

## РАДИАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА NiCoFeCrMn К ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМУ ОБЛУЧЕНИЮ ИОНАМИ ГЕЛИЯ

Физический факультет Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь

Исследована радиационная стойкость структурно-фазового состояния высокоэнтропийного сплава NiCoFeCrMn к облучению ионами He<sup>2+</sup>. Выявлена высокая стойкость сплава NiCoFeCrMn к облучению ионами гелия при высокой температуре (700°C). Установлено влияние напряжений на стойкость высокоэнтропийного сплава NiCoFeCrMn при высокотемпературном облучении.

Из-за низкого уровня выбросов углерода ядерная энергия будет играть более важную роль в энергетической системе будущего. Для дальнейшего повышения энергоэффективности и сокращения образования отходов в начале этого века было предложено несколько концепций ядерно-энергетических систем IV поколения. В отличие от нынешних реакторов, ядерные системы четвертого поколения рассчитаны на работу при более высоких температурах и при больших радиационных повреждениях. Значит, конструкционные материалы будут эксплуатироваться в более жестких условиях. Известно, что при высоких температурах облучения (половина температуры плавления материала или выше) имплантированный гелий формирует пузырьки вдоль границы зерна материала при приложении механического напряжения. Рост и слияние пузырьков, образование газовых полостей на границах зерен в конечном итоге приводит к разрушению материалов (эрозия поверхности), называемого охрупчиванием гелия. Поэтому разработка новых конструкционных материалов, способных выдерживать экстремальные условия воздействия, является перспективной для применения в ядерной энергетике.

Высокоэнтропийные сплавы (ВЭС) как новый класс металлических материалов, состоящих из четырех или более элементов в равномолярных или почти равномолярных составных частях, в последние годы привлекли большое внимание материаловедов. Благодаря своей сильной стойкости к окислению и многообещающей устойчивости к радиационным повреждениям. ВЭС также были предложены в качестве одного из кандидатов в качестве конструкционных материалов перспективных ядерных систем [1].

В работе исследованы образцы высокоэнтропийного сплава NiCoFeCrMn, полученных методом дуговой плавки с последующей гомогенизацией. После чего образцы подвергались отжигу на протяжении 24 ч и 72 ч при температуре 1150 °С с промежуточной холодной прокаткой до 85 % сокращения толщины. Образцы облучались ионами He<sup>2+</sup> с энергий 40 кэВ и флюенсом  $2 \times 10^{17}$  см<sup>-2</sup>. Одна часть образцов облучалась при комнатной температуре, а другая – при температуре 700 °С.

Фазовый состав образцов изучался методом рентгеноструктурного анализа (РСА) на дифрактометре Rigaku Ultima IV в геометрии параллельного пучка с использованием медного излучения ( $\lambda = 0,15418$  нм). Для исследования только приповерхностной области ВЭС имплантированной гелием, съемка рентгенограмм образцов проводилась при угле падения скользящего рентгеновского пучка 1°.

Исследование морфологии поверхности образцов осуществлялось на растровом электронном микроскопе Carl Zeiss LEO 1455VP.

Согласно полученным результатам, рентгенограммы всех образцов демонстрируют формирование однофазной системы на основе твердого раствора (Ni,Co,Fe,Cr,Mn) с ГЦК структурой, как видно из рисунка 1.

Выявлено, что облучение ионами гелия как при комнатной температуре, так и при температуре 700°C не приводит к изменению фазового состава ВЭС NiCoFeCrMn, но при этом выявлена уширение и асимметрия дифракционных пиков твердого раствора (Ni,Co,Fe,Cr,Mn), как видно из рисунка 1.

