

УДК 621.762.34

ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫЙ СПЛАВ, ПОЛУЧЕННЫЙ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫМ МЕТОДОМ

А.С. Новикова¹

Научный руководитель: профессор, д.ф.-м.н. Ю.Ф. Иванов²

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

²Институт сильноточной электроники СО РАН,

Россия, г. Томск, пр. Академический, 2/3, 634055

E-mail: olenevaalex@gmail.com

HIGH-ENTROPIC ALLOY PRODUCED BY ION-PLASMA METHOD

A.S. Novikova¹

Scientific Supervisor: Prof., Dr. Yu.F. Ivanov²

¹Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

²Institute of High Current Electronics SB RAS, Russia, Tomsk, Akademicheskii Ave., 2/3, 634055

E-mail: olenevaalex@gmail.com

Abstract. *The shown that the ion-plasma method is possible to form coatings from a high-entropy alloy close to the equiatomic composition. The established that the Ti-Al-Nb-Zr WPP formed by a solid solution based on niobium and contains inclusions (drops) of α -Zr and titanium aluminide TiAl.*

Введение. Высокоэнтропийные сплавы (ВЭС) – это новый класс металлических материалов, начало исследования которых может быть датировано публикациями 2004 г. [1, 2]. ВЭС обладают уникальным сочетанием механических, трибологических, физических, химических и т.д. свойств. Как правило, ВЭС являются многокомпонентными материалами и содержат несколько (четыре, пять и более) элементов близкой концентрации. ВЭС являются в большинстве случаев однофазными термодинамически стабильными твердыми растворами замещения, преимущественно, на основе ОЦК или ГЦК кристаллической решетки. Предполагается, что стабилизация твердого раствора при кристаллизации ВЭС обеспечивается высокой энтропией смешения компонентов сплава в жидком состоянии. В многочисленных исследованиях показано, что ВЭС могут иметь наноразмерную структуру или даже находиться в аморфном состоянии, что является следствием низкой скорости диффузии элементов и малой скорости роста кристаллитов.

В работе [3] на основании обзора 322 публикаций, посвященных ВЭС, сделано заключение, что на сегодняшний день нет обоснованных доказательств того, что основные эффекты, связанные с энтропийной стабилизацией, искажением кристаллической решетки и замедлением диффузии атомов, могут быть столь значительными, как было предположено в многочисленных работах. Тем не менее, авторы работы [3] считают, что ВЭС предлагают новый подход для формирования сплавов и одним из их наиболее многообещающих приложений являются конструкционные материалы. С этой целью фокус исследования должен отойти от попыток получить однофазные ВЭС и вместо этого разрабатывать сплавы, которые обладают правильным балансом механизмов упрочения и механических свойств.

Подтверждая выводы, сделанные в [3], в ряде работ [4, 5] показано, что к высокоэнтروпийным сплавам могут быть отнесены многокомпонентные сплавы неэквивалентного состава, к тому же не являющиеся однофазными твердыми растворами. Таким образом, краткий анализ работ по высокоэнтропийным сплавам показывает, что исследования в данной области знаний представляют широкий интерес и являются перспективным направлением материаловедения недалекого будущего.

Целью настоящей работы является обнаружение и анализа закономерностей формирования структуры и фазового состава высокоэнтропийного сплава, напыленного на подложку ионно-плазменным методом.

Материал и методика исследований. Плёнки ВЭС осаждали с помощью метода плазменно-ассистированного дугового напыления на установке «КВИНТА» (ИСЭ СО РАН. Для напыления используются катоды из циркония, ниобия, а также композиционный катод состава (Ti-Al 50/50) либо (Ti-Al-Si 45/45/10). Циркониевый катод устанавливали на Y-образный фильтр, ниобиевый катод – на дуговой испаритель ДИ100, а композиционный Ti-Al либо Ti-Al-Si катод устанавливали на магнитный фильтр с углом поворота плазменного потока 120 град. Напыление осуществляли на предварительно полированные подложки, выполненные из твердого сплава WC-8Co. После установки образцов (подложки) на оснастку вакуумная камера откачивалась до давления $6,6 \cdot 10^{-3}$ Па. Затем происходит напуск аргона до давления 0,3 Па, включался генератор газовой плазмы ПИНК-П и проводилась ионно-плазменная очистка поверхности образцов. После очистки запускались генераторы металлической плазмы и происходило нанесение покрытия ВЭС на подложку. После окончания напыления образцы остужались в вакуумной камере до температуры ниже 373 К. 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). Исследование морфологии, фазового и элементного состава сплава осуществляли методами сканирующей электронной микроскопии (прибор SEM-515 Philips) и рентгеноструктурного анализа (дифрактометр Shimadzu XRD-7000). Элементный состав сплава исследовали методами микрорентгеноспектрального анализа (микроанализатор EDAX ECON IV, являющийся приставкой к сканирующему электронному микроскопу SEM-515 «Philips»).

