

## РАДИАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА Hf-Nb-Zr-Ti К ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМУ ОБЛУЧЕНИЮ ИОНАМИ ГЕЛИЯ

Физический факультет Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь

Исследовано влияние облучения ионами  $He^{2+}$  при различных температурах на структурно-фазовое состояние высокоэнтропийного сплава на основе системы HfNbZrTi. Сплав HfNbZrTi является неустойчивым к облучению ионами гелия с флюенсом  $2 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$  при температуре 700 °С, в результате чего наблюдается распад фаз.

Быстро растущий спрос на энергию и все больше внимания к экологическим проблемам создают импульс для быстрого роста интереса к ядерной энергии. В настоящее время около 430 коммерческих атомных энергетических реакторов в мире обеспечивают около 11% мировых поставок электроэнергии. Подавляющее большинство конструкционных материалов играют важную роль в реакторах деления. Для повышения безопасности и эффективности ядерных реакторов необходима разработка новых и перспективных ядерных конструкционных материалов с высокой устойчивостью к радиационному повреждению. Во многих случаях ключевая стратегия разработки материалов с высокой устойчивостью к радиационному повреждению основана на высокотемпературной фазовой стабильности, высокотемпературной прочности и стабильности размеров в условиях облучения, поскольку облучение может привести к увеличению плотности дефектов, что препятствует движению дислокаций и увеличивает напряжение течения. Конструкционные материалы для передовых ядерных систем должны выдерживать гораздо более высокие дозы нейтронов, более высокие температуры и чрезвычайно коррозионную среду, которые выходят за рамки характеристик материалов, используемых в современных ядерных системах [2]. В общем, обычные материалы для ядерных реакторов включают различные ферритные стали, аустенитные нержавеющие стали, сплавы циркония, керамика, композиты и т. д. У них может быть предел, чтобы выдержать высокую дозу облучения и суровые условия окружающей среды в будущей ядерной системе. Чтобы противостоять радиационным угрозам эксплуатации конструкционных материалов, используемых в ядерных системах, необходимо разработать новые конструкции, обладающие высокой радиационной стойкостью. В последнее время высокоэнтропийные сплавы (ВЭС) или многоэлементные сплавы как новый тип сплавов становятся новым направлением исследований в сообществе металлических материалов. По сравнению с обычными сплавами с одним или двумя основными элементами, ВЭС обычно содержат 5-13 основных элементов с концентрацией каждого элемента от 5 до 35 ат.%. Последние исследования показывают, что некоторые ВЭА демонстрируют лучшую стойкость к облучению, чем традиционные сплавы, такие как повышенная стойкость к набуханию, уменьшенное развитие дислокаций, значительное снижение накопления повреждений и т. д. Тугоплавкие высокоэнтропийные сплавы (RHEA) стимулировали быстрорастущие исследования благодаря их исключительным высокотемпературным механическим свойствам и большому потенциалу применения в термически агрессивных средах (например, в аэрокосмической и энергетической промышленности). Однако ключевым узким местом, мешающим их реальному применению, является хрупкость и плохая пластичность при низких температурах. Недавно сообщалось, что РЭА HfNbTiZr может преодолеть это препятствие, демонстрируя сочетание высокой прочности и хорошей пластичности. Чтобы способствовать применению этого сплава при повышенных температурах, поддержание высокой фазовой стабильности в широком диапазоне температур в течение длительного срока службы имеет решающее значение для сохранения его стабильных структурных характеристик.[1]

В данной работе исследовался образец высокоэнтропийного сплава HfNbZrTi методом дуговой плавки с последующей гомогенизацией. Далее проводился отжиг на протяжении

#### Секция 4. Прикладные проблемы физики конденсированного состояния

24 ч и 72 ч при температуре 1150 °С с промежуточной холодной прокаткой до 85 % сокращения толщины. Один из образцов облучался ионами  $\text{He}^{2+}$  с энергией 40 кэВ и флюенсом  $2 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$  при комнатной температуре, другая часть облучалась ионами  $\text{He}^{2+}$  с энергией 40 кэВ и флюенсом  $2 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$  при температуре 700 °С.

