

## Структура и физико-механические свойства композиционных материалов Cu—NbC, полученных методом электронно-лучевого испарения-конденсации

В. Г. Гречанюк, А. Г. Косторнов

*Рассмотрено влияние упрочняющей фазы карбида ниобия на структуру и физико-механические свойства композиционных материалов, полученных методом электронно-лучевого испарения-конденсации. Показано, что увеличение концентрации второй фазы приводит к существенному измельчению зерна. Твёрдость двухфазных конденсатов растёт пропорционально содержанию второй фазы, плотность практически не изменяется. Пределы прочности и текучести повышаются с увеличением концентрации карбида ниобия, пластичность снижается.*

**Ключевые слова:** электронно-лучевое испарение, композиционный материал, упрочняющая фаза, механические свойства.

### Введение

Благодаря высокой тепло- и электропроводности, коррозионной стойкости, прочности, возможности работать при повышенных температурах композиционные материалы на основе меди в настоящее время находят широкое применение в различных областях науки и техники [1—3]. Возможность регулирования в широких пределах физико-механических свойств дает метод электронно-лучевого испарения-конденсации [4, 5].

Для улучшения механических свойств меди используют дисперсное упрочнение. Как известно [6], взаимодействие на межфазной границе частица—матрица характеризуется краевым углом смачивания металлическими расплавами тугоплавких соединений. Чем выше краевой угол смачивания, тем меньше межфазное взаимодействие и степень упрочнения матрицы. Поскольку краевой угол смачивания карбида ниобия жидкой медью при 1100 °С в вакууме составляет 70° [7], карбидное упрочнение медной матрицы будет эффективным. Кроме того, целесообразность применения карбида ниобия в качестве упрочняющей добавки медной матрицы обусловлена его высокой температурой плавления, высоким модулем упругости, нерастворимостью и не взаимодействием с медью при высоких температурах.

### Методика эксперимента

Двухфазные конденсаты систем Cu—NbC получали одновременным испарением в вакууме  $10^{-2}$ — $10^{-3}$  Па из двух независимых источников (меди и карбида ниобия) с последующей конденсацией смешанного парового потока на нагретую до  $700 \pm 15$  °С подложку из Ст.3. При такой температуре подложки обеспечивалось получение материала высокой плотности с равновесной структурой. В качестве исходных материалов использовали медь марки МОБ (ГОСТ 859-78) и карбид ниобия марки Ч (МРТУ-6-09-5896-69).

Штабики карбида ниобия диаметром 64—68 мм прессовали из порошка NbC и затем спекали. Удельное давление прессования составляло 4,5—5 ГПа. Штабики спекали при температуре 2200—2350 °С в среде водорода в течение 3—5 ч.

Скорость конденсации меди и карбида ниобия составляла 10—15 и 0,5—3 мкм/мин соответственно. Для лёгкого отделения конденсата от подложки на нее предварительно наносили слой ZrO<sub>2</sub> толщиной 10—15 мкм. Полученные конденсаты представляли собой листы размером 350×250×0,8—1,2 мм с градиентом концентрации карбида ниобия 0—6,22% (мас.). Из полученных конденсатов готовили образцы необходимых для исследования размеров.

Металлографические исследования, изучение тонкой структуры, фазового состава конденсатов, их кратковременных механических свойств при комнатной температуре на воздухе и при 600 °С в вакууме, электропроводности, коррозионной стойкости проводили по стандартным методикам [8, 9].

### Экспериментальная часть

Металлографические исследования шлифов поперечных сечений композиционных материалов Cu—NbC позволили определить влияние количества упрочняющей фазы на характер структуры двухфазных композиций (рис. 1). С увеличением концентрации карбида ниобия происходит измельчение зерна. Наиболее заметное измельчение кристаллитов наблюдается в области малых концентраций (до 1% (мас.)) NbC (рис. 2). Последующее увеличение концентрации карбида ниобия вызывает дальнейшее измельчение элементов структуры конденсатов, однако скорость этого процесса заметно уменьшается.

