

## **ВЛИЯНИЕ НИОБИЯ НА СТРУКТУРУ И ПРОЧНОСТЬ ВАКУУМНЫХ КОНДЕНСАТОВ И ОТЛИВОК МЕДИ**

**Зубков А.И.<sup>1</sup>, Соболев О.В.<sup>1</sup>, Крещенко В.А.<sup>2</sup>, Рудь Н.Д.<sup>3</sup>, Рябоштан В.А.<sup>1</sup>,  
Жадько М.А.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", г. Харьков, Украина,*

<sup>2</sup>*Государственное предприятие Научно-производственный комплекс газотурбостроения «Зоря» – «Машпроект», г. Николаев, Украина,*

<sup>3</sup>*АО «Мотор Сич», г. Запорожье, Украина,  
anatoly.i.zubkov@gmail.com*

Рекордный уровень термической стабильности наноразмерной зеренной структуры вакуумных конденсатов меди, легированных молибденом, вольфрамом или танталом, обусловлен сегрегацией атомов этих тугоплавких металлов на границах зерен матричного металла – меди [1]. Однако такие сплавы не удается получить кристаллизацией из расплавов, так как молибден, вольфрам и тантал нерастворимы в расплаве меди, а их температуры плавления превышают температуру кипения меди. Поэтому остается открытым вопрос о том, насколько закономерности формирования зернограницных сегрегаций, наблюдаемых при конденсации из паровой фазы, распространяются на аналогичные процессы при кристаллизации расплавов.

Исследования в этом направлении перспективно проводить на бинарной системе Cu-Nb, которая в твердом состоянии близка по свойствам системам Cu-Mo, Cu-W и Cu-Ta, но, в отличие от них, сплавы Cu-Nb можно получать, как кристаллизацией из расплавов [2], так и порошковыми [3] и вакуумными технологиями [4].

В этой связи целью данной работы является изучение влияния ниобия на структуру конденсатов и отливок в меди и склонности ниобия к формированию сегрегаций на границах зерен медной матрицы при кристаллизации из паровой фазы и расплава.

На рис. 1 представлены электронно-микроскопические изображения однокомпонентных конденсатов меди и двухкомпонентных Cu+0,5%Nb полученных в одинаковых технологических условиях. Видно, что ниобий измельчает зеренную структуру меди с 3 мкм до ~ 0,5 мкм. При этом период ГЦК кристаллической решетки медной матрицы остается неизменным. На электронограммах легированных конденсатов присутствуют дифракционные рефлексы, принадлежащие, как ГЦК меди, так и несвойственные ниобию в массивном состоянии – ГЦК кристаллической решетки ниобия.

Немаловажно, что дифракционные рефлексы (111) ГЦК меди и (111) ГЦК ниобия располагаются на одном дифракционном векторе, что свидетельствует о параллельности кристаллографических плоскостей (111)Cu/(111)Nb. Это важное свидетельство указывает не эпитаксиальный механизм формирования частиц ГЦК ниобия, по отношению к кристаллической решетке меди.

Анализ приведенных результатов позволяет сделать предположение, что частицы ниобия находятся в границах зерен медной матрицы в виде высокодисперсных образований, которые сформировались на поверхности растущих зародышей меди при кристаллизации двухкомпонентного пара, блокируя их дальнейший рост.

Легированные ниобием конденсаты демонстрируют повышенную твердость, которая составляет ~1300 МПа, что примерно в три раза превышает твердость нелегированной меди. Таким образом, приведенные результаты указывают на то, что ниобий проявляет активность по отношению к границам зерен меди и образует зернограницные сегрегации. В данном случае это проявляется в виде частиц ниобия, когерентно связанных с кристаллической решеткой меди по плоскостям (111)Cu/(111)Nb. Такое кристаллографическое соответствие и нехарактерная для ниобия кристаллическая решетка свидетельствуют о сильном межатомном взаимодействии на межфазных поверхностях раздела Cu-Nb.