Наблюдение морфологии поверхности (описать какая сторона, излом, до и после обработки и т. д.) исследуемых образцов осуществлялось с помощью растрового электронного микроскопа марки LEO 1455VP фирмы «Carl Zeiss». При этом регистрировался сигнал отраженных и вторичных электронов одновременно или поочередно.

Результаты ПЭМ облученного образца демонстрирует нам однородные фазы ОЦК, что доказывает то, что распад фаз напрямую связан с температурным воздействием. Также ТЕМ показал, что средние размеры пузырьков гелия составляют менее 3 нм и эти наноразмерные пузырьки гелия высокой плотности распределяются от поверхности образца до области пика. Данные SEM показали, что больший размер пузырьков имплантированного гелия и меньшая числовая плотность проявляются при более высокой температуре, что видно из рисунка 1.

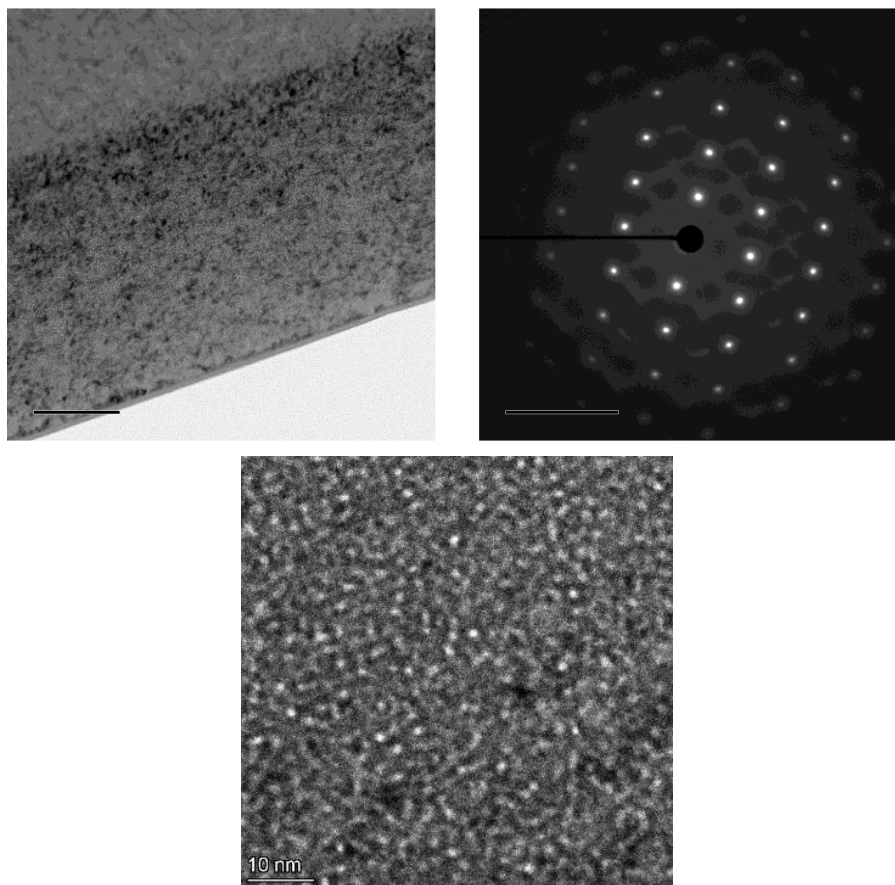


Рисунок 1 – Демонстрация ПЭМ и СЭМ снимков сплава HfNbZrTi при облучении ионами  $\text{He}^{2+}$

Результаты исследования фазового состава с помощью метода рентгеноструктурного анализа (РСА) продемонстрированы на Рисунке 2 и представляют собой дифрактограммы для необлученных образцов и образцов облученных ионами  $\text{He}^{2+}$  при комнатной температуре, и температуре равной 700 °С. Видно, что HfNbZrTi представляют собой однофазный твердый раствор с ОЦК-решеткой. Параметр решетки для исходного образца составил 0.687079 нм. Исходя из данных дифрактограммы, наблюдается распад фаз при 700 °С. Схожие явления распада демонстрируется и в образцах HfNbTaZrTi, при облучении его при высокой температуре[4]. Данный распад является результатом сегрегации, то есть явление, которое возникает в ходе высокотемпературного движения дефектов, которые захватывают близлежащие атомы решетки. Как результат, тяжёлые атомы Hf и Zr выделяются в отдельную ГПУ фазу, как видно на рисунке 2[3].

