

ФОРМИРОВАНИЕ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА МЕТОДАМИ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Н.А. ПРОКОПЕНКО¹, М.С. ПЕТЮКЕВИЧ², В.В. ШУГУРОВ¹, Е.А. ПЕТРИКОВА¹

¹Институт сильноточной электроники СО РАН

²Томский политехнический университет

E-mail: nick08_phantom@mail.ru

Высокоэнтропийные сплавы (ВЭС) являются многоэлементными эквивалентными однофазными термодинамически стабильными твердыми растворами замещения на основе, преимущественно, ОЦК или ГЦК кристаллической решетки, обладающими уникальным сочетанием механических, трибологических, физических и т.д. свойств, что позволяет рекомендовать их использование в экстремальных условиях в различных отраслях промышленности [1-3]. К недостаткам ВЭС можно отнести результаты, представленные в работе [4], в которой показано, что ВЭС из тугоплавких элементов обладают высокой плотностью (высокий удельный вес) и хрупкостью. Существующие жаропрочные ВЭС с низкой плотностью не обладают высокой прочностью при высоких температурах, за исключением соединения NbMoCrTiAl, продемонстрировавшего предел текучести 600 МПа при температуре 1000 °С, но этот сплав оказался очень хрупким при комнатной температуре. Одним из перспективных путей улучшения пластических свойств жаропрочных ВЭС без потери их прочности является, как показано в работах [5, 6], наноструктурирование материала. Композиции сплавов с высокой энтропией в настоящее время получают преимущественно методами вакуумно-дугового плавления и механического легирования. Для создания жаропрочных сплавов из тугоплавких элементов практически значимыми представляются методы порошковой металлургии [4].

Целью настоящих исследований является разработка электронно-ионно-плазменного метода формирования ВЭС, синтезированных в виде тонких пленок, заключающегося в осаждении многоэлементной металлической плазмы, созданной электродуговым плазменно ассистированным одновременным независимым распылением катодов выбранных элементов и дополнительном облучении сформированного материала интенсивным импульсным электронным пучком.

Плёнка ВЭС осаждается с помощью метода плазменно-ассистированного дугового напыления на установке КВИНТА (входит, в составе комплекса «УНИКУУМ», в каталог уникальных научных установок, <http://ckp-rf.ru/usu/434216/>). Схема эксперимента представлена на рисунке 1.

Для напыления используются катоды из меди МЗ, циркония, ниобия, а также композиционный катод состава (Ti-Al 50/50) либо (Ti-Al-Si 45/45/10). Циркониевый и медный катоды устанавливаются на Y-образный фильтр с двумя отдельными катодными узлами, ниобиевый катод – на дуговой испаритель ДИ100, а композиционный Ti-Al либо Ti-Al-Si катод устанавливается на магнитный фильтр с углом поворота плазменного потока 120 град. Напыление осуществляется на подложки, выполненные из технически чистого титана ВТ1-0, стали нержавеющей класса 12Х18Н10Т и твердого сплава ВК8.

После установки образцов (подложки) на оснастку, вакуумная камера откачивается до давления $6,6 \cdot 10^{-3}$ Па. Затем происходит напуск аргона до давления 0,3 Па, включается генератор газовой плазмы ПИНК-П и происходит ионно-плазменная очистка поверхности образцов. После очистки запускаются генераторы металлической плазмы и происходит нанесение покрытия ВЭС. После окончания напыления образцы остужаются в вакуумной камере до температуры ниже 100 °С.

Неоспоримым достоинством данного метода является экологическая чистота процесса, возможность полной автоматизации ионно-плазменного напыления и формирования ВЭС наперед заданного элементного состава, а также допустимость поэтапного формирования покрытий со строго контролируемым элементным составом (двух, трех, четырех, пяти и т.д. элементные покрытия).