При содержании второй фазы более 3,5% (мас.) микроструктура гетерофазных конденсатов становится настолько дисперсной, что плохо разрешается с помощью оптического микроскопа. Отмеченное измельчение структуры можно объяснить влиянием дисперсных частиц на

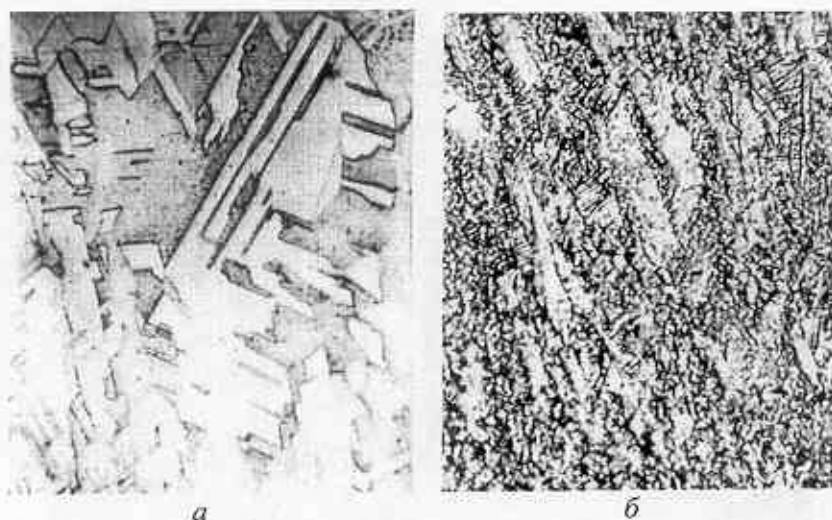


Рис. 1. Микроструктуры (х300) вакуумных конденсатов Cu (а) и Cu—0,34% (мас.) NbC (б).

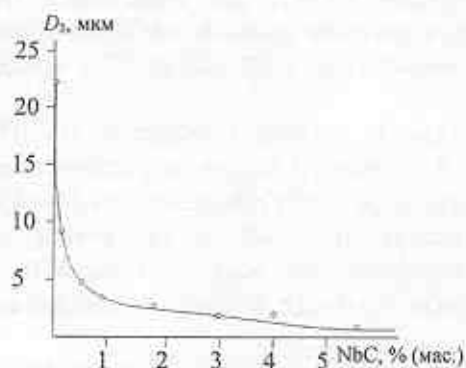


Рис. 2. Зависимость среднего размера зерна  $D$  от содержания второй фазы в конденсатах Cu—NbC.

процесс рекристаллизации [10, 11]. Это влияние усиливается с возрастанием количества дисперсной фазы, которая тормозит процесс рекристаллизации. Замедление рекристаллизации меди высокодисперсными частицами второй фазы происходит по двум причинам: замедляется или тормозится образование зародышей рекристаллизации и замедляется рост новых зёрен из-за взаимодействия движущейся границы зёрен с дисперсными частицами [12].

Параметр кристаллической решётки медной матрицы в конденсатах Cu—NbC совпадает в пределах ошибки измерения ( $\pm 0,002$  нм) с параметром решётки конденсатов чистой меди  $a = 0,3615$  нм [13]. Величина постоянной решётки NbC также не изменяется с увеличением количества легирующей добавки в конденсатах. На основании этих данных можно сделать вывод, что заметного взаимодействия между медью и карбидом ниобия в процессе их совместной конденсации не происходит.

Электронно-микроскопические исследования на просвет специально приготовленных фольг конденсатов медь—карбид ниобия позволили определить размеры и форму дисперсных частиц в зависимости от количества вводимой в медную матрицу упрочняющей фазы NbC. На основании полученных экспериментальных данных можно заключить, что частицы карбида ниобия имеют округлую, слегка вытянутую форму и их размер увеличивается с повышением концентрации NbC (рис. 3). Так, например, если при содержании в меди 1% (мас.) NbC размер частиц составляет около 10 нм, то при повышении концентрации упрочняющей фазы до 5% он возрастает примерно в четыре раза и составляет 40 нм.

Вторая фаза заметно увеличивает твёрдость меди. При введении NbC в количестве около 1% (мас.) микротвёрдость возрастает примерно в два раза (рис. 4). По мере дальнейшего повышения концентрации упрочняющей добавки NbC твёрдость двухфазных конденсатов растёт пропорционально её содержанию.