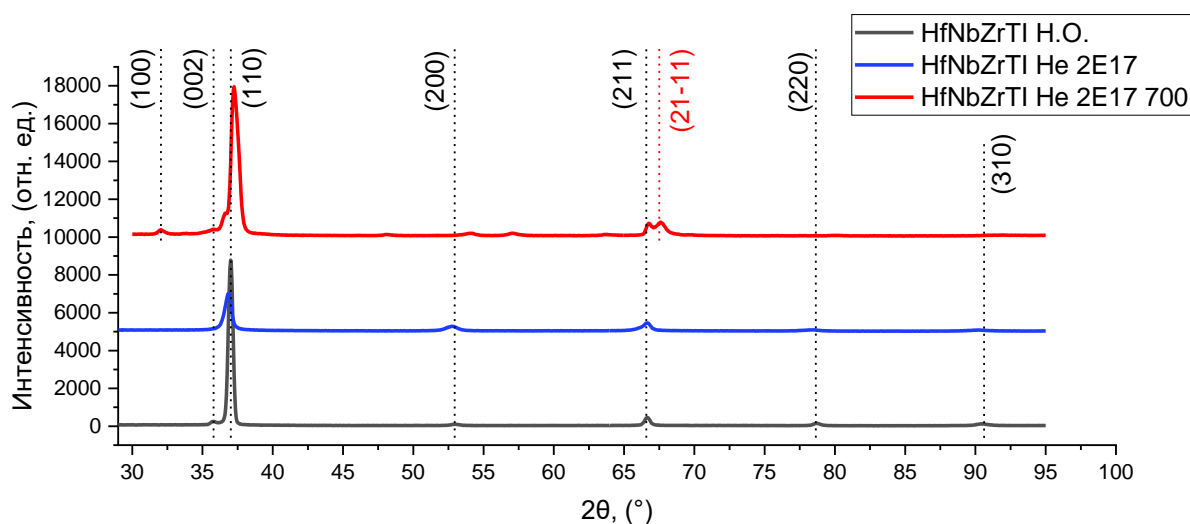


Рисунок 2 – Рентгеновские дифрактограммы образцов HfNbZrTi: не облученного и облученных ионами He<sup>2+</sup> 40 кэВ с флюенсами  $2 \times 10^{17}$  при комнатной температуре и флюенсом  $2 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$  при температуре 700°C

Таким образом, фазовый состав высокоэнтропийного сплава HfNbTiZr является устойчивым к облучению ионами He<sup>2+</sup> с энергий 40 кэВ и флюенсом  $2 \times 10^{17}$  при комнатной температуре и нестабильным к облучению с флюенсом  $2 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$  при температуре 700 °С. В результате высокотемпературного облучения наблюдается распад однофазной ОЦК структуры, что вероятно связано с образованием метастабильной ГПУ-фазы. Анализ SEM и TEM изображений показал данные о сохранении единой ОЦК структуры при облучении гелием при комнатной температуре, что соответствует данным рентгеноструктурного анализа

#### Список литературы

1. Song-qin XIA , Zhen WANG , Teng-fei YANG , Yong ZHANG Irradiation Behavior in High Entropy Alloys, JOURNAL OF IRON AND STEEL RESEARCH, INTERNATIONAL. 2015, 22(10): 879-884
2. S. J. Zinkle, K. A. Terrani, L. L. Snead, Curr. Opin. Solid. St. Mater. 20 (2016) 401-410
3. H. Okamoto, Desk Handbook: Phase Diagrams for Binary Alloys, ASM International, Materials Park, OH, 2000
4. S. Y. Chen , Y. Tong , K.-K. Tseng , J.-W. Yeh b , J. D. Poplawsky , J. G. Wen , M. C. Gao , G. Kim , W. Chen , Y. Ren , R. Feng, W. D. Li, P. K. Liaw, Phase transformations of HfNbTaTiZr high-entropy alloy at intermediate temperatures, 2018