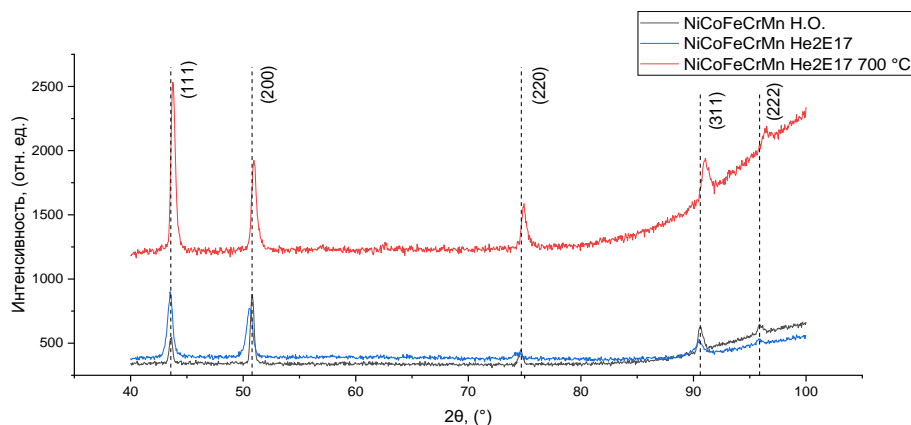


Рисунок 1 – Рентгенограмма исходного сплава NiCoFeCrMn и облученного ионами He<sup>2+</sup> 40 кэВ с флюенсом  $2 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$  при комнатной температуре и температуре 700°C

Для определения значений микродеформаций и плотности дислокаций применялся Метод Вильямсона-Холла: графический метод определения размера ОКР и величины микродеформаций, используя график зависимости  $\beta \cos(\theta)$  от  $\sin^2(\theta)$  в приближении, что функции вклады размера ОКР и микродеформаций описываются функциями Лоренца ( $\beta$  - интегральная ширина линии). При облучении в условиях комнатной температуры мы наблюдаем увеличение значений микродеформации, но при этом напряжения остаются сжимающими. При высокотемпературном облучении гелием значения микродеформаций заметно отличались от облученных при аналогичном флюенсе при комнатной температуре. Поскольку структурно-фазовый состав сохранился при облучении гелием при 700°C, то это указывает на то, что произошел отжиг радиационных дефектов, вследствие чего уменьшились значения напряжений, но при этом они остались сжимающими, что видно из рисунка 2.

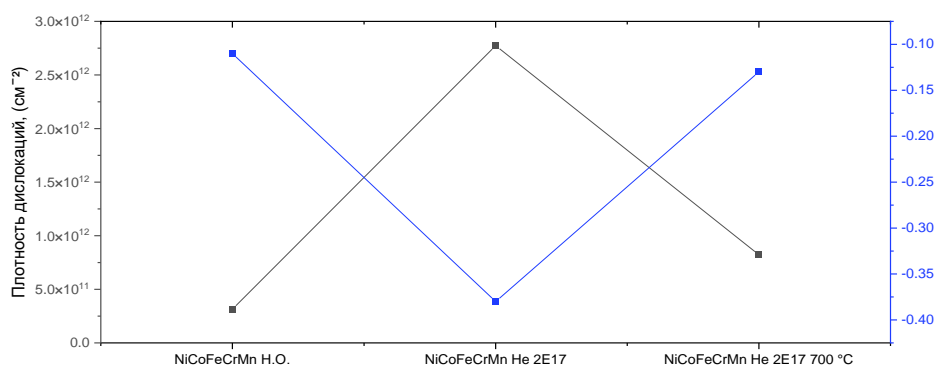


Рисунок 2 – Корреляция между значениями микродеформаций и плотностью дислокаций для NiCoFeCrMn

С атомистической точки зрения (метод функционала плотности) предполагается более высокий энергетический барьер для миграции гелия в ВЭС путем внедрения либо замещения [2], т.е. подавленная подвижность гелия с увеличением сложности состава ВЭС. Подавленная подвижность гелия объясняет высокий уровень напряжений и плотности дислокации в ВЭС NiCoFeCrMn, что связано с повышенной концентрацией гелия и ограниченным объемом его распределения. А значит анализ поведения напряжений и плотности дислокации после облучения позволяет сравнить радиационную стойкость ВЭС. Поскольку на поверхности образцов, подвергшихся высокотемпературному облучению, отсутствовали блистеры можно сделать вывод о структурной стойкости ВЭС NiCoFeCrMn, что видно из рисунка 3.