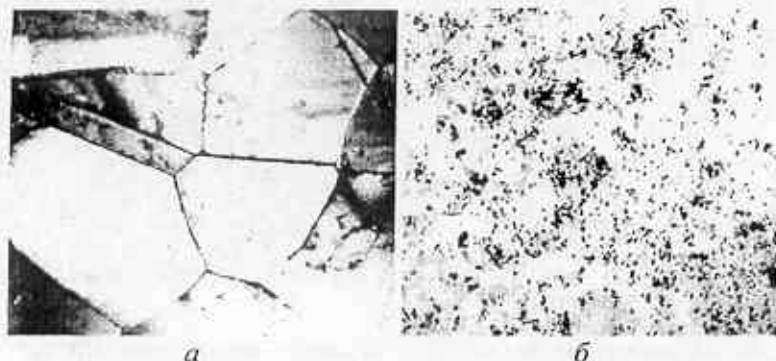
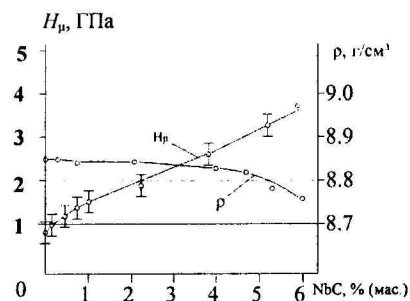


Рис. 3. Электронно-микроскопические снимки структур конденсатов Cu (а,  $\times 8000$ ) и Cu—5% (мас.) NbC (б,  $\times 80\,000$ ).

Рис. 4. Зависимости микротвёрдости  $H_{\mu}$  и плотности  $\rho$  от содержания второй фазы в композиционных материалах Cu—Nb.



Плотность чистой меди и карбида ниобия составляет соответственно  $8,94 \cdot 10^3$  и  $7,85 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> [7, 10]. Введение второй фазы в медную матрицу практически не приводит к изменению экспериментальной плотности в пределах, рассчитанных по правилу смесей (рис. 4). Следовательно, структура двухфазных конденсатов остаётся плотной во всём исследуемом диапазоне концентраций упрочняющей добавки.

Испытания образцов конденсатов на растяжение при комнатной температуре показывают, что повышение содержания NbC приводит к возрастанию пределов прочности и текучести во всём исследуемом диапазоне концентраций фаз (рис. 5, а). Введение в медную матрицу карбида ниобия в количестве 1,5% (мас.) способствует увеличению временного сопротивления разрыву и предела текучести матричного металла соответственно в 2 и 4 раза.

Пластичность конденсатов резко снижается в области малых добавок NbC (до 0,75%). Характерной особенностью системы Cu—NbC является наличие пика пластичности при содержаниях карбида ниобия около 1%. Как показали электронно-микроскопические исследования, максимальной пластичностью обладают двухфазные конденсаты, в которых выполнено структурное условие  $D = \Lambda$ . Дальнейшее повышение содержания карбида ниобия (до 5%) приводит к снижению  $\delta$  до 2%.

Подобно конденсатам, испытанным при комнатной температуре, пределы прочности  $\sigma_b$  и текучести  $\sigma_{0,2}$  при 600 °С возрастают с увеличением концентрации карбида ниобия (рис. 5, б). При этом абсолютные величины пределов прочности и текучести значительно ниже. Относительное удлинение конденсатов при 600 °С сначала резко снижается

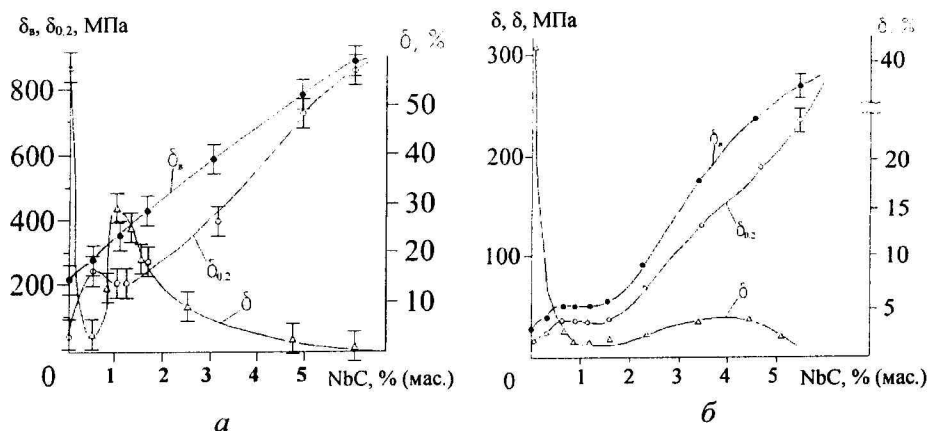


Рис. 5. Зависимости пределов прочности  $\sigma_b$  и текучести  $\sigma_{0,2}$  и относительного удлинения  $\delta$  конденсатов Cu—NbC от содержания карбида ниобия при температурах испытаний 20 (а) и 600 °С (б).