Результаты исследования и их обсуждение. Методами микрорентгеноспектрального анализа показано, что формируемый ионно-плазменным методом материал является четырехкомпонентным с близкими атомными весами элементов (рис. 1, б, таблица). На поверхности сплава видны частицы капельной фракции, размеры которых составляют сотни нанометров (рис. 1, а). Методами микрорентгеноспектрального анализа «по точкам» было установлено, что частицы капельной фракции могут быть обогащены атомами алюминия, титана и циркония.

Методами рентгеноструктурного анализа выявлены, наряду с дифракционными максимумами от подложки (карбид вольфрама), сложные, размытые на дальних углах, линии от напыляемого сплава (рис. 2). Учитывая элементный состав ВЭС, полученный сплав можно трактовать, как пересыщенный твердый раствор на основе ниобия (Nb(Zr, Ti, Al)), содержащий включения (капли) α -Zr и алюминида титана TiAl.

Заключение. Разработана методика формирования ионно-плазменным методом покрытий из высокоэнтропийного сплава близкого к эквиаtomному составу. Показано, что ВЭС сформирован твердым раствором на основе ниобия и содержит включения (капли) α -Zr и алюминиды титана TiAl.

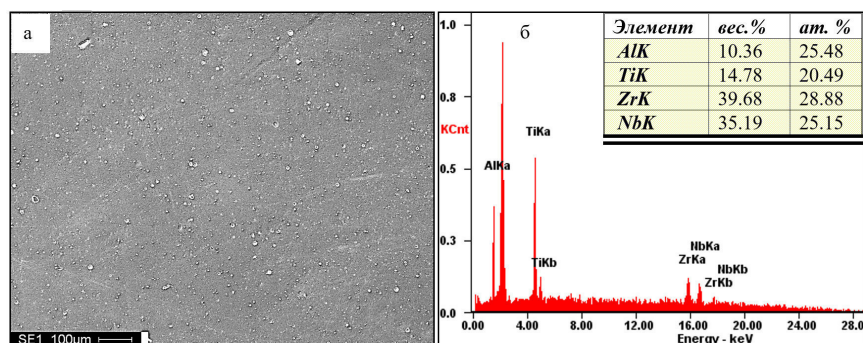


Рис. 1. Электронно-микроскопическое изображение структуры ВЭС (а); б – энергетические спектры, полученные с (а); в таблице приведен элементный состав сплава

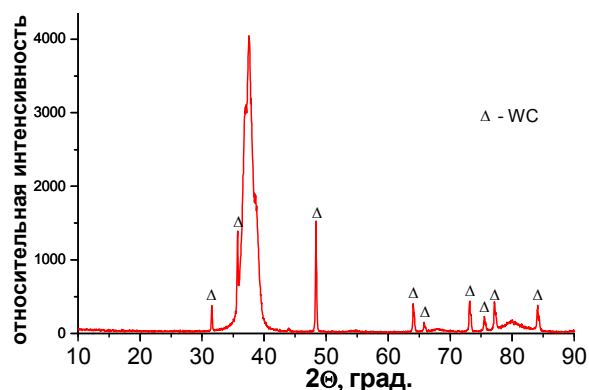


Рис. 2. Фрагмент рентгенограммы, полученной с высокоэнтропийного сплава

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cantor B., Chang I.T.H., Knight P., Vincent A.J.B. Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys // Mater. Sci. Eng. A – 2004 –V. 375-377 – P. 213-218.
2. Yeh J.W. Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: Novel alloy design concepts and outcomes / J.W. Yeh // Adv. Eng. Mater. – 2004. – V. 6. – P. 299-303.
3. Pickering E. J., Jones N. G. High-entropy alloys: a critical assessment of their founding principles and future prospects // International Materials Reviews. – 2016. – Vol. 61, № 3. – P. 183-202.
4. Zhiming Li, Fritz Kormann, Blazej Grabowski, Jorg Neugebauer, Dierk Raabe. Ab initio assisted design of quinary dual-phase high-entropy alloys with transformation-induced plasticity // Acta Materialia. – 2017. – V. 136. – P. 262-270.
5. Silva Basu, Zhiming Li, K. G. Pradeep and Dierk Raabe. Strain Rate Sensitivity of a TRIP-Assisted Dual-Phase High-Entropy Alloy // Frontiers in Materials. – 2018. – Vol. 5 – A. 30. – P. 1-10.