ИМПЛАНТАЦИЯ ИОНОВ КРИПТОНА В ПОВЕРХНОСТНЫЙ СЛОЙ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА HfNbZrTi И СПЛАВА V-4Cr-4Ti

М.О. Коваленко, И.В. Кондрусь
Белорусский государственный университет,
пр. Независимости 4, Минск 220030, Беларусь,
maksuskoval@tut.by, ilyakondrus01@gmail.com

Исследована стойкость структурно-фазового состояния высокоэнтропийных сплавов HfNbZrTi в сравнении со сплавом V-4Cr-4Ti к облучению ионами Kr. В работе применялись методы рентгеноструктурного анализа для определения микро- и макронапряжений, а также плотности дислокаций. Установлено влияние напряжений и плотностей дислокаций на стойкость структурно-фазового состояния высокоэнтропийного сплава HfNbZrTi после облучения ионами криптона. Система HfNbZrTi представляют собой однофазную ОЦК структуру на основе твердого раствора (Hf, Nb, Zr, Ti) как в исходном состоянии, так и после облучения ионами Kr при флюенсах 5×10^{15} и 1×10^{16} см$^{-2}$. Выявлена высокая стойкость структурно-фазового состояния сплава HfNbZrTi к облучению ионами криптона.

Ключевые слова: высокоэнтропийный сплавы; рентгеноструктурный анализ; макронапряжения; плотность дислокаций; ионная имплантация.

IMPLANTATION OF KRYPTON IONS INTO THE SURFACE LAYER OF A HIGH-ENTROPY Hf Nb Zr Ti ALLOY AND V-4Cr-4Ti ALLOY

Maksim Kovalenko, Ilya Kondrus
Belarusian State University,
4 Nezavisimosty Ave., 220030 Minsk, Belarus,
maksuskoval@tut.by, ilyakondrus01@gmail.com

The resistance of the structural-phase state of high-entropy HfNbZrTi alloys in comparison with the V-4Cr-4Ti alloy to irradiation with Kr ions has been studied. In the work, methods of X-ray diffraction analysis were used to determine micro- and macrostresses, as well as the density of dislocations. The influence of stresses and dislocation densities on the stability of the structural-phase state of the high-entropy HfNbZrTi alloy after irradiation with krypton ions has been established. The HfNbZrTi system is a single-phase bcc structure based on a solid solution (Hf, Nb, Zr, Ti), both in the initial state and after irradiation with Kr ions at fluences of 5×10^{15} and 1×10^{16} cm^{-2}. A high resistance of the structural-phase state of the HfNbZrTi alloy to irradiation with krypton ions was revealed.

Keywords: high-entropy alloys; X-ray diffraction analysis; macro stresses; dislocation density; ion implantation.

Введение

Развитие атомной энергетики в мире предъявляет повышенные требования к применяемым конструкционным материалам, технологии их производства и контролю работоспособности. Под действием облучения в этих материалах происходят структурно-фазовые превращения, отрицательно влияющие, в первую очередь, на механические свойства.

Высокоэнтропийные сплавы (ВЭС) на основе однофазного твердого раствора и большого количества (более пяти) основных элементов в эквимолярных или почти эквимолярных соотношениях перспективны для получения радиационно-стойких материалов для ядерной энергетики.

Считается, что максимизация конфигурационной энтропии ВЭС способствует образованию однофазного неупорядоченного твердого раствора вместо выделения сложных интерметаллических или вторичных фаз, в результате чего сплав имеет простую микроструктуру с улучшенными свойствами по сравнению с традиционными сплавами [1]. Многочисленные исследования показали, что ВЭС обладают высокими пределом упругости, усталост-

ной прочностью, термической и коррозионной стойкостью, сопротивлением ползучести, радиационной стойкостью. Свойства этих сплавов связаны с четырьмя основными эффектами: высокой энтропией, большой деформацией решетки, многоэлементным составом и замедленной диффузией [2].

Сплавы на основе системы Ti-V-Cr-Zr-Nb также рассматриваются как жаропрочные конструкционные материалы, обладающие низкой плотностью и высокой твердостью [3]. Таким образом, тугоплавкие ВЭС (которые содержат Ti, Zr, Hf, Ta, V, Nb, W и Cr) являются одним из типов претендентов, поскольку они демонстрируют исключительно высокие температуры плавления, пластичность и прочность при повышенных температурах [4].

Интерес к облучению таких образцов связан с потребностью в экспериментальных данных о поведении тугоплавких ВЭС и продуктов реакции деления в решетке. Учитывая, что данный материал является перспективным для применения в строительстве реакторов нового поколения, то система HfNbZrTi+примесь (He, Ar, Kr, Xe) в первом приближении может служить представительным объектом исследований при решении указанной задачи.

Материалы и методы исследования

В работе исследованы образец высокоэнтропийного сплава HfNbZrTi и проводилось сравнение со сплавом V-4Cr-4Ti, полученных методом дуговой плавки с последующей гомогенизацией. После чего образцы подвергались отжигу на протяжении 24 ч и 72 ч при температуре 1150 °C с промежуточной холодной прокаткой до 85% сокращения толщины. Образцы облучались ионами криптона с энергий 280 кэВ и при флюенсах 5×10^{15} и 1×10^{16} см$^{-2}$.

