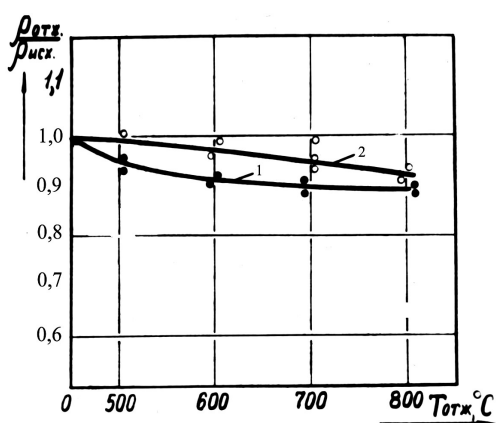


Рис. 6. Влияние температуры отжига на удельное электросопротивление фольг:  
1 – Cu-W; 2 – Cu-Ta

Распад пересыщенных растворов в определенных условиях сопровождается появлением характерного для стареющих сплавов пика дисперсионного твердения (рис. 5). Его высота и положение [5, 9] зависят от температуры, изотермического отжига, степени пересыщения и других факторов. По своему структурному состоянию после распада пересыщенного раствора объекту являются типичными дисперсно-упрочненными композиционными материалами. Важно отметить, что приведенные данные свидетельствуют о том, что в результате отжига предел текучести Cu-W и Cu-Ta увеличивается почти на 40%. Одновременно с этим происходит снижение удельного электросопротивления (рис. 6). В результате после отжига при температурах 600... 800 °C происходит улучшение как прочностных, так

и электрофизических свойств сплавов на основе меди. Таким образом, в результате соосаждения смеси паров взаимно нерастворимых металлов на холодной подложке в вакууме и последующей термообработки были получены дисперсно-упрочненные композиционные материалы, сочетающие достоинства стареющих сплавов и дисперсно-упрочненных композиционных материалов.

## Литература

1. Двойные и многоэлементные системы на основе меди. М.: «Наука», 1979, с. 248
2. А.И.Ильинский, М.Я.Фукс, А.В.Аринкин, А.И.Зубков, Ю.Л.Базаров. Структура быстрозакаленных пленок сплавов Cu-Mo // *Физика металлов и металловедение*. 1985, т. 60, вып. 5, с. 943-947.
3. А.И.Ильинский, А.И.Зубков, А.В.Субботин, С.В.Русинова. О структуре пересыщенных сплавов меди с тугоплавкими металлами // *Функциональные материалы*. 1992, т.6, №5, с. 677-879.
4. А.И.Ильинский, Г.Е.Лях. Методы механических испытаний пленок и фольг // *Зав. лабораторией*. 1976, т. 44, №2, с.1507-1511
5. А.И.Зубков, А.И.Ильинский, О.А.Подгорная, В.И.Севрук, Я.Г.Сокол-Прусский. О возможности старения быстрозакаленных сплавов Cu-Mo // *Физика металлов и металловедение*. 1990, №10, с. 197-199.
6. А.И.Ильинский, А.И.Зубков, Л.С.Палатник, В.С.Коган, В.М.Шулаев. Механизм осаждения конденсатов из двухкомпонентной (Cu, Mo) гомогенной паровой фазы и структура полученных композитов: Препринт ХФТИ 86-9 М.: «ЦНИИ-атоминформ», 1986.
7. А.И.Ильинский, А.И.Зубков, Л.С.Палатник, В.С.Коган, В.М.Шулаев. Структура и механизм образования конденсированных дисперсно-упрочненных композиций медь-молибден // *Вопросы атомной науки и техники. Серия: «Ядерно-физические исследования»*, 1990, вып.4(12), с. 65-67.
8. К.П.Пастухова, А.Г.Рахштадт. Пружинные сплавы цветных металлов. М.: «Металлургия», 1983, с. 340.
9. А.И.Ильинский, А.И.Зубков, А.В.Субботин, О.А.Подгорная. О старении быстрозакаленных сплавов на основе меди // *Функциональные материалы*. 1994, т.1, №2 с. 73-77.