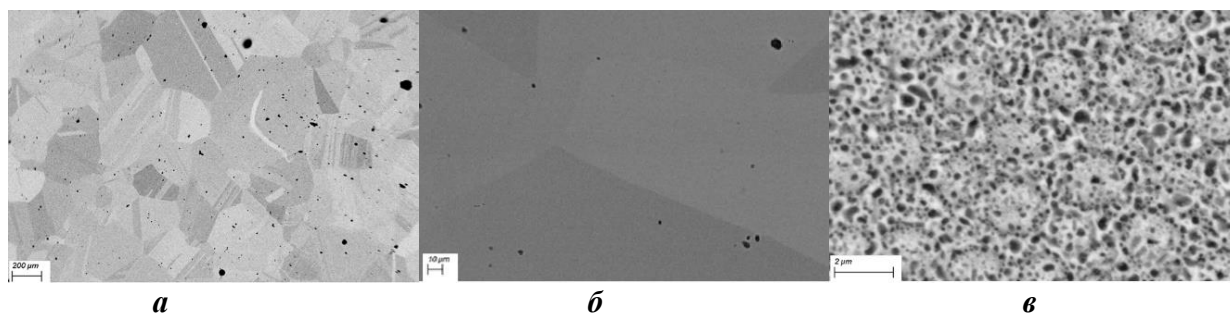


Рисунок 3 – Демонстрация SEM снимков образцов сплава NiCoFeCrMn: не облученных (а), облученных при комнатной (б) и повышенной температуре (в)

Наблюдение с помощью SEM показало равноосную зернистую структуру с несколькими двойниками отжига в сплаве NiCoFeCrMn. Средний размер зерна ВЭС сплава составил 450 мкм, на основе измерений методом пересечения линий.

Известно, что пузырьки гелия в ВЭС NiCoFeCrMn имеют меньший размер, более высокую плотность, более плотное распределение, а также меньшую объемную долю по сравнению с ВЭС NiCoFeCr и никелем [3]. Это указывает на то, что сплав NiCoFeCrMn обладает более сильным сопротивлением образованию пузырьков He. Как правило, накопление гелия и образование пузырьков в металлах контролируются диффузией гелия, на которую влияют условия облучения, такие как температура, скорость повреждения, скорость образования гелия [4,5].

Поскольку растворимость He в металлической системе ограничена [4], имплантированные атомы He будут диффундировать и связываться с вакансиями с образованием пузырьков, а поведение точечных дефектов, включая их подвижность и концентрацию, будет оказывать значительное влияние на поведение He, а также на образование пузырьков. В работе [6] предположили, что химическая неупорядоченность ВЭС будет приводить к распределению энергетических барьеров для точечных дефектов, а перекрытие энергий миграции междоузлий и вакансий будет способствовать рекомбинации дефектов в ВЭС. Это означает, что в ВЭС NiCoFeCrMn будет локально усилена взаимная рекомбинация точечных дефектов, так что концентрация вакансий в нем, вызванная повреждением смещения, будет меньше, чем у NiCoFeCr и Ni.

Таким образом структурно-фазовый состав высокоэнтропийного сплава NiCoFeCrMn является устойчивым к облучению ионами He<sup>2+</sup> с энергией 40 кэВ и флюенсом  $2 \times 10^{17}$  при комнатной температуре и с флюенсом  $2 \times 10^{17}$  см<sup>-2</sup> при температуре 700 °С.

#### Список литературы

1. Kumar, N. A. P. K., Li, C., Leonard, K. J., Bei, H., & Zinkle, S. J. (2016). Microstructural stability and mechanical behavior of FeNiMnCr high entropy alloy under ion irradiation. *Acta Materialia*, 113, 230–244.
2. Zhao S., Chen D., Kai J.-J. First-principles study of He behavior in a NiCoFeCr concentrated solid solution alloy // *Mater. Res. Lett.* –2019. –V. 7, is. 5. –P. 188-193.
3. D. Chen, S. Zhao, J. Sun, P. Tai, Y. Sheng, Y. Zhao, G. Yeli, W. Lin, S. Liu, W. Kai, and J.-J. Kai, “Diffusion controlled helium bubble formation resistance of FeCoNiCr high-entropy alloy in the half-melting temperature regime,” *Journal of Nuclear Materials*, vol. 526, p. 151747, 2019.
4. Trinkaus H., Singh B. Helium accumulation in metals during irradiation – where do we stand? // *Journal of Nuclear Materials*. –2003. –V. 323, is. 2-3. –P. 229–242.
5. Was G.S. *Fundamentals of Radiation Materials Science: Metals and Alloys*. Springer, 2016.
6. S. Zhao, T. Egami, G. M. Stocks, and Y. Zhang, “Effect of d electrons on defect properties in equiatomic NiCoCr and NiCoFeCr concentrated solid solution alloys,” *Physical Review Materials*, vol. 2, no. 1, 2018.