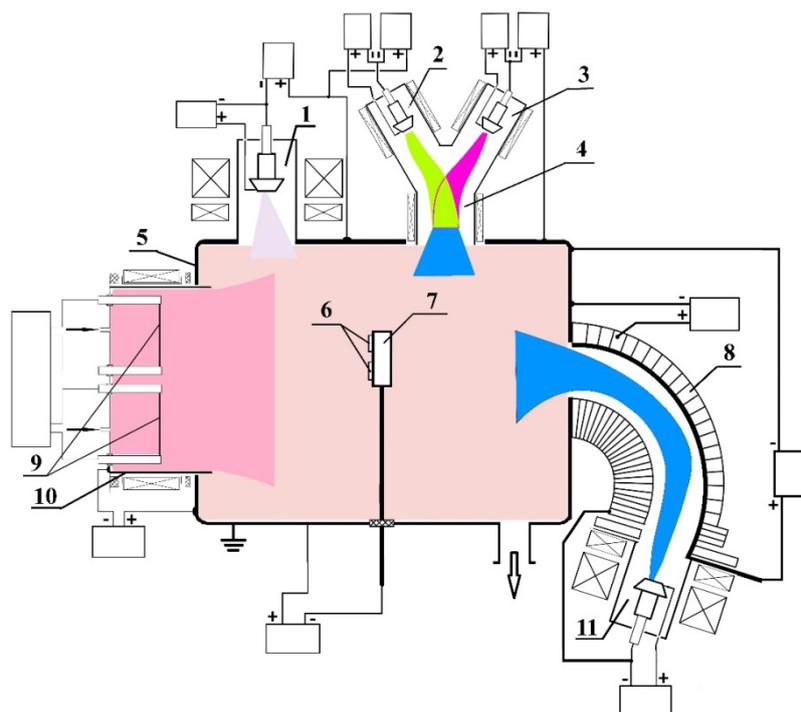


Рисунок 1 - Схема эксперимента по получению ВЭС: 1- дуговой испаритель ДИ100 с Nb катодом, 2 – дуговой испаритель ДИ80 с Cu катодом, 3 - дуговой испаритель ДИ80 с Zr катодом, 4 – Y-образный магнитный фильтр, 5 – вакуумная камера, 6 – образцы, 7 – оснастка, 8 – 120 град. магнитный фильтр, 9 – накалинные катоды, 10 – генератор газовой плазмы ПИНК-П, 11 - дуговой испаритель ДИ100 с Ti-Al либо Ti-Al-Si катодом.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ-БРФФИ (проект № 20-58-00006).

Список литературы

1. Ye Y.F., Wang Q., Lu J., Liu C.T. and Yang Y. High-entropy alloy: challenges and prospects // *Materials Today*. – 2016. – V. 19, №6 (July/August). – P. 349-362.
2. Погребняк А.Д., Багдасарян А.А., Якущенко И.В., Береснев В.М. Структура и свойства высокоэнтропийных сплавов и нитридных покрытий на их основе // *Успехи химии*. – 2014. – Т. 83, №11. – С. 1027-1061.
3. Miracle D.B., Senkov O.N. A critical review of high entropy alloys and related concepts // *Acta Materialia*. – 2017. – V. 122. – P. 448-511.
4. Pickering E. J., Jones N. G. High-entropy alloys: a critical assessment of their founding principles and future prospects // *International Materials Reviews*. – 2016. – V. 61, № 3. – P. 183-202.
5. Трофименко Н.Н., Ефимочкин И.Ю., Большакова А.Н. Проблемы создания и перспективы использования жаропрочных высокоэнтропийных сплавов // *Авиационные материалы и технологии*. – 2018. – №2 (51). – С. 3-8.
6. Juan C.C., Tsai M.H., Tsai C.W. e.a. Enhanced mechanical properties of HfMoTaTiZr and HfMoNbTaTiZr refractory high-entropy alloys // *Intermetallics*. – 2015. – V. 62. – P. 76-83.
7. Schuh B., Mendez-Martin F., Volker B., George E.P., Clemens H., Pippan R., Hohenwarter A. Mechanical properties, microstructure and thermal stability of a nanocrystalline CoCrFeMnNi high-entropy alloy after severe plastic deformation // *Acta Materialia*. – 2015. – V. 96. – P. 258-268.