в интервале концентраций NbC 0—0,75% (мас.), а затем остаётся практически неизменным с ростом содержания карбида ниобия.

Несмотря на общее снижение уровня прочностных характеристик при температуре испытаний 600 °С, композиции, содержащие более 3,5% (мас.) NbC, по механическим свойствам не уступают значениям  $\delta_b$  и  $\delta_{0,2}$ , полученным для чистой меди при комнатной температуре. Проведенные исследования показали, что карбид ниобия является эффективным упрочнителем, однако при его введении резко снижается пластичность композиционных материалов Cu—NbC.

1. *Портной К. И., Бабич Б. Н.* Дисперсно-упрочнённые материалы. — М.: Металлургия, 1974. — 199 с.
2. *Цветные металлы: алюминий, медь, титан.* (Справ. бизнесмена). — К.: Внешторгиздат, 2007. — 385 с.
3. *Гречанюк И. Н., Гречанюк В. Г., Емельянов Б. Г., Руденко И. Ф.* Коррозия композиционных материалов на основе меди, используемых для электрических контактов // Электрические контакты и электроды. — К.: Ин-т пробл. материаловедения НАН Украины, 1998. — С. 140—144.
4. *Демчишин А. В.* Структура и свойства толстых вакуумных конденсатов металлических материалов и научные основы электронно-лучевой технологии их получения: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — К.: Ин-т электросварки НАН Украины, 1981. — 35 с.
5. *Мовчан Б. А.* Неорганические материалы, осаждаемые из паровой фазы в вакууме // Современное материаловедение XXI. — К.: Наук. думка, 1998. — С. 318—332.
6. *Найдич Ю. В.* Контактные явления в металлических расплавах. — К.: Наук. думка, 1972. — 196 с.
7. *Самсонов Г. В., Этик А. П.* Тугоплавкие покрытия. — М.: Металлургия, 1973. — 399 с.
8. *Тучинский Л. И., Плохов А. В.* Исследование структуры и физико-механических свойств покрытий. — Новосибирск: Наука, 1986. — 197 с.
9. *Геллер Ю. А., Рахитадт А. Г.* Материаловедение, методы анализа, лабораторные работы и задачи. — М.: Металлургия, 1983. — 384 с.
10. *Мильман Ю. В., Рябошапка К. П.* О рекристаллизации дисперсно-упрочнённых сплавов с ОЦК решёткой // Физика металлов и металловедение. — 1971. — 32, вып. 5. — С. 998—1001.
11. *Афоница Т. М., Бурлаков С. Ф.* Влияние легирования карбидами титана, циркония и ниобия на структуру и свойства деформированных и отожжённых сплавов молибдена // Там же. — 1971. — 32, вып. 1. — С. 114—122.
12. *Физическое металловедение* / Под ред. Р. Коно. — М.: Мир, 1968. — 484 с.
13. *X-Ray diffraction dana cards* // Committee of Chemical Analysis by X-Ray Diffraction Met Hools. — Philadelphia: ASTM, 1975.

### **Структура і фізико-механічні властивості композиційних матеріалів Cu—NbC, отриманих методом електронно-променевого випаровування-конденсації**

В. Г. Гречанюк, А. Г. Косторнов

*Розглянуто вплив зміцнюючої фази карбиду ніобію на структуру і фізико-механічні властивості композиційних матеріалів, отриманих методом*

електронно-променевого випаровування-конденсації. Показано, що збільшення концентрації другої фази приводить до суттєвого подрібнення зерна. Твердість двофазних конденсатів зростає пропорційно вмісту другої фази, щільність практично не змінюється. Границі міцності і плинності підвищуються зі збільшенням концентрації карбиду ніобію, пластичність знижується.

**Ключові слова:** електронно-променеве випаровування, композиційний матеріал, зміцнююча фаза, механічні властивості.

## **Structure and mechanical properties of composite materials Cu—NbC, obtained by electron beam evaporation-condensation**

V. G. Grechanyuk, A. G. Kostornov

*The effect of the strengthening phase of niobium carbide on the structure and mechanical properties of composite materials obtained by electron-beam evaporation and condensation. It is shown that increasing the concentration of the second phase lead to a significant refinement of the grain. The hardness of the two-phase condensates is proportional to the content of the second phase, the density remains almost unchanged. Tensile strength and yield strength increased with increasing concentrations of niobium carbide, plasticity is reduced.*

**Keywords:** electron beam evaporation, composite material, hardening phase, the mechanical properties.