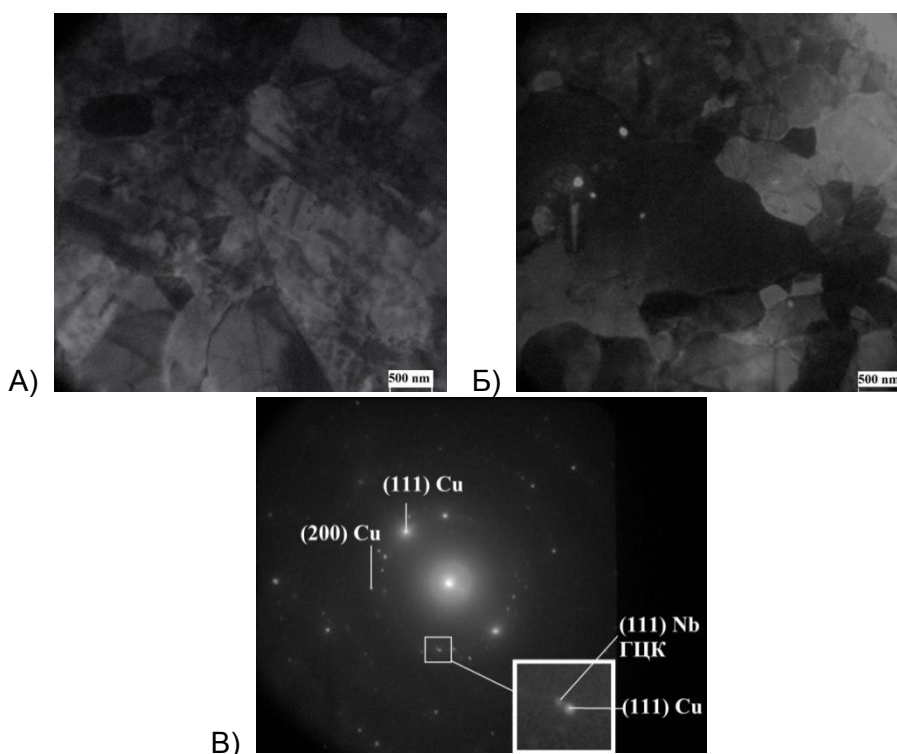


Рисунок 1 –  
Электронно-микроскопические изображения однокомпонентных конденсатов меди (А) и двухкомпонентных  $\text{Cu}+0,5\%\text{Nb}$  (Б), полученных в одинаковых технологических условиях, а также электронограмма конденсата  $\text{Cu}+0,5\%\text{Nb}$  (В)

Распределение ниобия в отливке меди демонстрируют результаты локального рентгеноспектрального анализа, проведенного в области контакта твердого ниобия и расплава меди (Рис. 2).

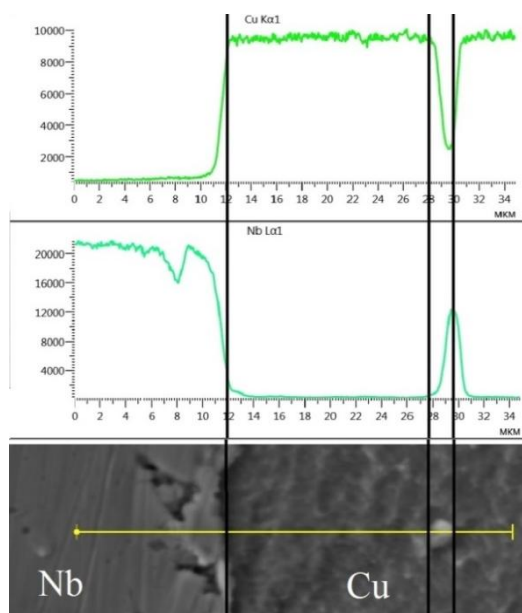


Рисунок 2 - Рентгеноспектральный анализ отливки  $\text{Cu-Nb}$ , проведенный в области контакта твердого ниобия и расплава меди

В объеме зерен меди содержится приблизительно  $\sim 0,1-0,2$  ат.% ниобия, что примерно соответствует его предельной растворимости в меди. Наблюдается также тенденция к концентрированию ниобия в границах и субграницах меди (Рис. 3).

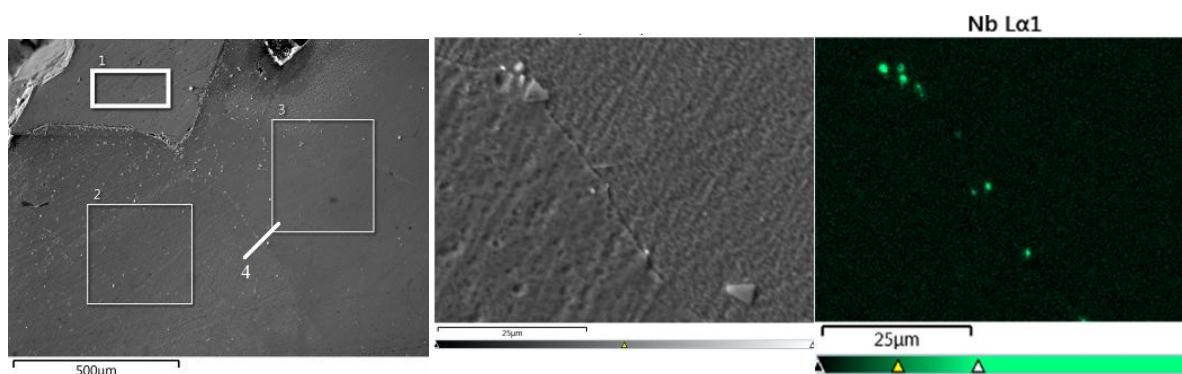


Рисунок 3 - Рентгеноспектральный анализ участков 1, 2 и 3, а также снимок по границе меди в режиме картирования по площади

Таблица 1 – Рентгеноспектральный анализ участков 1, 2 та 3

Название спектра	Si	Cl	Cu	Nb	Сумма
Спектр 1	0.94			99.06	100.00
Спектр 2			99.84	0.16	100.00
Спектр 3		0.17	99.71	0.11	100.00

Результаты данной работы свидетельствуют о том, что сегрегационные процессы, происходящие при кристаллизации сплавов из различных сред, имеют общие закономерности. Это заключение указывает на возможность распространения результатов исследований адсорбционных явлений, например в случае конденсации из паровой фазы на процессы формирования зарнограничных сегрегаций при кристаллизации расплавов.

#### Список литературы

1. Зубков А.И. Термическая стабильность нанокомпозитов, кристаллизуемых в вакууме // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. 2010 Т.15. Вып. 3. с. 846-848.
2. Попов И.А., Ширяева Н.В., ЖНХ, 1961 г., Т.6 с. 2334-2340.
3. Li C.J., Teng L., Tan J., Yuan Q., Tang J.J., Chen T.L., Zhu X.K. Microstructure and property evolution of Cu90Zr10 alloy in the process of mechanical alloying, Advanced Materials Research. 2013. V. 750-752, pp 667-670.
4. S. Özeriç, K. Tai, N.Q.Vo, P. Bellon, R.S. Averbach, W.P. King. Grain boundary doping strengthens nanocrystalline copper alloys, Scripta Materialia, 67, 2012. P. 720.