Фазовый состав образцов изучался методом рентгеноструктурного анализа (РСА) на дифрактометре Rigaku Ultima IV с использованием медного излучения (λ = 0.15418 нм). Для исследования воздействия имплантированного криптона на поверхностный слой, рентгенограммы получены съемкой образцов при малом фиксированном угле падения скользящего рентгеновского пучка (1°).

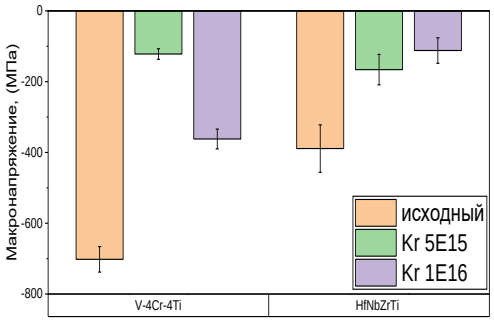
Для определения макронапряжений применялся метод $\sin^2\psi$.

Для определения значений плотности дислокаций применялся метод Вильямсона-Холла: графический метод определения размера ОКР и величины микродеформаций, используя график зависимости $\beta\cos(\theta)$ от $\sin(\theta)$ описываются функциями Лоренца и пропорциональны значению микронапряжений (β - интегральная ширина линии).

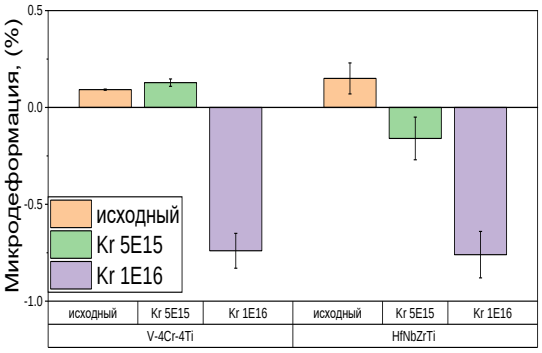
Результаты и их обсуждение

Исходя из рентгенограмм образцов, мы можем сказать о формировании однофазной системы на основе твердого раствора (Hf,Nb,Zr,Ti) с ОЦК структурой в исходном состоянии. Дифрактограммы образцов HfNbZrTi, облученных ионами криптона, показывают, что фазовый состав не изменяется (распада твердых растворов не обнаружено). Однако наблюдается более выраженная асимметрия пиков и их смещение в сторону меньших углов по сравнению с исходными дифрактограммами, что свидетельствует о деформации кристаллической решетки в приповерхностной области, вызванной облучением.

С помощью метода $\sin^2\psi$ и Вильямсона-Холла были определены макронапряжения и микронапряжения соответственно. Исходные образцы демонстрируют сжимающие напряжения, которые сохраняют свой сжимающий характер при облучении несколькими дозами, но значение данных напряжений, данный эффект не проявляется в сплаве V-4Cr-4Ti, что говорит об особом характере протекания данного явления в ВЭС. Микронапряжения демонстрируют изменение знака после облучения.



(а)



(б)

Рис. 1. Полученные значения в образце HfNbZrTi и V-4Cr-4Ti, исходных и облученных ионами криптона с энергией 280 кэВ при дозах 5×10^{15} и 1×10^{16} см$^{-2}$: а – макронапряжения; б – микронапряжения

Заключение

Таким образом, система HfNbZrTi представляет собой однофазную ОЦК структуру на основе твердого раствора (Hf, Nb, Zr, Ti) как в исходном состоянии, так и после облучения ионами Kr при флюенсах 5×10^{15} и 1×10^{16} см$^{-2}$. Облучение ионами криптона приводит к снижению макронапряжений, что можно объяснить несколькими причинами. Вероятно, различие в размерах атомов между элементами приводит к уменьшению длин свободного пробега электронов и фононов, что может влиять на энергию образования и миграционные барьеры дефектов в материале. Различие размеров атомов элементов в твердых растворах также способствует увеличению атомного рассеяния и уменьшению сфокусированного движения межузельных атомов в направлении плотной упаковки, что препятствует быстрому перемещению межузельных атомов из области с высокой концентрацией вакансии. Это способствует рекомбинации дефектов в этих сплавах. Кроме того, искажение решетки также может снижать подвижность дефектов, поэтому многие межузельные кластеры были стационарными и оставались в области образования дефектов, что приводило к более высокой скорости рекомбинации дефектов [5-6].

Библиографические ссылки

1. Tsai M.H., Yeh J.W. High-Entropy Alloys: A critical review. *Mater. Res. Lett.* 2014; 2(3): 107-114.
2. Zhang Y. Science and technology in high-entropy alloys. *Prog. Mater. Sci.* 2014; 61(1).
3. Senkov O.N., Senkova S.V., Woodward C., Miracle D. B. Low-density, refractory multi-principal element alloys of the Cr – Nb – Ti – V – Zr system: microstructure and phase analysis. *Acta Materialia* 2013; 61(5):1545–1557.
4. Senkov O.N., Wilks G.B., Miracle D.B., Chuang C.P., Liaw P.K. Refractory high-entropy alloys. *Intermetallics* 2010;18(9):1758–1765.
5. Lu C., Niu L., Chen N., Jin K., Yang T., Xiu P. Enhancing radiation tolerance by controlling defect mobility and migration pathways in multicomponent single-phase alloys. *Nature Communications* 2016; 7(1): 135-164.
6. Jin K., Lu C., Bei H., Sales B.C. Influence of chemical disorder on energy dissipation and defect evolution in concentrated solid solution alloys. *Nature Communications* 2015; 6(1).